БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Передовые инженерные школы

БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

Серия основана в 2022 году

Том 9

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Шахнов — главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана

А.И. Власов — зам. главного редактора, канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана

М.Ф. Булатов — д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. научный сотрудник факультета космических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова

В.А. Быков — д-р техн. наук, профессор, президент Нанотехнологического общества России

Дун Гэ — профессор Университета Цинхуа (КНР)

А.Н. Козырев — начальник производства ООО «Резонит»

А.С. Комшин — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

И.Г. Мироненко — д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

С.Б. Нестеров — д-р техн. наук, профессор, президент Российского научно-технического вакуумного общества имени С.А. Векшинского

В.В. Одиноков — заместитель генерального директора по науке Акционерного общества «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»

И.А. Покровский — Генеральный директор Центра современной электроники

Ю.С. Сахаров — д-р техн. наук, профессор Университета «Дубна»

А.Л. Стемпковский — д-р техн. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН

В.Б. Стешенко — канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального конструктора по электронной компонентной базе АО «Российские космические системы»

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки высшего образования 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» в качестве учебного пособия

BAUMANPRESS
Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2024

УДК 361.3.06;621.382
ББК 32.85

В18 Издание доступно в электронном виде по адресу:
press.bmstu.ru/catalog/item/8210/

Издание учебно-методического комплекса по укрупненным группам специальностей и направлений «Информатика и вычислительная техника», «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» подготовлено в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «Системная инженерия ракетно-космической техники» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Авторы: В.Н. Гриднев, Г.Н. Гриднева, В.П. Жалнин, К.В. Селиванов, А.Н. Козырев

Рецензенты:
д-р техн. наук, профессор *Н.К. Юрков*, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета; Заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор *Д.Ю. Муромцев* кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета

В18 **Введение в технологию коммутационных структур электронных средств** : учебное пособие / [В. Н. Гриднев и др.] . — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. — 511, [1] с. : ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 9).

ISBN 978-5-7038-6098-4
ISBN 978-5-7038-6323-7 (т. 9)

Приведены рекомендации по организации и проведению лекций, практических занятий, семинаров, лабораторных работ и деловых игр, перечень учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава и студентов по дисциплине «Технологии коммутационных структур электронных средств».

Соответствует стандартам WorldSkills по компетенции «Производство и инженерные технологии», а также содержанию и уровню подготовки студентов по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Приборостроение». Может представлять интерес для специалистов, занимающихся вопросами приборостроения и созданием цифровых систем.

Электронная версия учебного пособия имеет свободный доступ: приведенные материалы можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные или частичные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

УДК 361.3.06;621.382
ББК 32.85

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6323-7 (т. 9)
ISBN 978-5-7038-6098-4

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024

Предисловие

Учебно-методические комплексы дисциплин по направлению «Приборостроение» разработаны в рамках адаптации образовательных программ высшего образования к требованиям Перечня специальностей и укрупненных направлений подготовки высшего образования — бакалавриата и магистратуры (Приказ Министерства образования и науки РФ от 12 сентября 2013 г. № 1061 «Об утверждении перечней специальностей и направлений подготовки высшего образования» (с изменениями и дополнениями)). Они направлены на изучение и освоение компетенции Future Skills в рамках актуализированных образовательных программ высшего образования в соответствии с запросом цифровой трансформации промышленности.

В настоящее время трудно представить какую-нибудь отрасль промышленности, медицины, сельского хозяйства, оборонной техники, быта и т. д., где бы не использовались приборы различных классов, назначения, функциональной сложности. Это микроэлектронная элементная база, сенсорная техника, приборы для научных исследований, радиоэлектронные и электронно-вычислительные приборы и устройства, системы управления различного уровня, бытовая электроника.

Основная особенность предметной области «Приборостроение» заключается в ее междисциплинарном характере, что требует особых методических приемов и подбора соответствующего научного и учебного материала. Современные образовательные программы должны обеспечивать приобретение студентами профессиональных навыков и компетенций, необходимых для эффективной и самостоятельной работы в приборной индустрии. В связи с этим актуальной задачей является разработка и издание учебно-методических комплексов, которые обеспечат учебно-методическую поддержку подготовки бакалавров и магистров по основным образовательным программам высшего профессионального образования по тематическому направлению «Приборостроение» образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории РФ.

Целью создания данного комплекта является повышение эффективности междисциплинарной подготовки бакалавров и магистров путем распространения передового опыта среди вузов, осуществляющих подготовку по тематическому направлению «Приборостроение», и внедрения компонентов вариативного маршрутного обучения на базе адаптированного, сетевого учебно-методического комплекса дисциплин.

Трансформация подготовки инженерных кадров для технологического суверенитета страны предполагает переход к командной проектной подготовке. Необходимость перемен в обучении вызвана потребностью

в реверс-инжиниринге, разработке и эксплуатации в РФ принципиально новых технологий.

Образование будущего предусматривает переход от рутинного обучения инженеров к подготовке членов инженерных команд, способных конфигурироваться для решения конкретных практических задач. Это может быть обусловлено глубокой интеграцией образования с промышленностью, наукой и органами власти.

Создание комплекта учебно-методических комплексов «Библиотека “Приборостроение”» направлено на развитие образовательных технологий, базирующихся на основе проектного опыта, что позволит выпускникам работать над практическими проектами, спрос на которые создает «технологическая суверенизация» Российской Федерации.

Современное инженерное образование призвано сформировать компетенции для работы на всех уровнях готовности технологий — от исследования до реализации продуктовых решений.

Авторы выражают благодарность рецензентам: научному руководителю кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета Д.Ю. Муромцеву и заведующему кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета Н.К. Юркову, замечания которых позволили улучшить содержание учебно-методического комплекса, а также студентам кафедры ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана П.С. Чеботаевой и Д.Д. Петриченко за помощь в подготовке материалов пособия.

Разработанные учебно-методические пособия обеспечат подготовку по основным образовательным программам высшего профессионального образования по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (уровень бакалавриата) и 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата) образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории РФ.

Сетевые версии учебно-методических комплексов дисциплин на основе Web-версии, соответствующие стандарту SCORM 2004, 3rd edition, размещены на портале Электронной образовательной системы МГТУ им. Н.Э. Баумана (e-learning.bmstu.ru).

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию учебно-методического комплекса, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В.А. Шахнов

Список сокращений

АРМ — автоматизированное рабочее место
АСУ — автоматизированная система управления
БИП — бездефектное изготовление продукции
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ГЖПП — гибко-жесткая печатная плата
ГПП — гибкая печатная плата
ДПП — двусторонняя печатная плата
ЖПМ — жидкая паяльная маска
ИМС — интегральная микросхема
ИС — интегральная схема
ИСО — Международная организация по стандартизации
ИЭТ — иделия электронной техники
КМО — компонент, монтируемый в отверстие
КМП — компонент, монтируемый на поверхности
КМОП — комплементарная структура «металл–оксид–полупроводник»
КП — контактная площадка
КПК — концевой печатный контакт
КС — коммутационные структуры
ЛН — локализатор неисправностей
ЛУТ — лазерно-утюжная технология
МЭМС — микроэлектромеханическая система
МПП — многослойная печатная плата
НЭМС — наноэлектромеханическая система
ОАСУП — отдел автоматизированной системы управления производством
ОН — отдел надежности
ОПОП ВО — основная профессиональная образовательная программа высшего образования
ОПП — односторонняя печатная плата
ОТК — отдел технического контроля
ОТО — отдел технического обучения
ООЭК — особо ответственные элементы конструкции
ОЭР — отдел эксплуатации и ремонта
ОКБ — опытно-конструкторское бюро
ПК — персональный компьютер
ПЛИС — программируемая логическая схема
ПОС — припой «олово–свинец»
ПП — печатная плата
РПП — рельефная печатная плата

РЭА — радиоэлектронная аппаратура
САПР — системы автоматизированного проектирования
СМК — система менеджмента качества
СПФ — сухой пленочный фоторезистор
СТП — стандарт предприятия
СУОС — система управления окружающей средой
ТП — технологический процесс
ТУ — технические условия
ТХМ — тонкослойное химическое меднение
УМК — учебно-методический комплекс
ФУ — функциональный узел
ЭА — электронная аппаратура
ЭВС — электронно-вычислительная система
ЭМ — электронный модуль
ЭРЭ — электрорадиоэлемент
ЭС — электронные средства

Термины и определения

Агрегатирование	—	метод конструирования и эксплуатации изделий, основанный на функциональной и геометрической взаимозаменяемости их основных узлов и агрегатов.
Брак	—	единица продукции с дефектом, т. е. продукция, имеющая хотя бы один дефект.
Вспомогательный переход	—	законченная часть технологической операции, которая не сопровождается изменением формы или состояния заготовки, но необходима для выполнения технологического перехода, например установка заготовки, ее закрепление и т. д.
Вспомогательный ход	—	законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки без изменения формы, размеров, параметров шероховатости или свойств заготовки.
Временный технологический процесс (ТП)	—	технологический процесс, который применяется при изготовлении пробных изделий на имеющемся на предприятии оборудовании.
Групповой ТП	—	технологический процесс на технологически подобные изделия для мелкосерийного многономенклатурного производства.
Деталь	—	изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций, например ось, клемма, рама и т. д.
Дефект	—	каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативно-технической документацией.
Знак соответствия	—	зарегистрированный в установленном порядке знак, который по правилам, установленным в данной системе сертификации, подтверждает соответствие маркированной им продукции установленным требованиям.

Единичное производство — производство, которое характеризуется единичным или малым объемом выпускаемых изделий, процесс изготовления которых не повторяется или повторяется через неопределенные промежутки времени, характеризуется применением универсального, переналаживаемого оборудования и высококвалифицированным персоналом, высокой себестоимостью продукции и низкой производительностью.

Единичный ТП — технологический процесс только на определенное изделие, как правило, используется при массовом производстве.

Изделие — любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии, т. е. продукт конечной стадии производства; изделием может быть деталь, сборочная единица, комплекс и комплект; применительно к электронной аппаратуре под изделием понимается как сама электронная аппаратура, так и все составляющие ее элементы и детали.

Испытание — определение или исследование одной или нескольких характеристик изделия под воздействием совокупности физических, химических, природных или эксплуатационных факторов и условий.

Качество — совокупность свойств и характеристик продукции, которые придают ей способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности (ИСО 9000:2000), обеспечивающие ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Комплекс — два или более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое изделие в комплексе имеет свое назначение, например вычислительный комплекс, радиолокационный комплекс и т. д.

Комплект — два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие собой набор изделий, имеющих единое эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например комплект измерительной аппаратуры, комплект запасных частей и т. д.

Контроль — процесс определения и оценки информации об отклонениях действительных значений от заданных или их совпадении.

Маршрутный ТП — ТП, который определяет порядок (маршрут) следования операций, их вид и наименование, оборудование и оснастку для выполнения операций, трудоемкость выполнения операций и квалификацию работников; для мелкосерийного производства достаточно разработки маршрутной технологии, при этом все параметры разработки заносятся в маршрутные карты.

Маршрутно-операционный ТП — ТП на отдельные наиболее сложные операции маршрутной технологии.

Массовое производство — производство одинаковых изделий в течение длительного периода времени, характерным является закрепление за одним рабочим местом одной операции, требующей невысокой квалификации рабочих или исключения их из процесса и замены роботами и робототехническими комплексами. При этом используется поточный принцип изготовления продукции с применением автоматических линий, цехов и даже автоматических заводов, оборудование и оснастка, как правило, специальное, дорогое и высокопроизводительное. Производство микросхем и электрорадиоэлементов следует отнести к массовому типу производства.

Нормативный документ — документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

Операция — законченная часть ТП, которая выполняется непрерывно на одном рабочем месте.

Операционный ТП — ТП для средне- и крупносерийного или массового производства. При этом каждая операция разрабатывается подробно, окончательно выбирают оборудование и оснастку, выбирают или рассчитывают технологические режимы, операцию дробят на технологические переходы, используют принцип дифференциации и концентрации технологических переходов при выполнении операции, дают эскиз операции с установочными базами и настроечными размерами, рассчитывают операционное время $t_{оп}$ и окончательно устанавливают норму штучного времени $T_{шт}$, данные разработки заносят в операционные карты.

Параметрическая стандартизация — основана на упорядочении объектов стандартизации с помощью составления параметрических рядов характеристик продукции, процессов, классификаторов и т. п.

Переход — законченная часть операции, которая выполняется с использованием одного и того же инструмента при одних и тех же режимах.

Перспективный ТП — ТП для производства изделия по новой технологии или при модернизации старых предприятий.

Прием — совокупность отдельных движений в процессе выполнения работы или подготовки к ней (пуск станка, выключение и т. п.).

Позиция — каждое новое положение заготовки относительно инструментов при неизменном ее закреплении в приспособлении (например, несколько позиций имеет поворотное многопозиционное приспособление).

Правила — документ, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

Проектный ТП — ТП на начальной стадии проектирования, имеющий множество вариантов.

Производственный процесс — совокупность действий рабочих и орудий производства, в результате которых исходные материалы, полуфабрикаты и компоненты превращаются в готовую продукцию (платы, ячейки, блоки и т. п.), соответствующую своему назначению. К основному производственному процессу относят изготовление продукции, предусмотренной заказчиком, к вспомогательному — складирование, транспортировку, ремонт, энерго-, водоснабжение и др.

Проход — часть перехода, заключающаяся в снятии одного слоя материала с обрабатываемой поверхности.

Рабочий ход — законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, параметров шероховатости или свойств заготовки.

Рабочее место — часть производственной площади, оснащенной основным технологическим и вспомогательным оборудованием и средствами, закрепленными за рабочим для выполнения операции.

Рабочий ТП — ТП, выбираемый для реализации на производстве.

Ритм выпуска (производительность) — обратная величина по отношению к такту — количество изделий, выпускаемых в единицу времени.

Ревизия (проверка) — проверка, осуществляемая контролером, которая должна соответствовать содержанию карты контроля.

Регламент — документ, содержащий обязательные правовые нормы и принятый органом власти.

Рекомендации — документ, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

Руководство — лицо или группа работников, осуществляющих направление деятельности и управление организацией на высшем уровне.

Самопроверка (самоконтроль) — персональная проверка и контроль оператором с применением методов, установленных технологической картой на операцию, а также с использованием предусмотренных измерительных средств с соблюдением заданной периодичности проверки.

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с применением сборочных операций (свинчивание, сварка, пайка, склеивание), например ячейка, типовой элемент замены (ТЭЗ), разъем, узел, блок и т. д.

Свойство — объективная способность продукции, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации и потреблении.

Серийное производство — производство, которое характеризуется изготовлением изделий периодически повторяющимися партиями, сериями; в зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное (серийное), крупносерийное производство, выпуск партий — еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный. Для серийного производства характерно использование специализированного и автоматизированного оборудования и оснастки, особенно станков с числовым программным управлением (ЧПУ), в ряде случаев, особенно при крупносерийном производстве, используют специальное и автоматическое оборудование. Для многономенклатурного серийного производства экономически выгодным становится использование гибких производственных систем (ГПС), для которых используют автоматизированную систему технологической подготовки

производства (АСТПП) и автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП). Производство электронной аппаратуры различного назначения имеет серийный характер. В серийном производстве рабочие имеют среднюю и высокую квалификацию, производительность труда выше, чем при единичном производстве.

Симплификация — процесс простого сокращения числа типов или других разновидностей изделий до числа, технически и экономически необходимого для удовлетворения потребностей.

Система — совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.

Система «ДЖИТ» (*just in time* — производство точно в срок) — комплекс управленческих действий, ориентированный на нуль запасов, нуль отказов, нуль дефектов.

Способ (форма, схема) сертификации — определенная совокупность действий, официально принимаемая (устанавливаемая) в качестве доказательства соответствия продукции заданным требованиям (далее — схема сертификации).

Стандарт — нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс правил, норм, требований к объекту стандартизации и утвержденный компетентным органом.

Стандартизация — установление и применение правил в целях упорядочения деятельности в определенных областях на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении функциональных условий и требований техники безопасности.

Стандартный ТП — ТП, обязательный для применения в отрасли, например методики испытания электронно-вычислительной аппаратуры.

Такт выпуска — интервал времени, через который производится выпуск изделий.

Технический контроль — проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Технический регламент — регламент, содержащий технические требования либо непосредственно, либо путем ссылки на стандарты, технические условия или кодекс установившейся практики, либо путем включения в себя содержания этих документов.

Технический уровень продукции — относительная характеристика качества продукции.

Технологический процесс (ТП)	—	часть производственного процесса, непосредственно связанная с превращением предмета труда в готовую продукцию. Технологический процесс подразделяют на операции, а операции — на установы, позиции, технологические переходы, ходы́, приемы.
Технологическая операция	—	законченная часть ТП, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими над одним или несколькими совместно обрабатываемыми или собираемыми изделиями.
Технологический переход (переход)	—	законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.
Типовой ТП	—	ТП на конструктивно подобные изделия, например на изготовление печатных плат.
Унификация	—	действия, направленные на сведение к технически и экономически обоснованному рациональному минимуму неоправданного многообразия различных изделий, деталей, узлов, ТП и документации.
Установы или установка	—	часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки (заготовок) или собираемой сборочной единицы.
Холостой ход	—	то же, что и вспомогательный ход для станков-автоматов.

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Основная цель дисциплины — изучение основных принципов и методов проектирования, изготовления и эксплуатации коммутационных структур в электронных устройствах.

Задачи дисциплины — формирование знаний, навыков и умений по следующим направлениям:

– знание стандартов единой конструкторской документации (ЕСКД) и стандартов единой системы технологической документации (ЕСТД);

– чтение и создание технологической и конструкторской документации в специализированных системах электронного проектирования;

– осуществление сбора и анализа исходных данных для расчета и проектирования деталей, узлов и модулей электронных средств;

– значение общих принципов построения конструкций электронно-вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры;

– знание структуры современных предприятий, функции технических подразделений, задач отдела главного технолога при технологической подготовке производства.

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных ОПОП ВО на основе СУОС по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

В конце каждой лекции приведены тесты для контроля знаний студентов, состоящие из вопросов и трех ответов на них, из которых следует выбрать один правильный.

Методологически дисциплина построена на основе наиболее приемлемого соотношения теоретических и прикладных вопросов с обязательным участием студентов в самостоятельном исследовании в виде практических или лабораторных работ.

Теоретические основы изложены таким образом, чтобы показать общие принципы основных технологических методов, их особенности, достоинства и недостатки. Содержание соответствующих тем разделов направлено на усиление роли фундаментальных знаний в теоретической и профессиональной подготовке будущего инженера, что необходимо для формирования у студента фундаментальных системных знаний и развивает его творческие способности.

1.1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель лекции: ознакомление с учебным курсом, изучение видов коммутационных структур и их конструкторско-технологических особенностей, геометрии и электрических параметров коммутационных структур, их применения в модулях электронной аппаратуры.

1.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУРАХ

Приборостроение — отрасль науки и техники, занимающаяся исследованиями, проектированием и совершенствованием методов разработки, производства и применения интегрированных приборных систем. К разделам приборостроения относятся также высокоточное приборостроение, высокоточное машиностроение и биотехнологии с разрешающей способностью допусков размерных цепей объектов, составляющей десятки единиц нанометров. Коммутационные структуры в свою очередь обеспечивают электрическое соединение для коммутации и передачи сигналов между структурными элементами приборов.

Коммутационные структуры — специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями электронной аппаратуры (ЭА).

Коммутационные структуры (КС) используются на всех уровнях электронных модулей: соединения внутри интегральных микросхем (металлизация; рис. 1.1), соединения между различными изделиями электронной техники (ИЭТ) (печатные платы; рис. 1.2), соединения между блоками ЭА (кабели, шлейфы; рис. 1.3) и др. Они бывают внутри- и межмодульными, внутри- и межъячеечными, внутри- и межблочными и т. п., что обусловливает их конструктивное исполнение.

Коммутационные структуры для ЭА должны обладать следующими свойствами:

- минимальным активным и индуктивным сопротивлением;
- однородным по длине структуры волновым сопротивлением;
- минимальным электрическим полем вокруг линии при протекании по ней электрического тока;
- способностью передавать сигналы в широком диапазоне частот, токов и напряжений.

Удовлетворить всем приведенным требованиям, используя какой-либо один тип КС, не представляется возможным. Поэтому применяются

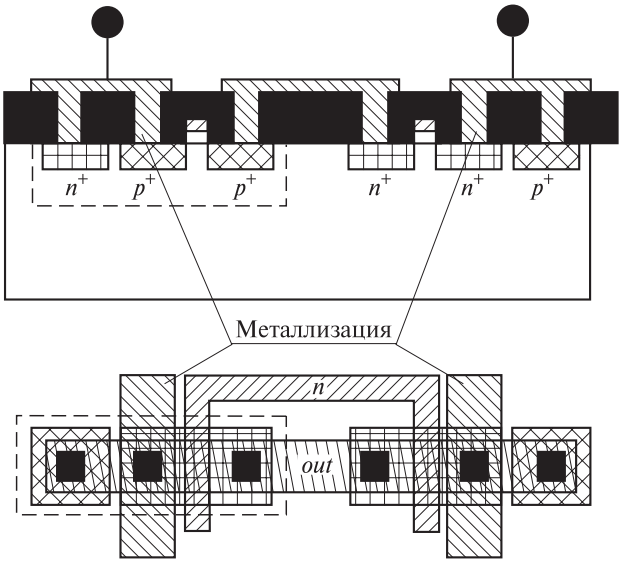


Рис. 1.1. Металлизация в интегральных микросхемах (ИМС)

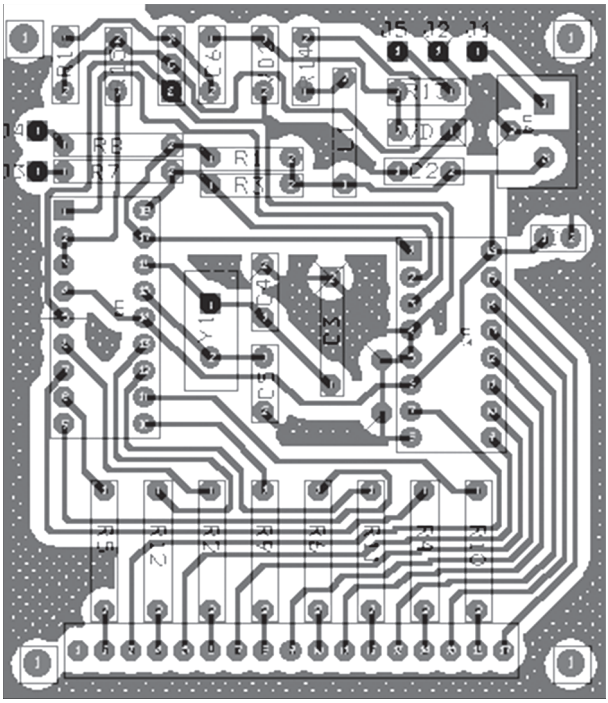
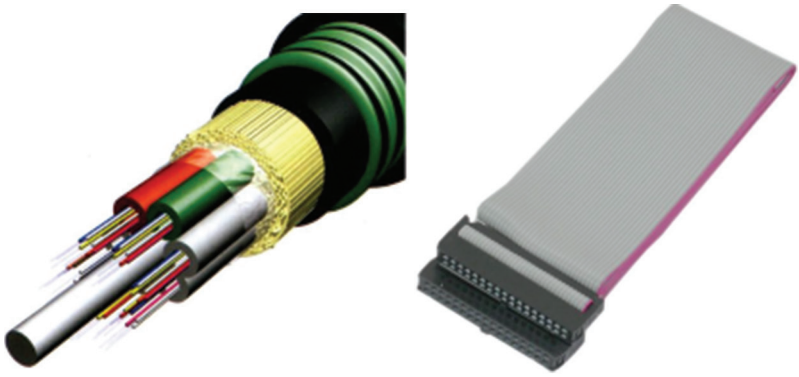


Рис. 1.2. Печатная плата



а *б*

Рис. 1.3. Кабель (*а*) и шлейф (*б*)

разнообразные типы КС в зависимости от функциональных особенностей как самих КС, так и ЭА.

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения соединений — важная и сложная задача, в значительной степени влияющая на качество проектируемой ЭА.

Геометрические параметры некоторых видов КС представлены на рис. 1.4.

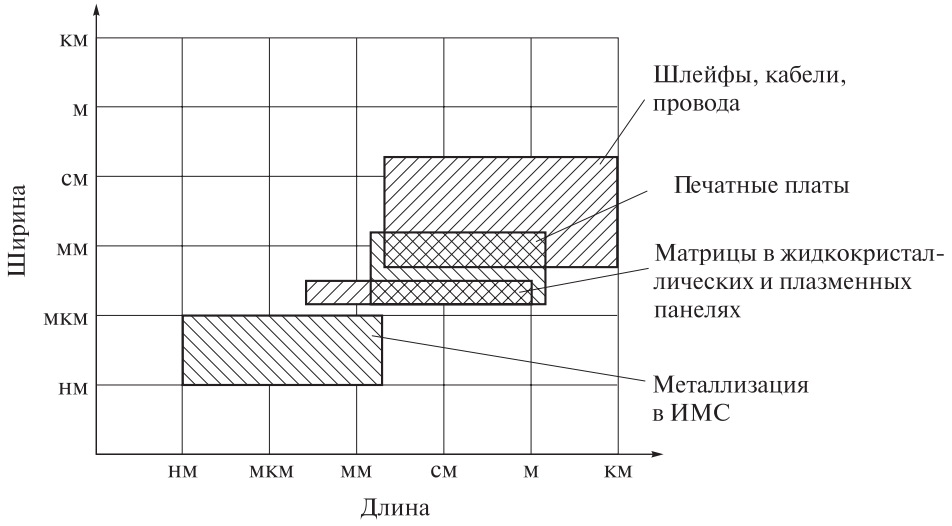


Рис. 1.4. Геометрические параметры некоторых видов коммутационных структур

В настоящее время увеличивающаяся сложность ЭА и ее миниатюризация ведут к смещению геометрических размеров КС в микро- и нанообласти. Это требует постоянного увеличения разрешающей способности технологического оборудования, а также разработки новых видов технологий и модернизации уже существующих.

Несмотря на сложность перехода к наноразмерам, их реализация открывает широкие перспективы в технологии КС. Уменьшение размеров электрических связей приводит к снижению затухания и искажения сигнала. Уменьшение ширины печатных проводников позволяет увеличить плотность монтажа и точность изготовления печатных плат (ПП).

Так, размеры минимального элемента в ИМС уже достигли 7 нм, активно ведется разработка технологии производства ПП с шириной проводников 25 мкм.

В данном учебном пособии рассмотрены основные виды КС, технологии их производства и перспективы использования.

1.1.2. ГЕОМЕТРИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Печатный монтаж — способ монтажа электронных модулей (ЭМ) аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников. Проводники размещены на диэлектрическом основании и образуют проводящий рисунок. Основание конечных размеров с проводящим рисунком и необходимыми отверстиями является ПП (рис. 1.5).

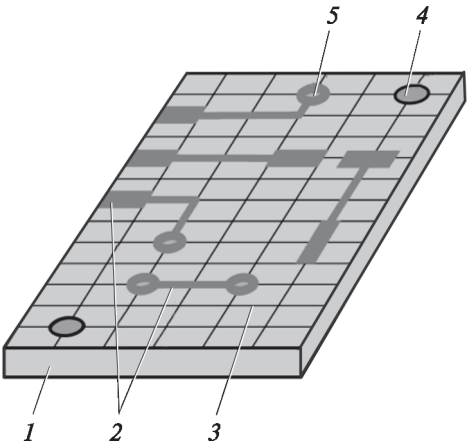


Рис. 1.5. Схема ПП:

1 — основание ПП; *2* — проводящий рисунок; *3* — непроводящий рисунок; *4* — конструкционное отверстие; *5* — металлизированное отверстие

Основной материал проводящего рисунка — медь в виде фольги или осажденного на диэлектрик слоя. В качестве материалов диэлектрического основания ПП применяют стеклотекстолиты различных марок, гетинакс, полиимид, лавсан, фторопласт, керамику.

Проводящий рисунок ПП состоит из различных элементов:
– сигнальных проводников шириной t, видимой в плане (рис. 1.6, *а*);
– шины земли $t_{ш.з}$ и шины питания $t_{ш.п}$ (рис. 1.6, *б*);
– контактных площадок (КП) различных типов (рис. 1.6, *в*);
– экранов и экранных сеток (рис. 1.6, *г*, *д*);
– металлизированных отверстий (рис. 1.6, *е*).

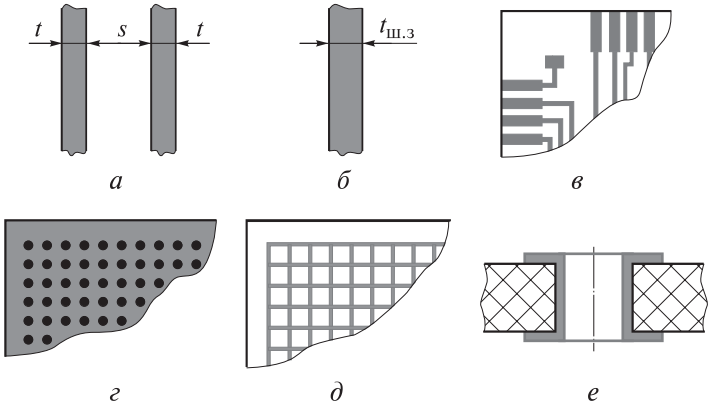


Рис. 1.6. Элементы проводящего рисунка ПП:
а — сигнальные проводники; *б* — шина земли (питания); *в* — концевые печатные контакты (КПК) — печатный разъем; *г* — экран; *д* — экранная сетка; *е* — металлизированное отверстие

Ширина t сигнальных проводников определяется токовой нагрузкой, зависит от прочности сцепления меди с диэлектриками, задается в соответствии с выбранным классом точности ПП. Расстояние s между параллельно проложенными проводниками задают равными или большими их ширины. Параметр t/s — основной для заданного класса точности ПП. Ширина шин земли и питания должна быть больше ширины сигнальных проводников.

Все элементы проводящего рисунка ПП, лежащие в одной плоскости, образуют проводящий слой. Если ПП состоит из нескольких проводящих слоев, то их электрически соединяют с помощью металлизированных отверстий (рис. 1.6, *е*) с осажденным на их стенки слоем меди. Взаимовлияние печатных проводников (индуктивное, емкостное) компенсируют экранами, экранными слоями и взаимно перпендикулярной прокладкой сигнальных цепей на различных слоях ПП.

Контактные площадки проводящего рисунка ПП предназначены для надежного электрического соединения выводов навесных компонентов, монтируемых на ПП (рис. 1.7), с печатным монтажом.

Круглые КП (рис. 1.7, *а*) должны быть соосны с монтажным отверстием под выводы компонентов, монтируемых в отверстие (КМО), а их диаметр $D_{КП}$ должен обеспечивать качество галтелей припоя и целостность КП (b — гарантированный поясок, определяемый классом точности ПП). Значение $D_{КП}$ компенсирует погрешности несоосности отверстия и КП.

Геометрия планарных КП (рис. 1.7, *б*, *в*) определяется геометрией корпусов и выводов ИМС и других компонентов, монтируемых на поверхность основания ПП (КМП). Их размеры должны быть достаточны для образования качественных галтелей припоя по периметру планарного вывода или корпуса КМП.

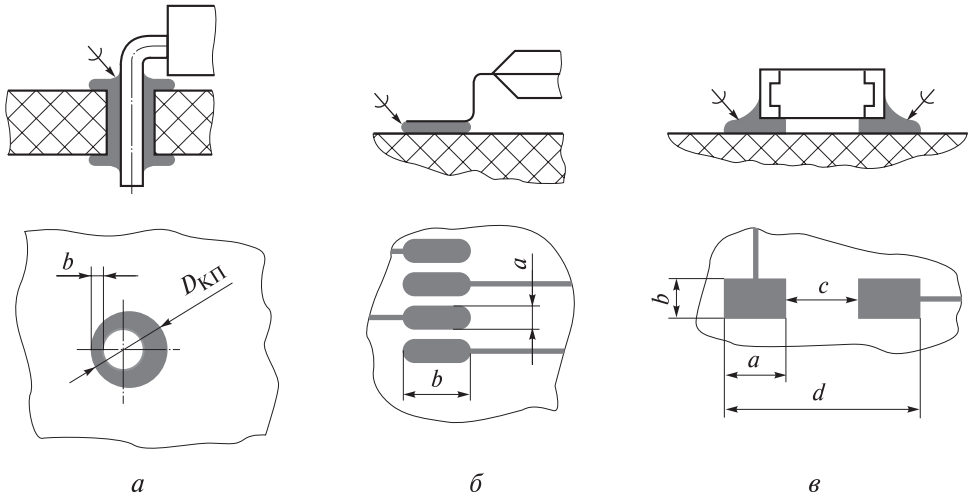


Рис. 1.7. Типы контактных площадок в проводящем рисунке ПП:

а — в зоне монтажных или переходных отверстий; *б* — для соединения планарных выводов ИМС с печатным монтажом; *в* — для соединения компонентов, монтируемых на поверхности основания ПП или монтируемых на поверхность (КМП) с печатным монтажом

По характеру размещения и геометрии КП в зоне проводящего рисунка можно предварительно судить о типе устанавливаемого на ПП компонента (рис. 1.8).

Металлизированные монтажные и переходные отверстия (рис. 1.9) также являются элементом проводящего рисунка, который выполнен в объеме основания путем осаждения меди на стенки отверстий. При этом необходим надежный электрический переход от плоской части проводящего рисунка к его цилиндрической части. Надежность соединения снижается в многослойных ПП (МПП). Отсюда следует необходимость высокого качества стенок просверленных отверстий и подготовки их под осаждение меди.

Координатная сетка (рис. 1.10) определяет положение всех конструктивных элементов ПП:

– прокладки сигнальных проводников и шин по линиям сетки, параллельно или под определенными углами (90°, 60°, 45°, 30°) к сетке;

– размещения отверстий в узлах сетки;

– размещения КП в узлах сетки.

Координатная сетка наносится на рабочем чертеже ПП с указанием шага t_c (2,5; 1,25; 0,625; 0,5). Как правило, шаг сетки согласуют с шагом выводов ИМС. На изготовленной ПП шаг сетки не нанесен.

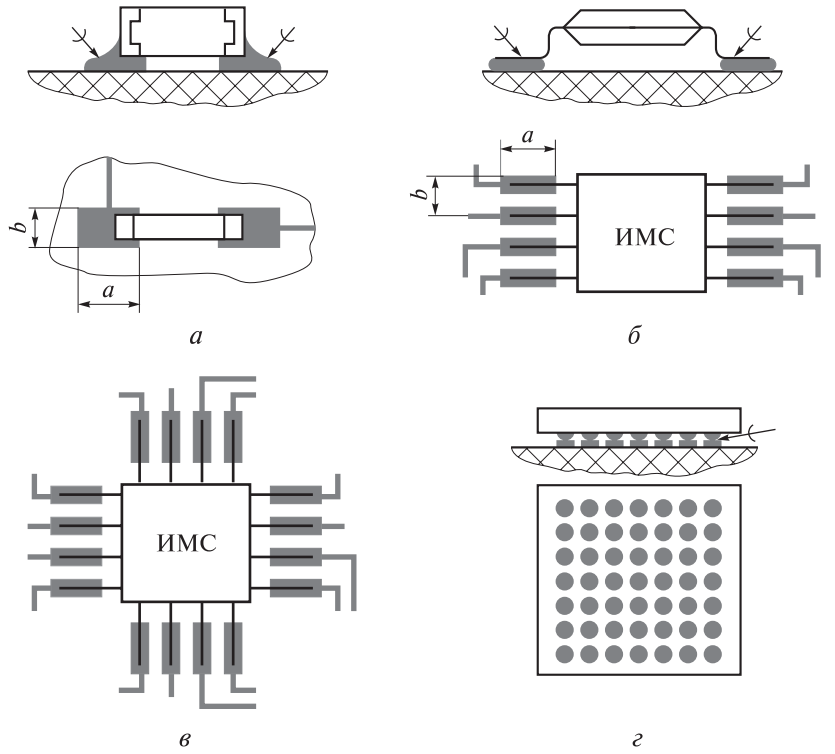


Рис. 1.8. Характер расположения КП проводящего рисунка:
а — для монтажа чип-компонентов; *б* — для монтажа ИМС с двусторонним расположением планарных выводов; *в* — для монтажа ИМС с четырехсторонним расположением планарных выводов; *г* — для монтажа ИМС с матричным расположением шариковых выводов

Технологическое поле (рис. 1.11) является важным конструктивным элементом заготовки ПП. Ширина поля 20...30 мм по периметру заготовки.

В нем размещают два базовых отверстия ($d_{б.о}$) для ориентации заготовки на операции сверления монтажных отверстий, для взаимной ориентации заготовки и фотошаблона с рисунком печатной схемы. В технологическом поле присутствуют реперные знаки для определения точного положения заготовки на некоторых технологических операциях. Технологическое поле является звеном электрической цепи при гальваническом осаждении меди на проводящий рисунок ПП. Предусмотрена удаляемая часть поля (тест-купон) для контроля качества металлизированных отверстий. После окончания ТП поле удаляется.

Исходными материалами для изготовления ПП служат *фольгированные* (рис. 1.12, *а*, *б*) и *нефольгированные* (рис. 1.12, *в*) *диэлектрики*.

Фольгу толщиной $h_ф$ (5; 18; 20; 35; 50 и 70 мкм) приклеивают к диэлектрику на заводе-изготовителе, что гарантирует прочность сцепления проводящего рисунка с основанием ПП при ее изготовлении и эксплуатации

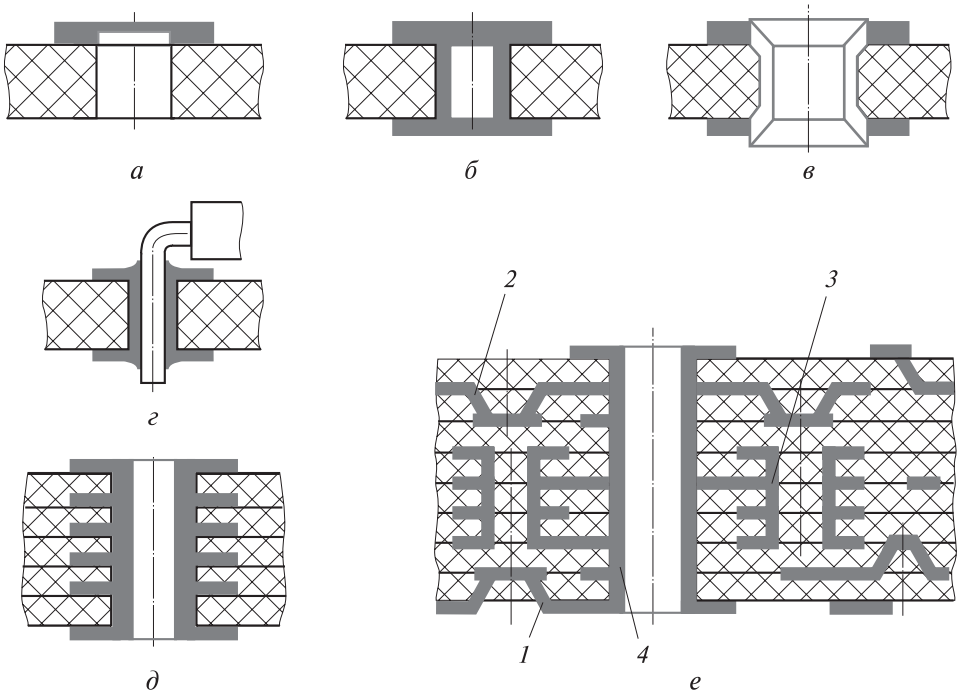


Рис. 1.9. Виды основных отверстий ПП:

а — неметаллизированное монтажное в односторонней ПП (ОПП); *б* — металлизированное переходное сверление в двусторонней ПП (ДПП); *в* — пистонированное переходное в ДПП; *г* — металлизированное монтажное в ДПП; *д* — сквозное, металлизированное в МПП; *е* — отверстия в МПП с высокой плотностью проводящего рисунка; *1* — глухой микропереход; *2* — скрытый глухой микропереход; *3* — внутреннее скрытое переходное отверстие; *4* — сквозное металлизированное отверстие

в составе электронного модуля. Толщина материала заготовки $H_м$ учитывает толщину диэлектрика и фольги.

Если заготовка — нефольгированный диэлектрик (рис. 1.12, *в*), то проводящий рисунок удерживается за счет адгезионного слоя и соответствующей химической подготовки поверхности. Изготовленную ПП покрывают паяльной маской (рис. 1.12, *г*), которая и определяет конечную толщину ПП $H_{ПП}$.

Для удобства монтажа на плате навесных компонентов на монтажную сторону сеткографией наносят маркировку типов изделий электронной техники (ИЭТ), знаки ориентации диодов, транзисторов и ИМС (рис. 1.13).

Разработаны требования к информации, содержащейся на рабочем чертеже ПП. В настоящее время проект ПП представляют в электронном виде, а на предприятии-изготовителе корректируют трассировку и адаптируют конструкцию ПП к действующему производству.

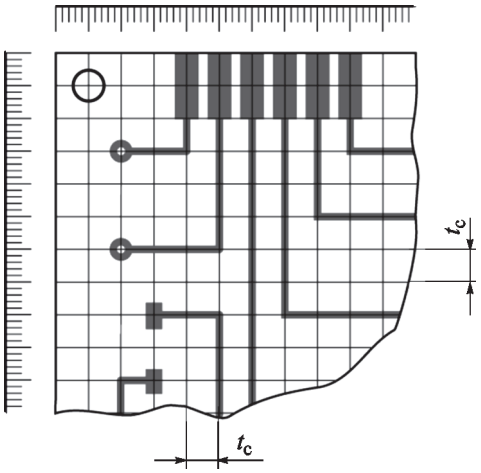


Рис. 1.10. Координатная сетка:
t_c — шаг координатной сетки

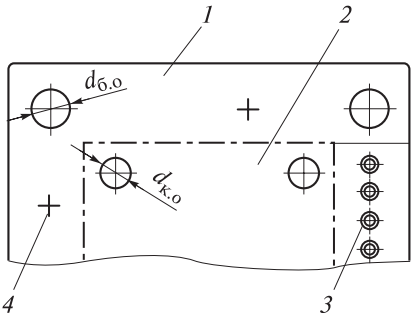


Рис. 1.11. Технологическое поле заготовки ПП:
1 — поле по периметру заготовки; *2* — рабочее поле ПП; *3* — тест-купон; *4* — реперный знак; $d_{к.о}$ — диаметр контактных отверстий; $d_{б.о}$ — диаметр базовых отверстий

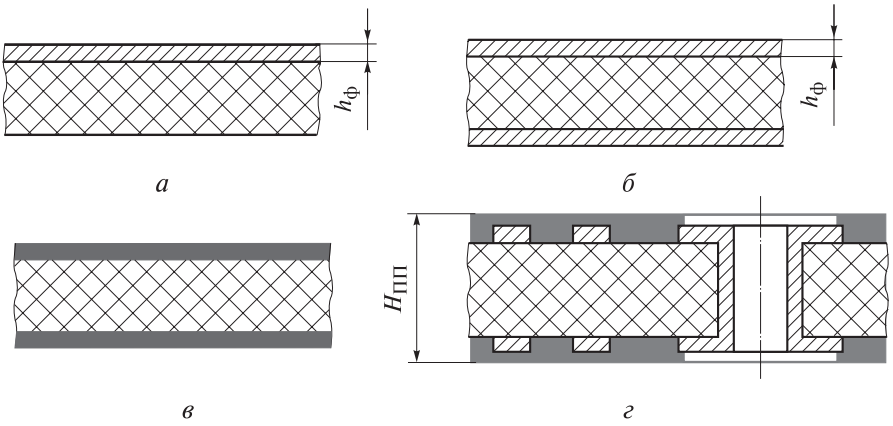


Рис. 1.12. Схемы состояния материалов ПП:
а — односторонне фольгированный диэлектрик; *б* — двусторонне фольгированный диэлектрик; *в* — нефольгированный диэлектрик с адгезионным слоем; *г* — двусторонняя ПП с паяльной маской; $h_ф$ — толщина слоя фольги

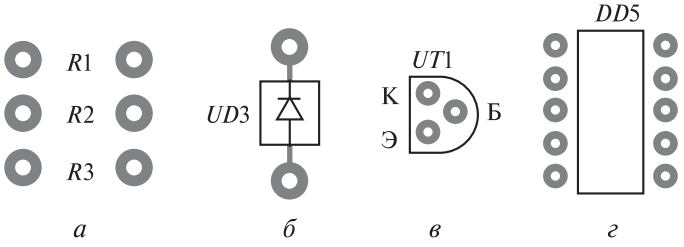


Рис. 1.13. Маркировка мест установки навесных компонентов на монтажной стороне ПП:
а — резисторы; *б* — диоды; *в* — транзисторы; *г* — ИМС; К — коллектор; Э — эмиттер; Б — база

Тесты к лекции 1.1

1. ***Что такое коммутационные структуры?***

а) специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями электронной аппаратуры;

б) способ монтажа электронных модулей аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников;

в) элемент проводящего рисунка, который выполнен в объеме основания путем осаждения меди на стенки отверстий.

2. ***Для чего созданы различные типы коммутационных структур и почему нельзя использовать один тип?***

а) удовлетворить всем требованиям к коммутационным структурам, используя какой-либо один тип, невозможно;

б) вследствие увеличивающейся сложности электронной аппаратуры;

в) потому что коммутационные структуры используются на всех уровнях электронных модулей.

3. ***Что такое печатный монтаж?***

а) способ монтажа электронных модулей аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников;

б) элемент проводящего рисунка, который выполнен в объеме основания путем осаждения меди на стенки отверстий;

в) специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями электронной аппаратуры.

4. ***Для чего используется координатная сетка?***

а) определяет положение всех конструктивных элементов ПП;

б) образует проводящий слой;

в) определяет точное положение заготовки на технологических операциях.

5. ***Что такое металлизированные монтажные и переходные отверстия?***

а) элемент проводящего рисунка, который выполнен в объеме основания путем осаждения меди на стенки отверстий;

б) специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями электронной аппаратуры;

в) способ монтажа электронных модулей аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников.

1.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель лекции: изучение методов и средств автоматизации проектирования коммутационных структур. Обоснование важности задачи формализации исходных данных и их анализа с позиции требований технического задания и наложенных ограничений. Ознакомление с алгоритмом проектирования коммутационных структур. Знакомство с программным обеспечением Altium Designer и его возможностями.

1.2.1. КОНЦЕПЦИЯ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ЦИФРОВОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РАМКАХ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ СРЕДЫ

В условиях все более глубокой микроминиатюризации электронных управляющих систем и с переходом к наноразмерному диапазону отдельных компонентов актуальной становится задача межмодульной и межэлементной коммутации, которая предполагает использование традиционных и новых подходов к реализации КС. Проектирование и создание датчиков на новых физических и технологических принципах, информационно-измерительных и управляющих систем на их основе невозможно без эффективного решения задач по коммутации и сопряжению компонентов различной физической природы.

С позиции системного подхода в условиях современного цифрового инструментального производства и синхронных технологий проектирования требуется реализация комплексного подхода к проектированию узлов и деталей электронных систем с использованием сквозных средств систем автоматизированного проектирования (САПР). В последнее время все большее применение находят параметрические средства автоматизированного проектирования, наилучшим образом ориентированные на реализацию комплексных проектов. Обобщенную концепцию развертывания интегрированного цифрового производства нельзя отделять от классической CALS инфраструктуры предприятия (рис. 1.14) в концепции бережливого производства.

CALS (*Continuous Acquisition and Lifecycle Support*) (см. рис. 1.14) — это концепция, которая обеспечивает непрерывную информационную поддержку и управление всем жизненным циклом изделия — от идеи и разработки до производства, эксплуатации и поддержки. Рассмотрим, какие компоненты используют в своей структуре предприятия, которые придерживаются CALS-технологий в своей инфраструктуре.

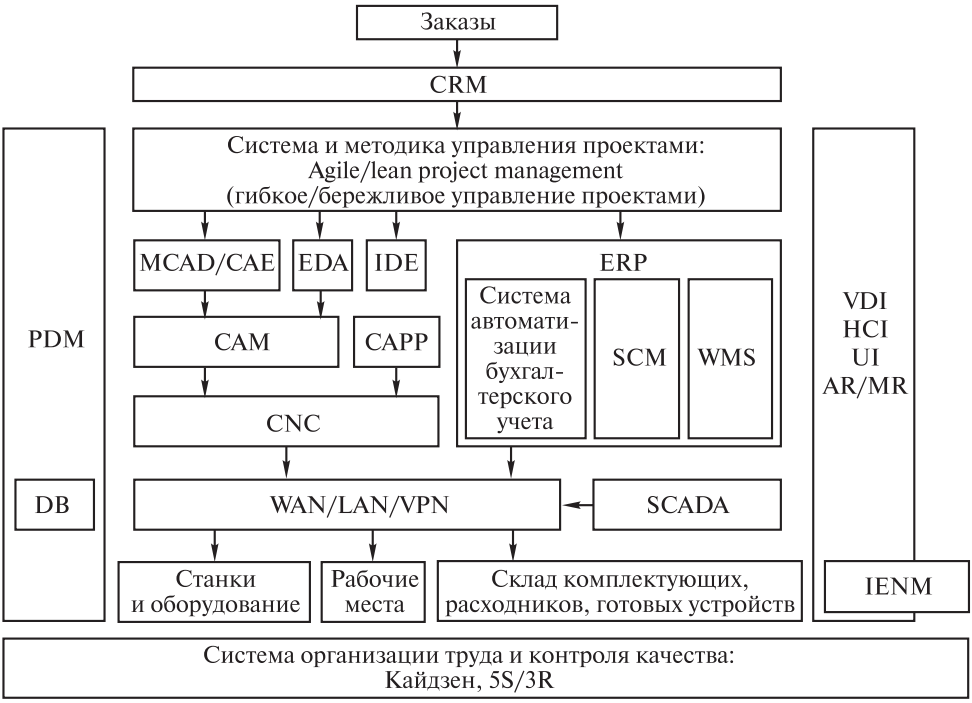


Рис. 1.14. Обобщенная структура компонентов CALS-технологий

Всем циклом взаимодействия предприятия с клиентами занимается система CRM (*Customer Relationship Management*), отвечающая за хранение контактов, предпочтений клиентов и истории взаимодействия с ними, а также за продажи, маркетинг, управление и автоматизацию обслуживания и пр.

Система CALS обеспечивает управление всей информацией об изделии посредством специальной организационно-технической системы PDM (*Product Data Manager*). В рамках этой системы предприятие осуществляет сбор, организацию и хранение информации с помощью баз данных DB (*database*).

Бережливое управление проектами LPM (*Lean Project Manufacturing*) основывается на принципах бережливого производства (*Lean Manufacturing*), которое фокусируется на устранении потерь и оптимизации производственных процессов путем минимизации избыточных операций, ожиданий, переработок. Бережливое производство также акцентирует внимание на непрерывном улучшении и вовлечении сотрудников в процесс оптимизации.

В рамках современного цифрового инструментального производства разработчики используют различные технологии автоматизации, например системы автоматизированного проектирования (*Computer-Aided Design*, *CAD*), в частности, это могут быть САПР для проектирования механических устройств, которые часто называют машиностроительными САПР (*Mechanical Computer-Aided Design*, *MCAD*) или САПР для проектирования электронных устройств

(*Electronic Computer-Aided Design*, *ECAD*). Часто в различные САПР интегрируют системы автоматизации инженерных расчетов (*Computer-Aided Engineering*, *CAE*). Разработчики также используют комплекс программ EDA (*Electronic Design Automation*) для автоматизации проектирования электронных систем. Для разработки, отладки и тестирования программного кода используют среду IDE (*Integrated Development Environment*), совмещающую в себе текстовый редактор, компилятор, отладчик, автоматическую проверку синтаксиса, автодополнение кода и другие инструменты.

Еще одним средством оптимизации производства является процесс CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) использования компьютерных систем и программного обеспечения для автоматизации и управления станками с ЧПУ (*Computer Numerical Control*, *CNC*).

Определить последовательность операций, необходимых для изготовления изделия, а также выбрать оборудование, инструменты и материалы для выполнения этих операций также можно с помощью компьютерной системы. Такие системы получили название CAPP (*Computer-Aided Process Planning*) — компьютерное планирование процессов. Их использование особенно эффективно совместно с системами ERP (*Enterprise Resource Planning*), SCM (*Supply Chain Management*) и WMS (*Warehouse Management System*), которые отвечают соответственно за планирование ресурсов предприятия, управление цепочкой поставок и автоматизацию работы со складом.

Для обеспечения оперативного и эффективного контроля над производственными процессами используют систему надзора и управления SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Система собирает данные о состоянии оборудования, параметрах процессов, уровнях сырья и пр. Эти данные отображаются на графическом интерфейсе оператора, который может просматривать информацию в режиме реального времени и при необходимости управлять оборудованием и процессами удаленно.

Оптимизация всех производственных процессов также выражается в развитии человеко-компьютерного взаимодействия (*Human-computer Interaction*, *HCI*), которое включает в себя разработку пользовательских интерфейсов (*User Interface*, *UI*), виртуальных пользовательских интерфейсов (*Virtual Desktop Infrastructure*, *VDI*), дополненной реальности (*Augmented Reality*, *AR*) и смешанной реальности (*Mixed Reality*, *MR*). Все это ускоряет процессы производства и упрощает эксплуатацию оборудования и конечных изделий. Для оперативного получения информации о техническом обслуживании и эксплуатации оборудования используют интерактивное электронное техническое руководство (*Interactive Electronic Technical Manual*, *IETM*). Его уникальность заключается в том, что оно обеспечивает возможность взаимодействия с оборудованием в режиме реального времени, используя при этом интуитивно понятный графический интерфейс. Например, возможны получение данных о состоянии оборудования, диагностика неисправностей и составление рекомендаций по устранению проблем при использовании одной системы.

В рамках одного предприятия все эти процессы осуществляются с помощью оборудования, помещенного в единую глобальную сеть WAN (*Wide Area*

Network), если филиалы компании территориально рассредоточены и сеть включает в себя большое число компьютеров, или в единую локальную сеть LAN (*Local Area Network*), если все компьютеры этой сети сосредоточены на небольшой территории. Нередко компании также создают виртуальные частные сети VPN (*Virtual Private Network*) внутри других сетей.

Технологии коммутационных структур — основа создания современных сенсоров и информационно-управляющих систем на их основе. Повышение требований к электронным устройствам и задачам, которые они должны выполнять, приводит к ужесточению требований по точности и надежности коммутационных структур, что усложняет производство и меняет технологический процесс в целом, что непосредственно затрагивает методы сквозного проектирования.

В настоящее время многие организации, работающие в сфере производства электроники, используют большое разнообразие программных сред проектирования коммутационных структур, которые отличаются не только сложностью интерфейса, методами документации результатов проектирования, импортированием работ в другие САПР, но и многими другими возможностями. Среда Altium Designer зарекомендовала себя как достойный конкурент другим средам проектирования печатных плат, таких как OrCAD, PCAD и др.

1.2.2. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕГРАЦИИ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ ALTIUM DESIGNER В ЕДИНУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ СИНХРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Altium Designer (AD) — программная среда, позволяющая реализовывать проекты электронных средств на уровне схемы или программного кода с последующей передачей информации проектировщику программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) или коммутационной структуры (например, ПП). Отличительной особенностью программы является проектная структура и сквозная целостность ведения разработки на разных уровнях проектирования. Другими словами, изменения в разработке на уровне платы могут мгновенно быть переданы на уровень ПЛИС или схемы и так же обратно.

В качестве актуального направления разработки данной среды следует отметить интеграцию систем ECAD и MCAD (http://www.solidworks.com, http://www.autodesk.ru). В общем случае разработка ПП возможна в трехмерном виде с двунаправленной передачей информации в механические САПР (рис. 1.15).

В состав программной среды Altium Designer входит весь необходимый инструментарий для разработки, редактирования и отладки проектов электронных схем и ПЛИС. Редактор схем позволяет вводить многоиерархические и многоканальные схемы любой сложности, а также проводить смешанное цифроаналоговое моделирование. Библиотеки программной среды содержат более 90 тыс. готовых компонентов, у многих из которых имеются

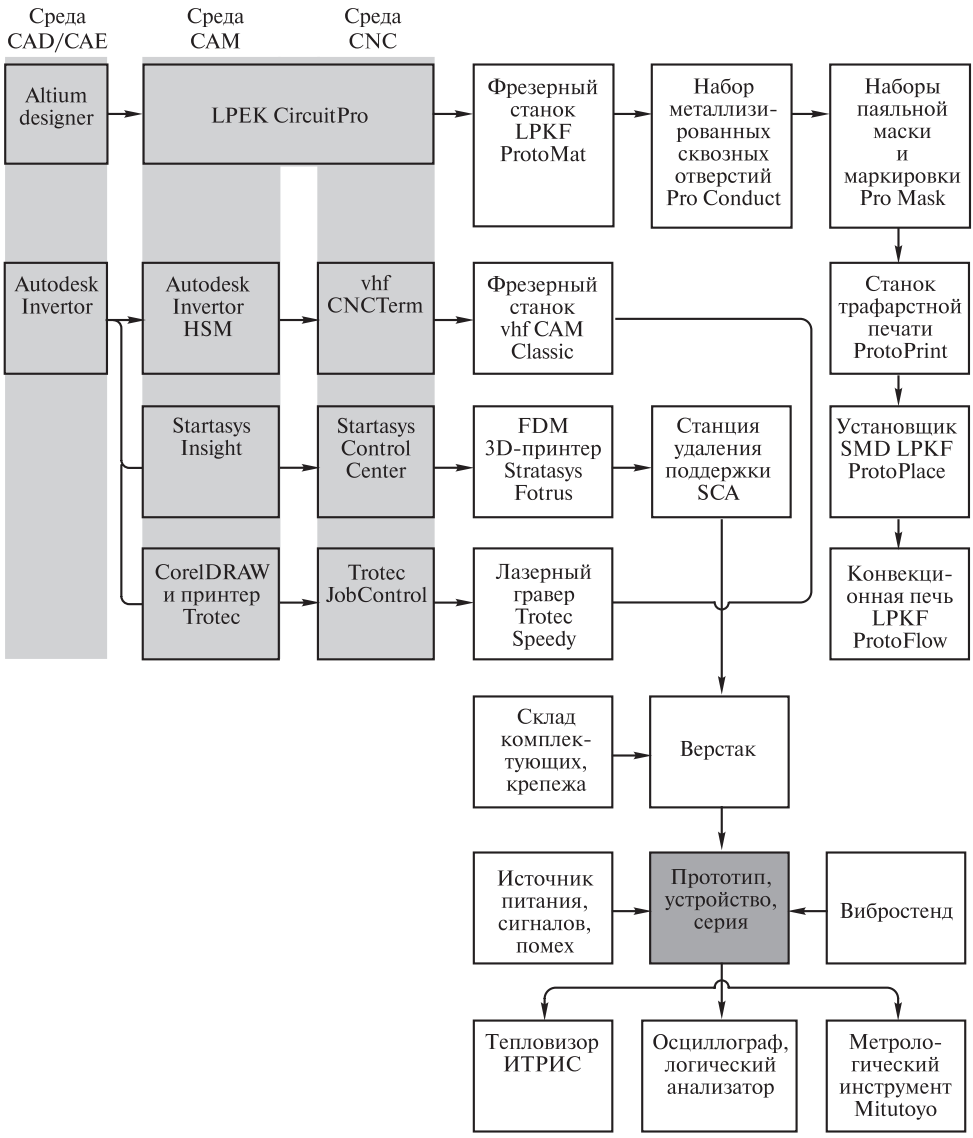


Рис. 1.15. Интеграция среды Altium Designer в инфраструктуру цифрового инструментального производства

модели посадочных мест, SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) и IBIS-модели (*Input/Output Buffer Information Specification*), а также трехмерные модели.

Редактор ПП Altium Designer содержит мощные средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников, которые совместно с интуитивной и полностью визуализированной системой установки правил проектирования максимально упрощают процесс разработки электроники.

Инструменты трассировки учитывают все требования, предъявляемые современными технологиями разработок, например при трассировке дифференциальных пар или высокочастотных участков ПП. В состав САПР входит автоматический трассировщик Situs, в котором используются наиболее прогрессивные алгоритмы трассировки печатных проводников. Принципиальным отличием последней версии Altium Designer является поддержка двунаправленной работы с механическими деталями и моделями компонентов в формате STEP, которые могут быть импортированы/экспортированы из механических САПР.

Работа над всеми частями проекта ведется в единой управляющей оболочке Design Explorer. Это позволяет разработчику контролировать целостность проекта на всех этапах проектирования. Таким образом, изменения, внесенные на любом этапе разработки, автоматически передаются на все связанные стадии проекта.

В дополнение к мощным средствам разработки Altium Designer имеет широкие возможности импорта и экспорта сторонних систем проектирования и поддерживает практически все стандартные форматы выходных файлов (Gerber, ODB++, DXF и т. д.). Полностью поддерживаются все наработки в виде схем, плат и библиотек, разработанные в последних версиях P-CAD.

В состав среды Altium Designer входят пять основных модулей проектирования ПП:

– библиотека 2D-компонентов (Schematic Library);
– библиотека посадочных мест (PCB Library);
– редактор принципиальных схем (Schematic);
– редактор печатных плат (PCB);
– генератор отчетов (Output Job File).

Таким образом, среда Altium Designer как современный продукт проектирования коммутационных структур имеет большое разнообразие возможностей при создании проекта от начального этапа до конечного с формализованным выводом итоговой документации по процессу производства. Далее рассмотрим комплексную методику проектирования сложных электронных КС.

1.2.3. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER

Среда Altium Designer позволяет разрабатывать КС высокой сложности. Отличительной особенностью программного комплекса являются проектная структура и сквозная целостность ведения разработки на разных уровнях проектирования, что обеспечивает удобное управление каждой стадией проектирования. В среде установлен удобный и мощный интеллектуальный графический интерфейс, реализующий все возможности программы. Концептуальная модель среды проектирования Altium Designer и основные задачи, которые она решает, приведена на рис. 1.16.

Рис. 1.16. Концептуальная модель среды Altium Designer

Проанализируем последовательность действий по проектированию КС на примере ПП в виде алгоритма (рис. 1.17).

В алгоритме выделяют следующие основные этапы проектирования:

– анализ и формализация исходных данных;

– настройка среды окружения;

– создание библиотеки посадочных мест;

– создание библиотеки компонентов;

– проектирование схемы устройства в Schematic;

– проектирование проводящего рисунка в PCB-редакторе;

– создание 3D-модели для дальнейшей разработки устройства (если это требуется);

– генерация проекта электронной коммутационной структуры.

При проектировании и оптимизации ПП наиболее важными и ответственными являются этапы анализа технического задания и требований, предъявляемых к ПП. Если готовая ПП не будет соответствовать хотя бы одной норме проектирования, то ее отправляют в отдел брака из-за несоответствия требованиям технического задания. Для предотвращения отбраковки изделия необходимо изучить нормы проектирования и соотнести их с техническим заданием.

Рис. 1.17. Алгоритм проектирования КС

С позиции системного подхода в условиях современного цифрового инструментального производства и синхронных технологий проектирования среда Altium Designer позволяет разрабатывать КС высокой сложности с минимальными затратами на проектирование и дальнейшее сопровождение за счет вариативной проектной структуры и сквозного сопровождения разработки на разных уровнях проектирования.

Тесты к лекции 1.2

1. ***Что такое CALS?***

а) концепция непрерывной информационной поддержки и управления всем жизненным циклом изделия;

б) виртуальная среда для живого общения всех участников проекта;

в) концепция устранения потерь и оптимизации производственных процессов путем минимизации избыточных операций, ожиданий, переработок.

2. ***Возможно ли в САПР с помощью среды Altium Designer проводить смешанное цифроаналоговое моделирование?***

а) да, возможно;

б) возможно только аналоговое моделирование;

в) в Altium Designer нет функционала моделирования.

3. ***Что такое система CAD/CAE?***

а) система автоматизированного проектирования с интегрированной в нее системой автоматизации инженерных расчетов;

б) система автоматизированного проектирования без функционала системы автоматизации инженерных расчетов;

в) система автоматизированного проектирования с интегрированной в нее системой автоматизации 3D-моделирования.

4. ***В чем заключается основное преимущество САПР Altium Designer?***

а) Altium Designer обладает вариативной проектной структурой, функционалом интеграции между CAD-системами и обеспечивает возможность сквозного сопровождения разработки на разных уровнях проектирования;

б) Altium Designer обладает интуитивно понятным интерфейсом;

в) в САПР Altium Designer имеется много тестовых и видеоуроков в свободном доступе, что позволяет быстро освоить основные возможности среды.

5. ***Что происходит с готовой печатной платой, если она не соответствует техническому заданию?***

а) отправляют в отдел брака;

б) вводят изменения в техническое задание;

в) исправляют ошибки, неточности и дефекты вручную.

1.3. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ И ПЛОТНОСТИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Цель лекции: изучение понятий классов точности и плотности проводящего рисунка. Ознакомление с методикой расчета геометрических параметров печатного монтажа с учетом технологических ограничений, в том числе с расчетом узких мест.

1.3.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ТОЧНОСТИ И ПЛОТНОСТИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Конструктор задает класс точности (табл. 1.1) на рабочем чертеже ПП. Принятый на предприятии ТП изготовления ПП должен обеспечить заданный класс точности. В процессе трассировки осуществляется прокладка сигнальных печатных проводников в габаритных размерах рабочего поля ПП при

Таблица 1.1

Параметры ПП согласно классам точности

Наименование элемента печатного монтажа	Обозначение	Номинальное значение параметров для классов точности, мм						
		1	2	3	4	5	6	7
Минимальная ширина сигнального проводника	t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Минимальное расстояние между проводниками или любыми элементами проводящего рисунка	s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Минимальная ширина круглой КП (гарантированный поясок, определяющий ее целостность)	$b_м$	0,3	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015
Отношение наименьшего диаметра металлизированного отверстия $d_{м.о}$ к толщине платы $H_{ПП}$	γ	0,4	0,4	0,33	0,25	0,20	0,187	0,15–0,125
Допуск на ширину элементов проводящего рисунка	δt	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; –0,03	0; –0,02	0; –0,015

наличии всех элементов проводящего рисунка (КП, шины земли и питания, КПК, экраны) и конструкционных элементов ПП (геометрия наружного контура, конструкционные отверстия, пазы и окна, крепежные отверстия).

При прокладывании проводников (рис. 1.18) между соседними круглыми и планарными контактными площадками, между КП и краем ПП, между двумя неметаллизированными отверстиями возникают так называемые узкие места, требующие минимальных значений отношений t/s, соответствующих заданному классу точности. Необходим также расчет узких мест с учетом технологических возможностей выбранного метода изготовления проводящего рисунка.

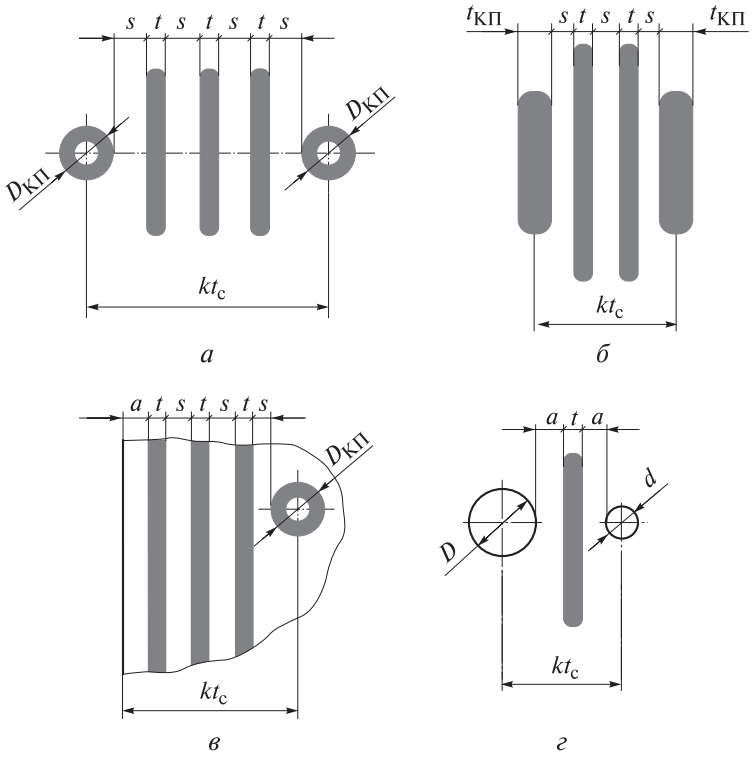


Рис. 1.18. Узкие места проводящего рисунка ПП:
а — между соседними круглыми КП; *б* — планарными КП; *в* — КП и краем ПП; *г* — двумя неметаллизированными отверстиями

Расчет предусматривает определение минимально возможного числа сигнальных проводников, прокладываемых в узком месте при заданном классе точности (t/s), известных размерах КП ($D_{КП}$, $t_{КП}$), известных диаметрах неметаллизированных отверстий (D, d), минимально допустимом расстоянии $a \geq H_{ПП}$ от проводника до края ПП. При этом должно соблюдаться правило размещения конструктивных элементов ПП на расстояниях, кратных шагу координатной сетки: kt_c.

В связи с переходом на технологию поверхностного монтажа, уменьшением геометрических размеров КМП, увеличением числа выводов ИМС и уменьшением шага между выводами (типы корпусов *QFP*, *PLCC*, *SOJ*, *BGA*) в отечественных стандартах можно ожидать более высоких классов точности с параметрами $t/s = 0{,}075$ и 0,05.

Ниже приведены зарубежные уровни точности проводящего рисунка ПП в соответствии с шагом координатной сетки.

Уровень точности	0	1	2	3	4	5
$\frac{t}{s}$, мм	0,2	0,15	0,1	0,075	0,05	0,025
t_c (наружные слои)	1,25	0,625	0,625	0,5	0,5	0,25

В настоящее время применяются следующие типы ПП: односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП) и гибкие (ГПП, ГПК). Печатные платы подразделяют на группы: с межслойными соединениями, обеспечиваемыми в процессе изготовления послойным наращиванием, попарным прессованием, металлизацией сквозных отверстий; без межслойных соединений, определяемых конструкцией ПП в виде открытых КП и выступающих выводов.

В зависимости от механических требований и метода изготовления номинальный размер толщины ПП следует выбирать равным 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0. Толщина МПП определяется числом слоев, прокладок и технологией их склеивания. Суммарная толщина склеивающих прокладок между смежными слоями должна быть не менее двух толщин проводников, располагающихся на внутренних слоях. Предельные отклонения толщины ОПП и ДПП определяются допуском на материал ПП и толщину гальванических покрытий.

Предельные отклонения толщины МПП: 0,15 мм — при толщине ПП до 1 мм включительно; ±0,20 мм — при толщине ПП 1–2 мм; ±0,30 мм — при толщине ПП 2–3 мм.

Центры монтажных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки, шаг которой по ГОСТ 10317–72 равен 0,5 мм. Диаметры монтажных и переходных металлизированных отверстий в зависимости от диаметра вывода навесного элемента выбирают равными 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0 мм. Разность между диаметром вывода и диаметром металлизированного отверстия рекомендуется не более 0,4 мм — для выводов диаметром 0,4; 0,6; 0,8 мм; 0,6 мм — для выводов диаметром 1,0; 1,2; 1,5; 1,7 мм.

Металлизированные отверстия на двусторонних ПП, а также на наружных слоях МПП со стороны фольги должны иметь КП. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у отверстий, электрически связанных с проводниками слоя. Контактные площадки рекомендуется выполнять круглой или прямоугольной формы. Металлизированные отверстия выполняют без зенковки. Неметаллизированные отверстия ОПП выполняют с зенковкой со стороны, обратной расположению рисунка печатного монтажа.

Печатные проводники рекомендуется выполнять одинаковой ширины на всем их протяжении. В узких местах, например между двумя соседними монтажными отверстиями, следует сужать проводники до минимально допустимых значений и прокладывать их перпендикулярно оси, соединяющей центры отверстий. Оси проводников рекомендуется совмещать с линиями координатной сетки. Элементы проводящего рисунка следует располагать от края ПП, неметаллизированного отверстия, паза и других конструктивных элементов на расстоянии, равном номинальной толщине ПП для ПП толщиной менее 1 мм.

Все изготовляемые ПП соответствуют классам точности, определяющим параметры элементов проводящего рисунка. По какому классу точности будет изготовлена ПП, зависит от комплекса технологических возможностей производства.

В качестве материалов ПП применяют фольгированные и нефольгированные диэлектрики, прокладочную стеклоткань и электроизоляционную пленку для защиты ГПК. Нефольгированные диэлектрики, например СТЭФ-1-2ЛК, имеют на поверхности адгезивный слой толщиной 50...100 мкм (эпоксидкаучуковая композиция) для обеспечения достаточной прочности сцепления с основанием осаждаемого слоя химической меди.

Максимальные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий указаны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Максимальные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий

Диаметр отверстия, мм	Наличие металлизации	Предельные отклонения диаметра $d_{м.о}$, мм, для классов точности (1–7)						
		1	2	3	4	5	6	7
До 0,3	Без металлизации	–	–	–	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02
	С металлизацией без оплавления	–	–	–	–0,03; –0,07	0,03; –0,07	–0,02; –0,06	–0,02; –0,06
	С металлизацией с оплавлением	–	–	–	–	–	–	–
От 0,3 до 1,0	Без металлизации	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,05	±0,025	±0,02
	С металлизацией без оплавления	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15	0; –0,10	0; –0,10	0; –0,075	–0,025; –0,075	–0,02; –0,05
	С металлизацией с оплавлением	+0,05; –0,18	+0,05; –0,12	0; –0,13	0; –0,13	0; –0,13	–	–
Свыше 1,0	Без металлизации	±0,15	±0,15	±0,10	±0,10	±0,10	±0,05	±0,03
	С металлизацией без оплавления	+0,10; –0,20	+0,10; –0,20	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15	0; –0,10	–0,02; –0,08
	С металлизацией с оплавлением	+0,10; –0,23	+0,10; –0,23	+0,05; –0,18	+0,05; –0,18	+0,03; –0,18	–	–

Следует отметить, что разработка новых методов изготовления ПП потребовала создания новых диэлектрических материалов. Например, нефольгированный диэлектрик с введенным катализатором и адгезивным слоем применяется для аддитивного метода, нефольгированный диэлектрик, покрываемый светочувствительной эмульсией водных растворов солей металлов, — для метода фотоформирования. Освоен также промышленный выпуск материала слофадит-диэлектрика, покрытого с двух сторон тонким слоем фольги (5 мкм) и предназначенного для изготовления ДПП электрохимическим (полуаддитивным) методом.

1.3.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Геометрические параметры и точность печатного монтажа непосредственно зависят от метода изготовления. При химическом и гальваническом способах осаждения меди происходит увеличение размеров токопроводящих участков за счет разращивания. Если пробельные места защищены краской (толщиной 5...7 мкм), то разращивание будет большим и примерно соизмеримо с толщиной осаждаемого слоя меди. Если пробельные места защищены сухими пленочными фоторезистами (толщиной 40...60 мкм), то разращивание осаждаемой меди будет минимальным.

Травление меди с пробельных мест сопровождается подтравливанием токопроводящих участков на величину, соизмеримую с глубиной травления. Подтравливание уменьшает эффективные размеры проводников и КП. При электрохимическом методе изготовления величина подтравливания меньше, чем при комбинированном позитивном, так как слой меди в пробельных местах имеет толщину 5...8 мкм (получен химико-гальванической металлизацией нефольгированного диэлектрика или применением материала слофадит с толщиной фольги 5 мкм).

При химическом способе осаждения токопроводящего слоя на нефольгированный диэлектрик подтравливание отсутствует, а разращивание зависит от стойкости маски (из краски) в *щелочной среде* ванны меднения (аддитивный метод) и исходной геометрии активированных участков диэлектрика в методе фотоформирования.

Производственный опыт показывает, что комбинированный позитивный метод позволяет получить, например, минимальную ширину проводников до 0,2 мм, электрохимический метод — до 0,1 мм, метод фотоформирования — до 0,05 мм. Следует также учитывать, что при гальваническом осаждении толщина слоя меди в отверстиях меньше, чем на поверхности, а на периферии ПП больше, чем в ее центре. Поэтому принимают, что толщина слоя гальванической меди в отверстиях в центре ПП должна быть не менее 25 мкм.

Методика приведена в ОСТ 4.ГО.010.209 и предназначена для расчета элементов печатного монтажа ОПП и слоев МПП, изготовляемых химическим методом, ДПП, изготовляемых комбинированным позитивным

и электрохимическим методами, МПП, изготовляемых методом металлизации сквозных отверстий.

Методика расчета предусматривает базовый способ изготовления ОПП, ДПП, ГПК и МПП, а также способы А и Б изготовления внутренних слоев МПП при автоматизированном сверлении монтажных и переходных отверстий:

– способ А: отверстия выполняют на фотошаблонах и на заготовках слоев, совмещение их проводят с помощью фиксирующих элементов;

– способ Б: базовые отверстия на слоях выполняют после получения печатного монтажа, относительно перекрестий (элементов рисунка), а совмещение слоев проводят на базовых штырях пресс-формы, перед прессованием слоев в МПП.

Рассчитывают диаметры D КП, ширину проводников t, минимальные расстояния между элементами печатного монтажа и расстояния, необходимые для прокладки n-го числа проводников между другими элементами ПП. В расчетах учитывают условия и технологические факторы различных методов изготовления ПП.

Предельные значения технологических параметров (табл. 1.3) получены в результате анализа производственных данных и экспериментальных исследований точности отдельных операций. Максимальные значения параметров соответствуют применению оборудования и оснастки низкой точности, средние значения — применению оборудования высокой точности. Минимальные значения учитываются для перспективного оборудования и оснастки.

Таблица 1.3

Предельные значения технологических параметров

Параметр	Обозначение	Значение
Толщина предварительно осажденной меди, мм	$h_{п.м}$	0,005–0,008
Толщина наращенной гальванической меди, мм	$h_г$	0,05–0,06
Толщина металлического резиста, мм	$h_р$	0,02
Погрешность расположения отверстия относительно координатной сетки, обусловленная точностью сверлильного станка, мм	$\delta_о$	0,02–0,10
Погрешность базирования плат на сверлильном станке, мм	$\delta_б$	0,01–0,03
Погрешность расположения КП относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_ш$	0,02–0,08
Погрешность расположения проводника относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_{ш\,t}$	0,03–0,06
Погрешность расположения печатных элементов при экспонировании на слое, мм	$\delta_э$	0,01–0,03
Погрешность расположения КП на слое из-за нестабильности его линейных размеров, % толщины	$\delta_м$	0–0,10

Окончание табл. 1.3

Параметр	Обозначение	Значение
Погрешность расположения базовых отверстий на заготовке, мм	$\delta_з$	0,01–0,03
Погрешность положения базовых отверстий в фотошаблоне, мм	$\delta_п$	0,01–0,05
Погрешность положения КП на слое, обусловленная точностью пробивки базовых отверстий, мм	$\delta_{пр}$	0,03–0,05
Погрешность положения контактной площадки, обусловленная точностью изготовления штырей пресс-формы, мм	$\delta_{пф}$	0,02–0,05
Погрешность диаметра отверстия после сверления, мм	Δd	0,01–0,03
Погрешность изготовления окна фотошаблона, мм	$\Delta D_ш$	0,01–0,03
Погрешность изготовления линии на фотошаблоне, мм	$\Delta t_ш$	0,03–0,06
Погрешность диаметра КП фотокопии при экспонировании рисунка, мм	ΔЭ	0,01–0,03

Примечание. δ — погрешность расположения; Δ — погрешность размеров.

В производственных условиях расчет элементов печатного монтажа выполняют по производственно-технологическим показателям предприятия-разработчика. Основные формулы для расчета приведены в табл. 1.4.

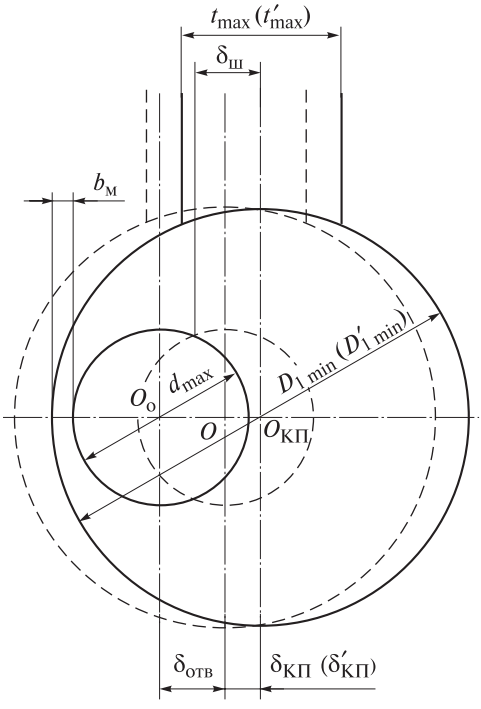


Рис. 1.19. Схема смещения КП и отверстия в ПП

Расчет диаметра КП ведется из условия сохранения целостности КП (отсутствие разрыва) при сверлении ПП. При этом учитываются явления подтравливания и разращивания проводящего слоя, погрешности относительного расположения отверстия и КП (рис. 1.9).

Расчет следует начинать с определения минимального эффективного диаметра КП (см. табл. 1.4):

$$D_{1\min} = 2\left(b_м + \frac{d_{\max}}{2} + \delta_{отв} + \delta_{КП} \right).$$

При расчете минимального эффективного диаметра КП $D_{1\min}$ принимают значение $b_м$ в соответствии с рассматриваемым классом точности ПП (см. табл. 1.1). Максимальный диаметр монтажного отверстия $d_{\max} = d_{св} + \Delta d$, где Δd определяется точностью изготовления сверла и его биением. В свою

Таблица 1.4

Основные формулы для расчета диаметра *D* КП, ширины *t* проводников и соответствующих размеров шаблонов ($D_ш$, $t_ш$) при различных методах изготовления печатного монтажа и с учетом технологических факторов

Обозначение параметров	Химический метод	Комбинированный позитивный метод с получением рисунка		Электрохимический (полуаддитивный) метод с получением рисунка	
		фотохимическим способом	сеткографическим способом	фотохимическим способом	сеткографическим способом
D_{min}	$D_{l\,min} + 1,5h_ф$	$D_{l\,min} + 1,5\left(h_ф + h_{п.м}\right) + h_р$	$D_{l\,min} + 1,5\left(h_ф + h_{п.м}\right) + h_г + h_р$	$D_{l\,min} + 1,5h_{п.м} + h_р$	$D_{l\,min} + 1,5h_{п.м} + h_г + h_р$
t_{min}	$t_{l\,min} + 1,5h_ф$	$t_{l\,min} + 1,5\left(h_ф + h_{п.м}\right) + h_р$	$t_{l\,min} + 1,5\left(h_ф + h_{п.м}\right) + h_г + h_р$	$t_{l\,min} + 1,5h_{п.м} + h_р$	$t_{l\,min} + 1,5h_{п.м} + h_г + h_р$
$D_{ш\,min}$	$D_{min} + \Delta Э$	$D_{min} - h_р$	$D_{min} - \left(h_г + h_р\right)$	$D_{min} - h_р$	$D_{min} - \left(h_г + h_р\right)$
$t_{ш\,min}$	$t_{min} + \Delta Э$	$t_{min} - h_р$	$t_{min} - \left(h_г + h_р\right)$	$t_{min} - h_р$	$t_{min} - \left(h_г + h_р\right)$
$D_{ш\,max}$	$D_{ш\,min} + D_ш$	$D_{ш\,min} + \Delta D_ш$	$D_{ш\,min} + \Delta D_ш$	$D_{ш\,min} + \Delta D_ш$	$D_{ш\,min} + \Delta D_ш$
$t_{ш\,max}$	$t_{ш\,min} + t_ш$	$t_{ш\,min} + \Delta t_ш$	$t_{ш\,min} + \Delta t_ш$	$t_{ш\,min} + \Delta t_ш$	$t_{ш\,min} + \Delta t_ш$
D_{max}	$D_{ш\,max} + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_р + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_г + h_р + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_р + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_г + h_р + \Delta Э$
t_{max}	$t_{ш\,max} + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_р + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_г + h_р + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_р + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_г + h_р + \Delta Э$

очередь, рассчитывают диаметр сверла $d_{св} = d_{м.о} + (0{,}1...0{,}15)$. При этом $d_{м.о}$ выбирают из ряда, рекомендуемого ОСТ и с учетом собираемости со штыревыми выводами электрорадиоэлемента (ЭРЭ) и интегральной схемы. Следует отметить, что коэффициент 0,1...0,15 является усредненным и учитывает минимально допустимую толщину слоя гальванической меди, равного 25 мкм, слой металлорезиста, усадку отверстия после сверления, а также возможный разброс толщины при гальваническом осаждении меди и металлорезиста.

Возможно смещение центра монтажного отверстия $\delta_{отв}$ относительно координатной сетки (см. рис. 1.19) после сверления вследствие неточности сверлильного станка и погрешности базирования платы на станке: $\delta_{отв} = \delta_{о} + \delta_{б}$. Смещение центра КП $\delta_{КП}$ (см. рис. 1.19) зависит от погрешности расположения ее рисунка на шаблоне $\delta_{ш}$, погрешности экспонирования $\delta_{э}$, погрешностей расположения базовых отверстий в фотошаблоне $\delta_{ф}$ и заготовке $\delta_{з}$ ПП:

$$\delta_{КП} = \delta_{ш} + \delta_{э} + \frac{1}{2}(\delta_{ПП} + \delta_{з}).$$

При расчете $\delta_{КП}$ для внутренних слоев МПП, изготовляемых по способу А, в приведенной контактной формуле добавляется член $\delta_{м}$, учитывающий смещение КП на слое вследствие линейной деформации материала. При толщине материала $H_{м}$ = 0,1...0,2 мм$\delta_{м}$ = 0,05 %$H_{м}$; при $H_{м}$ = 0,2...0,25 мм $\delta_{м}$ = 0,03 %$H_{м}$; при $H_{м}$ = 0,5 мм и более $\delta_{м}$ = 0.

При изготовлении слоев МПП по способу Б

$$\delta'_{КП} = \delta_{ш} + \delta_{э} + \delta_{ПП} + \delta_{пр} + \delta_{пф}/2,$$

где $\delta_{пр}$, $\delta_{пф}$ — погрешность изготовления проводников и пресс-формы соответственно.

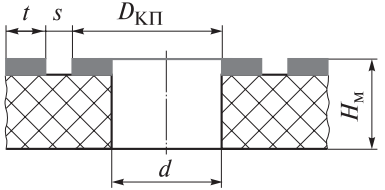
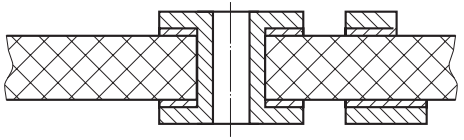
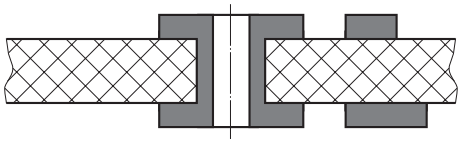
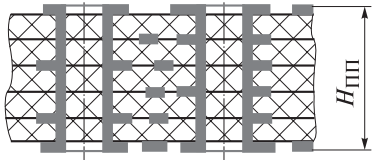
Расчет ширины проводников ведется из условия сохранения достаточной прочности сцепления проводника с диэлектриком, зависящей от адгезионных свойств материала основания и гальваностойкости фольги. Минимальная эффективная ширина проводника t_{1min} определена экспериментально и равна 0,14 мм для ПП классов точности 1–3 и 0,08 мм для классов точности 4 и 5.

При выполнении домашнего задания t_{1min} следует выбирать из табл. 1.1 в соответствии с заданным классом точности ПП.

В зависимости от метода изготовления ПП и, следовательно, толщины слоя меди на поверхности диэлектрика перед его травлением с пробельных мест величина подтравливания будет разной. Коэффициент 1,5 в формулах расчета минимальных размеров диаметров КП и ширины проводников (см. табл. 1.4) отражает особенность струйного направленного травления, обеспечивающего боковое подтравливание несколько меньше, чем значение травления по глубине. В формулах учитывается и разращивание при осаждении гальванической меди и металлорезиста. Если металлорезистом является оплавляемый сплав олово–свинец, то разращивание $h_{р}$ устраняется последующим оплавлением ($h_{р}$ = 0).

Таблица 1.5

Основные значения диаметра металлизированных монтажных отверстий и расстояний между ними при различных конструкциях, методах изготовления и классах точности ПП

Схема конструкции ПП	Обозначение	Класс ПП	Расстояние между монтажными отверстиями, мм	Диаметр металлизированных монтажных отверстий, мм	Способ получения рисунка печатного монтажа
	I	1, 2, 3	1,25–2,5	0,6–0,8	Сеткографический
			3,75–5,0	1,0–1,3	Фотохимический
	II	1, 2, 3, 4	1,25–2,5	0,6–0,8	Сеткографический
			3,75–5,0	1,0–1,3	Фотохимический
	III	1, 2, 3, 4, 5	1,25–2,5	0,6–0,8	Сеткографический
			3,75–5,0	1,0–1,3	Фотохимический
	IV	1, 2, 3, 4, 5	1,25–2,5	0,6–0,8	Сеткографический
			3,75–5,0	1,0–1,3	Фотохимический

Максимальные размеры КП и проводников зависят от точности изготовления фотошаблона и погрешности экспонирования (табл. 1.5). В формулах для расчета D_{max} и t_{max} учитывается разращивание слоя гальванической меди и металлорезиста при наличии на поверхности платы маски из краски (сеткографический способ). Если маска выполнена на основе сухого пленочного фоторезиста, то разращивание отсутствует (или минимально), что учитывается при расчетах.

Зная D_{max} и t_{max}, можно выполнить расчет минимальных расстояний между элементами печатного монтажа, например между проводником и КП:

$$S_{min} = l - \left[\left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{ш}\right) + \left(\frac{t_{max}}{2} + \delta_{ш}\right)\right],$$

где l — расстояние между центрами рассматриваемых элементов;

между двумя КП:

$$S_{min} = l - \left(D_{max} + 2\delta_{ш}\right);$$

между двумя проводниками:

$$S_{min} = l - \left(t_{max} + 2\delta_{ш}\right).$$

Расчет узких мест ведут с точки зрения возможности прокладки n-го числа проводников между элементами печатного монтажа и конструктивными элементами ПП.

Формулы для расчета узких мест следующие:

между двумя КП:

$$l_{min} = \left(\frac{D_{1max} + D_{2max}}{2} + 2\delta_{КП}\right) + \left(t_{min} + 2\delta_{ш}\right)n + S_{min}\left(n-1\right);$$

между двумя неметаллизированными отверстиями:

$$l_{min} = \left(\frac{d_{1max} + d_{2max}}{2} + 2\delta_{отв}\right) + \left(t_{max} + 2\delta_{ш}\right)n + S_{min}\left(n-1\right) + 2a;$$

между КП и неметаллизированным отверстием:

$$l_{min} = \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{КП}\right) + \left(\frac{d_{max}}{2} + \delta_{отв}\right) + \left(t_{max} + 2\delta_{ш}\right)n + S_{min}n + a;$$

между КП и краем ПП:

$$l_{min} = \left(\frac{D_{max}}{2} + \delta_{КП}\right) + \left(t_{max} + 2\delta_{ш}\right)n + S_{min}n + a;$$

между неметаллизированным отверстием и краем ПП:

$$l_{min} = \left(\frac{d_{max}}{2} + \delta_{отв}\right) + \left(t_{max} + 2\delta_{ш}\right)n + S_{min}\left(n-1\right) + 2a.$$

Данные формулы приведены для ДПП и наружных слоев МПП.

Для расчета ОПП и внутренних слоев МПП подставляют значения D_{1max}, D_{2max}, t_{max}, S_{max} и определяют их расчетным путем или выбирают из табл. 1.1.

Значение расстояния *a* от края ПП, выреза, неметаллизированного отверстия до элементов печатного монтажа берут равным номинальной толщине ПП, для ПП толщиной менее 1 мм и ГПК $a \geq 1$ мм.

При выборе класса точности ПП следует обращать внимание на поставленную задачу, область применения изделия, плотность монтажа, тип монтируемых компонентов и на возможности завода-изготовителя. Чем выше класс точности ПП, тем более высоким требованиям должно соответствовать производство.

Печатные платы классов точности 1 и 2 имеют низкую плотность монтажа, наименьшую себестоимость, их производство возможно даже без специализированного оборудования. Как правило, эти классы точности применяются при макетировании, в единичном или мелкосерийном производстве.

Печатные платы класса точности 3 имеют более сложную конструкцию. Для их производства необходимо специализированное оборудование. Для производства ПП класса точности 4 применяют прецизионные установки.

Для изготовления ПП классов точности 5, 6 и 7 необходимо дорогое высокоточное оборудование, специальные материалы, безусадочные фотопленки. Печатные платы класса точности 5 используются в составе бытовых приборов, вычислительной технике, класса точности 6 — в производстве сложной портативной техники, класса точности 7 — для аэрокосмического, медицинского оборудования, а также для оборонной промышленности.

Тесты к лекции 1.3

1. ***Что такое класс точности ПП?***

а) совокупность показателей точности выполнения элементов конструкции ПП (проводников, КП, отверстий и т. д.) и допустимых предельных отклонений, которые определяет ГОСТ Р 53429–2009;

б) характеристика, указывающая на наименьший линейный размер элемента конструкции ПП (проводника, КП, отверстия и т. д.) и его допустимых предельных отклонений, которые определяет ГОСТ Р 53429–2009;

в) характеристика, указывающая на наименьший линейный размер компонента, устанавливаемого на ПП, и его допустимых предельных отклонений, которые определяет ГОСТ Р 53429–2009.

2. ***Узкие места проводящего рисунка ПП встречаются между:***

а) верны оба ответа ниже;

б) соседними крупными КП, планарными КП;

в) КП и краем ПП, двумя неметаллизированными отверстиями.

3. ***Центры монтажных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки, шаг которой по ГОСТ 10317–72 равен:***

а) 0,5 мм;

б) 0,3 мм;

в) 0,7 мм.

4. ***При каком методе изготовления величина подтравливания токопроводящих участков меньше?***

а) электрохимическом;

б) комбинированном позитивном;

в) величина подтравливания токопроводящих участков у обоих методов одинаковая.

5. ***Какая величина обозначена d_{max} в формуле для определения минимального эффективного диаметра КП?***

а) максимальный диаметр монтажного отверстия;

б) максимальный эффективный диаметр КП;

в) максимальный диаметр переходного отверстия.

1.4. ТИПЫ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Цель лекции: изучение типов печатных плат (односторонние, двусторонние и многослойные), многослойных структур с наращиваемыми наружными слоями, материалов, способов получения рисунка коммутационных структур, способов получения проводящего рисунка коммутационных структур, промышленных методов изготовления коммутационных структур.

Некоторые типы ПП и их конструктивно-технологические особенности приведены в табл. 1.6.

Односторонние печатные платы (ОПП) с неметаллизированными монтажными отверстиями применяются для схемотехнически простой аппаратуры и при макетировании электронных устройств.

Они изготавливаются на односторонне фольгированных диэлектриках (типа СФ-1, ГФ-1 и др.), имеют низкую плотность (классы точности 1, 2, см. табл. 1.1) проводящего рисунка и большие диаметры КП $D_{КП}$ в зоне монтажных отверстий. Такие площадки обеспечивают достаточно надежные контактные соединения при пайке штыревых выводов КМО с проводящим рисунком ПП. На монтажной стороне ПП (противоположной стороне с проводящим слоем), как правило, наносят маркировку типов устанавливаемых компонентов и знаки их ориентации.

Основными операциями ТП изготовления ОПП являются: удаление фольги с пробельных мест с образованием проводящего печатного рисунка и сверление монтажных отверстий.

Односторонние печатные платы без монтажных отверстий применяются для коммутации КМП или в качестве внутренних проводящих слоев в составе МПП. Технологический процесс изготовления таких плат упрощается в связи с отсутствием монтажных отверстий, проводящий рисунок может быть выполнен по любому классу точности (см. табл. 1.1).

Двусторонние печатные платы (ДПП) на диэлектрическом основании широко применяются в электронных модулях электронно-вычислительных систем (ЭВС) различного назначения. Проводящий рисунок любых классов точности (см. табл. 1.1) размещают с двух сторон диэлектрического основания. Стороны электрически соединены с помощью металлизированных отверстий, которые могут быть как переходными, так и монтажными. Это обеспечивает возможность монтажа на ПП с двух сторон как КМО, так и КМП, что делает ее универсальной.

Двусторонние печатные платы могут быть изготовлены на двустороннем фольгированном основании (СФ-2, ГФ-2, СТФ-2) путем удаления

фольги с пробельных мест и осаждения меди на стенки отверстий в виде слоя металлизации в объеме основания. Технологический процесс изготовления ДПП является типовым и считается наиболее трудоемким в производстве ПП.

Прецизионные ДПП (класс точности 4 и 5, см. табл. 1.1) могут быть изготовлены и на нефольгированном диэлектрике (типа СТЭК) с осаждением меди на поверхности и в объеме основания. Следует отметить, что ДПП на тонком основании с металлизированными переходными отверстиями могут применяться в составе внутренних слоев МПП с внутренними межслойными переходами.

Двусторонние печатные платы на металлическом основании применяются в ЭВС с большой рассеиваемой мощностью и служат не только для монтажа и коммутации навесных компонентов, но и для отвода выделяемой ими теплоты. Основанием ПП является металлическая пластина (дюраль, медь, сталь), покрытая слоем диэлектрика, на поверхности и в объеме которой выполнен проводящий рисунок. Технологический процесс изготовления этих плат усложняется необходимостью нанесения на металлическое основание слоя диэлектрика (эпоксидный, керамический) с гарантированным покрытием стенок просверленных переходных отверстий. Если переходных отверстий нет, то ТП упрощается.

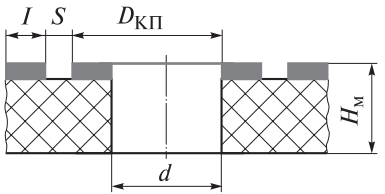
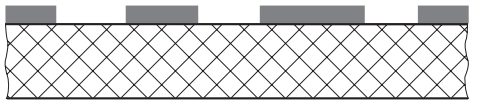
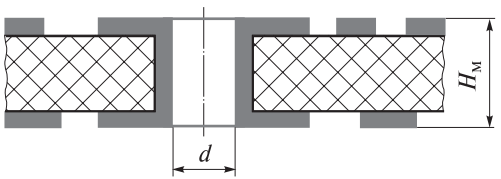
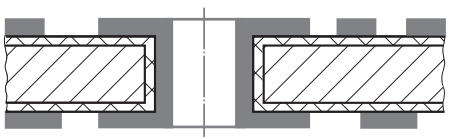
Двусторонние печатные платы на диэлектрическом основании без металлизированных отверстий могут быть выполнены как на фольгированном, так и на нефольгированном диэлектриках. Предназначены для монтажа КМП, но чаще всего при тонком основании (0,10...0,35 мм) могут применяться в составе внутренних слоев МПП.

Гибкие печатные платы (ГПП) всех классов точности изготовляются на тонком (0,1...0,5 мм) и эластичном фольгированном и нефольгированном основании. Они могут быть сконструированы в виде ОПП, ДПП и МПП и установлены с навесным монтажом в модуле ЭВС с ограниченным пространственным объемом. Для ГПП характерны монтажные и переходные отверстия малого диаметра (0,2...0,5 мм), получаемые лазерным сверлением или травлением.

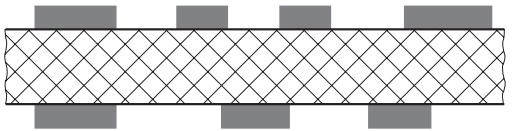
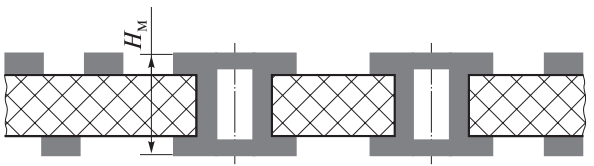
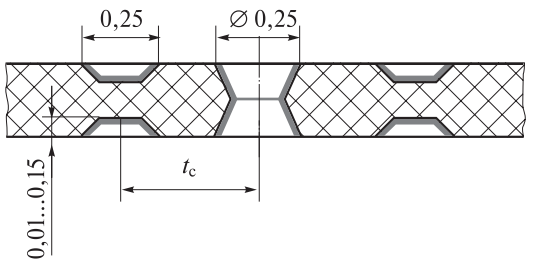
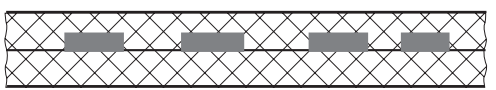
В электронных модулях специальных ЭВС применяются **рельефные печатные платы** (РПП), разработанные отечественными инженерами. Для их изготовления используют нефольгированный диэлектрик (СТАМ, СТЭК), в объеме которого выполнен проводящий рисунок (проводники и металлизированные переходные отверстия). Отверстия не имеют КП, их диаметры соизмеримы с шириной сигнальных проводников (0,25 мм), а образующие стенок — две встречные конические поверхности с общей осью. Это позволяет увеличить плотность печатного монтажа и использовать малый шаг трассировки t_c (0,625; 0,5; 0,4; 0,3 мм). Таким образом, двусторонняя РПП становится эквивалентной 8–12-слойной МПП. Однако при этом усложняется технология образования рельефа (фрезерование, сверление с двух сторон) в объеме нефольгированного основания ($H_{ПП}$ = 0,5...1,5 мм).

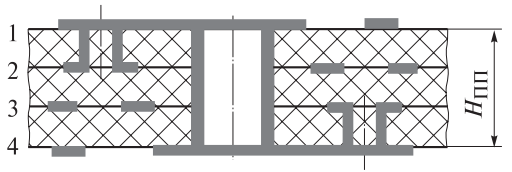
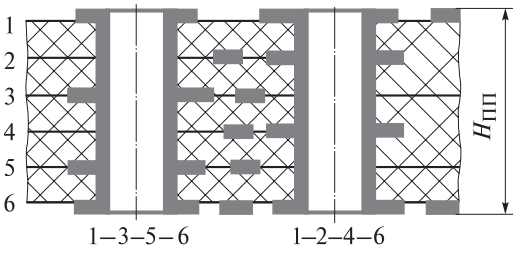
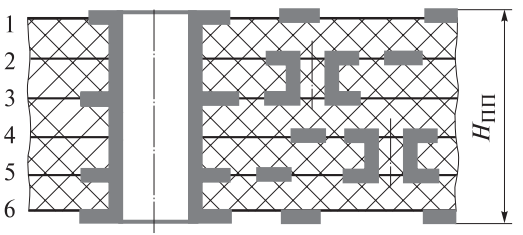
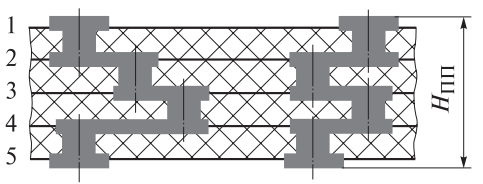
Таблица 1.6

Типы печатных плат

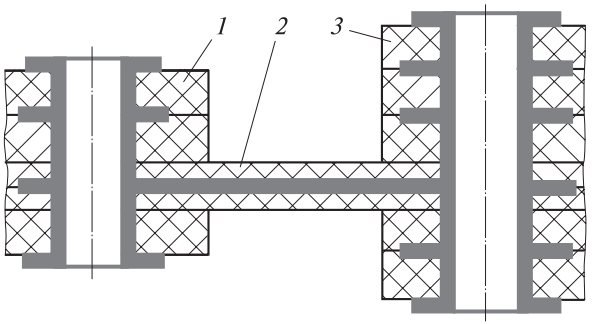
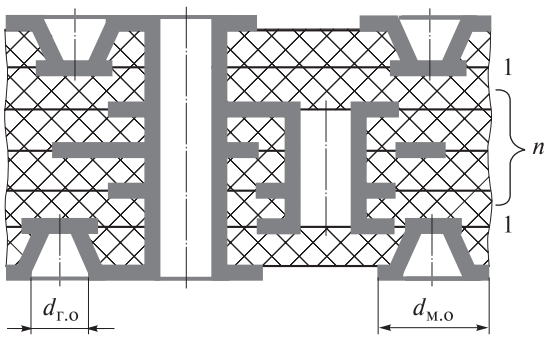
Наименование ПП	Поперечный разрез ПП (эскиз)	Конструктивно-технологические особенности	Толщина исходного материала, мм
ОПП с монтажными отверстиями		Проводящий рисунок выполнен на одной стороне фольгированного основания. Монтажные отверстия (d) не металлизированы	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
ОПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП. При малой толщине основания может быть внутренним слоем МПП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
ДПП на диэлектрическом основании		Проводящий рисунок выполнен на двух сторонах фольгированного основания и электрически соединен металлизированными отверстиями. Предназначена для монтажа КМО и КМП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
ДПП на металлическом основании		Проводящий рисунок выполнен на металлическом основании (Д16), покрытом слоем диэлектрика, основание Д16 обеспечивает теплоотвод и прочность	Зависит от толщины основания

Продолжение табл. 1.6

Наименование ПП	Поперечный разрез ПП (эскиз)	Конструктивно-технологические особенности	Толщина исходного материала, мм
ДПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП, может быть внутренним слоем МПП	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35
Гибкая печатная плата (ГПП)		Выполнена на тонком эластичном фольгированном основании, может быть изогнута с определенным радиусом	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5
Рельефная печатная плата (РПП)		Проводящий рисунок выполнен в объеме нефольгированного диэлектрика с двух сторон основания и электрически связан металлизированными отверстиями	0,8; 1,0; 1,5; 2,0
Гибкий печатный кабель — шлейф (ГПК)		Содержит параллельно проложенные печатные проводники, соединяет относительно подвижные модули ЭВС. Может быть изогнут с радиусом r = 3,0 мм	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3

МПП попарного прессования		Содержит четыре слоя с коммутацией 2–1–4–3 с помощью металлизированных переходных отверстий. Предназначена для монтажа КМП	$H_{ПП}$ определяется толщиной исходных заготовок и клеящей прокладки
МПП с металлизацией сквозных отверстий		Число слоев теоретически не ограничено. Металлизированные отверстия электрически связывают слои (1–3–5–6 и 1–2–4–6), имеющие в зоне отверстия КП	$H_{ПП}$ определяется числом слоев и прокладок
МПП с металлизацией сквозных отверстий и внутренними межслойными переходами		Число слоев теоретически не ограничено. Внутренние переходы (2–3; 4–5) сокращают длину сигнальных цепей	
МПП послойного наращивания на полиимидной или керамической основе		Последовательное создание проводящего рисунка слоев и их коммутация (1–2–3–4–5) с помощью металлизированных переходных отверстий. Высокая плотность проводящего рисунка (не более пяти слоев)	

Окончание табл. 1.6

Наименование ПП	Поперечный разрез ПП (эскиз)	Конструктивно-технологические особенности	Толщина исходного материала, мм
Гибко-жесткая печатная плата (ГЖПП)		В единой конструкции объединены жесткие МПП (*1*, *3*), связанные электрически ГПК (*2*). ГПК опрессован в составе слоев МПП (*1*, *3*)	$H_{ПП}$ определяется числом слоев и прокладок
МПП с наращиваемыми наружными слоями (структуры HDI): структура 1–*n*–1; $d_{г.о}$ — диаметр глухого отверстия; $d_{м.о}$ — диаметр микропереходного отверстия		Основа платы — *n* слоев, полученных методом металлизации сквозных отверстий. Структуры HDI получены наращиванием одного, двух или трех слоев на наружных слоях МПП. Слои имеют высокую плотность проводящего рисунка. Глухие, скрытые и внутренние микропереходы МПП позволяют электрически соединить современные ИМС с большим числом выводов и с малым шагом между ними	$H_{ПП}$ определяется числом слоев

Гибкий печатный кабель (ГПК) представляет собой ленточный печатный провод (шлейф) с однорядным, двурядным и трехрядным расположением параллельно проложенных печатных проводников. Основа ГПК — односторонне фольгированный диэлектрик (ПФ-1) с защитной полиимидной пленкой. С установленными на концах соединителями (разъемами) ГПК коммутирует относительно подвижные блоки ЭВС, при этом требуется проведение электрических расчетов: активного и волнового сопротивления печатных проводников, емкости и индуктивности их единицы длины, времени задержки прохождения сигнала.

Многослойные печатные платы (МПП) представляют собой структуры из проводящих и изолирующих слоев с различными способами электрического соединения проводящих рисунков. В составе проводящих слоев могут быть сигнальные слои, слои земли и питания, экранные слои, а также монтажные слои (наружные) для коммутации навесных компонентов.

Многослойные ПП попарного прессования имеют четыре проводящих слоя, электрически связанных по схеме 2–1–4–3 с помощью переходных металлизированных отверстий. Эта ПП по конструкции и технологии изготовления наименее трудоемка из всех плат семейства МПП. Ее изготовляют из двух двусторонне фольгированных заготовок (СФ-2) с получением проводящего рисунка вначале на внутренних слоях 2 и 3, а после их склеивания (прессования) — на наружных слоях 1 и 4 с одновременной металлизацией сквозных отверстий.

Характерными внешними признаками МПП попарного прессования являются большое число переходных глухих отверстий по схемам 2–1 и 3–4, заполняемых эпоксидной смолой при прессовании и малое число (20–30) сквозных отверстий по схеме 1–4. Кроме того, по сравнению с ДПП значительно возрастает число зон перехода от слоя металлизации отверстий к фольге КП. Возможен также разрыв контактных переходов глухих отверстий под действием тангенциальных сил от перемещения смолы, что приводит к меньшей электрической надежности МПП попарного прессования по сравнению с ДПП на диэлектрическом основании. Данная МПП не является универсальной и предназначена для монтажа КМП и ИМС с планарными выводами.

Многослойная ПП с металлизацией сквозных отверстий является основным несущим элементом электронных модулей современных ЭВС, обеспечивает высокую плотность печатного и навесного монтажа, служит для навесного монтажа как КМП, так и КМО. В МПП чередуются проводящие и диэлектрические слои, в классическом варианте конструкции слои электрически связаны последовательно и в том случае, если в зоне металлизированного отверстия предусмотрена КП, связывающая металлизацию с проводящим рисунком слоя.

В структуре МПП объединены сигнальные слои с ортогональным расположением проводников, слои земли и питания, экраны и экранные сетки, наружные монтажные слои. Оптимальное число слоев — 6–12, хотя теоретически возможно и большее их число.

В **МПП с внутренними межслойными переходами** ближайшие слои могут быть электрически соединены внутренними скрытыми металлизированными переходными отверстиями. В такой конструкции сокращается длина сигнальных цепей и уменьшается влияние индуктивных и емкостных наводок.

Исходными материалами рассматриваемых МПП являются односторонне фольгированные (ФТС-1, FR4-1) и двусторонне фольгированные (ФТС-2, FR4-2) диэлектрики, а также склеивающие диэлектрические прокладки (препрег). Вначале проводящий рисунок получают на внутренних слоях, а после прессования (склеивания) слоев — металлизированные сквозные отверстия и проводящий рисунок наружных слоев.

В производстве МПП с металлизацией сквозных отверстий возникают проблемы: совмещение заготовок слоев перед операцией прессования (КП в зоне каждого сквозного отверстия должны быть сосны); минимизация коробления слоев (возможно смещение контактных площадок) в процессе их прессования под действием давления и температуры.

Первая проблема решается применением разработанных схем, оснастки и технологией взаимной ориентации слоев. Решение второй проблемы требует применения в прессуемом пакете только односторонне или только двусторонне фольгированных заготовок, четного числа слоев, симметрии поперечного сечения МПП и равномерности распределения меди внутри каждого слоя. Это также обеспечивает применение в качестве наружного слоя чистой фольги, устанавливаемой в пакете перед прессованием на прокладку из препрега.

Современная практика производства МПП показывает, что толщина медной фольги внутренних слоев ($h_ф$ = 35 мкм) должна быть больше, чем наружных ($h_ф$ = 9; 18 мкм). Толстая фольга имеет большую площадь торцевого контакта со слоем металлизации отверстий.

Несмотря на указанные конструкторско-технологические решения, электрические соединения слоев МПП с металлизацией сквозных отверстий менее надежны, чем ДПП и МПП попарного прессования.

В **МПП послойного наращивания** проводящие слои соединены последовательно с помощью сплошь заполненных медью металлизированных отверстий. Фольгу первого слоя соединяют (склеивают) с нефольгированным перфорированным диэлектриком, гальванически наращивают медь в отверстиях и на противоположной стороне диэлектрика получают проводящий рисунок второго слоя. Далее все операции повторяют. Проводящий рисунок на первом слое выполняют на заключительном этапе изготовления МПП, так как фольга обеспечивает электрическую связь слоев на гальванических операциях. Надежность электрического соединения слоев МПП наивысшая по сравнению с другими. Однако число слоев ограничено возрастающей трудоемкостью изготовления МПП и многократно повторяющимися технологическими воздействиями на исходные материалы (химико-гальванические операции, склеивание слоев, травление меди, химико-механическая подготовка поверхностей).

Гибко-жесткая печатная плата (ГЖПП) состоит из двух жестких участков в виде МПП и гибкого участка (шлейфа), электрически их соединяющего. Концы шлейфа опрессованы в структуре МПП и электрически связаны с проводящим рисунком плат с помощью металлизированных отверстий. Навесной монтаж выполняется на жестких участках ГЖПП, а шлейф изготовлен на фольгированном полиимиде с защитой проводников диэлектрической пленкой. Шлейф позволяет расположить жесткие участки на разных уровнях и обеспечить им относительную подвижность.

Многослойные ПП с наращиваемыми наружными слоями с высокой плотностью проводящего рисунка на одном, двух или трех верхних слоях структуры *HDI* (*High Density Interconnections*) находят все большее применение. Это связано с дальнейшей миниатюризацией ЭМ ЭВС, уменьшением размеров чип-КМП, применением ИМС с шагом менее 0,625 мм, увеличением числа выводов ИМС и их четырехсторонним расположением (типоразмеры *QFP*, *LQFP*), применением ИМС с матричными шариковыми выводами (*BGA*, *CSP*).

В качестве основы (сердцевины) таких МПП применяются ДПП или МПП с металлизацией сквозных отверстий, на внешние поверхности которых наращивается жидкое покрытие или напрессовываются один (1–*n*–1) или два (2–*n*–2) слоя с созданием высокой плотности проводящего рисунка ($t/s \le 0{,}100$), с глухими и скрытыми металлизированными микропереходами (0,12; 0,10; 0,09 мм). В качестве материалов наращиваемых слоев применяются фоточувствительные (фотопроявляемые) диэлектрики на основе эпоксидных смол, фольгированный и нефольгированный полиимиды. Переходные отверстия указанных диаметров получают лазерным сверлением или травлением диэлектрика.

Тесты к лекции 1.4

1. ***Односторонние печатные платы (ОПП) с неметаллизированными монтажными отверстиями применяются для:***

а) схемотехнически простой аппаратуры и при макетировании электронных устройств;

б) схемотехнически сложной аппаратуры;

в) при макетировании электронных устройств.

2. ***Технологический процесс изготовления какого из типов ПП является типовым и считается наиболее трудоемким в производстве ПП?***

а) двусторонние печатные платы (ДПП);

б) односторонние печатные платы (ОПП);

в) гибкие печатные платы (ГПП).

3. ***Отметьте ответ, подходящий под описание: представляет собой ленточный печатный провод (шлейф) с однорядным, двурядным и трехрядным расположением параллельно проложенных печатных проводников:***

а) гибкий печатный кабель (ГПК);

б) МПП попарного прессования;

в) гибкая ПП (ГПП).

4. ***Чем ограничено число слоев МПП?***

а) возрастающей трудоемкостью изготовления МПП и многократно повторяющимися технологическими воздействиями на исходные материалы;

б) возрастающей трудоемкостью изготовления МПП;

в) число слоев МПП ничем не ограничено.

5. ***Из чего состоит гибко-жесткая печатная плата (ГЖПП)?***

а) из двух жестких участков в виде МПП и гибкого участка (шлейфа), электрически их соединяющего;

б) из двух жестких участков в виде МПП;

в) из двух жестких участков в виде ДПП и гибкого участка (шлейфа), электрически их соединяющего.

1.5. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Цель лекции: рассмотрение способов получения рисунка печатной платы с указанием сущности способа, основных этапов процесса, используемых в процессе материалов, инструментов и установок, а также получаемой точности воспроизведения рисунка.

1.5.1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Большинство промышленных методов изготовления ПП включают два основных этапа: получение рисунка схемы и придание ему проводящих свойств (проводящий рисунок). Зная способы получения рисунка и проводящего рисунка, их разрешающую способность, уровень механизации, можно выбрать один из известных методов изготовления ПП или синтезировать новый метод для заданного класса точности ПП и объема выпуска. Системный подход к анализу способов получения рисунка и проводящего рисунка ПП для дальнейшего синтеза их в том или ином методе изготовления ПП представлен на рис. 1.20. Рассмотрим способы получения рисунка ПП.

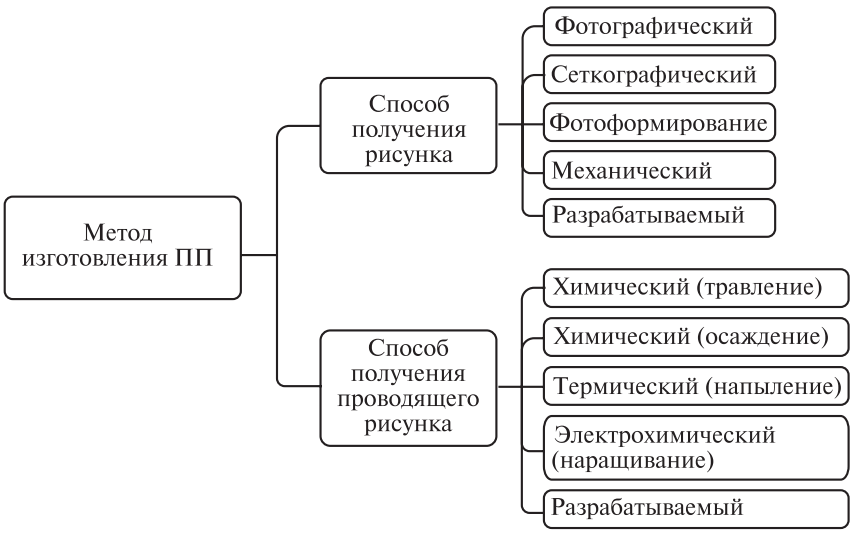


Рис. 1.20. Системный подход к анализу способов получения рисунка и проводящего рисунка ПП

Схемы основных способов представлены на рис. 1.21.

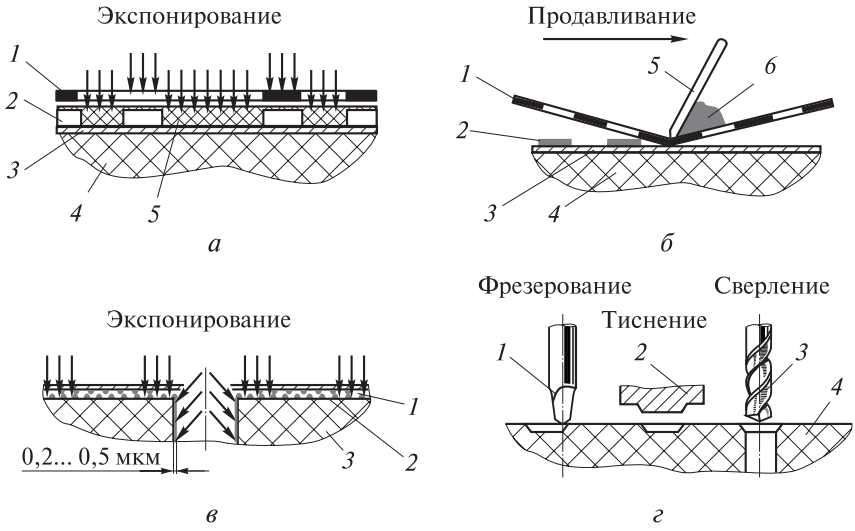


Рис. 1.21. Схемы способов получения рисунка:

а — фотографический способ (*1* — фотошаблон; *2* — фоторезист; *3* — медная фольга; *4* — основание ПП; *5* — маска (экспонированне участки фоторезиста)); *б* — сеткографический способ (*1* — сетчатый трафарет; *2* — маска из краски; *3* — медная фольга; *4* — основание ПП; *5* — ракель; *6* — запас краски); *в* — способ фотоформирования (*1* — водный раствор солей металлов; *2* — тонкий (0,2...0,5 мкм) проводящий рисунок; *3* — основание ПП — нефольгированный диэлектрик); *г* — механический способ (*1* — фреза; *2* — пуансон; *3* — сверло; *4* — основание ПП — нефольгированный диэлектрик)

Материалом, на котором формируется ПП, чаще всего является фольгированный стеклотекстолит (рис. 1.22). Фольгированный стеклотекстолит представляет собой слоистый прессованный материал, изготовленный на основе ткани из стеклянного волокна, пропитанной термореактивным связующим, и покрытый с одной или двух сторон слоем меди толщиной 35 или 18 мкм.

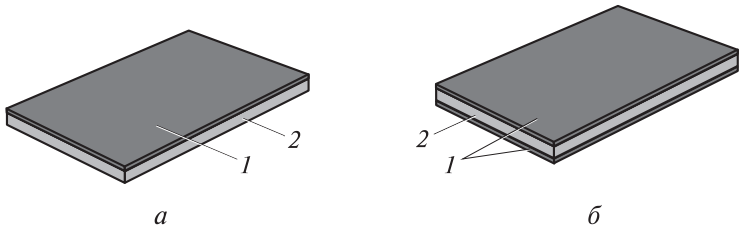


Рис. 1.22. Виды стеклотекстолита:

односторонний текстолит (*а*) и двусторонний тестолит (*б*);
1 — металлическая фольга; *2* — стеклотекстолит

1.5.2. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (рис. 1.21, *а*) — перенос изображения печатной схемы с инструмента — фотошаблона — на заготовку ПП, поверхность которой покрыта светочувствительным слоем фоторезиста. Экспонирование осуществляется методом контактной печати, т. е. фотошаблон без зазора совмещен с заготовкой ПП (обрезанный под размер и обезжиренный фольгированный стеклотекстолит). Заготовку и фотошаблон ориентируют относительно друг друга с помощью базовых отверстий и штырей приспособления. В этом случае с фотошаблона на заготовку переносится изображение реперных знаков, относительно которых на заготовке получают пробивкой или сверлением базовые отверстия для использования их на последующих операциях, например при сверлении монтажных отверстий. Засвеченные участки фоторезиста проявляют и задубливают. На поверхности заготовки ПП образуется позитивная маска при использовании негативного фотошаблона и наоборот. Точность воспроизведения рисунка ±0,03 мм определяется точностью фотошаблона $\delta = \pm 0{,}005...\pm 001$ мм и погрешностями при экспонировании (дифракция) и задубливании (размытие границ) изображения. В качестве светочувствительного слоя используют сухой пленочный фоторезист (СПФ) толщиной 20, 40 и 60 мкм, наносимый механически на тщательно подготовленную (промывка, травление) поверхность заготовки.

Фоторезист является светочувствительным материалом, применяемым в планарно-эпитаксиальной технологии и технологии ПП для формирования рельефного покрытия заданной конфигурации и защиты нижележащей поверхности от воздействия технологических сред в процессе изготовления платы. Для того чтобы фоторезист выполнил защитную функцию, необходимо обеспечить качественную адгезию, т. е. надежное сцепление поверхностных слоев фоторезиста и меди между собой. Для этого в первую очередь надо тщательно зачистить, промыть, обезжирить и просушить поверхность заготовки из фольгированного стеклотекстолита.

Особенность этих материалов заключается в том, что при воздействии светового потока с определенной длиной волны в слое фоторезиста начинают проходить химические реакции для получения прочного нерастворимого материала или, наоборот, разрушения связей между молекулярными группами и растворение полимера. По реакции на воздействие светового излучения фоторезисты делятся на негативные и позитивные.

Негативные фоторезисты (рис. 1.23) под действием света (в процессе экспонирования) образуют нерастворимые соединения; позитивные фоторезисты (рис. 1.24) при обработке светом образуют растворимые соединения.

Следовательно, при проявке (экспонировании) засвеченный позитивный фоторезист смывается, а негативный оставляет маску засвеченного проводящего рисунка.

По способу нанесения на поверхность фоторезисты подразделяют на жидкие и сухие. Жидкий фоторезист наносится с помощью центрифуги или

выпускается в аэрозольной упаковке. Сухой пленочный фоторезист представляет собой полимерную пленку, защищенную с двух сторон защитными светонепроницаемыми пленками.

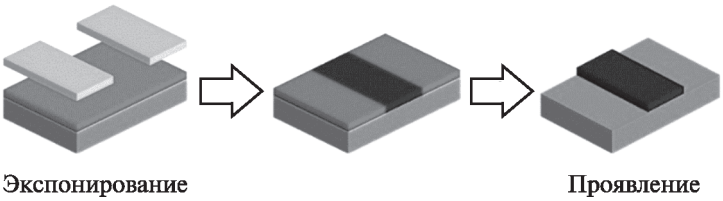


Рис. 1.23. Пример обработки негативного фоторезиста

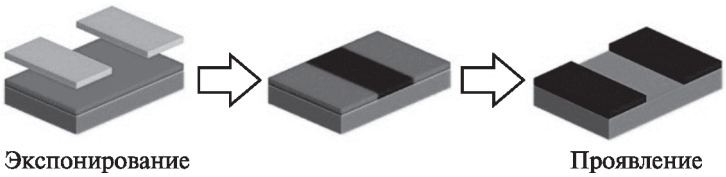


Рис. 1.24. Пример обработки позитивного фоторезиста

С помощью фотографического способа в лабораторных условиях можно получить рисунок класса точности 3. В условиях специализированного производства этот способ обеспечивает высокие точность и плотность монтажа, характерные для классов точности 4 и 5.

1.5.3. СЕТКОГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (см. рис. 1.21, *б*) — перенос изображения печатной схемы с инструмента — сетчатого трафарета на заготовку ПП путем продавливания краски. В исходном состоянии трафарет находится на небольшом расстоянии от поверхности заготовки, а в зоне продавливания краски соприкасается с ней. Продавливание краски осуществляется специальным шпателем (ракелем), перемещаемым вручную или автоматически вдоль поверхности трафарета. В результате продавливания на поверхности заготовки образуется маска из краски, которую сушат на воздухе или в камере. Точность воспроизведения рисунка ±0,1 мм зависит от точности линий на сетчатом трафарете $\delta = \pm 0{,}01...\pm 0{,}07$ мм; материала сетки (шелк, нейлон, металл) и размера ее ячеек; свойств краски, основа которой винил, масляная краска, целлюлозные и асфальтовые лаки; подтекания краски (вязкость) и смазывания (оттенения) изображения. Заготовку ПП ориентируют с помощью базовых отверстий на штифтах, а сетчатый трафарет — на раме устройства трафаретной печати.

Данный метод обеспечивает высокую производительность и экономичен в условиях массового производства.

1.5.4. СПОСОБ ФОТОФОРМИРОВАНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (см. рис. 1.21, *в*) — восстановление под действием УФ-излучения на поверхности нефольгированного основания заготовки ПП ионов металлов из водных растворов солей металлов на базе фотохимической реакции. В результате образуется рисунок в виде металлической пленки толщиной 0,2...0,5 мкм. При экспонировании металлическая пленка может быть получена и на стенках металлизируемых отверстий. После химической подготовки поверхности нефольгированного диэлектрика с поверхностным адгезионным слоем на нее наносят водный раствор солей металлов и высушивают его. В результате экспонирования рисунка с помощью фотошаблона или лучом лазера на поверхности диэлектрика и в отверстиях восстанавливаются ионы металла, прочно сцепленные с подложкой. Для способа фотоформирования характерна высокая разрешающая способность изображения, так как толщина светочувствительного слоя чрезвычайно мала.

1.5.5. МЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (см. рис. 1.21, *г*) — получение рисунка печатной схемы в объеме диэлектрического основания ПП путем механического или термического воздействия на материал. Технологически отработанным методом механического воздействия является фрезерование нефольгированного диэлектрика с образованием рельефа ($\delta = \pm 0{,}05$ мм). Монтажные и переходные отверстия получают сверлением с двух противоположных сторон заготовки ПП. При этом соосность отверстий должна находиться в пределах 0,1 мм. В качестве инструментов применяют твердосплавные резцы (фрезы) с трехгранной, полукруглой и лопаточной заточкой и твердосплавные сверла. В качестве оборудования используют сверлильные станки с ЧПУ с числом шпинделей от одного до четырех. Необходима высокая точность базовых отверстий заготовок ПП. При ширине рельефных проводников 0,125...0,127 мм возможна их прокладка с шагом $t_c = 025$ мм. Переходные отверстия должны находиться в пределах ширины рельефного проводника. Менее распространен метод выдавливания (тиснения) рельефа в диэлектрическом основании. Рисунок рельефа на плате-пуансоне получают лазерным фрезерованием на оборудовании с ЧПУ. Перед тиснением рельефа диэлектрическую заготовку подогревают. При лазерном «фрезеровании» рельефа на основании ПП применяют оборудование с ЧПУ, погрешность линий не превышает 0,01 мм, погрешность по глубине — 0,008 мм.

1.5.6. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНО-УТЮЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Лазерно-утюжная технология (ЛУТ) получила широкое применение в лабораторных условиях, поскольку она не требует специализированного оборудования. В данной технологии рисунок будущей маски печатается с помощью лазерного принтера на термотрансферной бумаге или простой глянцевой бумаге. От качества печати зависит точность будущего рисунка. Конструктивной особенностью лазерного принтера является термический перенос изображения с разогретого вала на конечный носитель изображения. Распечатанный рисунок маски накладывается на очищенную поверхность фольгированного диэлектрика тонером вниз. Бумага прижимается к заготовке с помощью разогретого бытового утюга, тонер расплавляется и смачивает поверхность заготовки, прилипая к ней. При прекращении нагрева тонер застывает, образуя рисунок на поверхности фольгированного стеклотекстолита. Бумагу удаляют путем размачивания в воде. Оставшийся на поверхности тонер является маской. Данная технология позволяет стабильно получать проводящий рисунок класса точности 3 при оценке ширины дорожек проводящего рисунка.

Технология изготовления печатных плат — одна из основ производства ЭА и ее узлов. В серийном производстве отлажены методы, которые позволяют производить однослойные и многослойные ПП высокой точности с металлизированными переходными отверстиями, однако внедрять автоматизированные линии выгодно только при массовом производстве. Поэтому себестоимость изготовления даже самых простых ПП в заводских условиях высокая. Но даже в производстве при массовом выпуске изделий часто возникает необходимость доработки или усовершенствования конструкции изделия, проведения опытной партии.

Существует ряд задач, требующих изготовления ПП несерийного производства:

– макетирование ЭА и ее узлов на различных этапах проектирования и отладки;

– изготовление ПП для штучного производства ЭА по частным заказам;

– изготовление плат в радиокружках, учебных заведениях, научно-исследовательских лабораториях.

В данных случаях решением могут стать различные технологии изготовления ПП, применяемые в домашних и лабораторных условиях для опытного производства.

Наиболее нетребовательными к технологическим ресурсам методами изготовления рисунка на фольгированном диэлектрике являются методы нанесения перманентным маркером вручную (рис 1.25). Также перманентный маркер часто используется для прорисовывания плохо перенесенного рисунка, полученного ЛУТ или фотографическим способом

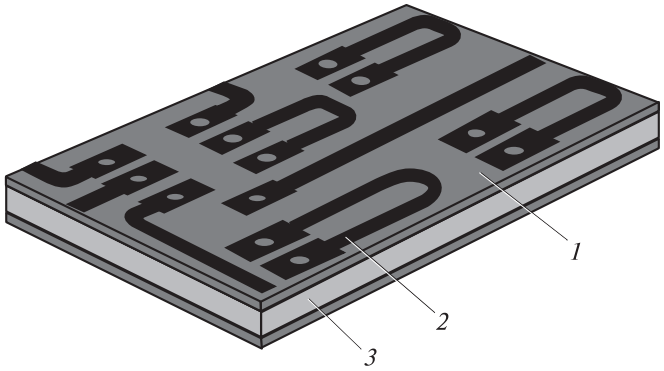


Рис. 1.25. Нанесение рисунка ПП с помощью маркера:
1 — металлическая фольга; *2* — рисунок, нанесенный маркером;
3 — стеклотекстолит

в лабораторных условиях (такое случается при плохой подготовле фольгированного стеклотекстолита или при использовании некачественных материалов).

Выбор промышленного способа получения рисунка зависит от требований к ПП, ее сложности и необходимой точности, наличия металлизированных отверстий. Фотографический способ и способ формирования наиболее точные и подходят для создания сложных деталей. Сеткографический способ применяется для создания крупных элементов. Механический способ используют для создания простых ПП с небольшим числом компонентов.

Тесты к лекции 1.5

1. ***Чем определяется точность воспроизведения рисунка ПП ±0,3 мм?***

а) точностью фотошаблона и погрешностями при экспонировании (дифракция) и задубливании (размытие границ) изображения;

б) точностью фотошаблона;

в) погрешностями при экспонировании (дифракция) и задубливании (размытие границ) изображения.

2. ***Отметьте ответ, подходящий под описание: представляет собой полимерную пленку, защищенную с двух сторон защитными светонепроницаемыми пленками.***

а) сухой пленочный фоторезист;

б) жидкий фоторезист;

в) фоторезист.

3. ***Продавливание краски при сеткографическом способе получения рисунка ПП осуществляется:***

а) шпателем (ракелем);

б) руками;

в) пинцетом.

4. ***Какой способ позволяет получить металлическую пленку на стенках отверстий?***

а) фотоформирования;

б) механический;

в) сеткографический.

5. ***Технологически отработанным методом механического воздействия при механическом способе получения рисунка ПП является:***

а) фрезерование нефольгированного диэлектрика с образованием рельефа;

б) экспонирование рисунка с помощью фотошаблона или лучом лазера;

в) лазерное фрезерование на оборудовании с ЧПУ.

1.6. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Цель лекции: рассмотрение способов получения проводящего рисунка печатной платы с указанием сущности способа, точности вопроизведения рисунка, основных этапов процесса, используемых в процессе материалов, инструментов и установок. Сравнение самых распространенных реализаций травления меди.

1.6.1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Выделяют следующие основные способы получения проводящего рисунка ПП: травление, осаждение, наращивание и напыление (рис. 1.26).

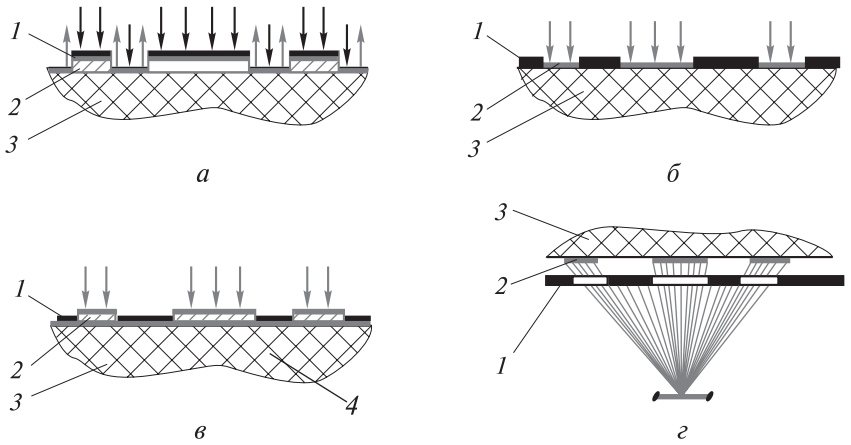


Рис. 1.26. Схемы способов получения проводящего рисунка:

а — травление ($FeCl_2$; $CuCl_2$; $(NH_4)_2S_2O_8$) медной фольги (*1* — маска; *2* — проводящий рисунок — фольга; *3* — основание ПП); *б* — химическое осаждение ($CuSO_4$) меди (*1* — маска; *2* — проводящий рисунок из осажденной меди; *3* — основание ПП); *в* — гальваническое наращивание ($CuSO_4$; $Cu(BF_4)_2$) меди в зонах проводящего рисунка (*1* — маска; *2* — проводящий рисунок — осажденная медь; *3* — слой предварительного меднения; *4* — основание ПП); *г* — термическое вакуумное напыление меди (*1* — трафарет; *2* — проводящий рисунок; *3* — диэлектрическое основание ПП)

1.6.2. СПОСОБ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (рис. 1.26, *а*) — удаление (травление) меди в зоне непроводящего рисунка — пробельных мест — печатной схемы. При этом проводящий рисунок должен быть защищен маской из фоторезиста, краски или металлорезиста (олово, олово–свинец). При травлении меди в зоне пробельных мест удаляется фольга и слой предварительной металлизации (если он был нанесен на заготовку ПП). Травление — сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором растворы на основе хлористого железа $FeCl_3$, хлорной меди $CuCl_2$ или персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$ служат окислителями.

Реакции травления:

$$2FeCl_3 + Cu \rightarrow CuCl_2 + 2FeCl_2$$

способ обеспечивает равномерную скорость травления со степенью насыщения медью 50–60 г/л, непригоден при наличии маски из металлорезиста;

$$CuCl_2 + Cu \rightarrow Cu_2Cl_2$$

способ дешев, легко регенерируется, имеет степень насыщенности медью 120–150 г/л;

$$(NH_4)_2S_2O_8 + Cu \rightarrow CuSO_4 + (NH_4)_2SO_4$$

способ применяется для травления меди в случае защиты проводящего рисунка металлорезистом (олово, олово–свинец), легко регенерируется.

Геометрия проводящего рисунка зависит от стойкости защитной маски, характеристик травильного раствора и скорости травления (точность воспроизведения ±0,01). Травление сопровождается боковым подтравливанием проводящего рисунка, глубина которого соизмерима с толщиной слоя меди, удаляемой с пробельных мест. Величина подтравливания зависит и от способа подачи в рабочую зону травильного раствора: погружение в раствор, струйное травление (предпочтительнее).

1.6.3. СПОСОБ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (см. рис. 1.26, *б*) — осаждение меди на диэлектрик в зоне проводящего рисунка в качестве подслоя для последующего гальванического наращивания меди или в качестве основного слоя путем толстослойного химического меднения. Медь, осажденная в качестве подслоя, имеет толщину 0,25...1,00 мкм (возможно до 2,0...3,0 мкм) и служит для подсоединения заготовки ПП к катоду электролитической ванны при последующем гальваническом наращивании. Химическое осаждение происходит из раствора на основе сернокислой меди $CuSO_4$ со скоростью 1...2 мкм/ч вследствие восстановления ионов двухвалентной меди на активированной

поверхности диэлектрика. Активация диэлектрика осуществляется в совмещенном растворе двухлористого олова $SnCl_2$ (сенсибилизация) и двухлористого палладия $PdCl_2$ (активация). Раствор содержит также соляную кислоту HCl и хлористый калий KCl. При толстослойном химическом меднении требуется увеличение скорости осаждения до 2 мкм/ч и более и применение системы автоматического управления процессом. Геометрия проводящего рисунка при химическом осаждении меди зависит от стойкости маски и ее толщины. При тонкой маске возможно боковое разращивание осаждаемой меди.

1.6.4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ НАРАЩИВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (см. рис. 1.26, *в*) — увеличение толщины предварительно осажденного слоя химической меди, а также образование проводящего рисунка схемы с толщиной меди в металлизируемых отверстиях не менее 25 мкм. Гальваническим осаждением через маску наносят металлорезист (олово — 3...5 мкм, олово–свинец — 8...20 мкм) для защиты проводящего рисунка при травлении меди с пробельных мест. К этому способу прибегают для создания на проводящем рисунке (например, в зоне печатных контактов) специальных покрытий (палладий, золото, родий и т. п.).

Медь осаждают, используя аноды из соответствующего металла и электролиты на основе сернокислой меди $CuSO_4$ (хорошая рассеивающая способность, пластичный осадок) и борфтористой меди $Cu(BF_4)_2$. Скорость осаждения составляет 60 мкм/ч. Металлорезист осаждают из электролита на основе борфтористого олова $Sn(BF_4)_2$ и свинца $Pb(BF_4)_2$.

Геометрия проводящего рисунка при наращивании меди и металлорезиста зависит от стойкости маски в электролитах, ее толщины, а также толщины осаждаемого металла. Точность воспроизведения рисунка $\pm 0{,}01...\pm 0{,}05$.

1.6.5. ТЕРМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Сущность способа (рис. 1.26, *г*) — осаждение меди на диэлектрик в зоне проводящего рисунка путем напыления через трафарет. Перед металлизацией необходимо очистить заготовку ПП от медных оксидов и жиров для лучшей адгезии. Медь испаряется из тигля в условиях вакуума. Процесс осуществляется в вакуумной установке. Этот способ эффективен при получении тонких (0,1–1,0 мкм) слоев металлизации на мелких участках КС.

Вакуумное напыление не получило широкого применения, поскольку требует большого расхода электроэнергии и напыляемых материалов.

Как и химическое осаждение, напыление относится к аддитивным (*additio* (лат.) — присоединять, прибавлять) методам получения проводящего

рисунка. Основная идея этих методов — нанесение меди на заготовку нефольгированного стеклотекстолита через маску. Маска при этом предотвращает попадаение меди на пробельные места. Как правило, при использовании аддитивных методов отверстия в ПП просверливают заранее, до процесса меднения и нанесения защитной маски.

Тесты к лекции 1.6

1. ***От чего зависит геометрия проводящего рисунка?***

а) от стойкости защитной маски, характеристик травильного раствора и скорости травления;

б) от материала защитной маски и состава травильного раствора;

в) от качества металлизации основания.

2. ***Что необходимо для проведения толстослойного химического меднения?***

а) увеличение скорости осаждения;

б) изменение состава активатора;

в) уменьшение скорости осаждения.

3. ***Что наносят методом гальванического осаждения?***

а) металлорезист;

б) фоторезист;

в) паяльную маску.

4. ***Какой эффект может возникнуть при слишком тонкой маске?***

а) боковое разращивание металла;

б) отслоение дорожек;

в) дефекты отверстий.

5. ***К каким методам относят химическое осаждение и напыление?***

а) аддитивным;

б) субтрактивным;

в) комбинированным.

1.7. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: рассмотрение методов изготовления печатных плат (химический, комбинированный позитивный, тентинг-метод, электрохимический, фотоаддитивный, аддитивный). Описание сущности методов, указание области применения, класса точности получаемого рисунка, используемых материалов.

1.7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Принято различать четыре метода изготовления ПП. *Химический* метод изготовления травлением фольги с незащищенных мест применяется для ОПП, ГПК и внутренних слоев МПП. *Комбинированный позитивный* метод, основанный на сочетании химико-гальванического способа металлизации отверстий, КП и проводников со способом химического травления фольги с пробельных мест, применяется для ДПП и МПП различных классов точности. *Электрохимический* (полуаддитивный) метод изготовления путем химико-гальванического предварительного меднения отверстий и поверхности нефольгированного диэлектрика, гальванического наращивания токопроводящих участков и химического травления слоя предварительного меднения с пробельных мест применяется для изготовления ПП классов точности 4 и 5. Для изготовления МПП рекомендуется метод *металлизации* сквозных отверстий. При этом печатный монтаж на внутренних слоях получают химическим методом, а на внешних — комбинированным позитивным методом.

Аддитивный метод (химическое осаждение) и метод фотоформирования не включены в ОСТ4.ГО.010.209, но являются перспективными для производства ПП. Аддитивный метод — химическое осаждение меди в зоне токопроводящих участков на нефольгированный диэлектрик с введенным катализатором и адгезивным слоем. Метод фотоформирования — восстановление поверхности нефольгированного диэлектрика из водных растворов солей металлов и ионов, образующих рисунок толщиной 0,2...0,5 мкм, и последующее химическое осаждение слоя меди. Различные модификации метода связаны с различными способами формирования рисунка — фотоосаждение металлов, проявление и восстановление ионов, формирование лучом лазера, фотоформинг.

Материалы, применяемые для изготовления ПП, приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Материалы, применяемые для изготовления ПП

Материал	Марка	Толщина		Область применения
		фольги, мкм	материала с фольгой, мм	
Фольгированный гетинакс	ГФ-1-35	35	1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП, ДПП
	ГФ-2-35		1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
Фольгированный стеклотекстолит	СФ-1(2)-35	35	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП, ДПП
	СФ1(2)-50	50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
	СФ-1Н(2Н)-50	50	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
Нефольгированный стеклотекстолит	СТЭФ-1-2ЛК	–	1,0; 1,5	ДПП, изготовленные электро-химическим методом
Слофадит		5	1,0; 1,5	
Фольгированный теплостойкий стеклотекстолит	СТФ-1(2)	35	0,13; 0,15; 0,20; 0,25; 0,35; 0,50; 0,80; 1,00; 1,5; 2,00; 2,50; 3,00	ДПП, МПП, ГПП
Травящийся фольгированный стеклотекстолит	ФТС-1-20А(20АО)	20	0,08; 0,15	МПП, ГПП
	ФТС-2-20А(20АО)	20	0,18; 0,27; 0,50	
	ФТС-1-35А(35АО)	35	0,10; 0,12; 0,19	
	ФТС-2-35А(35АО)	35	0,14; 0,23; 0,50	
Фольгированный тонкий диэлетрик	ДФО-2	35	0,25; 0,35	ГПП
Фольгированный гибкий диэлектрик	ФДЛ	35	0,06; 0,07; 0,10	ГПК
		50	0,08; 0,09; 0,12	
	ФДФ-3МС-1	20	0,12	
Прокладочная стеклоткань	СПТ-3	–	0,025; 0,060	МПП

Наиболее трудоемким является комбинированный позитивный и электрохимический методы. Предварительную химико-гальваническую металлизацию проводят в отверстиях и на поверхности ПП, гальваническую металлизацию (наращивание) — только на токопроводящих участках (отверстия, КП, проводники). В комбинированном позитивном и электрохимическом методах печатный монтаж перед травлением меди с пробельных мест защищают гальванически осажденным металлорезистом (олово–свинец), который затем оплавляют (рис. 1.27).

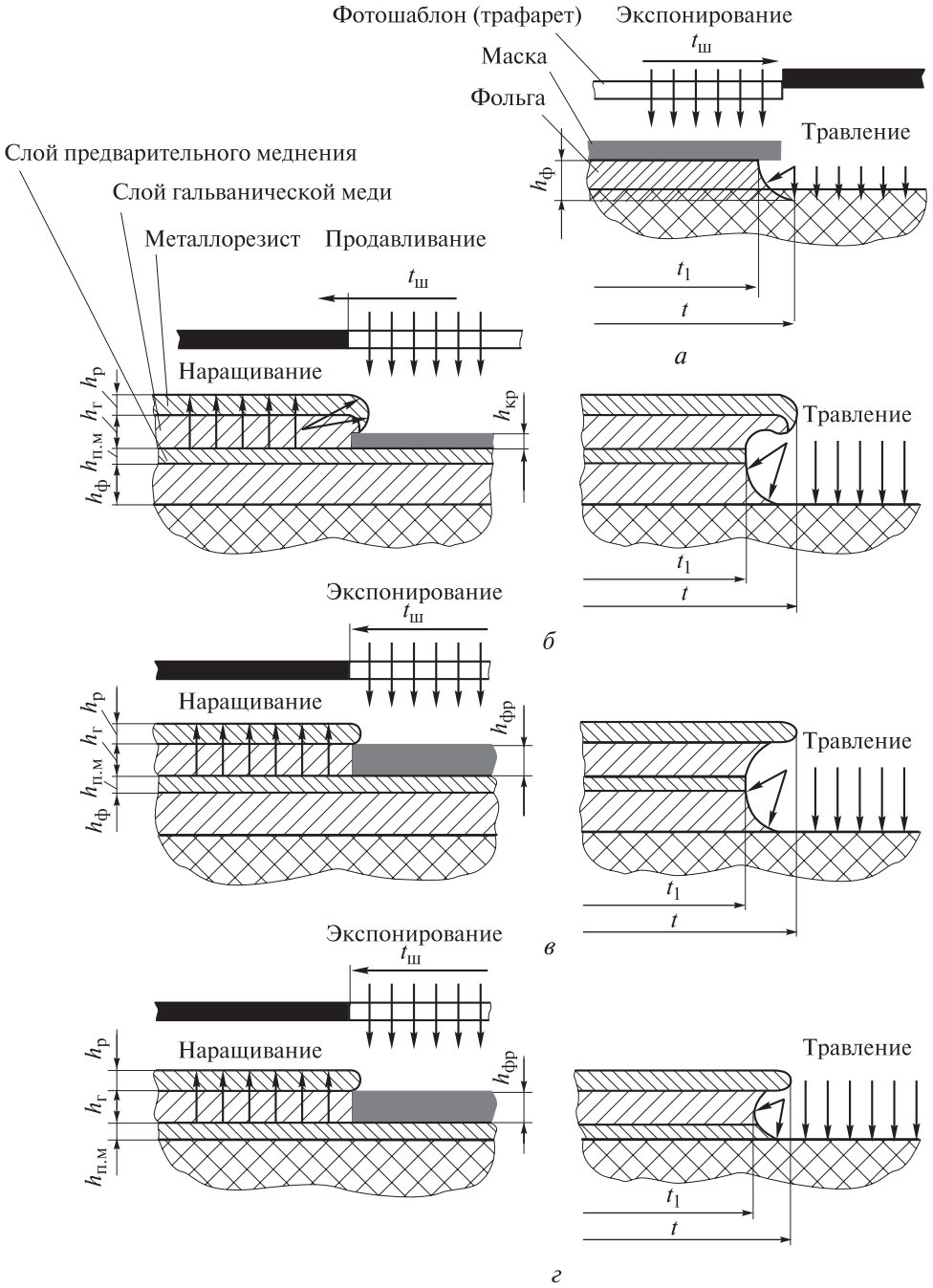


Рис. 1.27. Изменение параметров печатного монтажа (проводника):

а — химический метод; *б* — комбинированный позитивный сеткографический и *в* — фотохимический способы получения рисунка; *г* — электрохимический метод с фотохимическим способом получения рисунка; $h_{п.м}$ — толщина слоя предварительной металлизации; $h_{фр}$ — толщина слоя фоторезиста; $h_ф$ — толщина слоя металлизации; $h_{кр}$ — толщина слоя краски; $h_г$ — толщина слоя меди при гальваническом наращивании; $h_р$ — толщина слоя металлорезиста; t, t_1 — ширина проводников

Для нанесения рисунка на заготовку с просверленными монтажными отверстиями применяют сухой пленочный фоторезист (СПФ) при фотохимическом способе или сеткографический способ (жидкий фоторезист неприемлем). Для совмещения рисунка КП с центрами монтажных отверстий необходимо точное базирование фотошаблона (трафарета) относительно заготовки платы.

По числу основных этапов аддитивный метод и метод фотоформирования близки к химическому методу изготовления ОПП. Если сравнить трудоемкость методов изготовления ДПП и принять трудоемкость комбинированного позитивного метода за 100 %, то трудоемкость электрохимического метода составит 90 %, аддитивного — примерно 70 %, метода фотоформирования — около 60 %.

1.7.2. ХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Химический метод (табл. 1.8) применяется в тех случаях, когда исходными материалами являются фольгированные диэлектрики (ГФ, СФ, СТФ, ФТС, FR и др.). В аббревиатуре отечественных материалов буква Ф означает «фольгированный». Пример марки материала СФ-1-35, где СФ — стеклотекстолит фольгированный; 1 — односторонне фольгированный; толщина фольги $h_ф = 35$ мкм.

Сущность химического метода (субтрактивный метод — *subtratio* (лат.) — отнимать, вычитать) — образование проводящего рисунка путем удаления (травления) фольги в зонах, образующих непроводящий рисунок, т. е. в зонах пробельных мест (табл. 1.8, этап 3). При этом будущий проводящий рисунок защищает от травления маска из фоторезиста, нанесенного фотоспособом, или из краски, нанесенной сеткографическим способом.

Для травления применяют травители на основе хлорного железа $FeCl_3$, хлорной меди $CuCl_2$, персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$ и некоторые другие травители.

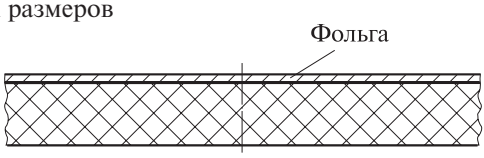
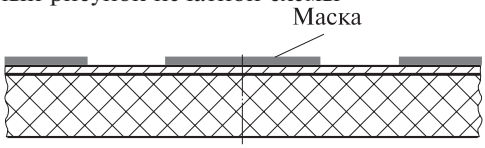
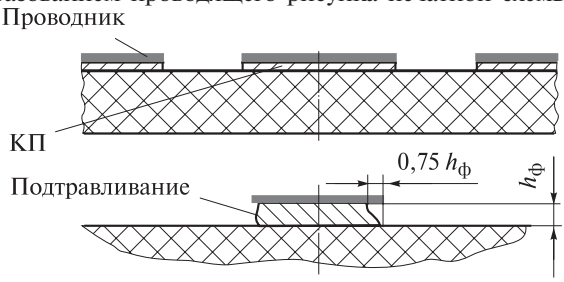
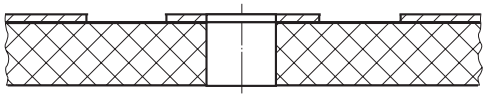
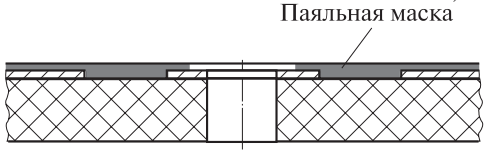
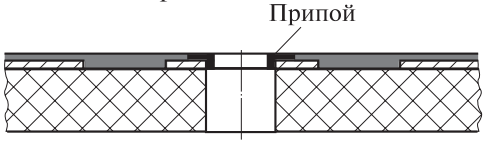
В зависимости от травителя и условий травления (температура, насыщенность медью) скорость травления изменяется в пределах 20...35 мкм/мин. Качество травления характеризуется боковым подтравливанием проводящего рисунка, которое составляет 0,75 $h_ф$ при струйном травлении. Подтравливание следует учитывать при расчете узких мест и определении геометрии рисунка на фотошаблонах:

$$t_{min} = t_{1min} + 1,5h_ф; \quad D_{min} = D_{1min} + 1,5h_ф,$$

где t_{1min} — исходная минимальная ширина сигнального проводника, заданная классом точности ПП или получающаяся на основании электрического расчета печатной схемы; $h_ф$ — толщина слоя фольги; D_{1min} — минимально допустимый диаметр круглой КП в зоне монтажного или переходного отверстия.

Таблица 1.8

Химический метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа фольгированного диэлектрика на заготовки ПП. Химико-механическая очистка поверхности	Односторонне фольгированная заготовка конечных размеров 
2	Получение рисунка фотографическим (маска–фоторезист) или сеткографическим (маска–краска) способом	На поверхность фольги заготовки нанесен позитивный рисунок печатной схемы 
3	Химическое травление фольги на пробельных местах ПП. Воздействие сопровождается подтравливанием фольги под маской	Фольга удалена в местах, не закрытых маской, с образованием проводящего рисунка печатной схемы 
4	Химико-механическое удаление маски. Сверление монтажных отверстий в зоне КП проводящего рисунка	В заготовке для односторонней ПП выполнены монтажные отверстия 
5	Нанесение, сушка и экспонирование рисунка паяльной маски (КП открыты для пайки)	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской (кроме мест пайки навесных компонентов) 
6	Флюсование и горячее лужение мест пайки, не закрытых паяльной маской. Окончательная промывка готовой печатной платы	На КП нанесен припой 

При дальнейшем уменьшении $t_{1\min}$ и $D_{1\min}$ следует учитывать фактор прочности сцепления фольги, приклеенной к диэлектрику, при механических, химических и температурных воздействиях.

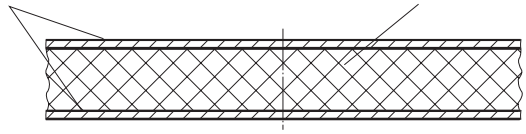
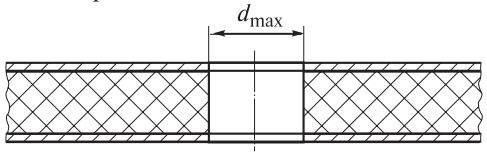
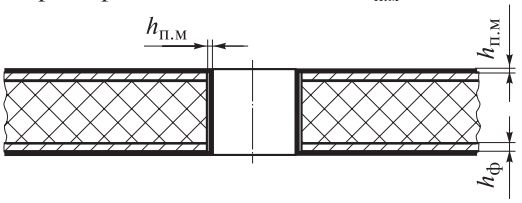
Области применения химического метода — изготовление ОПП с монтажными неметаллизированными отверстиями и без монтажных отверстий, слоев МПП без межслойных переходов, ГПК и гибких шлейфов, гибко-жестких ПП.

1.7.3. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОЗИТИВНЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

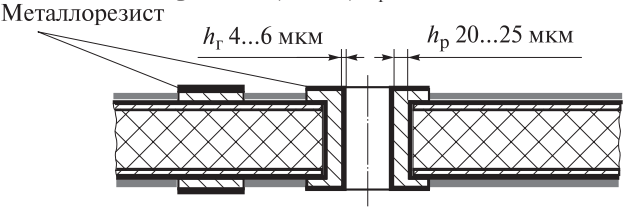
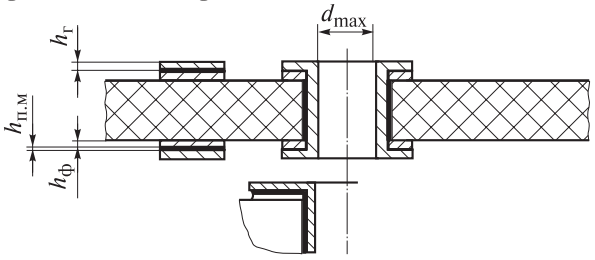
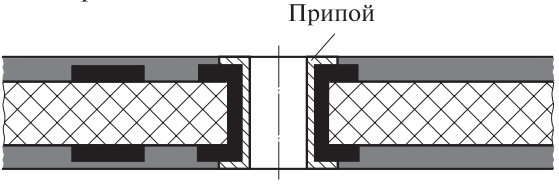
Комбинированный позитивный метод (табл. 1.9) разработан для изготовления ПП на двусторонне фольгированных диэлектриках (СФ-2-50, ГФ-2, ФТС-2, СТФ-2 и др.). Наличие в ДПП металлизированных отверстий требует сочетания операций: *удаление меди* (признак сутбрактивного метода) с пробельных мест двух проводящих слоев и *осаждение меди* (признак аддитивного метода) на стенки металлизируемых отверстий; отсюда название метода — комбинированный.

Таблица 1.9

Комбинированный позитивный метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа фольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Химико-механическая очистка поверхностей заготовки	Двусторонне фольгированная заготовка конечных размеров Фольга Диэлектрик 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Подготовка отверстий под металлизацию	Заготовка с просверленными монтажными и переходными отверстиями 
3	Подготовка стенок отверстий и активация поверхностей под осаждение меди. Химическая или прямая металлизация с последующей гальванической затяжкой ($h_{п.м}$ = 5...7 мкм)	Стенки отверстий и поверхность фольги покрыты слоем предварительного меднения $h_{п.м}$ 

Окончание табл. 1.9

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
4	На фольгу ламинированием нанесен сухой пленочный фоторезист. Рисунок экспонирован с позитивного фотошаблона, проявлен и задублен	На поверхностях фольги заготовки образован негативный рисунок печатной схемы
5	Гальваническое наращивание меди на стенках отверстий ($h_г$) и в зонах проводящего рисунка на поверхности фольги. Гальваническое осаждение металлорезиста (олово) на проводящий рисунок ($h_р$)	В зонах, не закрытых СПФ, нанесен слой меди $h_г$ и слой металлорезиста (олово) $h_р$ 
6	Удаление фоторезистивной маски. Травление меди ($h_ф + h_{п.м}$) с пробельных мест. Травление металлорезиста (олово) на проводящем рисунке	Проводящий рисунок выполнен в объеме и на поверхности диэлектрического основания 
7	Нанесение, сушка и экспонирование рисунка жидкой маски (КП открыты для пайки выводов навесных компонентов)	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской (кроме мест пайки навесных компонентов). Проводящий рисунок изображен без разделения слоев меди
8	Флюсование и горячее лужение мест пайки, не закрытых паяльной маской. Окончательная промывка готовой ПП	На КП проводящего рисунка и на стенки отверстий нанесен припой 

В отличие от химического метода монтажные или переходные отверстия ДПП получают до образования проводящего рисунка на слоях (табл. 1.9, этап 2). При предварительной металлизации отверстий слой $h_{\text{п.м}} = 5...7$ мкм химико-гальванически осаждается на всех поверхностях заготовки (табл. 1.9, этап 3). Однако этой толщины недостаточно для надежного электрического соединения слоев ДПП металлизированными отверстиями.

На этапе 5 (табл. 1.9) осуществляется гальваническое наращивание меди в отверстиях ($h_{\text{г}} = 20...25$ мкм) и на всех участках проводящего рисунка слоев. При этом пробельные места защищают маской из фоторезиста (сухой пленочный фоторезист $h_{\text{фр}}$ толщиной 20, 40 и 60 мкм) или краски $h_{\text{кр}} = 10$ мкм. На фольгированных поверхностях заготовки образуется негативный рисунок (табл. 1.9, этап 4). Следовательно, для его получения необходим позитивный фотошаблон или сетчатый трафарет; отсюда полное название метода — комбинированный позитивный метод.

Для того чтобы защищать проводящий рисунок ДПП при травлении слоя ($h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}$) с пробельных мест (табл. 1.9, этап 6), его закрывают путем гальванического осаждения металлорезиста (олово или олово–свинец) (табл. 1.9, этап 5). Если металлорезист олово ($h_{\text{р}} = 3...5$ мкм), то после травления меди его также удаляют травлением. Паяемость проводящего рисунка обеспечивается нанесением паяльной маски (табл. 1.9, этап 7) и горячим лужением открытых мест пайки (табл. 1.9, этап 8).

Если металлорезист олово–свинец ($h_{\text{р}} = 10...20$ мкм), то его оставляют на проводящем рисунке ДПП, а после травления меди с пробельных мест оплавляют. При этом паяльную маску наносят поверх оплавленного сплава олово–свинец.

При анализе геометрии проводящего рисунка ДПП учитывают явление разращивания проводников и других элементов печатного рисунка при гальваническом осаждении меди и металлорезиста ($h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$) и явление подтравливания слоя ($h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}$) при удалении (травлении) меди с пробельных мест.

Если маска из краски или тонкого СПФ, то учитывается подтравливание и разращивание:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}};$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}.$$

Если маска из толстого СПФ ($h_{\text{СПФ}}$ равно 40; 60 мкм), то разращивание отсутствует и учитывается только подтравливание:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right);$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right).$$

Таким образом, при необходимости изготовления ДПП классов точности 4 и 5 не следует применять сеткографический способ нанесения рисунка, а также использовать тонкофольгированный диэлектрик СФ-2-9, СФ-2-18 и СТПА-5 ($h_ф$ равно 9; 18 и 5 мкм соответственно).

Комбинированный позитивный метод — типовой и наиболее распространенный в производстве ПП. Он применяется для изготовления ДПП различных классов точности, внутренних слоев МПП с металлизированными переходными отверстиями, наружных слоев МПП с металлизацией сквозных отверстий и ГПП с металлизированными отверстиями.

1.7.4. ТЕНТИНГ-МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Тентинг-метод (табл. 1.10) разработан как менее трудоемкий для производства ДПП на двусторонне фольгированных диэлектриках. Основная его особенность — защита проводящего рисунка при травлении меди с пробельных мест не слоем металлорезиста (Sn, Sn—Pb), а слоем фоторезиста, который в зоне металлизированных отверстий образует тент (завеску). Технология комбинированного метода при этом видоизменяется (см. табл. 1.10). Сразу после предварительной металлизации ($h_{п.м}$) следует гальваническое наращивание слоя меди ($h_г$ до 35 мкм) в отверстиях и на поверхности фольги. Затем проводящий рисунок защищают с применением СПФ ($h_{фр}$ равно 40; 60 мкм), экспонируя его с негативного фотошаблона, а медь с пробельных мест удаляют травлением $CuCl_2$, который хорошо поддается регенерации и утилизации. При этом для сохранения прочности завесок несколько увеличивают диаметры контактных площадок и толщину применяемого фоторезиста (до 60 мкм). В тентинг-методе разращивание проводящего рисунка отсутствует, а подтравливание снижает его точность, причем

$$t_{min} = t_{1min} + 1{,}5\left(h_ф + h_{п.м} + h_г\right);$$

$$D_{min} = D_{1min} + 1{,}5\left(h_ф + h_{п.м} + h_г\right).$$

Поэтому применяют тонкофольгированные диэлектрики ($h_ф$ равно 5; 9; 18 мкм).

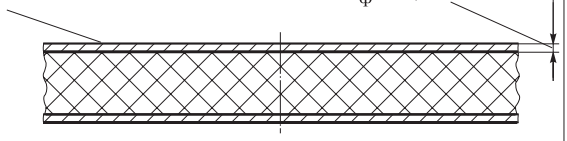
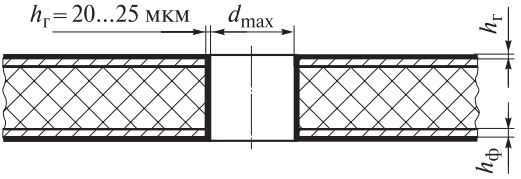
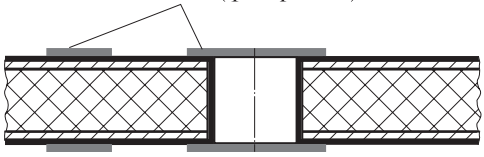
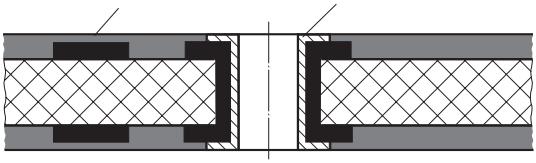
Тентинг-метод хорошо сочетается с технологией прямой металлизации диэлектрика в отверстиях, когда на стадии активации исключают химическое осаждение меди и сразу переходят к гальваническому осаждению.

Защитное СПФ-покрытие повышает защиту проводников от коррозии, пыли и влаги.

По сравнению с тентинг-методом комбинированный позитивный метод является более экономичным. Кроме того, комбинированный позитивный метод, как правило, позволяет получить проводящий рисунок с большей точностью, чем тентинг-метод.

Таблица 1.10

Тентинг-метод изготовления печатных плат

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа тонкофольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Химико-механическая очистка поверхностей заготовки	Двусторонне фольгированная заготовка конечных размеров Фольга $h_ф = 5; 9; 18$ мкм 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Химическая или прямая металлизация, гальваническое наращивание слоя Cu до заданной толщины в отверстиях и на поверхности фольги	Заготовка с переходными отверстиями металлизирована гальваническим осаждением Cu в объеме и на поверхности $h_г = 20...25$ мкм d_{max} $h_г$ $h_ф$ 
3	Нанесение рисунка фотоспособом с применением СПФ с негативного фотошаблона	На заготовке нанесен позитивный рисунок схемы. Отверстия закрыты завесками (тентами) из СПФ от проникновения травильных растворов Маска (фоторезист) 
4	Травление $h_г$ и $h_ф$ с пробельных мест, удаление маски из СПФ, нанесение паяльной маски, горячее лужение проводящего рисунка	Заготовка закрыта паяльной маской, места пайки подвергнуты горячему лужению Паяльная маска Зона горячего лужения 

Паяемость ПП, изготовленных тентинг-методом, обеспечивают нанесением паяльной маски и горячим лужением мест, не закрытых ею.

Для изготовления прецизионных ПП применяются аддитивные (*additio* (лат.) — присоединять, прибавлять) методы, реализуемые на нефольгированных диэлектриках. Рассмотрим полуаддитивный (электрохимический) метод.

1.7.5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

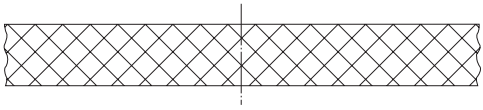
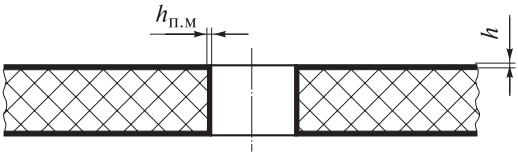
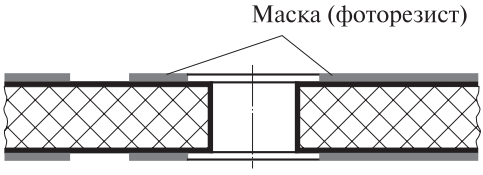
В **электрохимическом методе** (табл. 1.11) на нефольгированную заготовку (СТЭК) с просверленными отверстиями путем активации, химического осаждения ($h_{х.м} \cong 1$ мкм) и гальванической затяжки (до 5...7 мкм) наносят слой предварительного меднения ($h_{п.м}$). Толщина слоя достаточна для дальнейшего гальванического наращивания меди на проводящий рисунок (табл. 1.11, этап 4) и осаждения металлорезиста (Sn). Толстая маска сухого пленочного фоторезиста (табл. 1.11, этап 3) препятствует разращиванию меди, а при травлении слоя меди $h_{п.м}$ с пробельных мест подтравливание незначительно:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1{,}5h_{п.м}; \quad D_{\min} = D_{1\min} + 1{,}5h_{п.м}.$$

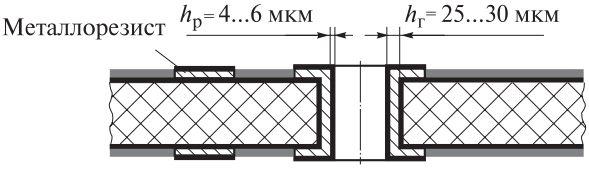
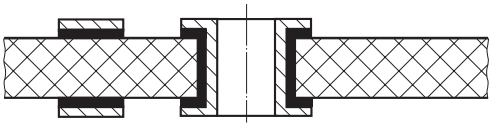
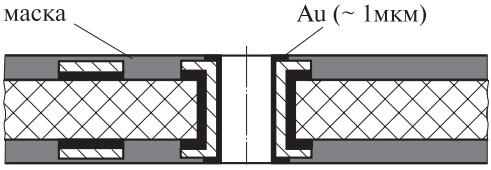
Все эти технологические условия позволяют получить проводящий рисунок классов точности 4 и 5 и даже выше.

Таблица 1.11

Электрохимический (полуаддитивный) метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа нефольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Очистка поверхностей заготовки	Заготовка конечных размеров из нефольгированного диэлектрика 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ активация (Sn) и сенсибилизация (Pd) диэлектрика. Химическая металлизация (Cu) и гальваническая затяжка медью ($h_{п.м}$ = 5...7 мкм)	Заготовка с просверленными монтажными отверстиями и переходными отверстиями металлизирована в объеме (стенки отверстий) и на поверхности слоем предварительного меднения ($h_{п.м}$) 
3	Нанесение СПФ на металлизированную заготовку. Рисунок экспонирован с позитивного фотошаблона, проявлен и задублен	На заготовку нанесен негативный рисунок печатной схемы 

Окончание табл. 1.11

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
4	Гальваническое наращивание меди $h_г$ в зонах проводящего рисунка (сплошной слой $h_{п.м}$ на диэлектрическом основании — катод). Гальваническое осаждение металлорезиста Sn	Проводящий рисунок доведен до оптимальной толщины (Cu) и защищен слоем металлорезиста (Sn) 
5	Удаление фоторезистивной маски, травление ($h_{п.м}$ = 5...7 мкм) с пробельных мест, травление металлорезиста (Sn)	Слой предварительного меднения ($h_{п.м}$) удален с пробельных мест диэлектрического основания. Металлорезист удален с проводящего рисунка 
6	Нанесение жидкой паяльной маски, сушка и экспонирование рисунка. Иммерсионное покрытие мест пайки на проводящем рисунке	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской. На места пайки выводов навесных компонентов нанесено иммерсионное покрытие (Sn, Au) 

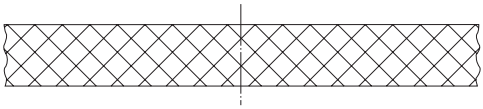
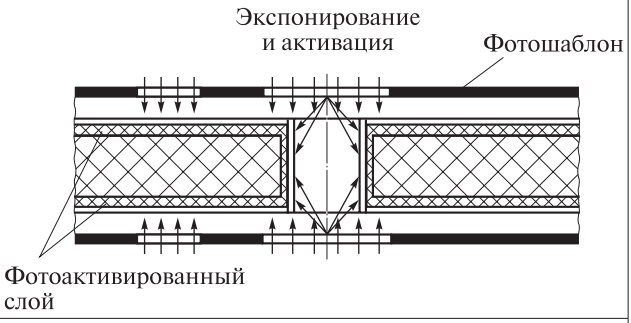
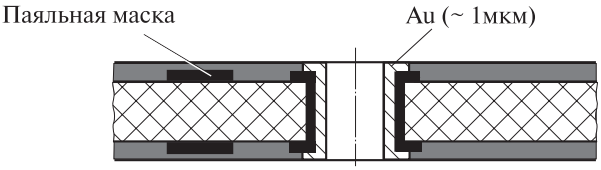
Таким образом, электрохимический (полуаддитивный) метод предусматривает предварительное меднение ($h_{п.м}$) всей заготовки в объеме (отверстия) и на поверхности диэлектрика путем химико-гальванического осаждения меди. Слой металлизации служит катодом при дальнейшем гальваническом наращивании меди во всех зонах проводящего рисунка. После достижения заданной расчетной толщины меди слой предварительного меднения ($h_{п.м}$) удаляют с пробельных мест травлением (отсюда название — «полуаддитивный»).

1.7.6. ФОТОАДДИТИВНЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Фотоаддитивный метод разработан для изготовления ПП на нефольгированном диэлектрике (табл. 1.12). В нефольгированной диэлектрической заготовке (материал СТЭК) сверлят монтажныеи переходные отверстия. На заготовку наносят раствор, содержащий соли металлов (Cu, Ag) и обладающий фотосвойствами.

Таблица 1.12

Фотоаддитивный метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа нефольгированного диэлектрика на заготовки. Очистка поверхностей заготовки	Заготовка конечных размеров из нефольгированного диэлектрика 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Нанесение фотоактивируемого катализатора. Экспонирование и активация с образованием тонкого металлического рисунка	Заготовка с отверстиями, все поверхности которой покрыты фотоактивируемым катализатором 
3	Тонкослойное химическое меднение (ТХМ) проводящего рисунка. Отмывка заготовки от технологических растворов и неактивированного катализатора. Нанесение паяльной маски и иммерсионного покрытия	Проводящий рисунок заданной толщины закрыт паяльной маской. В местах пайки нанесено финишное иммерсионное покрытие 

Нанесенный и высушенный раствор экспонируют УФ-излучением через негативный фотошаблон. При УФ-облучении из раствора на диэлектрике осаждаются ионы металлов, образуя тончайшую металлическую пленку. При одновременном экспонировании с двух сторон заготовки металлическая пленка образуется и на стенках отверстий. При этом следует учитывать отношение $d_{\text{м.о}}/H_{\text{ПП}}$.

На диэлектрическом основании образуется тончайший металлический рисунок печатной схемы. Обеспечить толщину проводящего рисунка позволяет его толстослойное химическое меднение. Применение гальванического наращивания меди невозможно, так как все компоненты рисунка не соединены в единую электрическую цепь.

Процесс изготовления ПП (например, ДПП) заканчивается нанесением паяльной маски и иммерсионным осаждением соответствующих металлов в местах пайки навесных компонентов и проводящего рисунка.

Основное преимущество фотоаддитивного метода — получение ПП классов точности 4 и 5.

Если пробельные места проводящего рисунка закрыты фоторезистивной маской, то разращивание слоя $h_{\text{ТХМ}}$ отсутствует:

$$t_{\min} = t_{1\min};$$

$$D_{\min} = D_{1\min}.$$

Если маски нет, то происходит разращивание проводящего рисунка:

$$t_{\min} = t_{1\min} + h_{\text{ТХМ}};$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + h_{\text{ТХМ}}.$$

Поскольку фотоаддитивный метод реализуется на нефольгированных диэлектриках, то в ТП изготовления отсутствует операция травления проводящего рисунка, что обеспечивает более высокую геометрическую точность.

Анализируя последовательность операций, следует отметить, что монтажные отверстия сверлят до нанесения рисунка печатного монтажа (исключение — химический метод). Это требует применения сверлильных станков с программным управлением и точного базирования заготовок ПП на станке.

1.7.7. АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

3D-печать, или аддитивное печатное производство, — процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала (субтрактивное производство).

В настоящее время рынок аддитивных технологий активно развивается во всех направлениях науки и промышленности. Согласно исследованиям, рынок аддитивных технологий показывал непрерывный рост с 2017 по 2020 г. в среднем на 22 % ежегодно. По прогнозам аналитиков, к 2027 г. рынок аддитивных технологий может вырасти более чем на 300 % относительно 2020 г. Диаграмма состояния и прогноза рынка аддитивных технологий приведена на рис. 1.28.

Рассмотрим с экономической точки зрения преимущества, которые открываются перед разработчиками и производством в результате применения технологии 3D-печати при изготовлении ПП.

Как правило, в аддитивном производстве, по сравнению с традиционным производством, значительно сокращаются затраты за счет существенного сокращения производственного цикла изделий. Появляется возможность

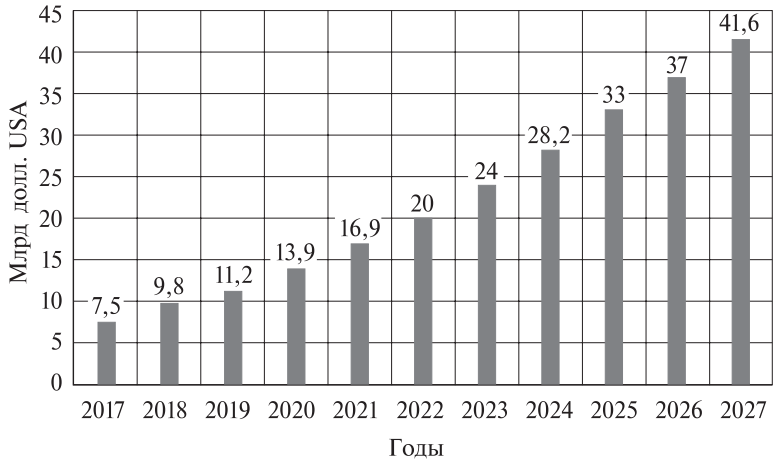


Рис. 1.28. Диаграмма состояния и прогноз рынка аддитивных технологий

отказаться от необходимости разработки технологии на изготовление, а также от этапов подготовки производства (заготовительные участки, литейное производство и т. д.). Аддитивное производство также позволяет значительно сократить затраты на изготовление продукции за счет кратного сокращения штата рабочих, экономии на производственных площадях, экономии материалов, а также быстрого производственного цикла. Однако перечисленные преимущества неминуемо приводят к снижению качества выпускаемой продукции. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков этих двух технологий приведен в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков двух технологий

Традиционное производство		Аддитивное производство	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
Высокая степень надежности	Сравнительно долгий производственный цикл	Быстрый цикл производства	Низкая степень надежности
Отработанная технология	Большая площадь производства	Небольшая площадь производства	«Сырая» технология
Гарантийный срок на изделия	Большой штат сотрудников	Небольшой штат сотрудников	Отсутствие гарантийного срока
Большой выбор поставщиков материалов и оборудования	Высокая стоимость оборудования для производства	Возможность применения особых технологий (встроенные компоненты, заполненные отверстия и т. д.)	Невозможность применения технологии для большей части уже разработанных изделий

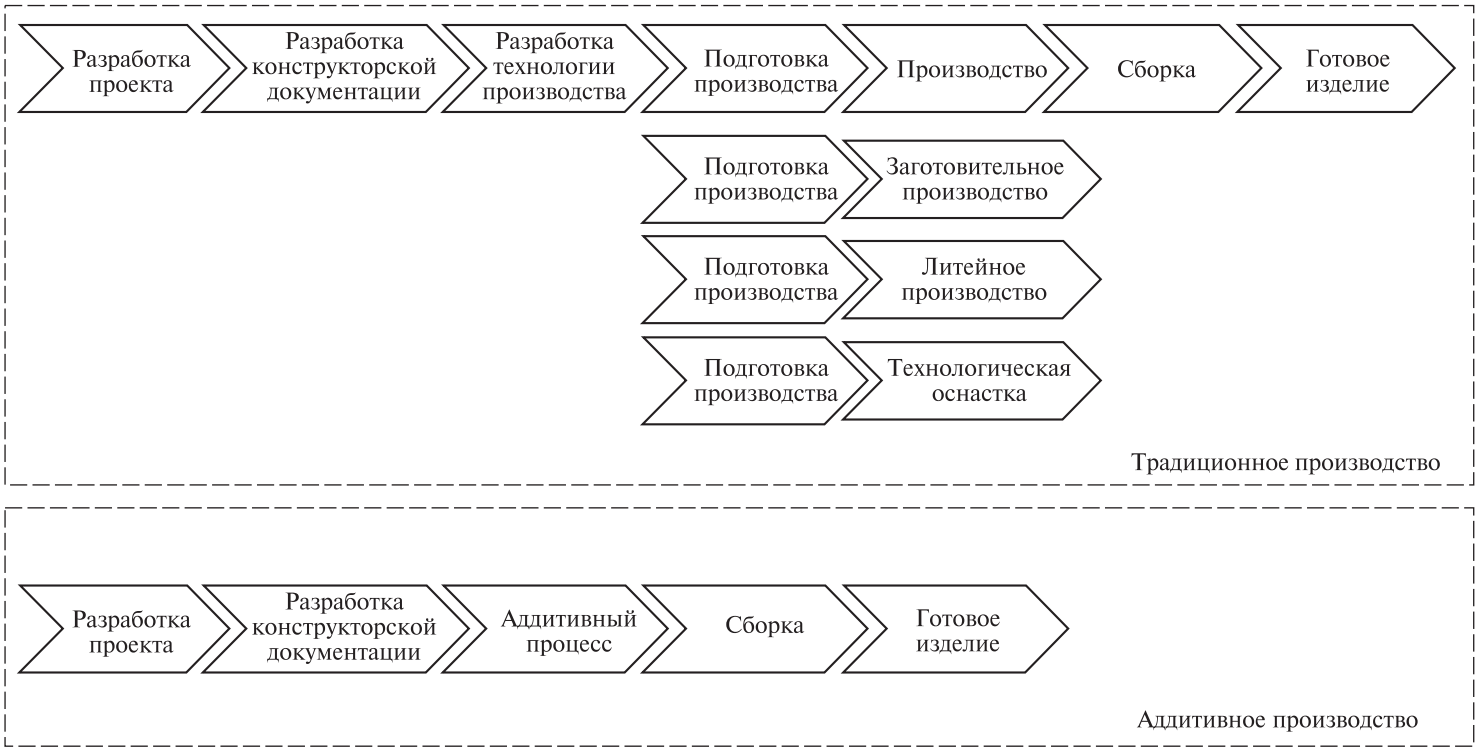


Рис. 1.29. Сравнение традиционного и аддитивного производства

Следует отметить, что аддитивное производство ПП на текущем этапе его развития позволяет существенно сэкономить производственные затраты и ускорить процесс изготовления ПП. Кроме этого, оно дает возможность применения особых технологий, таких как монтаж с торца печатной платы, технологии встроенных компонентов и других технологий, недоступных в рамках традиционного производства.

Тесты к лекции 1.7

1. ***Какие виды маски можно наносить на заготовку с просверленными монтажными отверстиями при фотохимическом способе получения рисунка?***

а) сухой пленочный фоторезист;

б) жидкий фоторезист;

в) любой фоторезист.

2. ***С помощью чего в комбинированном позитивном методе осуществляется защита проводящего рисунка при травлении меди с пробельных мест?***

а) металлорезист;

б) фоторезист;

в) зависит от материала основания ПП.

3. ***Какое основание используют для реализации аддитивного метода получения проводящего рисунка ПП?***

а) нефольгированный диэлектрик;

б) полимер;

в) фольгированный диэлектрик.

4. ***Какие методы производства ПП позволяют получить класс точности 4 и 5?***

а) комбинированный позитивный, электрохимический и фотоаддитивный методы;

б) любой метод;

в) все субтрактивные методы.

5. ***Что является преимуществом аддитивного производства?***

а) небольшой штат сотрудников;

б) высокая степень надежности;

в) большой выбор поставщиков материала.

1.8. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: изучение основных типовых операций технологического процесса изготовления печатных плат. Указание основных видов дефектов, встречающихся при выполнении этих операций и описание наилучших режимов/концентраций, позволяющих максимально избежать дефектов.

1.8.1. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ

Цель этой операции — получить электропроводный слой меди для обеспечения возможности последующей гальванической металлизации отверстий. Химическое меднение диэлектрика осуществляется за счет восстановления на его поверхности меди раствором ее солей. При этом поверхность диэлектрика должна обладать каталитическими свойствами по отношению к реакции восстановления. Такие свойства диэлектрик приобретает после операции активирования — осаждения на его поверхности частиц металлов — катализаторов последующего химического меднения.

В производстве ПП широко применяется метод сенсактивирования — активирования с предварительной сенсибилизацией. Чаще всего для сенсибилизации используют растворы двухвалентного олова, а также соединения Ge, Fe, Ti.

Для производства ПП применяют следующий раствор сенсибилизации: $SnCl_2$ — 10...100 г/л; HCl — 10...30 мл/л. Присоединение $SnCl_2$ к поверхности происходит не в растворе сенсибилизирования, а при промывке поверхности водой (T = 18...25 °C; t = 2...5 мин):

$$SnCl_2 + H_2O \rightarrow Sn(OH)\downarrow + H^+ + Cl^-$$

Результат сенсибилизации — осаждение на поверхности диэлектрика солей двухвалентного олова $Sn(OH)Cl$ или других соединений, служащих катализатором в реакции восстановления металла-активатора.

Сенсибилизацию можно также проводить обработкой в красителях, например в метиленовом синем, анилиновом синем, с последующей обработкой в восстановителе $Na_2S_2O_4$ (гидросульфит) и промывкой.

Активирование осуществляют обработкой сенсибилизированной поверхности растворами соединений каталитически активных металлов Pd, Pt, Au, Ag. Растворы могут быть кислыми или щелочными. Металл в них находится в виде простого или комплексного соединения. При взаимодействии

с сенсибилизатором на поверхности ПП оседают коллоидные или малорастворимые соединения металла-катализатора. Для химического меднения ПП используют два раствора активирования:

1) $PdCl_2$ — 0,8...1,0 г/л; HCl — 1...2 г/л (T = 20 °С; t = 1...2 мин);

2) $PdCl_2$ — 4 г/л; NH_4OH–250...350 мл/л; Трилон Б — 12 г/л (T = 18...25 °С; t = 3...5 мин).

Первый раствор — кислый, второй — щелочной. При активировании диэлектрика в кислом растворе скорость химического меднения значительно выше. Однако при концентрации кислоты в растворе более чем 15 % возможен подтрав внутреннего окисленного слоя фольги.

В последнее время широкое распространение получало совмещенное сенсактивирование в растворах, содержащих соли двухвалентного олова и двухвалентного палладия. На поверхности диэлектрика, обработанного в таком растворе, образуется коллоидная частица, включающая $Sn(OH)Cl$ и $PdCl_2$. При последующей обработке поверхности в растворе $(NH_4)HF_2$ образуется металлический палладий — катализатор последующего меднения. Для успешной металлизации диэлектрика необходимо, чтобы в процессе активирования на квадратном миллиметре поверхности детали образовалось 10...15 частиц палладия диаметром ≈50 нм.

Химическое меднение ПП проводится в растворах, содержащих соль двухвалентной меди (обычно $CuSO_4$), восстановитель, комплексообразователи меди, вещества, поддерживающие pH раствора, различные добавки. Хороший восстановитель, используемый для химического меднения, — формалин. При восстановлении им меди обеспечивается автокаталитический процесс, т. е. катализатором процесса является сама медь, что препятствует прекращению роста пленки меди по мере покрытия ею центров кристаллизации (частиц палладия) и самопроизвольному восстановлению меди из $CuSO_4$ в объеме раствора. Автокатализ при восстановлении меди гипофосфитом, гидразином, гидросульфитом выражен гораздо слабее.

Химическое меднение требует тщательного соблюдения режимов и концентраций. Этот процесс обладает следующими недостатками: все растворы разового действия и имеют низкую плотность загрузки (<2 дм^2/л); растворы очень нестабильны и требуют тщательной отработки процесса. Химически осажденная медь обладает очень низким качеством. Ее удельное сопротивление значительно превышает сопротивление чистой меди. Гальваническая медь плохо сцепляется с химической. Требуется механическая зачистка поверхности перед гальваническим меднением. Скорость химического осаждения меди ~0,5 мкм/ч, толщина слоя меди на ПП составляет 0,3...0,5 мкм.

1.8.2. ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ

Гальваническое осаждение меди проводят для получения основного слоя металла-проводника. При этом плата с нанесенным слоем химической меди является катодом, а анодом — массивная медная пластина.

Гальваническое меднение ПП обеспечивает толщину слоя меди в отверстиях не менее 25 мкм и равномерный по толщине слой меди на поверхности ПП. Для этого необходима высокая рассеивающая способность электролита, прочное сцепление гальванической меди с фольгой и химической медью.

Наиболее применяемые в производстве ПП — сульфатные, фторборатные, фторсиликатные и пирофосфатные электролиты меднения. Сернокислый электролит, состоящий из $CuSO_4$ и H_2SO_4, обладает самой низкой рассеивающей способностью, дает крупнозернистые осадки меди. Лучшими свойствами обладают электролиты (табл. 1.14).

Таблица 1.14

Свойства электролитов

Электролит	Компоненты	Концентрация, г/л	Плотность тока, А/дм^2	pH	Температура, °С
Фторборатный	$Cu(BF_4)_2$	230	2–4	0,5–1,5	18–25
	HBF_4	5–15			
	H_3BO_3	15–40			
Фторсиликатный	$CuSiF_6$	280–370	5–7	1,7–2,2	18–25
	H_2SiF_6	10–15			
Пирофосфатный	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	30–38	1,0–1,5	7,5–9	45–60
	$K_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$	400–450			
	NH_4OH (25%-ной)	12–15			
	Лимонная кислота	10–15			

В этих электролитах компоненты $CuSO_4$, $Cu(BF_4)_2$, $CuSiF_6$ являются растворителями анодов и способствуют получению ионов Cu^{2+}, разряжающихся на катоде. Фторборатная кислота H_3BO_3 увеличивает проводимость электролита и способствует образованию мелкокристаллического осадка. Аналогичное действие оказывает фторсиликатная кислота H_2SiF_6. Осаждение меди из фторборатных электролитов происходит с высокой скоростью. Выход по току (катодный и анодный) приближается к 100 %. Электролит фторсиликатный по свойствам приблизительно аналогичен фторборатному, однако требуется большая плотность тока. При этом выход по току несколько снижается.

Пирофосфатные электролиты позволяют получить наиболее высокое качество меди. При плотности тока I = 1,0...1,5 А/дм^2 выход по току — 100 %. Аммиак ускоряет растворение анодов и способствует образованию

мелкокристаллического осадка. Лимонная кислота адсорбируется на выступах микрорельефа катода и препятствует росту губчатых дендритов. Скорость осаждения меди из пирофосфатного электролита примерно 13 мкм/ч.

Типичные дефекты химически осажденных пленок меди:

1) низкая прочность сцепления осажденной меди с фольгой вследствие плохого качества очистки фольги и нарушения режимов гальванического процесса;

2) наличие крупнозернистых шероховатых участков на поверхности покрытия вследствие присутствия органических веществ в электролите, адсорбируемых поверхностью;

3) неравномерность по толщине слоя осажденной меди вследствие малой рассеивающей способности электролита;

4) наличие проколов в слое в отверстиях вследствие низкого качества химического меднения.

Для защиты поверхности токопроводящих участков при травлении меди с пробельных мест, а также для обеспечения условий пайки выводов ЭРЭ печатный монтаж покрывают металлорезистом Sn–Pb (15...20 мкм). Металлорезист, содержащий 50...65 % Sn и 50...35 % Pb, осаждается во фторборатном электролите. Для получения покрытия Sn–Pb, соответствующего сплаву ПОС-61 (температура плавления сплава должна быть 210 °С, чтобы не повредить ПП), необходимо поддерживать в электролите отношение Sn:Pb = (2,0...2,5):1. На поверхности металлорезиста Sn–Pb не должно быть сульфатов и оксидов. Для их удаления применяют осветление в растворе, содержащем HCl (17 г/л), $SnCl_2$ (20 г/л), тиомочевину (до 1 г/л). После осаждения металлорезист оплавляют.

При производстве ПП с печатными разъемами (ламелями) в качестве материала покрытия ламелей применяют палладий. Если плата не была покрыта серебром перед палладированием, необходимо гальванически нанести подслой никеля (3...6 мкм) для лучшего сцепления палладия с основанием. Эта операция осуществляется в обычном сернокислом электролите. Палладирование проводится в аммиакатных электролитах. Толщина покрытий из палладия составляет 1...2 мкм. Такие покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью, не тускнеют на воздухе при температуре до 40 °С.

1.8.3. ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ

Эта операция служит для удаления меди с пробельных мест и получения элементов печатного монтажа. Технологический процесс травления меди на ПП состоит из следующих операций: щелочное обезжиривание поверхности; декапирование в 20%-ном растворе соляной кислоты; травление меди в соответствующих растворах; нейтрализация после травления; сушка обдувом воздуха.

После каждой операции следует процесс промывки водой. Проводники из меди перед травлением могут быть защищены фоторезистом или металлорезистом (Ag; Au; Sn–Pb; Sn–Ni).

Для травления меди в производстве ПП применяют следующие растворы: на основе хлорного железа $FeCl_3$, хлорной меди $CuCl_2$, персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$, хромовосерной кислоты.

Растворы на основе $FeCl_3$ и $CuCl_2$ не применяются в случае использования металлорезиста Sn–Pb.

Растворы на основе $CuCl_2$ более перспективные, так как имеют следующие преимущества: предел насыщения раствора ионами Cu^{2+} примерно в 3 раза выше, чем у $FeCl_3$ (150...180 г/л для $CuCl_2$ и 50...60 г/л для $FeCl_3$); высокая и постоянная скорость травления меди; легкость отмывки ПП после травления (после обработки в $FeCl_3$ образуются нерастворимые соединения типа $FeO \cdot Fe(OH)_2$, что требует дополнительного декапирования, а осадки гидрооксида меди снимаются промывкой в щелочи).

Для травления фольги на ПП, покрытых оловянно-свинцовым припоем, применяют также растворы хромовосерной кислоты. Широко применяется в этом случае травление меди персульфатом аммония. Эти растворы создают на поверхности припоя олово–свинец (ПОС) нерастворимые пленки сульфида свинца, предотвращающие растворение сплава.

Основные требования к процессу травления меди с ПП — обеспечение равномерного травления и минимального бокового подтрава элементов печатного монтажа. Выполнение этих требований обеспечивается выбором правильного раствора и метода травления. Так, травление меди в растворах на основе хлорного железа или хлорной меди сопровождается боковым подтравом, величина которого в 2 раза меньше, чем при травлении в растворе на основе персульфата аммония. Для обеспечения равномерности травления всей поверхности ПП используют струйный метод травления, при котором платы, расположенные на конвейере, равномерно перемещаются под струями травителя, причем расположение сопел, формирующих струи, обеспечивает попадание одинакового количества свежего травителя на каждый элементарный участок ПП.

1.8.4. СВЕРЛЕНИЕ МОНТАЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ

От качества выполнения этой операции зависит сплошность и электрическая прочность печатного монтажа. К просверленным отверстиям предъявляются следующие требования:

– стенки отверстий должны быть гладкими, без заусенцев, смятия и расслаивания диэлектрика;

– оси отверстий должны быть перпендикулярны поверхности ПП;

– отверстия должны быть строго цилиндрическими;

– не допускается наличия в отверстиях следов инструмента, смазки;

– отверстия не должны выходить за пределы КП.

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих инструмента, оборудования, режимов обработки.

Сверление отверстий в ПП осуществляют спиральными твердосплавными сверлами, выполненными с высокой точностью. Процесс проводят без применения СОЖ во избежание загрязнения диэлектрика. Стойкость сверл — 2000...5000 отверстий. Для сверления ПП собирают в пакет и фиксируют по базовым отверстиям. Толщина пакета не должна превышать 4 мм. Под нижнюю ПП пакета помещают подкладку из гетинакса или оргстекла толщиной 1,5 мм, предотвращающую образование заусенцев при выходе сверла из пакета и поломку сверл. В качестве оборудования наиболее перспективно применение многошпиндельных сверлильных станков с программным управлением. Они должны удовлетворять следующим основным требованиям:

– размер поля обработки — 250...300 мм;

– точность позиционирования инструмента — не менее ±0,05 мм;

– плавная регулировка частоты вращения шпинделей — от 5000 до 70 000 об./мин и подачи — от 0,02 до 0,5 об./мин;

– наличие пневматического устройства для удаления стружки.

Вследствие некачественного сверления на ПП возникают следующие дефекты:

1) наличие неметаллизированных участков в отверстиях вследствие неровностей стенок отверстия, в которых скапливаются пузырьки воздуха, препятствующие осаждению меди на этих участках; наличия загрязнений участков отверстий, которые в дальнейшем удаляются вместе с осажденной на них медью;

2) уменьшение диаметра отверстий вследствие наличия заусенцев, на которые осаждается избыточное количество меди;

3) отслаивание проводников и КП вследствие смятия диэлектрика при высокой плотности отверстий. Смятый диэлектрик при металлизации впитывает химические реактивы и воду, которые могут подтравливать внутренний слой фольги. Насыщение диэлектрика ионами примесей снижает его сопротивление и приводит к образованию коротких замыканий между соседними отверстиями;

4) смещение отверстий вследствие изгиба сверла, неправильной его заточки, высокой скорости подачи, сверления слишком толстого пакета плат, люфтов в патроне, шпинделе. При смещении отверстий возможен их выход за пределы КП на одной из сторон ПП.

Все основные операции технологических процессов изготовления ДПП различными методами приведены в табл. 1.15. Операции даны в технологической последовательности.

Таблица 1.15

Основные операции технологических процессов изготовления ДПП

Основные технологические операции	Метод изготовления					
	Комбинированный позитивный	Комбинированный позитивный с печатными разъемами	Полуаддитивный		Аддитивный	Метод фотоформирования
			На диэлектрике	На металлическом основании		
Нарезка заготовок	+	+	+	+	+	+
Образование базовых отверстий	+	+	+	+	+	+
Образование монтажных отверстий	+	+	+	+	+	+
Нанесение диэлектрических покрытий	–	–	–	+	–	–
Активация поверхности	–	–	+	+	–	+
Химическая металлизация	+	+	+	+	–	–
Гальваническая металлизация	+	+	+	+	–	–
Фотосенсибилизация	–	–	–	–	–	+
Получение рисунка схемы	+	+	+	+	+	+
Усиление рисунка схемы	–	–	–	–	–	+
Термообработка	–	–	–	–	+	–
Активация поверхности	–	–	–	–	+	–
Химическая металлизация	–	–	–	–	+	+
Гальваническая металлизация	+	+	+	+	–	–
Нанесение металлорезиста	+	+	+	+	–	–
Удаление маски	+	+	+	+	+	–
Термообработка	–	–	+	–	+	+
Травление меди	+	+	+	+	–	–
Снятие металлорезиста с контактами	–	+	–	–	–	–
Палладирование печатного разъема	–	+	–	–	–	–
Оплавление металлорезиста	+	+	+	+	–	–
Обработка по контуру	+	+	+	+	+	+
Маркировка	+	+	+	+	+	+
Нанесение защитного покрытия	+	+	+	+	+	+
Окончательный контроль	+	+	+	+	+	+

Техника безопасности при работе с ручным сверлильным станком.

1. Пройдите инструктаж по работе с ручным сверлильным станком.

2. Работа со сверлильный станком возможна только с разрешения преподавателя или лаборанта. При обнаружении неисправности станка обязательно проинформируйте преподавателя или лаборанта.

3. Перед началом работы соберите волосы (можно использовать головной убор), застегните все пуговицы на одежде, в том числе пуговицы на манжетах, наденьте защитные очки и рукавицы. Не начинайте работу без разрешения преподавателя или лаборанта.

4. Проверьте, не содержит ли рабочая зона посторонних предметов, которые могут помешать при работе.

5. Убедитесь, что станок находится на устойчивой горизонтальной поверхности, надежно закреплен и в исправном состоянии. Проверьте, достаточно ли места для комфортной работы.

6. Перед началом работы убедитесь, что необходимое сверло соответствует требованиям (острое, чистое, не повреждено и т. д.), а также правильно и надежно закреплено в сверлильном станке, т. е. расположено строго перпендикулярно заготовке для сверления.

7. Во время работы запрещается оставлять станок без присмотра!

8. Во время работы станка не поправляйте обрабатываемую деталь руками. Для того чтобы подправить деталь, выключите оборудование, дождитесь его полной остановки и после этого подправьте деталь.

9. Избегайте сильного нажима на сверло во избежание его разлома или иного повреждения. В случае повреждения сверла немедленно выключите станок, дождитесь его полной остановки, аккуратно снимите поврежденное сверло и утилизируйте его. Убедитесь, что на рабочем месте не осталось осколков. Для продолжения работы используйте только исправное сверло.

10. При сверлении металлических материалов используйте смазку или охлаждающую жидкость, чтобы предотвратить перегрев и повреждение сверла. Своевременно обновляйте их.

11. После завершения работы выключите сверлильный станок и дождитесь его полной остановки перед заменой сверла или завершением работы.

12. Никогда не пытайтесь регулировать или очищать сверло, пока оно вращается. При удалении стружки пользоваться поддувом запрещено.

13. Если произошло внезапное отключение электричества, то сразу проведите отключение станка. В противном случае внезапное включение станка может стать причиной травмы. Перед повторным включением станка убедитесь, что станок в исправном состоянии и деталь находится в правильном положении.

14. После завершения работы убедитесь, что все инструменты и оборудование полностью отключены, и разложите их по местам.

Тесты к лекции 1.8

1. ***Что является источником меди при ее химическом осаждении?***

а) раствор ее солей;

б) металлическая медь;

в) раствор ее оксидов.

2. ***Что является восстановителем при реакции меди с формалином?***

а) медь;

б) формалин;

в) палладий.

3. ***Чем является ПП с нанесенным слоем химической меди при гальваническом осаждении меди?***

а) катодом;

б) анодом;

в) зависит от технологии производства.

4. ***Что НЕ относится к типичным дефектам химического осаждения пленок меди?***

а) пористость осажденной пленки;

б) низкая прочность сцепления осажденной меди с фольгой;

в) неравномерность по толщине слоя осажденной меди.

5. ***Как происходит сверление отверстий в ПП при массовом производстве?***

а) ПП собирают в пакет и фиксируют по базовым отверстиям;

б) каждая ПП закрепляется в установке сверления за счет крепежных отверстий;

в) сверление проводится вручную с использованием лазерного станка.

1.9. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: анализ технологических процессов изготовления некоторых типов печатных плат с указанием материалов, методов получения рисунка печатной платы и ее проводящего рисунка. Рассмотрение комплекта типового оборудования для производства двусторонних печатных плат.

1.9.1. ОДНОСТОРОННИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ С НЕМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Односторонние ПП с неметаллизированными отверстиями (см. табл. 1.6) имеют невысокий класс точности, а большие диаметры КП ($D_{КП}$) препятствуют плотной прокладке проводников. Основной метод их изготовления — химический (табл. 1.8) с нанесением рисунка печатной схемы фото- и сеткографическим способом (см. рис. 1.17).

Опытные и макетные ОПП имеют ограниченное число отверстий, которые целесообразно сверлить по разметке. В центре круглой КП размещается метка ($d_м$ = 1,0 мм), перенесенная с фотошаблона или сетчатого трафарета на этапе получения рисунка печатной схемы. Оператор визуально или с помощью оптического наведения ориентирует сверло по центру КП. Возможное смещение центра отверстия относительно центра КП ($\delta_{отв} = \pm 0{,}5$ мм) компенсируют увеличением $D_{КП}$.

Применяя химический метод для изготовления ОПП, следует учитывать явление бокового подтравливания проводящего рисунка под маской (фоторезист, краска) на $1{,}5h_ф$ при струйном травлении.

Для обеспечения паяемости проводящего рисунка ОПП в местах коммутации с выводами навесных компонентов на ПП наносят паяльную маску, оставляя открытыми места пайки. Затем ПП подвергают горячему лужению припоем (см. табл. 1.8, этапы 5 и 6).

При изготовлении ОПП можно защитить проводящий рисунок позитивной маской из металлорезиста (Sn–Pb). Его осаждают гальванически (слой фольги — катод), предварительно защитив пробельные места фоторезистом или краской. Металлорезист надежно защищает проводящий рисунок при травлении фольги с пробельных мест, а после оплавления обеспечивает ее паяемость. Недостаток — увеличенный расход металлорезиста, который приходится осаждать на весь проводящий рисунок, а не только в местах пайки навесных компонентов.

1.9.2. ОДНОСТОРОННИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ БЕЗ МОНТАЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Односторонние ПП без монтажных отверстий (см. табл. 1.6) также изготовляют химическим методом (см. табл. 1.8). Отсутствие отверстий упрощает ТП и позволяет задать плотность проводящего рисунка по классу точности 4 и 5 (см. табл. 1.1) при условии применения маски из фоторезиста и минимально возможной толщине фольги. Если ОПП предназначена для монтажа компонентов, монтируемых на поверхность, то ее закрывают паяльной маской и подвергают горячему лужению места пайки (КП) навесных компонентов.

Если ОПП является внутренним слоем МПП, то после получения проводящего рисунка травлением (см. табл. 1.8, этап 3) слой готовят (химико-механическая очистка) к операции прессования в составе пакета слоев МПП.

1.9.3. ДВУСТОРОННИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

Двусторонняя ПП на диэлектрическом основании (см. табл. 1.6), как правило, имеет металлизированные отверстия, электрически соединяющие обе стороны двусторонне фольгированной заготовки. При ее изготовлении необходимо травлением фольги получить проводящий рисунок печатной схемы на обеих сторонах заготовки и электрически соединить обе стороны с помощью металлизированных переходных отверстий.

Для изготовления таких ДПП применяется комбинированный позитивный метод (см. табл. 1.10). Вначале в технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия, с помощью которых ее ориентируют на столе сверлильного станка с ЧПУ. Сверление переходных отверстий по разметке не может быть применено, так как на обеих сторонах заготовки отсутствует какой-либо рисунок. Станок по программе позволяет получить в заданных координатах любое число отверстий, в том числе и различных диаметров путем автоматической замены сверл в процессе цикла сверления. Диэлектрические стенки отверстий не могут обеспечить электрическую связь двух сторон заготовки ДПП и должны быть металлизированы (см. табл. 1.10, этап 3).

Диэлектрик в отверстиях активируют и проводят предварительное меднение ($h_{п.м}$) химико-гальваническим способом или прямую металлизацию с последующей гальванической затяжкой. Слой $h_{п.м}$ имеет толщину 5...7 мкм и достаточен для дальнейшего гальванического наращивания меди в отверстиях и на всех других участках проводящего рисунка. При этом маска из СПФ, закрывающая пробельные места, должна быть достаточно толстой ($h_{фр}$ равно 40; 60 мкм), чтобы препятствовать разращиванию гальванически осаждаемой меди ($h_г$ = 20...25 мкм) и металлорезиста ($h_р$ = 3...5 мкм).

Окончательно проводящий рисунок ДПП получают травлением меди с пробельных мест (слой $h_ф + h_{п.м}$) ПП. Чем тоньше фольга диэлектрика

($h_ф$ равно 5; 9; 12; 18 мкм), тем меньше боковое подтравливание и точнее геометрия проводящего рисунка.

Таким образом, минимизация разращивания и подтравливания меди, обеспечение стойкости СПФ в процессе ее травления позволяют с помощью комбинированного позитивного метода получить ДПП классов точности 4 и 5.

1.9.4. ДВУСТОРОННИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОСНОВАНИИ

В ЭВС специального назначения применяются ДПП на металлическом основании (см. табл. 1.6). Чаще всего такие платы применяются для ИЭТ, в которых необходимо рассеивать большую тепловую мощность. Перед созданием проводящего рисунка основание ДПП должно быть заизолировано.

Металлическое основание с предварительно просверленными монтажными и переходными отверстиями изолируют нанесением слоя диэлектрика в виде эпоксидного или керамического покрытия. При этом диаметр отверстий и толщина основания ДПП должны обеспечить надежное покрытие стенок отверстий. Это условие ограничивает возможность получения на металлическом основании проводящего рисунка высоких классов точности.

Изолированное основание ДПП представляет собой нефольгированную диэлектрическую заготовку, проводящий рисунок которой может быть получен электрохимическим методом (см. табл. 1.6). На изолирующий слой химико-гальваническим способом осаждают слой $h_{п.м}$, который в ходе ТП выполняет роль катода при гальваническом наращивании меди в отверстиях и в других местах проводящего рисунка. При удалении слоя $h_{п.м}$ с пробельных мест подтравливание минимально ($1{,}5h_{п.м}$). Отсюда большая точность проводящего рисунка. Паяемость печатного монтажа ДПП на металлическом основании обеспечивается горячим лужением после нанесения паяльной маски.

1.9.5. ДВУСТОРОННИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ БЕЗ МОНТАЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Двусторонние ПП без монтажных отверстий (см. табл. 1.6) изготовляют на двусторонне фольгированном основании (СФ-2, FR4-2) химическим методом (см. табл. 1.8). Для получения непосредственно самой ДПП необходимо предварительно изготовить фотошаблоны соответствующих слоев (рис. 1.30). Основная задача при этом заключается в точной взаимной ориентации двух фотошаблонов относительно друг друга и заготовки ДПП. Она решается с помощью реперных знаков, базовых отверстий и штифтов — кнопок на этапе экспонирования рисунков.

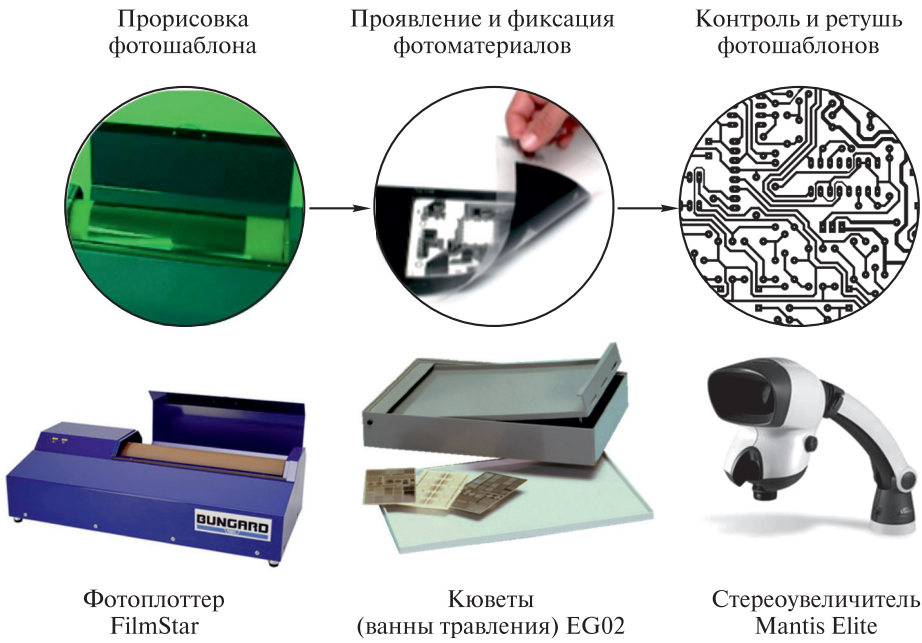


Рис. 1.30. Изготовление фотошаблонов

Отсутствие металлизированных отверстий позволяет увеличить плотность проводящего рисунка, а при тонкой фольге уменьшить боковое подтравливание и тем самым получить ДПП классов точности 3–5.

Маршрут производства ДПП представлен на рис. 1.31.

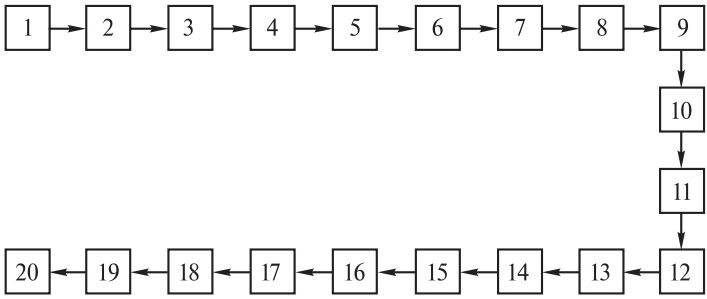
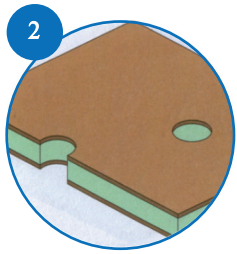
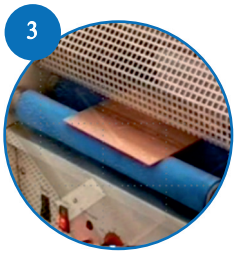
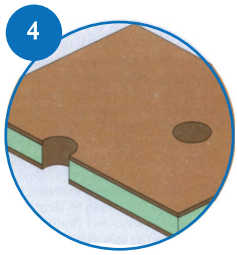
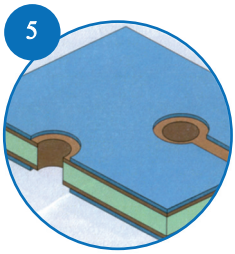
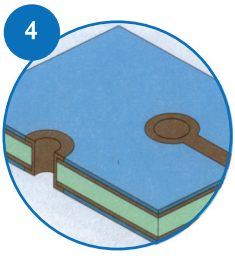
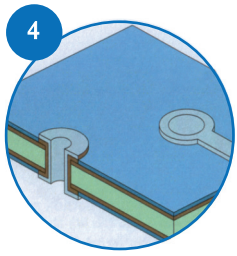
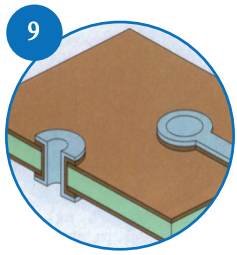
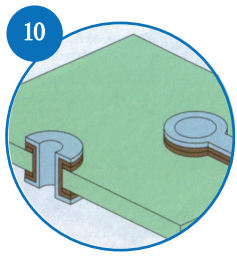
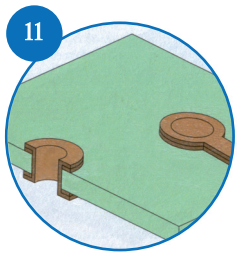
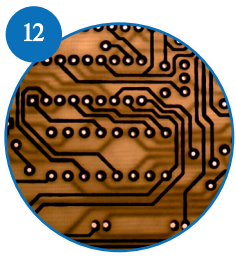
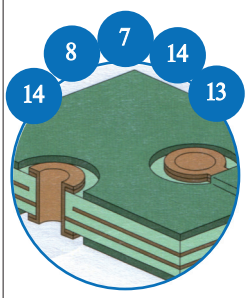
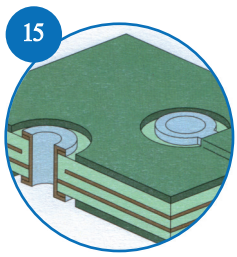
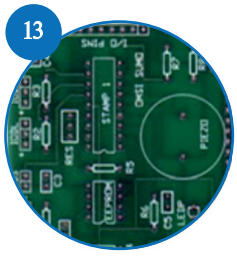
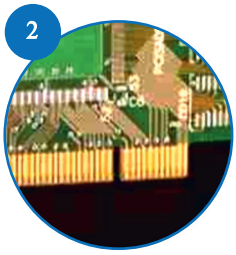
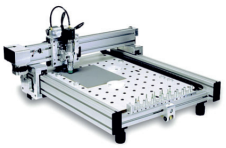


Рис. 1.31. Маршрут производства ДПП
(источник: www.ostec-group.ru):
1–20 — последовательность технологических операций

Ниже приведены технологические операции производства ДПП и используемое оборудование. Номера на эскизах соответствуют используемому оборудованию.

Операция	Иллюстрация	Операция	Иллюстрация
Операция			
1. Нарезка заготовок		2. Сверление сквозных отверстий	
3. Зачистка поверхностей		4. Прямая металлизация сквозных отверстий	
5. Ламинирование фоторезиста		6. Базирование фотошаблона	
7. Экспонирование фоторезиста		8. Проявление фоторезиста	
9. Гальваническое меднение сквозных отверстий		10. Осаждение металлорезиста	

Операция	Иллюстрация	Операция	Иллюстрация
11. Удаление фоторезиста		12. Травление рисунка	
13. Удаление металлорезиста		14. Контроль вытравленного рисунка	
15. Нанесение композиции для маски, сушка, экспонирование, проявление, термодубление		16. Нанесение финишных покрытий	
17. Маркировка		18. Фрезерование сложного контура	
19. Финишная отмывка плат от технологических загрязнений		20. Контроль по признакам внешнего вида	

Операция	Иллюстрация	Операция	Иллюстрация
Оборудование			
1. Гильотинные ножницы NE-CUT		2. Сверлильно-фрезерный станок Bungard CCD/ATC	
3. Зачистная машина RBM300 BLS		4. Установка металлизации COMPACTA L40 ABC 2Cu	
5. Ламинатор RLM 419p		6. Лампа-лупа LAMP-ZOOM 8066-1C-8D	
7. Установка двустороннего экспонирования HELLAS		8. Установка JET-34D	
9. Установка JET-34D		10. Установка JET-34D	

Операция	Иллюстрация	Операция	Иллюстрация
11. Установка JET-34D		12. Стерео-увеличитель Mantis Elite	
13. Ручная установка трафаретной печати LSP-6070HP		14. Сушильный шкаф Source	
15. Установка металлизации COMPACTA L30 ABC		16. Ванна УЗ отмывки S-Power	

Технологический процесс также предусматривает очистку водопроводной воды и очистку стоков.

Блок «Очистка воды» содержит водоочистительную установку Bungard IONEX B для очистки водопроводной воды и водоочистительную установку Bungard IONEX B для очистки стоков.

1.9.6. ГИБКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Гибкие печатные платы (см. табл. 1.6) могут быть односторонними, двусторонними и многослойными. Они обладают статической и динамической гибкостью и применяются практически во всех видах современных ЭВС. Такие ПП позволяют осуществить трехмерную компоновку электронных модулей с одновременным уменьшением числа жестких разъемов-соединителей.

Основным материалом для изготовления ГПП является односторонне фольгированный (ПФ-1) и двусторонне фольгированный (ПФ-2) полиимид толщиной 0,05; 0,1 мм, обладающий гибкостью в диапазоне температур –200...+300 °С, размерной стабильностью и химической стойкостью (исключение — травится в горячей щелочи).

Одностороннюю ГПП изготовляют химическим методом (см. табл. 1.8), двустороннюю — комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.10) с металлизацией отверстий. Многослойная ГПП состоит из нескольких проводящих слоев, изготовленных на тонком полиимидном основании и соединенных прессованием с применением, например, акрилового адгезива, свойства которого хорошо сочетаются со свойствами полиимидной пленки.

Наружные проводящие слои ГПП защищают полиимидным покрытием, не снижающим их устойчивость к перегибам. Фоточувствительные свойства покрытия позволяют выполнить в нем окна доступа к КП проводящего рисунка и металлизированным отверстиям. Паяемость КП обеспечивается нанесением различных покрытий, длительно сохраняющих способность к смачиванию припоем. К ним относятся: иммерсионное золото (ImmAg), иммерсионное олово (ImmSn), горячее лужение (HALS-процесс) и др.

1.9.7. ГИБКИЕ ПЕЧАТНЫЕ КАБЕЛИ

Гибкие печатные кабели (шлейфы) представляют собой параллельно проложенные печатные проводники, размещенные на гибком диэлектрическом основании и закрытые диэлектрической покровной пленкой (табл. 1.6). Их изготовляют на фольгированном полиимиде ПФ-1 толщиной 75; 125 мкм ($h_ф$ = 35 мкм) химическим методом. При этом на всех технологических операциях (получение заготовок: химико-механическая очистка, нанесение проводящего рисунка, травление меди и др.) приходится учитывать гибкость и деформируемость исходного материала. Применяются жесткие подложки-спутники или усовершенствуются конструкции известных технологических установок для обработки гибкой заготовки.

1.9.8. РЕЛЬЕФНЫЕ ПЛАТЫ

В рельефных ПП (РПП) проводящий рисунок выполнен в объеме диэлектрического основания (см. табл. 1.6), поэтому для их изготовления применяется нефольгированный диэлектрик СТАМ, СТЭК. Способ получения рисунка ПП — механический (см. рис. 1.21, *г*) — фрезерование трасс проводников и сверление переходных отверстий, диаметр которых (d = 0,25 мм) не превышает ширину профрезерованных канавок (t = 0,25 мм).

Метод получения проводящего рисунка РПП — электрохимический (см. табл. 1.11). После фрезерования и сверления нефольгированной заготовки на станке с ЧПУ ее подвергают абразивной обработке, которая удаляет стружку, загрязнения и придает диэлектрику равномерный микрорельеф. Далее заготовка подвергается химико-гальваническому меднению,

в результате которого на всех поверхностях основания образуется слой меди ($h_{п.м}$) толщиной 5...7 мкм (возможна толщина до 15 мкм).

Плоские пробельные места заготовки закрывают маской из типографской краски (накатывается офсетным способом) или из СПФ (наносится ламинированием с экспонированием рисунка с фотошаблона). При этом остаются открытыми трассы проводников и переходные отверстия, в зонах которых гальванически наращивается слой меди заданной толщины и слой металлорезиста. Слой меди обеспечивает токоподвод ко всем элементам проводящего рисунка. Технологический процесс изготовления РПП заканчивается удалением маски, травлением слоя $h_{п.м}$ с пробельных мест и оплавлением металлорезиста.

Если оплавленный металлорезист заполняет переходные отверстия, то увеличивается прочность сцепления рельефного проводника с поверхностью канавки диэлектрика (эффект заклепки).

Тесты к лекции 1.9

1. ***Каким методом получают рисунок ОПП с неметаллизированными монтажными отверстиями и ОПП без монтажных отверстий?***

а) химическим;

б) фото- или сеткографическим;

в) методом фотоформирования.

2. ***Как величина бокового подтравливания зависит от толщины фольги диэлектрика?***

а) чем тоньше фольга диэлектрика, тем меньше боковое подтравливание;

б) чем тоньше фольга диэлектрика, тем больше боковое подтравливание;

в) не зависит от толщины фольги диэлектрика.

3. ***Что усложняет получение ПП на металлическом основании высоких классов точности?***

а) необходимость покрывать стенки отверстий диэлектрическим слоем;

б) большая масса ПП на металлическом основании;

в) невозможность получения презиционных отверстий небольшого диаметра.

4. ***Что такое фотоплоттер?***

а) устройство для прорисовки фотошаблона;

б) устройство для проявления фотошаблона;

в) устройство для ретуши фотошаблона.

5. ***Выберите вариант ответа, подходящий под описание: рисунок на ПП этого типа получают с помощью фрезерования и сверления нефольгированной заготовки на станке с ЧПУ и последующей абразивной обработки.***

а) РПП;

б) ДПП на металлическом основании;

в) ДПП на диэлектрическом основании.

1.10. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: анализ технологических процессов изготовления многослойных типов печатных плат с указанием материалов, методов получения рисунка печатной платы и проводящего рисунка печатной платы. Рассмотрение комплекта типового оборудования для производства многослойных печатных плат.

1.10.1. МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ ПОПАРНОГО ПРЕССОВАНИЯ

При разработке конструкции МПП попарного прессования (см. табл. 1.6) учитывалась возможность применения известных типовых методов изготовления ПП, и в частности ДПП на фольгированном диэлектрическом основании (см. табл. 1.6).

Четырехслойную МПП получают с помощью двух фольгированных заготовок из фольгированного диэлектрика СФ-2 с образованием проводящего рисунка вначале на внутренних слоях, а затем на наружных слоях (табл. 1.16).

Электрическая связь слоев обеспечивается с помощью металлизированных отверстий 1–4. Поскольку проводящие рисунки слоев получают травлением фольги с пробельных мест, а металлизированные отверстия — осаждением меди, применяются комбинированные методы изготовления ПП.

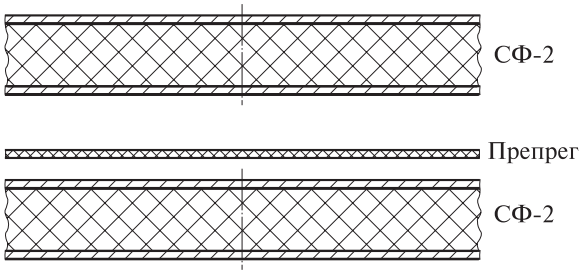
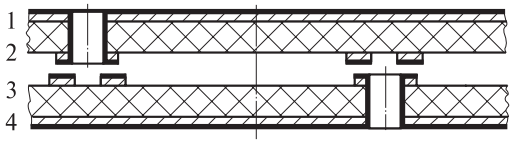
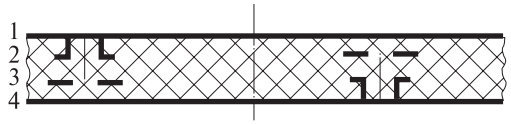
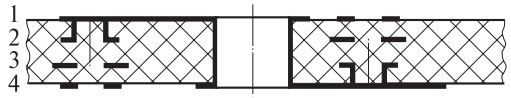
Внутренние слои 2 и 3 изготовляют комбинированным негативным методом с применением негативных фотошаблонов, а гальваническое осаждение меди обеспечивается фольгой наружных слоев 1 и 4, включенных в электрическую цепь гальванической ванны с присоединением электродов в зоне технологического поля заготовки.

Проводящий рисунок наружных слоев 1 и 4 получают комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.9) с гальванической металлизацией сквозных отверстий.

Химико-гальваническая металлизация сквозных отверстий МПП попарного прессования обусловливает большую толщину меди на наружных слоях (слой фольги и дважды осажденный гальванически слой меди). Велико боковое подтравливание проводящего рисунка наружных слоев, что не позволяет получить высокий класс точности ПП по параметру t/s. Возникают также проблемы обеспечения сплошности паяльной маски из-за большой толщины слоя меди (100...130 мкм) на наружных слоях МПП.

Таблица 1.16

Изготовление МПП попарного прессования

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой фольгированного диэлектрика (СФ-2) на заготовки с технологическими полями, раскрой препрега. Химико-механическая подготовка поверхности фольги. Обеспечение условий хранения заготовок препрега (в холодильнике)	Две двусторонне фольгированные заготовки, диэлектрическая прокладка 
2	Получение проводящего рисунка на внутренних слоях 2 и 3 со сверлением и металлизацией переходных отверстий комбинированным негативным методом	Проводящий рисунок на слоях 2 и 3, стенки переходных отверстий и сплошная фольга слоев 1 и 4 закрыты слоем гальванически осажденной меди 
3	Сборка заготовок 1–2 и 3–4 в пакет с установкой прокладки-препрега. Прессование пакета под действием давления (p, кг/см^2) и температуры (T, °С). Химико-механическая обработка наружных слоев 1 и 4	Монолитная заготовка — аналог заготовки ДПП. Переходные отверстия 1–2 и 4–3 заполнены эпоксидной смолой препрега. *Примечание*: проводящий рисунок изображен без разделения слоев меди 
4	Получение проводящего рисунка наружных (1 и 4) слоев и сквозных металлизированных отверстий комбинированным позитивным методом по технологии ДПП. Удаление технологического поля с контролем качества металлизации отверстий по тест-купонам	Монолитная четырехслойная МПП с большим числом переходных (1–2, 4–3) отверстий и относительно небольшим числом сквозных (1–4) отверстий. Предназначена для монтажа КМП (ИМС с планарными выводами, ЧИП-компоненты). Наносится паяльная маска 

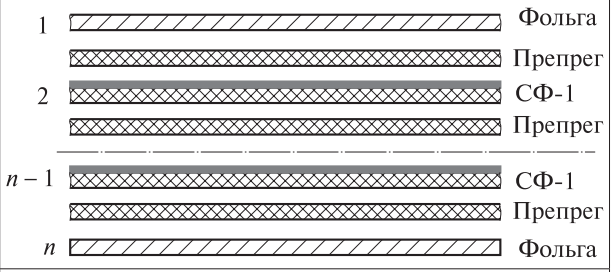
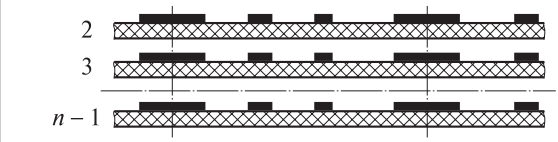
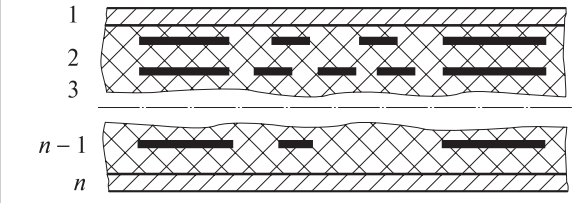
1.10.2. МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ С МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Этапы изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий приведен в табл. 1.17.

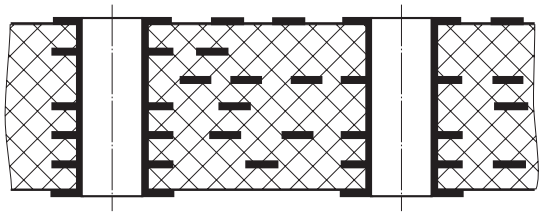
Многослойные ПП с металлизацией сквозных отверстий получили наибольшее применение в производстве ЭМ первого уровня. В классической (базовой) конструкции МПП (см. табл. 1.6) металлизированные отверстия электрически соединяют проводящие рисунки всех слоев при наличии в каждом слое в зоне металлизированного отверстия КП, к которой подходит печатный проводник.

Таблица 1.17

Изготовление МПП без внутренних межслойных переходов методом металлизации сквозных отверстий

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала; эскиз заготовки
1	Раскрой односторонне фольгированных заготовок, препрега и медной фольги	Необходимое число заготовок слоев МПП с технологическими полями 
2	Получение проводящего рисунка внутренних слоев МПП химическим методом	Наличие проводящего рисунка с КП в зоне будущих сквозных отверстий на каждом слое, знаков ориентации слоев 
3	Сборка заготовок слоев МПП в пакет. Прессование пакета под действием давления и температуры. Обеспечение точности совмещения слоев по знакам ориентации	Монолитная двусторонне фольгированная заготовка  Слои 1 и *n* не имеют проводящего рисунка

Окончание табл. 1.17

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала; эскиз заготовки
4	Получение проводящего рисунка на наружных слоях (1 и *n*), сверление и металлизация сквозных отверстий комбинированным позитивным методом, который является типовой технологией изготовления ДПП на диэлектрическом основании. Контроль качества металлизации отверстий. Нанесение паяльной маски	Готовая МПП с точным совмещением контактных площадок в зоне каждого металлизированного отверстия  Упрощенный (стандартный) проводящий рисунок на наружных слоях. Слои земли, питания, сигнальные и экранные — внутри МПП. Паяльная маска на наружных слоях

При наличии в МПП 10 слоев и, например, 1000 сквозных отверстий образуется 10 000 зон контакта в виде цилиндрических поясков перехода слоя металлизации отверстия к плоской КП проводящего рисунка каждого слоя. Таким образом, электрические соединения образуются только в зоне сквозных металлизированных отверстий (см. табл. 1.17), а их большое число уменьшает электрическую надежность межслойных соединений.

Ниже приведены технологические операции производства МПП и используемое оборудование (номера на эскизах соответствуют используемому оборудованию).

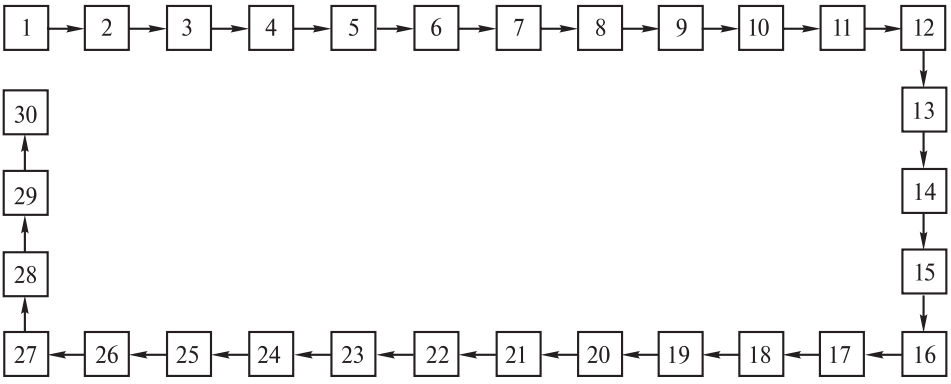
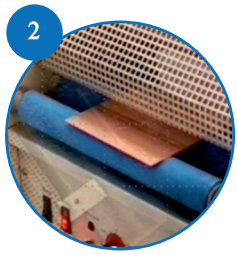
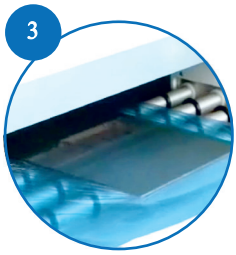
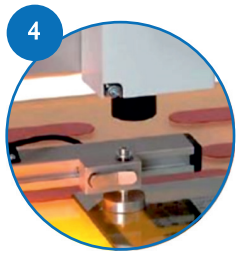
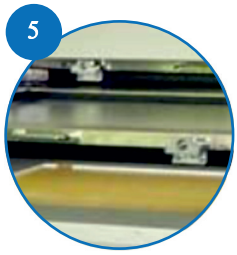
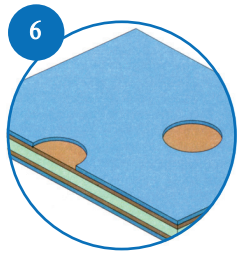
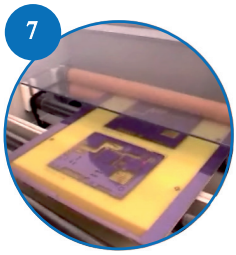
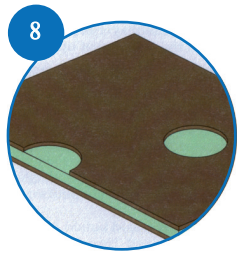
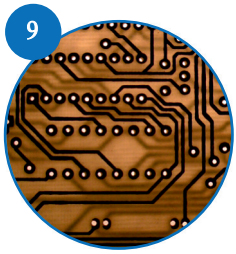
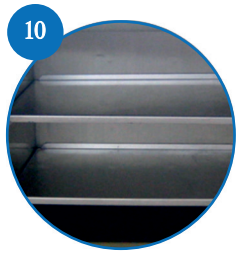
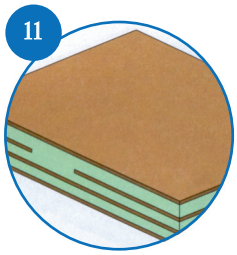
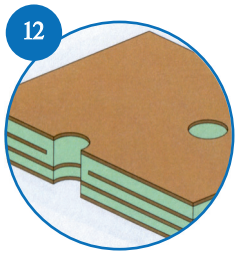
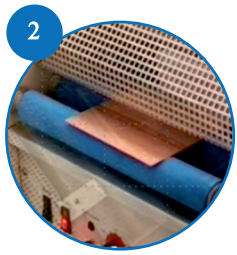
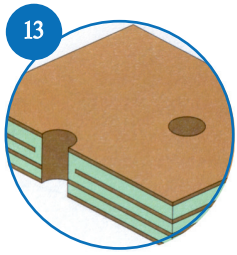
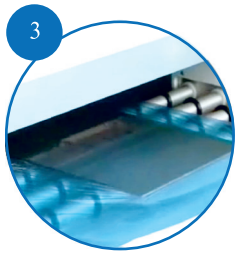
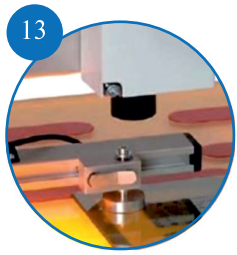
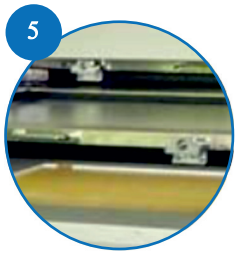
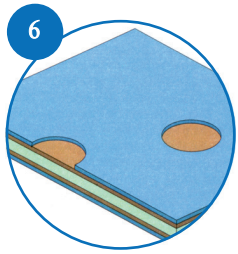
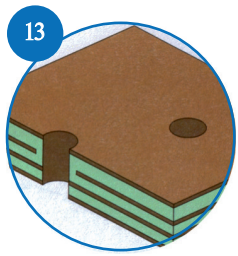
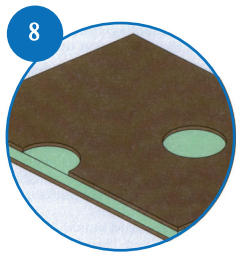
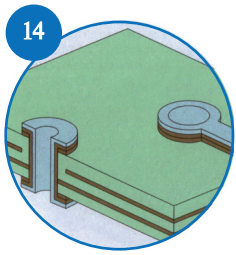
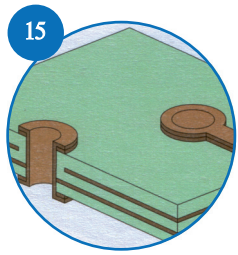
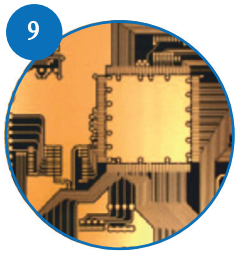
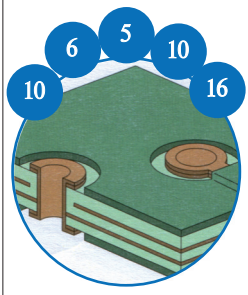
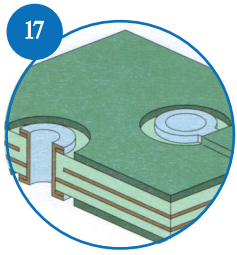
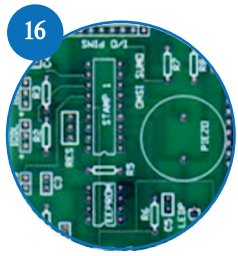
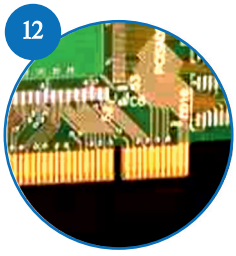
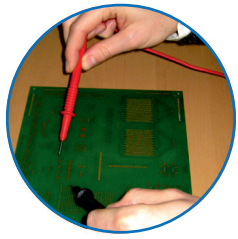


Рис. 1.32. Маршрут производства МПП
(источник: www.ostec-group.ru):
1–30 — последовательность технологических операций

Операция	Иллюстрация	Операция	Иллюстрация
Операции			
1. Нарезка заготовок		2. Зачистка поверхностей	
3. Ламинирование фоторезиста		4. Базирование фотошаблона	
5. Экспонирование фоторезиста		6. Проявление фоторезиста	
7. Травление по фоторезисту		8. Удаление фоторезиста	
9. Контроль вытравленного рисунка		10. Сушка слоев	

11. Прессование слоев МПП		12. Сверление сквозных отверстий	
13. Зачистка поверхностей		14. Прямая металлизация сквозных отверстий	
15. Ламинирование фоторезиста		16. Базирование фотошаблона	
17. Экспонирование фоторезиста		18. Проявление фоторезиста	
19. Гальваническое меднение сквозных отверстий, осаждение металлорезиста		20. Удаление фоторезиста	

21. Травление рисунка		22. Удаление металлорезиста	
23. Контроль вытравленного рисунка		24. Нанесение композиции для маски, сушка, экспонирование, проявление, термодубление	
25. Нанесение финишных покрытий		26. Маркировка	
27. Фрезерование сложного контура		28. Финишная отмывка плат от технологических загрязнений	
29. Контроль по признакам внешнего вида		30. Электрический контроль на обрыв цепей и короткое замыкание	

Оборудование			
1. Гильотинные ножницы NE-CUT		2. Зачистная машина RBM300 BLS	
3. Ламинатор RLM 419p		4. Установка автоматического совмещения Expo-Aligner	
5. Установка экспонирования SEM M8K2		6. Конвейерная установка DL 500	
7. Конвейерная установка DL 500		8. Конвейерная установка DL 500	
9. Стереоувеличитель Mantis Elite		10. Сушильный шкаф Source	

11. Пресс RMP210		12. Сверлильно-фрезерный станок CNC-1	
13. Установка металлизации COMPACTA L40 ABC 2Cu		14. Конвейерная установка DL 500	
15. Установка JET-34D		16. Ручная установка трафаретной печати LSP-6070HP	
17. Установка металлизации COMPACTA L30 ABC		18. Ванна УЗ отмывки S-Power	

Проводящий рисунок на внутренних слоях МПП при отсутствии внутренних межслойных переходов (табл. 1.6) получают на односторонне фольгированном диэлектрике химическим методом (см. табл. 1.8). После химико-механической обработки слои собирают в пакет с установкой между ними слоев плетеной стеклоткани (препрега), пропитанной эпоксидной смолой, находящейся в состоянии неполного отверждения. Толщина слоев препрега должна быть в 2 раза больше толщины слоя меди проводящего рисунка внутренних слоев, что гарантирует надежное заполнение смолой всех пустот в процессе прессования пакета.

Учитывая анизотропные свойства стеклоткани, меньшее растяжение по нитям основы и большее по нитям утка́, требуется взаимно перпендикулярная ориентация слоев препрега и заготовок с проводящим рисунком. Это позволяет уменьшить деформацию пакета после прессования. Этому же способствуют близкие по величине площади покрытия медью в проводящем рисунке внутренних слоев и применение заготовок фольги для наружных слоев МПП с установкой их на прокладку из препрега (табл. 1.17, этап 1).

Таким образом, после операции прессования пакета получается двусторонне фольгированная заготовка, аналогичная заготовке ДПП (табл. 1.17, этап 3). Дальнейшее изготовление МПП целесообразно проводить по технологии комбинированного позитивного метода (см. табл. 1.9).

Операция сверления сквозных переходных отверстий в пакете МПП требует особого внимания, минимальные диаметры отверстий находятся в пределах 0,2...0,6 мм, в процессе сверления твердосплавные сверла с четырехгранной заточкой преодолевают сопротивление материалов: медная фольга ($h_ф$ равно 9;18; 20; 35; 50 мкм), стеклоткань (переплетенные с различной плотностью нити основы и утка́), отвержденная эпоксидная смола препрега и диэлектрика внутренних слоев. При этом прохождение сверлом этих материалов повторяется в соответствии с числом слоев и заготовок МПП в обрабатываемом пакете.

Просверленные отверстия имеют характерные дефекты:

заусенцы на входе и выходе сверла из пакета и отслоение фольги;

наволакивание смолы на стенки отверстия из-за нагрева зоны сверления до 350 °С;

«гвоздевой эффект» — развальцовка торцев КП внутренних слоев МПП;

смещение оси отверстия от заданной координаты на входе и выходе сверла.

Дефекты устраняются при подготовке и в процессе операции сверления или последующей очисткой отверстий в ходе технологической операции, входящей в ТП изготовления МПП. Для того чтобы уменьшить наличие заусенцев, снизу в пакете ПП размещают лист прессованного

картона, а сверху, после установки пакета на столе сверлильного станка, — лист тонкой металлической фольги. Просверленная фольга выполняет роль направляющей втулки, препятствующей уходу сверла при сверлении пакета заготовок. Центрирование сверл может быть обеспечено также применением специальных направляющих втулок с усилием прижима их в зоне отверстия в пределах 1,5...2,0 МПа.

Наволакивание смолы и гвоздевой эффект минимизируют специальными заточками режущих кромок сверл, соблюдением диапазона подач рабочего (s = 0,02...0,05 мм/об.) и обратного хода (ускоренное извлечение) инструмента, работой только острозаточенными сверлами (период стойкости — 1000...1200 отверстий). Температуру сверл снижают с помощью направленного воздушного охлаждения.

Поскольку полностью исключить наволакивание смолы на торцы просверленных КП внутренних слоев МПП не представляется возможным, в ТП изготовления введена операция очистки просверленных сквозных отверстий.

Известно несколько способов очистки: подтравливание в смеси серной и плавиковой кислот; перманганатная обработка; плазмохимическая и гидроабразивная очистка. Промышленное применение нашли перманганатная обработка и плазмохимическая очистка.

Перманганатная очистка проводится на конвейерных линиях струйной обработки с растворением смолы в щелочном растворе перманганата калия при температуре 70 °С. В состав линии входят также ванны кондиционирования, восстановления и промывки.

Для *плазмохимической очистки* необходимо специальное стационарное вакуумное оборудование, в котором под действием высокочастотного электрического поля образуется плазма (газы — кислород, фреон), растворяющая смолу в отверстиях ПП. Процесс сухой, экологически безвредный, однако достаточно дорогой, так как связан с применением и доставкой приведенных газов. Сухое плазменное травление обеспечивает хорошую адгезию меди, осаждаемой в отверстиях МПП. Технологический процесс предусматривает предварительную очистку водопроводной воды и очистку стоков.

Этапы изготовления **МПП с внутренними межслойные переходами** методом металлизации приведены в табл. 1.18.

Отличие технологии изготовления МПП с внутренними межслойными переходами (см. табл. 1.6) заключается только в том, что для изготовления внутренних слоев применяют двусторонне фольгированный диэлектрик (см. табл. 1.18) с образованием проводящего рисунка и металлизацией внутренних переходных отверстий комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.9).

Таблица 1.18

Изготовление МПП с внутренними межслойными переходами методом металлизации сквозных отверстий

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой двусторонне фольгированных заготовок, препрега и медной фольги	Необходимое число заготовок слоев МПП с технологическими полями 1 Фольга Препрег 2 3 СФ-2 Препрег 4 СФ-2 5 Препрег 6 Фольга
2	Получение проводящего рисунка внутренних слоев МПП комбинированным позитивным методом	Проводящий рисунок слоев 2–3 и 4–5 соединен металлизированными переходными отверстиями. Наличие знаков ориентации слоев 2 3 4 5
3	Сборка заготовок слоев МПП в пакет. Прессование пакета под действием давления и температуры. Обеспечение точности совмещения слоев по знакам ориентации	Монолитная двусторонне фольгированная заготовка 1 2 3 4 5 6 Слои 1 и 6 не имеют проводящего рисунка. Внутренние межслойные переходы заполнены смолой препрега
4	Получение проводящего рисунка на наружных слоях (1 и 6), сверление и металлизация сквозных отверстий комбинированным позитивным методом по технологии ДПП. Контроль качества металлизации отверстий. Нанесение паяльной маски	Готовая МПП с точным совмещением контактных площадок в зоне сквозных металлизированных отверстий Межслойные переходы сокращают длину сигнальных цепей проводящего рисунка. Внутренние слои: сигнальные цепи, шины земли, питания, экраны (экранная сетка). Паяльная маска на наружных слоях

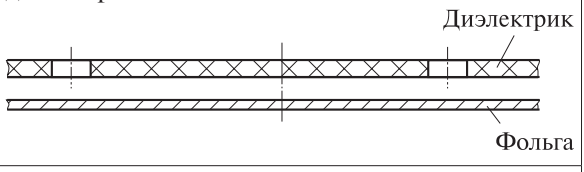
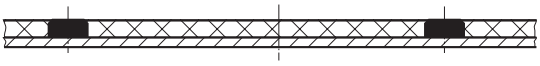
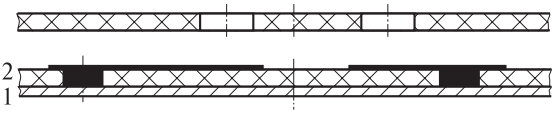
1.10.3. МНОГОСЛОЙНАЯ ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА ПОСЛОЙНОГО НАРАЩИВАНИЯ

В **МПП послойного наращивания** (см. табл. 1.6) все проводящие слои (не более пяти) электрически соединены последовательно с помощью сплошь металлизированных переходных отверстий. Исходными заготовками для изготовления такой ПП являются: лист медной фольги стандартной толщины (первый слой) и лист перфорированного диэлектрика: стеклоткань, полиимидная пленка (табл. 1.19, этап 1). Отверстия в диэлектрике могут быть получены травлением, пробивкой, прожиганием лазерным лучом или сверлением. Фольгу и перфорированный диэлектрик приклеивают друг к другу, затем из отверстий химико-механическим способом удаляют остатки клея и гальваническим методом наращивают в отверстиях слой меди. Сплошная фольга первого слоя служит катодом.

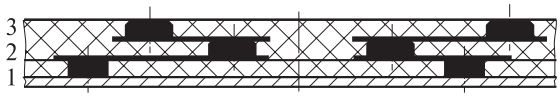
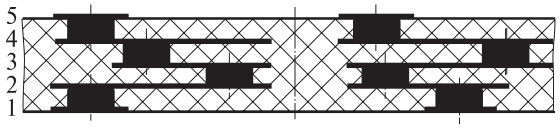
Осажденный в переходных отверстиях слой меди должен выступать над поверхностью диэлектрика (табл. 1.19, этап 2). Выступающую часть столбиков меди выравнивают шлифованием до уровня плоскости слоя диэлектрика. Эта операция трудоемкая и плохо механизирована.

Таблица 1.19

Изготовление МПП послойного наращивания

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой медной фольги нефольгированного диэлектрика. Перфорирование диэлектрика	Слой медной фольги и слой перфорированного диэлектрика 
2	Склеивание фольги и диэлектрика, удаление клея из отверстий в диэлектрике, гальваническое наращивание слоя меди в отверстиях (слой фольги — катод)	Отверстия в диэлектрике заполнены сплошным слоем гальванически осажденной меди, выступающей за диэлектрик 
3	Химико-механическое вытравливание поверхности диэлектрика. Получение проводящего рисунка слоя 2 электрохимическим методом. Подготовка следующего слоя перфорированного диэлектрика	Слой фольги 1 остается сплошным, на слое 2 образован проводящий рисунок, следующий слой диэлектрика перфорирован 

Окончание табл. 1.19

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
4	Приклеивание перфорированного диэлектрика к пакету слоев 1 и 2. Гальваническое наращивание меди в отверстиях очередного слоя диэлектрика. Далее повторение операций наращивания последующих проводящих слоев	Образование следующих проводящих слоев. Слой фольги 1 выполняет роль катода на гальванических операциях 
5	Создание проводящего рисунка на слое фольги 1. Удаление технологического поля, нанесение паяльной маски	Многослойная ПП со сплошными металлизированными межслойными переходами, обепечивающими надежное соединение слоев 

Проводящий рисунок следующего слоя получают электрохимическим методом (см. табл. 1.6) путем осаждения слоя $h_{\text{п.м}}$, гальванического наращивания проводящего рисунка и травления слоя $h_{\text{п.м}}$ с пробельных мест. Для получения последующих слоев приведенные выше операции повторяются (приклеивание перфорированного диэлектрика и т. д.). Проводящий рисунок в фольге первого слоя получают на последнем этапе изготовления платы химическим методом (табл. 1.19, этап 5).

Таким образом, МПП послойного наращивания имеет высокую надежность электрического соединения слоев с помощью сплошь металлизированных переходных отверстий, обеспечивает возможность получения межслойных соединений в любом свободном месте монтажного поля ПП и, как следствие, высокую плотность печатного монтажа.

Недостаток данной МПП — только последовательное изготовление проводящих слоев, наличие операции очистки переходных отверстий после операций приклеивания и шлифования диэлектрика с выступающими медными столбиками. Такие МПП предназначены только для монтажа компонентов (КМП), монтируемых на поверхность платы, и могут быть применены для изготовления ЭВС высокой надежности (бортовая аппаратура).

Тесты к лекции 1.10

1. ***Многослойная ПП попарного прессования предназначена для монтажа:***

а) чип-компонентов и ИМС с планарными выводами;

б) выводных компонентов и ИМС с планарными выводами;

в) только чип-компонентов.

2. ***Что такое препрег?***

а) плетеное стекловолокно, пропитанное эпоксидной смолой;

б) клей для склеивания слоев ПП;

в) затвердевшая эпоксидная смола.

3. ***Выберите верное утверждение:***

а) операцию сверления сквозных отверстий в МПП для удаления стружки, возникшей при сверлении, проводят сразу после прессования пакета;

б) операцию сверления сквозных отверстий в МПП проводят до прессования пакета с помощью реперных знаков;

в) операцию сверления сквозных отверстий в МПП проводят только после получения печатного рисунка на наружних слоях ПП.

4. ***Для чего нужна операция очистки просверленных сквозных отверстий?***

а) для устранения дефектов, возникших при сверлении, и подготовки стенок отверстия к металлизации;

б) для устранения дефектов, возникших при сверлении и подготовке стенок отверстия к металлизации;

в) для удаления остатков растворов травления.

5. ***Что является исходными заготовками для изготовления МПП послойного наращивания?***

а) лист медной фольги стандартной толщины и лист перфорированного диэлектрика (стеклоткань или полиимидная пленка);

б) готовые ОПП и ДПП с монтажем КМП;

в) фольгированный стеклотекстолит и адгезивные материалы.

1.11. АНАЛИЗ ГИБКО-ЖЕСТКИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: анализ технологических процессов изготовления гибко-жестких печатных плат. Обзор используемых материалов для производства основания, проводящего рисунка, а также соединительных материалов. Изучение процесса соединения гибких и жестких частей в единую структуру. Описание особенностей получения и металлизации сквозных отверстий в ГЖПП, а также особенностей пайки.

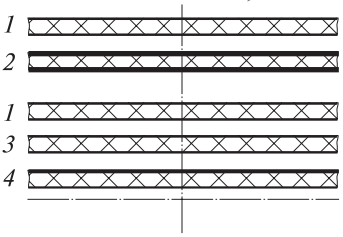
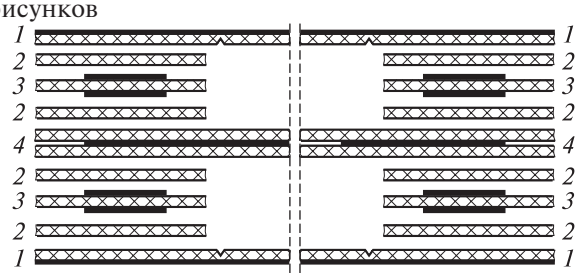
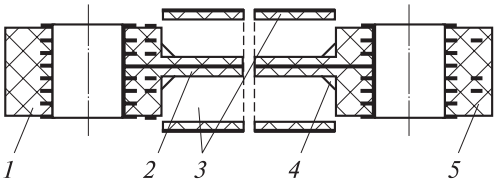
Гибко-жесткая ПП (ГЖПП) (табл. 1.20) представляет собой два или несколько жестких участков, электрически и конструктивно соединенных между собой гибкими печатными проводниками (шлейфами). В электронном модуле второго уровня жесткие участки (модули первого уровня) с навесными компонентами могут размещаться на разных уровнях в дву- и трехмерном пространстве за счет гибкости токоведущих шлейфов. В составе ГЖПП отсутствуют внутренние соединители-разъемы, так как гибкие токоведущие шины опрессованы вместе со слоями жестких участков и электрически соединены с ними с помощью сквозных металлизированных отверстий.

Наличие в плате гибких и жестких участков требует применения большей номенклатуры (табл. 1.20, этап 1) исходных конструкционных материалов по сравнению с материалами ОПП, ДПП и МПП. Так, проводящий рисунок гибких участков платы (шлейфов) изготовляют из односторонне фольгированного ($h_ф$ равно 18; 35 мкм) полиимида химическим методом. Гибкие участки могут состоять из нескольких слоев, соединяемых в монолит прессованием с применением акрилового или полиимидного адгезива.

В состав пакета перед прессованием вводят тонкую покровную пленку полимера (например, полиимида или полиэфира), герметично с двух сторон защищающую гибкую часть платы (табл. 1.20, этап 2). Толщина слоя адгезива покровной пленки должна быть оптимальной, чтобы опрессовать проводящий рисунок без воздушных включений. Для толщины проводящего рисунка 18 мкм достаточно толщины слоя адгезива 25 мкм, для 35 мкм — 50 мкм адгезива. Покровную пленку наносят на гибкую часть платы до сборки и прессования ее в составе пакета жестких участков (табл. 1.20, этап 3).

Таблица 1.20

Изготовление гибко-жестких печатных плат

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Получение заготовки из гибкого фольгированного полиимида *2*, полиимидной покровной пленки *1* с адгезивом, препрега *3*, ламината *4* или фольгированного диэлектрика для внутренних слоев жесткой части ПП и ужесточителя	Заготовки всех слоев, входящих в состав ГЖПП  *1* Покровная пленка *2* Фольгированный полиимид гибкой части *1* Покровная пленка *3* Препрег *4* Ламинат внутренних жестких слоев, фольгированный диэлектрик
2	Получение проводящего рисунка на гибкой части ПП и на заготовках слоев жесткой части химическим методом. Опрессовка гибкой части покровной пленкой с двух сторон	*1–2–3* — гибкая часть ПП с проводящим рисунком и герметичным покрытием; *4* — заготовки внутренних слоев жесткой части с проводящим рисунком *1* *2* *3* *4*
3	Сборка слоев ГЖПП в пакет со взаимной ориентацией по реперным знакам или базовым отверстиям. Установка в пакет ужесточителей *1* с прорезями (канавками) препрега *2*, жестких слоев с проводящим рисунком *3*, гибкой части платы *4*. Прессование пакета (*p*, *T*)	Заготовки всех слоев ГЖПП собраны в пакет с обеспечением взаимной ориентации проводящих рисунков  *1* *2* *3* *2* *4* *2* *3* *2* *1*
4	Сверление и металлизация сквозных отверстий в жестких частях ПП с одновременным получением проводящего рисунка на наружных слоях ПП. Освобождение гибкой части ПП от ужесточителя путем вскрытия окон по прорезям. Нанесение силиконовых валиков на стыках гибкой и жесткой частей ПП	Гибко-жесткая ПП с освобожденной от ужесточителя гибкой частью; *1* и *5* — жесткая часть; *2* — гибкая часть; *3* — удаляемый ужесточитель; *4* — силиконовый валик  *1* *2* *3* *4* *5*

Для жестких участков ГЖПП применяют фольгированный стеклотекстолит, аналогичный материалам ДПП и МПП. Структура жестких участков соответствует структуре МПП с металлизацией сквозных отверстий, поэтому проводящий рисунок внутренних слоев при отсутствии межслойных переходов получают химическим методом.

Опрессованную гибкую часть ГЖПП и заготовки слоев жестких участков собирают в пакет с установкой между заготовками слоев препрега, который после прессования обеспечит монолитную структуру ГЖПП. Количество слоев жестких частей ПП должно быть одинаково, чтобы избежать разновысотности собранного пакета и обеспечить равные условия прессования (табл. 1.20, этап 3) всех участков ПП.

Взаимная ориентация проводящих рисунков слоев ПП (и соосность КП) осуществляется с помощью реперных знаков, точное расположение которых перенесено с фотошаблонов слоев. Эта применяемая в промышленности система ориентации без базовых отверстий называется MAS-LAM и обеспечивает точность совмещения до 5 мкм.

Наличие в собранном пакете гибкой части из тонкого фольгированного полиимида с тонкой покровной пленкой может привести к смещению проводящего рисунка шлейфа при сборке и прессовании. Поэтому в состав пакета включены два наружных слоя ужесточителя (см. табл. 1.20, этап 3), изготовленных из фольгированного диэлектрика. Для того чтобы обеспечить гибкость шлейфа готовой ГЖПП, в ужесточителе предусмотрены окна над ее гибким участком. В связи с этим в необходимых местах до сборки в ужесточителе на внутренней стороне, обращенной к пакету, прорезают канавки.

На окончательной стадии изготовления ГЖПП канавки прорезают на внешней стороне ужесточителя и, вскрыв окно, удаляют жесткий участок, освобождая гибкую часть ПП (табл. 1.20, этап 4).

При изготовлении ГЖПП возникают дополнительные трудности при сверлении и металлизации сквозных отверстий в жесткой многослойной части ПП. В отличие от обычных МПП приходится сверлить и материалы гибкой части: фольгированный полиимид, полиимид покровных пленок, слои адгезива. Кроме «гвоздевого эффекта», при прохождении сверлом слоев фольги (расплющивание торцев КП) аналогичный эффект возникает в результате деформации и смещения пленки полиимида в сторону адгезивного слоя. К наволакиванию эпоксидной смолы добавляется наволакивание адгезива на стенки просверленных отверстий.

Эффективным методом очистки отверстий от наволакивания смолы и адгезива является плазмохимическая очистка в среде ионизированных газов (кислород, фреон). Плазма растворяет слои наволакивания на стенках отверстий и подтравливает материалы диэлектриков на глубину 5–10 мкм, оголяя торцы КП внутренних слоев. Подтравливание увеличивает площадь контакта слоя металлизации отверстий с КП проводящего рисунка. Недостатком метода очистки является необходимость удаления продуктов растворения из отверстий малого диаметра (0,2...0,6 мм).

На последнем этапе изготовления ГЖПП получают проводящий рисунок на наружных слоях жестких участков с одновременной металлизацией сквозных отверстий. Это обеспечивает типовой комбинированный позитивный метод. При этом качество металлизированных отверстий определяет надежность ГЖПП как коммутационной структуры, позволяющей электрически соединить модули первого уровня (жесткие участки ГЖПП с навесным монтажом) в трехмерном пространстве ЭВС, не прибегая к традиционным разъемам.

Передовые производства и фирмы переходят от предварительной химико-гальванической металлизации отверстий к технологии прямой металлизации. Диспергированный на поверхности диэлектриков (стеклоткань, полиимид, адгезив) палладий электропроводен и образует тонкую сплошную пленку, на поверхность которой гальванически наращивается слой меди заданной толщины (технология *System-S* фирмы I-Kem International).

Следует отметить, что ГЖПП не технологичны для горячего лужения с помощью HALS-процесса мест пайки проводящего рисунка с навесными компонентами. Гибкие участки мешают погружению ПП в горячий припой и снятию его излишков пневмоножами при извлечении ПП из ванны с припоем. Поэтому на поверхности проводящего рисунка, предназначенные для пайки, наносят покрытия, обладающие способностью к смачиванию припоем и длительно ее сохраняющие. Это может быть гальванически осажденный и оплавленный металлорезист (SnPb) и иммерсионные покрытия: NiAu, NiPd, NiPdAu, Imm Ag и др. Толщина иммерсионных покрытий не превышает 1 мкм.

Рассмотренные вопросы технологии ГЖПП иллюстрируют сложность, дороговизну, трудоемкость их изготовления и необходимость применения большой номенклатуры различных материалов. Однако их применение в модулях ЭВС необходимо, оно позволяет упростить традиционную компоновку аппаратуры, снизить массу конечного изделия, снизить трудоемкость монтажа и повысить его плотность.

Тесты к лекции 1.11

1. ***Что такое ГЖПП?***

а) несколько жестких участков с закрепленными на них электронными компонентами, электрически и конструктивно соединенных между собой гибкими печатными проводниками (шлейфами);

б) то же, что и гибкий печатный кабель;

в) совокупность гибких печатных кабелей (шлейфов) и закрепленных на них электрических компонентах.

2. ***Какой материал используют в качестве основания гибких частей ГЖПП?***

а) фольгированный полиимид;

б) фольгированный стеклотекстолит;

в) адгезив.

3. ***Для чего используют реперные знаки?***

а) для взаимной ориентации проводящих слоев ГЖПП;

б) при производстве ГЖПП их не используют;

в) для маркировки отверстий в ГЖПП.

4. ***Для чего на этапе сборки ГЖПП в состав пакета включают два наружних слоя ужесточителя?***

а) для предотвращения смещения проводящего рисунка шлейфа при сборке и прессовании;

б) для получения жестких участков ГЖПП;

в) для того чтобы предотвратить излишнюю гибкость шлейфа готовой ГЖПП.

5. ***Для чего необходима плахмохимическая очистка в среде ионизированных газов?***

а) для очистки от наволакивания эпоксидной смолы и адгезива стенок отверстий ГЖПП;

б) для очистки ГЖПП от флюса;

в) для растворения полиимида на стенках отверстий ГЖПП.

1.12. ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МАКЕТИРОВАНИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Цель лекции: ознакомление с методами получения коммутационных структур в лабораторных условиях и на лабораторном оборудовании для макетирования и прототипирования печатных плат.

Печатная плата является основой любого изделия электронной аппаратуры. Производство ПП — технологически сложный процесс, требующий использования дорогого оборудования. Внедрение таких технологий при производстве уникальных или единичных экземпляров КС невозможно.

При необходимости в частных или учебных целях возможным решением является использование КС собственного производства; учитывая сложность технологии производства, возможно использование макетных ПП.

Макетная ПП представляет собой универсальную ПП, предназначенную для сборки и испытаний ИЭТ. Это могут быть ПП с множеством равномерно расположенных сквозных металлизированных отверстий, которые при сборке устройства спаивают между собой проводящими перемычками. Такие ПП часто называются «плата универсальная». Существуют также макетные ПП для монтажа выводных компонентов в гнездо без пайки. Беспаечные макетные ПП изготовляют из пластика, они состоят из матрицы контактных посадочных мест с расстоянием между ними 2,54 мм, которое является стандартным шагом для производимых в мире электронных компонентов. С помощью таких ПП можно быстро осуществить сборку и отладку электронной схемы с частой заменой радиодеталей без использования паяльника, что во многом ускоряет процесс разработки и отладки. Минусом таких ПП является ненадежность беспаяного соединения и невозможность тестирования КМП. Кроме того, реализация устройств с высокой плотностью монтажа на макетных ПП часто невозможна.

Современные устройства часто содержат схемотехнически и конструкционно сложные модули, которые необходимо тестировать на соответствие требуемым характеристикам перед запуском в серийное производство. Несомненным преимуществом любого предприятия, занимающегося разработкой изделий электронной техники, является наличие собственной технически оснащенной лаборатории, позволяющей сотрудникам создавать опытные образцы модулей ИЭТ на различных этапах проектирования в самые сжатые сроки.

Получение даже самых простых, односторонних или двусторонних ПП без металлизации отверстий, требует создания и отработки ТП малосерийного производства. При этом должна быть уверенность в том, что при

создании прототипа ПП будет сэкономлено время и осуществлен переход от принципиальной схемы до тестирования готового устройства в течение одного-двух рабочих дней, в противном случае обустройство лаборатории не имеет смысла.

К методам лабораторного изготовления коммутационных структур можно отнести скрайбирование, лазерно-утюжный метод, фотолитографический метод, лазерную гравировку и фрезерование.

Лазерно-утюжный метод, или лазерно-утюжная технология (ЛУТ), очень прост в реализации и не требует специализированного оборудования, однако вероятность получения четкого рисунка даже класса точности 3 без повреждения проводников невысокая. У фотографического метода, как правило, качество и точность рисунка выше. Однако трудоемкость данного метода также повышается по сравнению с ЛУТ, так как метод содержит большее число операций.

Скрайбирование, лазерная гравировка и фрезерование подразумевают удаление проводящего слоя (или полное удаление фольгированного стеклотекстолита) с пробельных мест проводящего рисунка. Скрайбирование — механическая резка фольгированного стеклотекстолита — занимает очень много времени, что делает его применение обоснованным только в случае несложных КС. Самым точным из этих методов является лазерная гравировка, но сложность и цена оборудования в этом случае гораздо выше по сравнению с другими методами. Автоматизированное фрезерование несколько уступает лазерной гравировке в качестве и точности получаемого проводящего рисунка, однако данный метод легче реализовать, что делает его популярнее. Неавтоматизированное фрезерование дает низкую точность при высоких трудозатратах. Автоматизированные методы заключаются в том, что топология ПП импортируется из специализированной CAD (например, AltiumDesigner) и обрабатывается в ПО станка лазерной гравировки или фрезерования.

В качестве примера рассмотрим оборудование фирмы LPKF (www.lpkf.ru) и некоторые инструменты (рис. 1.33):

– фрезерный станок LPKF ProtoMat S103;
– станок для трафаретной печати LPKFProtoPrintS;
– станок для экспонирования LPKFUV-Exposure;
– конвекционную печь LPKFProtoFlowS;
– полуавтоматический установщик компонентов SMDLPKFProtoPlaceS;
– раму LPKFZelFlexQR.

Для получения рисунка проводящих слоев может быть использован фрезерный станок (рис. 1.34). На этом же станке выполняют операции обработки контура ПП и получение трафарета для нанесения паяльной пасты.

Данный станок является полностью автоматизированным. На встроенный вакуумный стол, позволяющий предотвратить перемещение заготовки, помещают фольгированный стеклотекстолит. Толщину материала стеклотекстолита и материала проводника измеряются автоматически, что позволяет расчитать необходимую глубину фрезерования. Фрезерный двигатель и датчик глубины фрезерования самоочищающиеся.

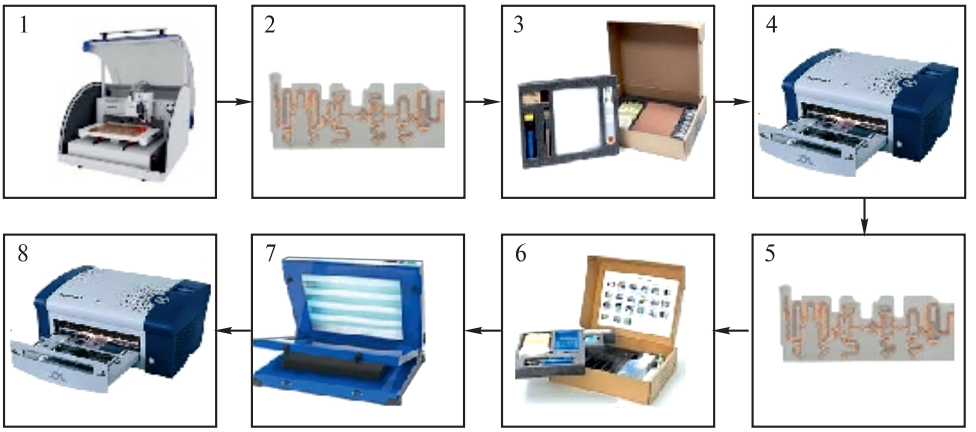


Рис. 1.33. Процесс изготовления макета ПП из фольгированного текстолита с использованием комплексного лабораторного производственного оборудования LPRF:
1 — фрезерный станок LPKF ProtoMat S103; 2 — прототип печатной платы без металлизации; 3 — набор для металлизации сквозных отверстий LPKF ProConduct; 4 — конвекционная печь для бессвинцовой пайки LPKF ProtoFlow S; 5 — прототип печатной платы с металлизацией; 6 — наборы для нанесения защитной паяльной маски и маркировки LPKF ProMask и ProLegend; 7 — станок для экспонирования LPKF UV-Exposure; 8 — конвекционная печь для бессвинцовой пайки LPKF ProtoFlow S

Максимальная рабочая зона станка 229 мм в ширину 305 мм в длину. Максимальная толщина 8 мм. Механическое разрешение 0,508 мкм. Станок оснащен 20 позициями сменного инструмента, который автоматически заменяется в процессе работы. Также имеется функция автоматического нанесения паяльной пасты на КП.

Металлизация отверстий проводится с помощью ручного инструмента (металлические заклепки) или оборудования для химического осаждения меди (материала проводника для металлизации отверстий).

Конвекционная печь ProtoFlow S служит для бессвинцовой пайки оплавлением припоя. Установка также позволяет осуществить ряд других операций, таких как сушка компонентов, монтируемых на ПП, запекание клеящих веществ, упрочнение паст при помощи сквозной металлизации.

Рис. 1.34. Общий вид фрезерного станка LPKFProtoMatS103

С помощью ЖК-дисплея и простой клавиатуры (рис. 1.35) можно выбрать множество заранее запрограммированных профилей процессов. Все параметры профиля, такие как температура и продолжительность процесса, могут быть запрограммированы индивидуально для отдельных стадий

подогрева и оплавления. Профили определяются по именам, заданным пользователем.

Благодаря многопроцессорному контроллеру обеспечивается равномерное распределение теплоты по всей площади ПП. С помощью USB-контроллера модуль записи профилей (до четырех необязательных дополнительных датчиков) обеспечивает мониторинг и запись значений температуры на ПП или отдельных компонентах. Это же USB-соединение обеспечивает удобный способ создания и программирования профилей процессов с помощью компьютера.

На передней панели устройства в правом нижнем углу расположен выключатель питания. Когда питание включено, выключатель подсвечен. Для включения или выключения устройства достаточно одного нажатия на выключатель. Рядом с выключателем находится USB-порт подключения типа A.

Необходимая информация отражается на четырехстрочном ЖК-дисплее, выбор в меню проводится с помощью клавиатуры управления, стрелки которой перемещают в требуемом направлении курсор на ЖК-дисплее. Среди доступных пунктов меню — выбор методов работы и настройка параметров.

Внутри выдвижного ящика (см. рис. 1.35) располагается рабочее пространство для установки ПП. Алюминиевые накладки (рис. 1.36) скользят по

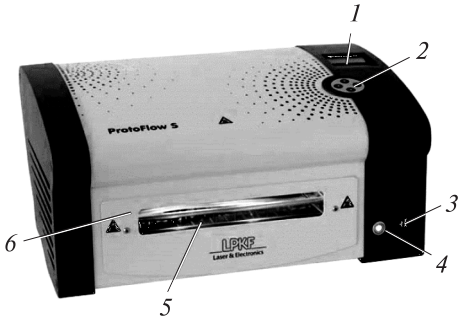


Рис. 1.35. Общий вид установки конвекционной печи ProtoFlow S

1 — ЖК-дисплей; *2* — клавиатура управления; *3* — USB-контроллер; *4* — выключатель питания; *5* — смотровое окно; *6* — выдвижной ящик

Рис. 1.36. Моторизированный выдвижной ящик:

1 — алюминиевые накладки для крепления платы; *2* — вентиляторы; *3* — стержни

двум стержням, что позволяет адаптировать крепежную систему к различным размерам печатной ПП. Печатную плату необходимо устанавливать либо на алюминиевые накладки, либо жестко крепить между ними. При поверхностном монтаже компонентов рекомендуется располагать ПП компонентами вверх для исключения их отрыва от ее поверхности и попадания в зону вентиляции. Не рекомендуется паять элементы с корпусами, выполненными из пластика, если в их технических характеристиках не указана возможность пайки при данных высоких температурах (максимальная температура

оплавления 320 °С). Перед открыванием и закрыванием ящика подается предупреждающий звуковой сигнал и выводится сообщение на ЖК-дисплее. Смотровое окошко и внутреннее освещение позволяют в любой момент контролировать процесс.

Два регулируемых вентилятора установлены в нижней части выдвижного ящика. Скорость охлаждения регулируется в диапазоне 0...100 % с шагом 10 %.

Встроенные датчики температуры обеспечивают максимальную оптимизацию процесса оплавления, а USB-порт связи позволяет передавать данные на компьютер для анализа и редактирования.

Установка экспонирования UV Exposure Unit фирмы LPKF — установка настольного типа. Она (рис. 1.37) состоит из основания, на котором располагается синтетическая подложка, на которую помещают заготовку. Ее накрывают стеклом с металлической рамой и плотно закрепляют крепежами.

После проверки правильности установки заготовки через стекло крышку приводят в горизонтальное положение. Далее на панели меню выставляют время работы УФ-ламп. После окончания экспонирования засвеченную заготовку извлекают из устройства.

Установка экспонирования используется в операциях нанесения защитной паяльной маски (рис. 1.38) и маркировки, а также может применяться для экспонирования рисунка с фоторезиста на заготовку при изготовлении ПП фотографическим методом.

Рис. 1.37. Общий вид установки UV Exposure Unit:

1 — основание; *2* — металлическая рама; *3* — крышка; *4* — УФ-лампа; *5* — панель меню; *6* — крепеж; *7* — синтетическая подложка

Установка ProtoPrint S RP представляет собой прецизионный ручной принтер трафаретной печати для нанесения паяльной пасты на КП проводящего рисунка ПП. Паста наносится ракелем путем продавливания через окна трафарета, плотно прилегающего к поверхности платы. Установка (рис. 1.39) состоит из двусторонней копировальной рамки LPKF ZelFlex QR *1*, помещенной на жестком основании *2* с четырьмя регулируемыми ручками опоры *3*. Горизонтальное положение рамы регулируется четырьмя микрометрическими винтами *4*, расположенными по углам основания. Микрометры позволяют провести регулировку по высоте при нанесении пасты на ПП разной толщины.

На одном основании с копировальной рамкой расположен печатный стол *8*, на котором на опорных штифтах *7* или цилиндрических магнитных опорах устанавливается ПП. Ручки юстировки *9* расположены с левой

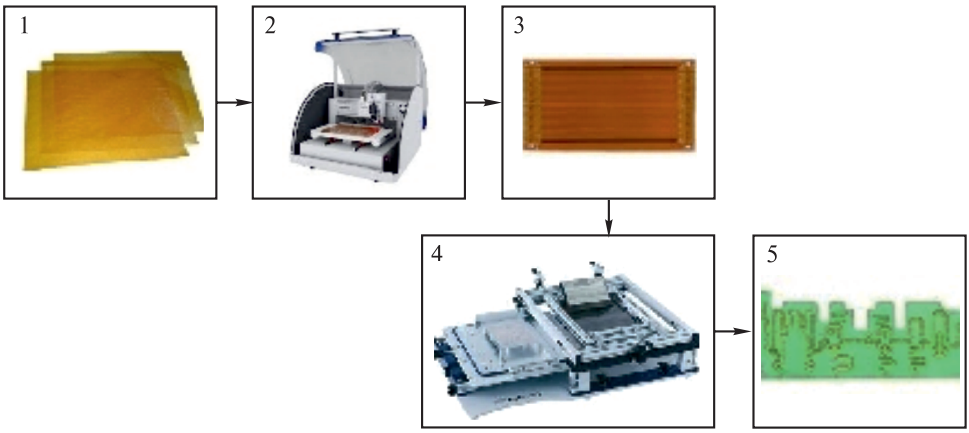


Рис. 1.38. Процесс получения ПП с паяльной маской с использованием комплексного лабораторного производственного оборудования LPRF:

1 — заготовка для трафарета (полиимидная пленка); 2 — фрезерный станок LPKF ProtoMat S103; 3 — полиимидный трафарет; 4 — станок для трафаретной печати LPKF ProtoPrint S RP; 5 — печатная плата с паяльной маской

стороны печатного стола и позволяют юстировать стол по осям *X* и *Y* в диапазоне ±10 мм и ±5° по углу.

После юстировки (выравнивания) положения ПП стол задвигается в зону копировальной рамы *1* (рис. 1.40), закрепленной фиксирующими ручками *3* (см. рис. 1.39), на которой размещен трафарет *2* (см. рис. 1.39). Для фиксации копировальной рамы установка оснащена тремя шарнирно-рычажными зажимами *6* (см. рис. 1.39). Справа от копировальной рамы расположен подъемно-освобождающий рычаг *5* (см. рис. 1.39) для подведения ПП к трафарету.

Производство ПП электронного устройства также предусматривает нанесение на нее паяльной маски и лужение контактных площадок. Данный процесс представлен на рисунке 1.41 и состоит из следующих этапов: получение профиля печатной платы (1), создание коммутационной структуры (2), нанесение паяльной маски (3), вскрытие и лужение контактных площадок на печатной плате (4 и 5).

Существуют компактные установки поверхностного монтажа, которые могут быть размещены на столах или любых других горизонтальных поверхностях. В этом случае в основании располагаются массивные металлические пластины, которые позволяют снизить вибрации, передающиеся как от другого оборудования, так и от работы собственных двигателей.

В качестве примера рассмотрим установку ProtoPlace S, предназначенную для установки компонентов, монтируемых на поверхность печатной платы (КМП). Установка позволяет дозировать паяльную пасту на КП посадочных мест и устанавливать КМП, размещенные россыпью в таре или по номиналам в дисковых ленточных кассетах.

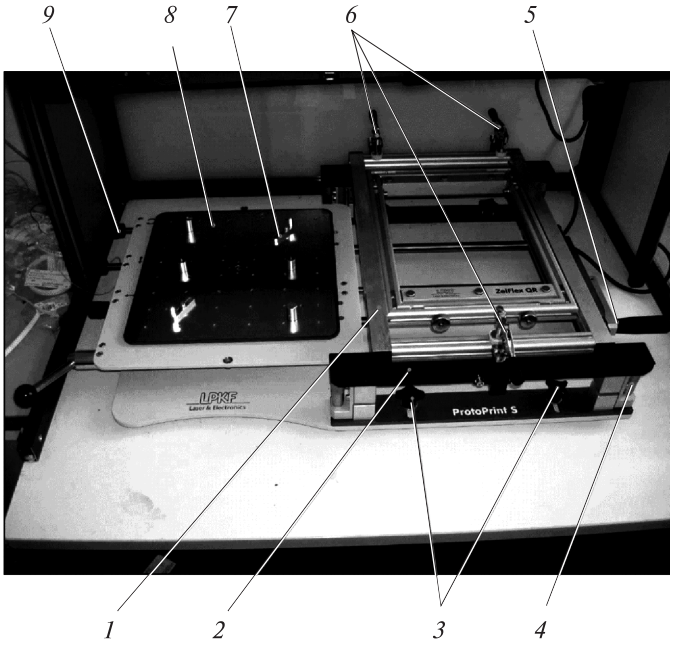


Рис. 1.39. Общий вид установки трафаретной печати ProtoPrint SRP

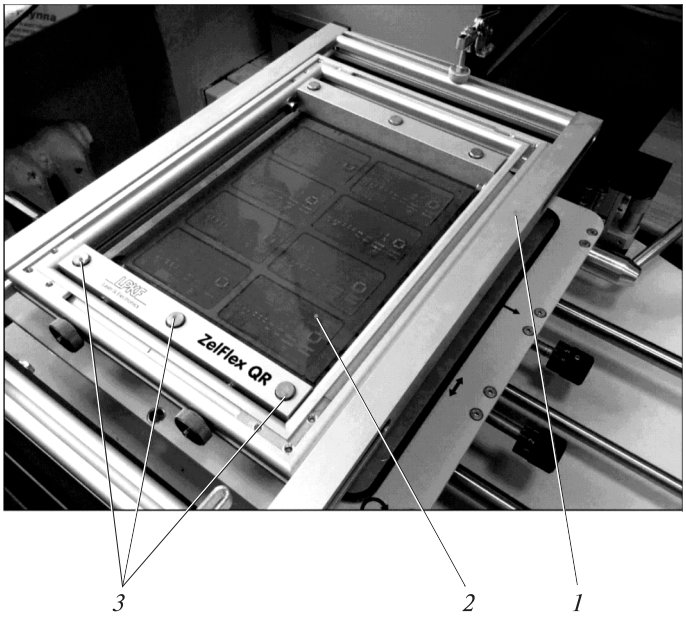


Рис. 1.40. Трафарет и печатный стол в зоне копировальной рамы

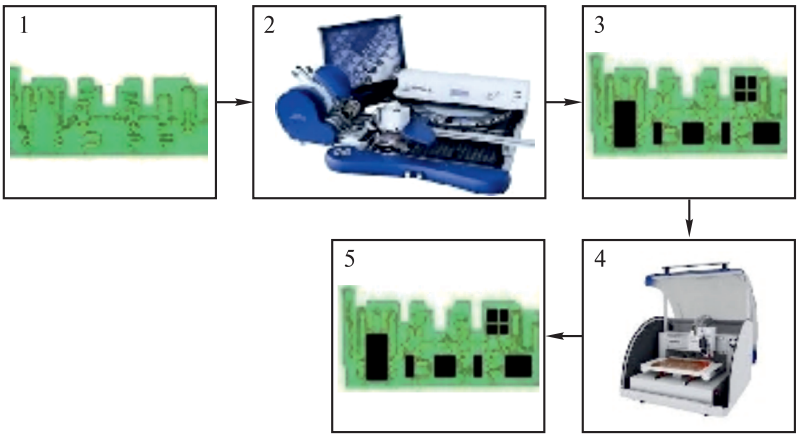


Рис. 1.41. Процесс получения готового электронного устройства из ПП с нанесенной на нее паяльной маской при использовании комплексного лабораторного производственного оборудования LPRF

Установка (рис. 1.42) состоит из передней панели *1* с клавиатурой управления *2*, монтажного микростола *3*, на который устанавливают печатную плату собираемого модуля. Максимальный габаритный размер платы 297×420 мм (формат А3). Печатную плату размещают между двумя планками, из которых одна жестко зафиксирована, а другая подпружинена с возможностью регулировки. Возможна также установка ПП на цилиндрические магнитные опоры, размещаемые на поддоне стола.

Точное положение монтажного стола по координатам *X* и *Y* можно корректировать с помощью микрометрических винтов *4*, размещенных на передней панели устройства. Правый винт перемещает стол по оси *X*, левый — по оси *Y*. Световая точка в окне передней панели показывает положение стола относительно начала координат. Затрудненное вращение ручек микровинтов свидетельствует о крайних положениях стола по осям *X* и *Y*, при которых необходимо прекратить корректировку положения стола, чтобы избежать поломки.

Установку компонента оператор осуществляет с помощью манипулятора *6*, перемещаемого вручную по осям *X* и *Y* по направляющим. На манипуляторе закреплен пневмопинцет (игла), наблюдаемый с помощью видеокамеры *5* на экране монитора *7*.

При достаточном увеличении видно монтажное поле *2* (рис. 1.43) и КП, на которые необходимо установить КМП-чип или ИМС. Компоненты удерживаются иглой *3* (см. рис. 1.43) пневматически путем настройки регулятора *9* подачи воздуха (см. рис. 1.42). Угловым положением компонентов управляет оператор, вращая иглу-пинцет и наблюдая на экране положение компонента относительно КП посадочного места.

Необходимая информация отражается на дисплее *10* (рис. 1.42), а клавиатура управления *2*, расположенная на передней панели *1*, позволяет

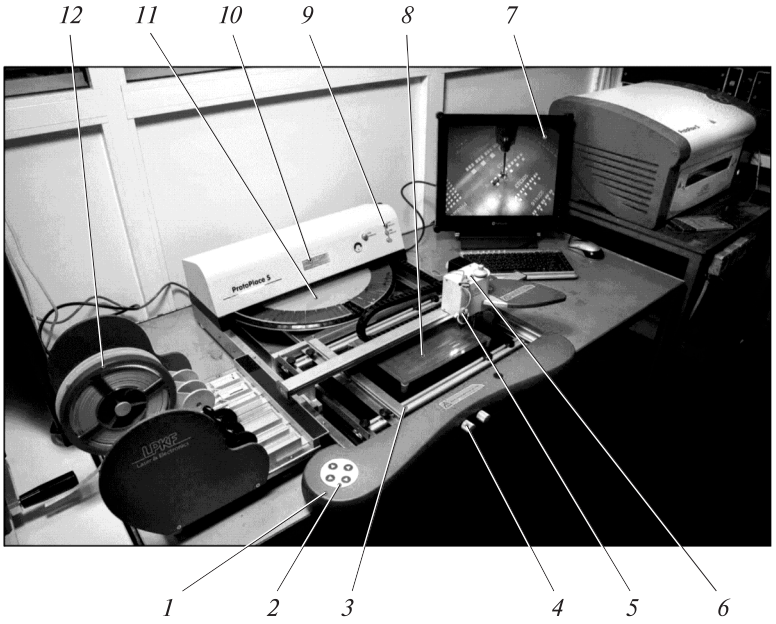


Рис. 1.42. Общий вид установки монтажа КМП

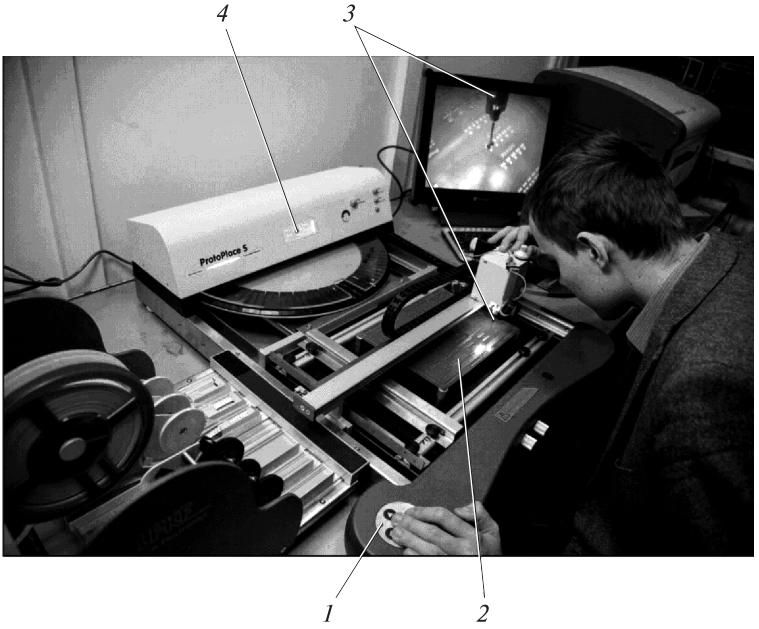


Рис. 1.43. Рабочее положение оператора-монтажника при монтаже КМП

осуществить режим размещения компонента (Place) или дозирование пасты (Dispense) на КП.

Устанавливаемые компоненты находятся россыпью в ячейках, расположенных на поворотном столе *11* (см. рис. 1.42). Стол можно вращать вручную или механизированно. Часть компонентов, поставляемых в дисковых ленточных кассетах *12*, находится на кронштейне устройства подачи, размещенном в левой части установки монтажа.

Тесты к лекции 1.12

1. ***Выберите верное утверждение:***

а) макетирование и прототипирование электронных схем упрощает и ускоряет процесс производства устройства;

б) метод ЛУТ позволяет получить рисунок топологии более высокой точности и четкости по сравнению с методом фотолитографии;

в) фрезерование коммутационных структур менее распространено, чем лазерная гравировка.

2. ***При выполнении каких операций используется установка конвекционной печи?***

а) при операциях пайки оплавлением припоя, при сушке компонентов, монтируемых на плату, запекании клеящих веществ, упрочнении паст;

б) при фрезеровке ПП;

в) при операциях нанесения защитной паяльной маски и маркировки, а также может применяться для экспонирования рисунка с фоторезиста на заготовку.

3. ***При выполнении каких операций используется установка экспонирования?***

а) при операциях нанесения защитной паяльной маски и маркировки, а также может применяться для экспонирования рисунка с фоторезиста на заготовку;

б) при операциях пайки оплавлением припоя, при сушке компонентов, монтируемых на плату, запекании клеящих веществ, упрочнении паст;

в) при монтаже КМП.

4. ***Для чего применяют установку трафаретной печати?***

а) для нанесения паяльной пасты на КП;

б) для печати трафарета нанесения паяльной пасты;

в) для печати проводящего рисунка.

5. ***Установка ProtoPlace S позволяет:***

а) оператору устанавливать миниатюрные SMD-компоненты, используя прибор увеличения (камеру) и специализированный манипулятор;

б) устанавливать миниатюрные компоненты автоматически;

в) производить пайку SMD-компонентов.

1.13. ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ КОМБИНИРОВАННЫМ ПОЗИТИВНЫМ МЕТОДОМ

Цель лекции: ознакомление с промышленным оборудованием для производства печатных плат. Рассматриваются основные технологические этапы и оборудование для производства печатных плат комбинированным позитивным методом.

1.13.1. ЭТАПЫ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

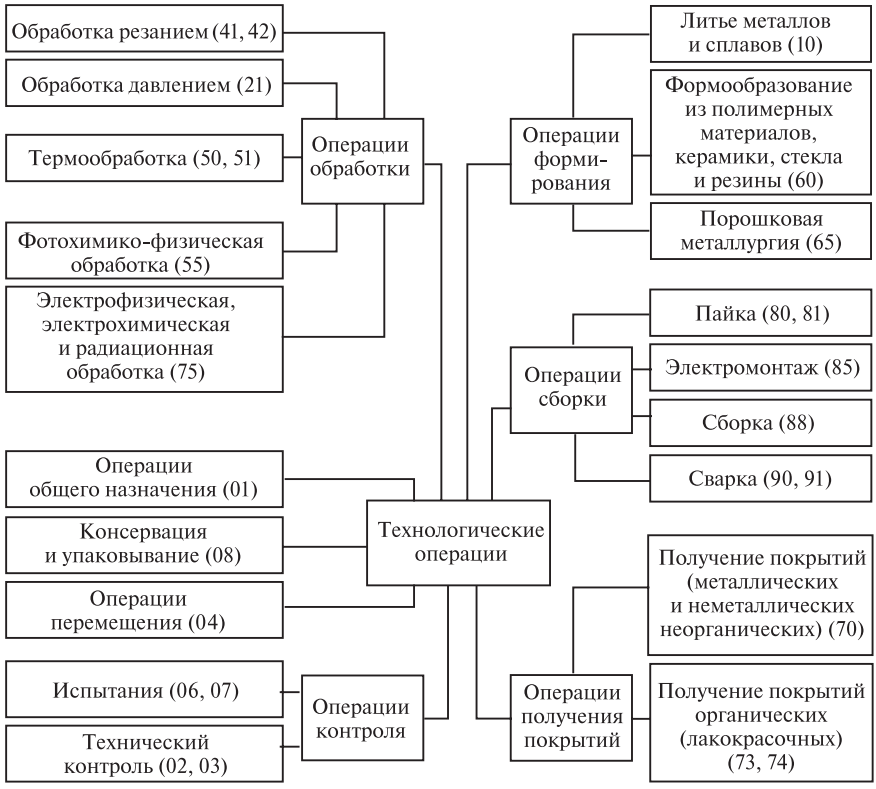
В серийном производстве для получения ПП часто применяют комбинированный позитивный метод (рис. 1.44, *а*). Основное преимущество комбинированного позитивного метода — возможность получения металлизированных отверстий в ПП. Для предварительной металлизации отверстий обычно используют электрохимический способ нанесения медного покрытия на стенки отверстий. Перечень типовых технологических операций приводится в Классификаторах технологических операций машиностроения и приборостроения (рис. 1.44, *а*, приложение 4).

1.13.2. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВКИ

Исходным материалом для ПП является лист фольгированного с двух сторон диэлектрика (обычно стеклотекстолита). Основной метод получения заготовок ДПП — резка листа на гильотинных или дисковых ножницах с раскроем на полосы, а полос — на заготовки. Размеры заготовки определяются ее типом: одинарная (для изготовления одной ДПП) или групповая (для изготовления нескольких ДПП); шириной технологического поля (20...30 мм) по периметру и между отдельными ПП групповой заготовки (5...10 мм) и принятым на предприятии оптимальным соотношением длины и ширины заготовки. Позиционирование листа стеклотекстолита при резке осуществляется с помощью направляющих. Станок располагается на массивной станине для минимизации вибраций и большей устойчивости.

При производстве многослойных ПП сначала происходит изготовление внутренних слоев, затем их автоматическая оптическая инспекция во избежание дефектов внутренней топологии. Перед изготовлением внешних слоев собирается заготовка из фольги первого наружного слоя, препрега, пакета внутренних слоев, препрега и фольги второго наружного слоя. Заготовка прессуется вакуумным прессом при повышенной температуре.

а



б

Рис. 1.44. Основные этапы при производстве ПП комбинированным позитивным методом (*а*), обобщенная классификация технологических операций (*б*)

1.13.3. СВЕРЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ И МОНТАЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ

В наружном технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия на специальном станке (рис. 1.45). Несколько заготовок (обычно от двух до шести) собирают в пакет, затем сверлят и, не меняя установа пакета, штифтуют. Штифты служат для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с числовым программным управлением (ЧПУ).

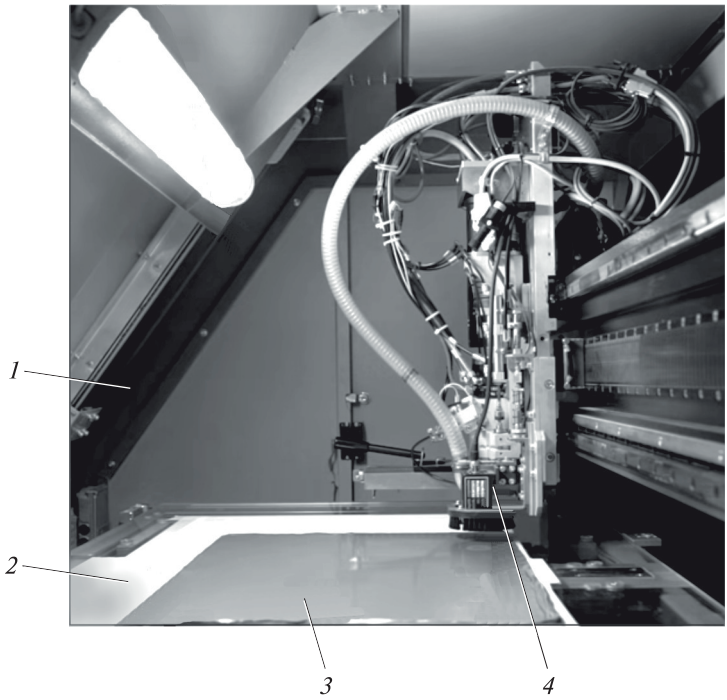


Рис. 1.45. Сверлильный станок с автоматической сменой сверл:
1 — станина; *2* — стол; *3* — пакет заготовок; *4* — сверлильный шпиндель

Для сверления применяют специальные одно-, двух- и четырехшпиндельные станки с точностью позиционирования в пределах ±(0,001...0,005) мм. Сверление происходит по заранее заданной программе. При необходимости в процессе работы станка автоматически меняются сверла из специального магазина.

1.13.4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ

Стенки просверленных отверстий имеют дефекты в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией, химическую обработку растворами на основе

соляной и серной кислот, комбинированную химико-механическую обработку, плазмохимическое травление.

Типовой ТП предварительной металлизации диэлектрика предусматривает сенсибилизацию (адсорбция олова Sn^{2+}), активацию (образование сверхтонкого слоя палладия Pd), химическое меднение ($h_{х.м}$ = 1...2 мкм) и гальваническое меднение ($h_{п.м}$ до 5...7 мкм).

В настоящее время чаще используется метод прямой металлизации диэлектрика на основе трехметаллического катализатора (Pd, Sn, Me). На стенках отверстий образуется металлическая пленка (Pd, Sn, Me) толщиной 60–80 Å с хорошей адгезией и высокой проводимостью. Прямая металлизация завершается гальванической затяжкой медью до $h_{п.м}$ до 5...7 мкм. Технологический процесс предварительной металлизации отверстий организуется на модульной линии автооператорного типа (рис. 1.46) с автоматическим переносом заготовки в вертикальные ванны в соответствии с последовательностью операций ТП. Следует отметить, что одновременно медь осаждается и на фольгированные поверхности заготовок.

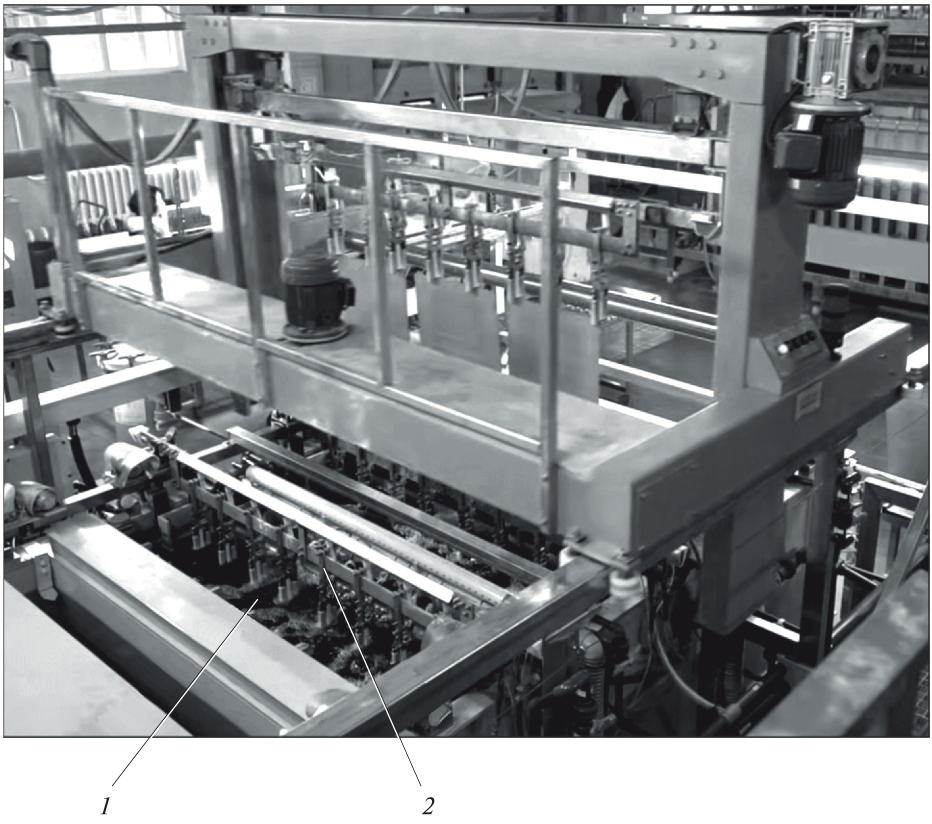


Рис. 1.46. Линия автооператорного типа для химико-гальванической обработки:
1 — ванная с раствором; *2* — автооператор, к которому прикреплены заготовки ПП

Линия состоит из нескольких расположенных друг за другом ванн с растворами, используемыми для предварительной металлизации. Автооператор помещает прикрепленные к нему заготовки в каждую из ванн и выдерживает их в течение определенного времени. Данные операции проводятся под управлением программы.

1.13.5. ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА СХЕМЫ

Изображение схемы получают с помощью СПФ путем его экспонирования с инструмента — позитивного фотошаблона на заготовку и проявления. Экспонированные и проявленные участки фоторезиста прочно удерживаются на пробельных местах заготовки, оставляя открытыми все зоны будущего проводящего рисунка.

Сухой пленочный фоторезист представляет собой трехслойную структуру (лавсановая основа — СПФ — полиэтиленовая защитная пленка) и наносится с двух сторон на заготовку с помощью валкового ламинатора (рис. 1.47). Адгезия обеспечивается предварительной химико-механической обработкой заготовки, подогревом (5 мин, 100 °С) в термошкафу, ламинированием (скорость 1,2...1,8 м/мин) с прижимом валков, нагретых до 115...120 °С, и термостабилизацией ламинированной заготовки (20 °С, 20 мин).

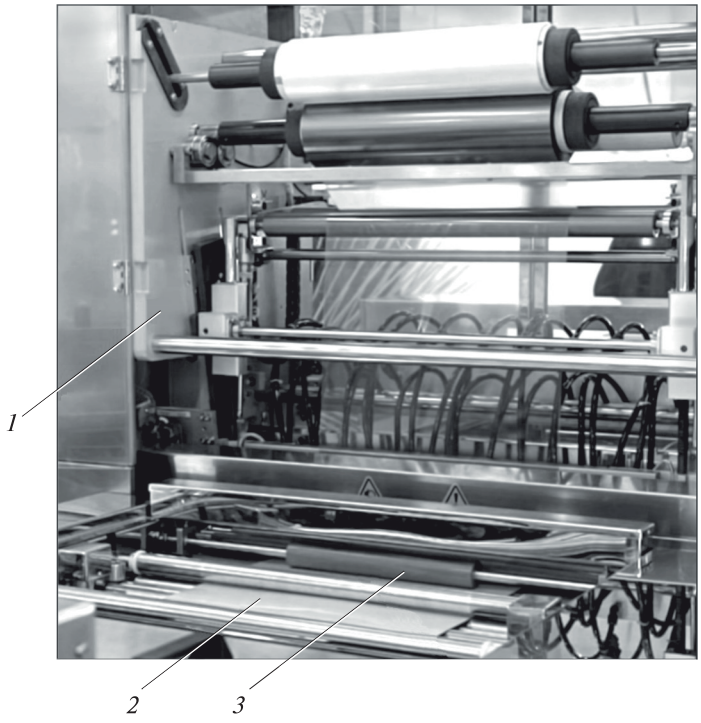


Рис. 1.47. Валковый ламинатор:
1 — станина; *2* — заготовка; *3* — валики ламинирования

Заготовки (две–четыре шт.), ламинированные СПФ, размещают на столе установки экспонирования, совмещая каждую с фотошаблоном с помощью кнопок и базовых отверстий, полученных в технологическом поле перед операцией сверления монтажных отверстий.

Использование базовых отверстий на операциях сверления и экспонирования рисунка позволяет с достаточной точностью обеспечить совмещение центров КП с центрами монтажных и переходных отверстий ДПП.

Рис. 1.48. Внешний вид установки прямого лазерного экспонирования

Однако в настоящее время на многих производствах, в том числе на производстве ОАО «Резонит», вместо совмещения заготовки с фотошаблоном используются технологии прямого лазерного экспонирования (рис. 1.48). Это позволяет отказаться от применения фотошаблонов в ТП: фоторезист с высокой точностью избирательно экспонируется УФ-лазером. Выравнивание заготовки в установке экспонирования также происходит автоматически и основано на распознавании базовых отверстий заготовки оптическими камерами. Использование технологии прямого экспонирования увеличивает точность совмещения и разрешающую способность, что важно при производстве ПП класса точности 6 и выше, а также ГЖПП.

Рис. 1.49. Внешний вид установки химической обработки (проявление рисунка схемы)

Для проявления рисунка схемы применяют механизированную модульную линию конвейерного типа (рис. 1.49), в которой загружаемые вручную заготовки проходят модули проявления (струйная подача проявителя Na_2CO_3), промывки и сушки.

1.13.6. ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ

Гальваническое осаждение меди (Cu) в отверстиях и одновременно в остальных зонах проводящего рисунка (пробельные места закрыты фоторезистивной маской) выполняют на программируемой линии предварительного меднения (см. рис. 1.44). Осаждение меди происходит в специальных растворах (электролитах). На этой же линии гальванически осаждают на проводящий рисунок олово (5...10 мкм) — металлорезист. Контроль качества рисунка визуальный.

1.13.7. ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ

Травление меди с пробельных мест осуществляется после удаления заготовки фоторезистивной маски на модульной линии конвейерного типа с ручной загрузкой (рис. 1.50, 1.51).

Роликовый конвейер перемещает заготовки через модули травления ($CuCl_2$), кислой промывки (HCl), каскадной промывки водой, модуль визуального промежуточного наблюдения, модуль снятия металлорезиста (травление олова с проводящего рисунка) и сушки.

Рис. 1.50. Модульная линия конвейерного типа с ручной загрузкой

Химические растворы и вода подаются в рабочие зоны модулей распылением под давлением с воздействием на обе стороны заготовок ДПП. Операция завершается визуальным или оптическим контролем состояния проводящего рисунка.

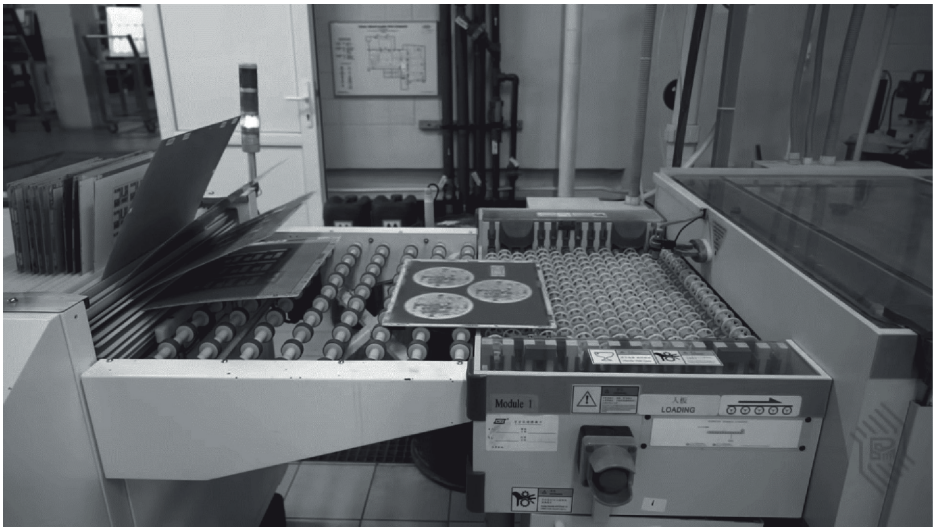
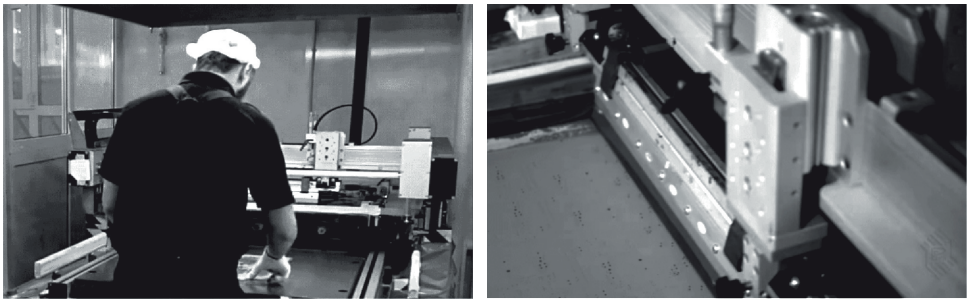


Рис. 1.51. Горизонтальная конвейерная линия травления
(*слева* — конвейер для перемещения заготовок, *справа* — ванна для травления)

1.13.8. НАНЕСЕНИЕ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ

Паяльная маска защищает полученный проводящий рисунок ДПП от внешних воздействий, оставляя открытыми места пайки навесных элементов, т. е. зоны контактных соединений с печатным монтажом. Применяют сухие и жидкие паяльные маски (ЖПМ), последние обладают более высокой разрешающей способностью.

Жидкую паяльную массу наносят на заготовку ДПП сеткографическим способом (рис. 1.52), высушивают (85 °С), экспонируют и проявляют. Окончательные защитные свойства ЖПМ приобретают в сушильном шкафу при (150 °С, 60 мин).



а *б*

Рис. 1.52. Сеткографическая установка для нанесения жидкой паяльной маски:
а — стадия загрузки заготовки в установку; *б* — стадия продавливания состава ЖПМ ракелем

Геометрию рисунка паяльной маски контролируют визуально при соответствующем увеличении. Дефекты при нанесении паяльной маски могут привести к плохой паяемости платы или отсутствию контакта с навесными элементами.

1.13.9. ГОРЯЧЕЕ ЛУЖЕНИЕ

Горячее лужение осуществляют на специальной установке (рис. 1.53) путем погружения и выдержки (около 6 с) заготовки в вертикальном положении в расплавленном припое (Sn — 63 %, Pb — 37 %), находящемся при температуре около 235 °С. Сбрасывание излишков припоя и выравнивание толщины слоя лужения до 5...8 мкм осуществляется ножами — форсунками, подающими горячий (200 °С) сжатый воздух с двух сторон извлекаемой из ванны заготовки.

Рис. 1.53. Установка для горячего лужения: заготовка погружается вниз в ванну с расплавленным припоем, после чего поднимается, и излишки припоя удаляются воздушным методом

Непосредственно перед горячим лужением на заготовку наносят водорастворимый флюс на установке флюсования конвейерного типа (рис. 1.54), а после лужения остатки его удаляют на установке отмывки конвейерного типа.

Изготовленные ПП подвергают выборочному (при больших объемах партии) или сплошному (мелкосерийное или опытное производство) выходному контролю. Существует два основных вида контроля: оптический и электрический.

Рис. 1.54. Установка для нанесения флюса

(*слева* ванна, в которой горизонтально расположенные, предварительно очищенные заготовки покрывают флюсом, *справа* — конвейер, по которому заготовки переходят на следующий этап (непосредственно горячее лужение))

1.13.10. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Оптический контроль качества проводящего рисунка ДПП позволяет выявить видимые дефекты (проколы, царапины, выступы на проводниках; неточности в размещении КП и проводников; неточность размеров КП

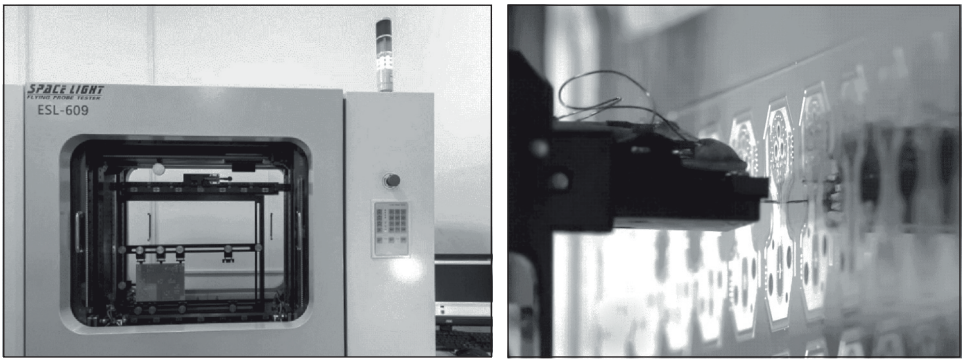
Рис. 1.55. Установка для оптического контроля:

1 — двухкоординатный стол с контролируемой заготовкой ПП; *2* — оптическая система; *3* — монитор увеличенных изображений дефектов и управления операцией контроля

проводников; подтравливание, дефекты металлизации и др.) печатной схемы. При двухкоординатном передвижении оператором стола с закрепленной заготовкой оптическая система установки контроля регистрирует контролируемые участки ПП, увеличивает их и сравнивает с данными бездефектного изображения ДПП.

Обнаруженные дефекты запоминаются, а по окончании контроля выводятся (в виде изображений) на мониторе, предоставляя оператору информацию для принятия решений. Некоторые дефекты оператор может немедленно удалить вручную.

Автоматический электроконтроль позволяет выявить короткие замыкания и разрывы в проводящем рисунке ДПП. Четыре специальных щупа установки (рис. 1.56) по программе тестирования обходят все электрические цепи ПП, сначала проверяя целостные цепи на разрыв, а затем — проверяя соседние цепи на замыкания. При этом контролируемый в данный момент участок отображается на экране монитора, а обнаруженные несоответствия с предварительно проконтролированной тест-платой вносятся в специальный чек со штрихкодом. Считывая штрихкод, легко определить место разрыва или короткого замыкания.



а *б*

Рис. 1.56. Установка для электрического контроля:
а — внешний вид установки с закрепленной на ней заготовкой; *б* — работа установки

По окончании операции контроля принимается решение о годности изделия или выполняется диагностика брака.

Лекция сопровождается учебным видеофильмом в видеотеке https://www.youtube.com/watch?v=6VdU7e9a1OY и https://youtu.be/5Ynlzqx6a18, предоставленным ОАО «Резонит».

Тесты к лекции 1.13

1. ***С какой целью штифтуют пакет заготовок ПП?***

а) для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с ЧПУ;

б) для подвижного соединения заготовок между собой;

в) для неразборного соединения заготовок между собой.

2. ***Какую операцию необходимо выполнить перед металлизацией отверстий?***

а) очистки отверстий;

б) предварительной металлизации;

в) оптического контроля.

3. ***Как называются растворы, в которых происходит гальваническое осаждение меди?***

а) электролиты;

б) раствор жидкой меди;

в) промывочный раствор.

4. ***Для чего нужна паяльная маска?***

а) для защиты полученного проводящего рисунка от внешних воздействий;

б) для улучшения внешнего вида изделия;

в) для предотвращения контакта с навесными элементами.

5. ***Назовите основные виды выходного контроля:***

а) оптический и электрический;

б) визуальный и электрический;

в) рентгеновский и оптический.

1.14. КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ПЛАЗМЕННЫХ ПАНЕЛЯХ

Цель лекции: изучение конструкционных особенностей жидкокристаллических и плазменных панелей, технологии изготовления прозрачных электродов адресной матрицы, коммутации тонкопленочных транзисторов.

1.14.1. ТЕХНОЛОГИИ ПЛОСКОЭКРАННЫХ ДИСПЛЕЕВ

Жидкокристаллический монитор (также жидкокристаллический дисплей, ЖКД, ЖК-монитор, LCD (*Liquid Crystal Display*), плоский индикатор) — плоскоэкранный дисплей на основе жидких кристаллов; используется для отображения информации с цифровых устройств.

Развитие LCD-дисплеев началось в 1960-х годах, когда появились первые индикаторы для систем отображения информации, работающие с помощью жидких кристаллов. К концу 1960-х годов дисплеи на основе жидких кристаллов начали использоваться в калькуляторах, измерительных приборах, электронных часах, а в 1990-х годах появились первые цветные LCD-мониторы.

Жидкие кристаллы — фазовое состояние, при котором вещество обладает одновременно свойствами жидкости (текучесть) и кристалла (анизотропия). Пребывать в состоянии жидкого кристалла могут только некоторые вещества и при определенных условиях (при повышении температуры или давления). К таким веществам относятся вязкие жидкости, молекулы которых имеют вытянутую (например, цилиндрическую) или дискообразную форму. В состоянии жидкого кристалла молекулы могут свободно изменять положение относительно друг друга, однако ориентация молекул имеет определенное направление, которое изменяется под воздействием электрических полей. Изменение ориентации молекул обусловлено тем, что в целом электрически нейтральные молекулы жидкого кристалла обладают дипольным моментом.

Каждый пиксель ЖК-дисплея состоит из двух линейных поляризационных фильтров, плоскости поляризации которых перпендикулярны. Между поляризаторами помещают две тонкие стеклянные пластинки, на которые наносят проводящую ток пленку из оксидов индия и олова — они выполняют роль электродов (рис. 1.57). При отсутствии жидких кристаллов свет, пропускаемый первым поляризационным фильтром, практически полностью блокируется вторым.

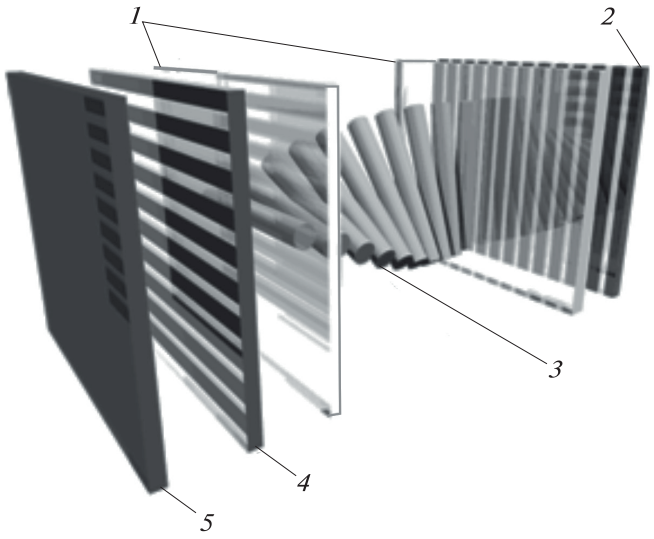


Рис. 1.57. Субпиксель цветного ЖК-дисплея:
1 — прозрачные электроды; *2* — вертикальный фильтр; *3* — ЖК-молекула; *4* — горизонтальный фильтр; *5* — цветовой фильтр

Одна из первых технологий получения ЖК-матрицы — TN (*Twist Nematic*). На поверхность стеклянных пластин наносят параллельные бороздки, причем ориентация бороздок на одной пластине перпендикулярна ориентации бороздок на другой пластине. Пространство между стеклянными пластинами занимают жидкие кристаллы. При взаимодействии жидких кристаллов с бороздками возникает взаимная ориентация этих кристаллов. Таким образом жидкие кристаллы могут разворачивать линию поляризации световой волны на угол 90° (см. рис. 1.57). Дисплеи с TN-матрицей не отличаются высоким качеством изображения, зато обладают низкой стоимостью и высокой скоростью отклика ячейки. В дальнейшем появились технологии STN (*Super Twist Nematic*), DSTN (*Double Super Twist Nematic*), IPS (*In-Plane Switching*), VA (*Vertical Alignment*), каждая из которых описывает свое расположение жидких кристаллов между стеклянными пластинами (например, в технологии STN бороздки на стеклянных пластинах расположены под углом более 200°). Дисплеи с матрицами, выполненными по этим технологиям, имеют больший угол обзора и лучшую цветопередачу, но меньшую скорость отклика, поскольку в целом технологии более сложные.

Управление жидкими кристаллами происходит за счет матрицы электродов. Существуют пассивные матрицы и активные матрицы электродов.

В пассивных матрицах для адресации используются полоски полупрозрачных электродов, расположенные на обеих поверхностях стеклянных подложек и ориентированные перпендикулярно. Их пересечение формирует пиксель. Для того чтобы изменить его состояние, необходимо задействовать две адресные линии — вертикальную и горизонтальную. Одна, например

вертикальная, заземляется, а на другую подается управляющий импульс. Процесс, в ходе которого с помощью поочередной выборки всех комбинаций из двух управляющих линий создается изображение, называется сканированием. Из-за сравнительно большой электрической емкости пикселей картинка не может изменяться быстро.

Основные проблемы заключаются в необходимости изготовлять большое количество очень точных микроскопических соединений на пластине макроскопических размеров и в сложности управляющей электроники. Нелегко подобрать материалы для проводников и электродов, обеспечивающих формирование и адресацию пикселей так, чтобы они сочетали все необходимые качества для неискаженной передачи управляющих сигналов: прозрачность, низкое сопротивление, однородность.

Во всех современных ЖК-дисплеях используются **активные матрицы**, в которых управление происходит с помощью тонкопленочных транзисторов TFT (*Thin Film Transistors*). На стеклянную подложку наносится слой аморфного кремния, на котором формируются транзисторы — по одному на каждый пиксель. В цветных дисплеях на каждый пиксель приходится по три транзистора — по транзистору на каждый субпиксель, каждый из которых отвечает за один из цветов модели RGB (*Red*, *Green*, *Blue* — красный, зеленый, синий). Транзисторы необходимы в качестве буфера между пикселями ЖК-дисплея и управляющей схемой. В активных матрицах исключается влияние процесса выборки (адресации) на соседние ячейки, так как каждый пиксель изолирован от окружающих. Это приводит к резкому уменьшению времени отклика у ячеек (в современных ЖК-мониторах на основе TN-матрицы — порядка 8...15 мс). В целом время отклика активной матрицы в несколько раз выше, чем время отклика пассивной матрицы.

Помимо тонкопленочных транзисторов формируются также специальные конденсаторы. Они необходимы для поддержания напряжения на каждом пикселе или субпикселе в течение времени сканирования всей матрицы. Это позволяет улучшить цветопередачу и контрастность дисплея.

В различных конструктивных реализациях ЖК-дисплея могут использоваться разные источники света. Например, в простейших ЖК-дисплеях калькуляторов применяют внешний источник света, который проходит через пиксели дисплея, отражается от расположенного за ней зеркала и выходит наружу. Темные цифры, которые видны на дисплее, состоят из тех пикселей, которые стали непрозрачными для света. В других устройствах используется не отраженный свет, а прямой свет от источника, расположенного позади экрана. Для обеспечения более яркого и равномерного изображения со временем в качестве внутреннего источника света стали использовать слой подсветки из светодиодов. Этот тип подсветки получил название LED (*Light Emitting Diode*).

К преимуществам классических ЖК-дисплеев можно отнести сравнительно невысокую стоимость, долговечность и хорошую цветопередачу. Основным недостатком данных дисплеев является недостаточная глубина черного цвета: из-за наличия светодиодной подсветки невозможно получить

полностью черный цвет. Также LCD-дисплеи обладают повышенным энергопотреблением, которое связано с постоянной работой светодиодной подсветки.

1.14.2. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛИКРЕМНИЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Низкотемпературная поликремниевая технология — современный процесс изготовления TFT-транзисторов. В этой технологии используется лазерный отжиг, который позволяет проводить кристаллизацию кремниевой пленки при температуре менее 400 °C.

Как известно, для изготовления тонкопленочных TFT-транзисторов для ЖК-дисплеев используется аморфный кремний. Этот материал обладает рядом существенных недостатков: низкая подвижность зарядов, невозможность изготовления малых по площади транзисторов и др.

Данных недостатков лишен поликристаллический кремний — материал на основе кремния, который содержит множество кристаллов кремния размером от 0,1 до нескольких микрон. Структуры однокристального, аморфного и поликристаллического кремния представлены на рис. 1.58.

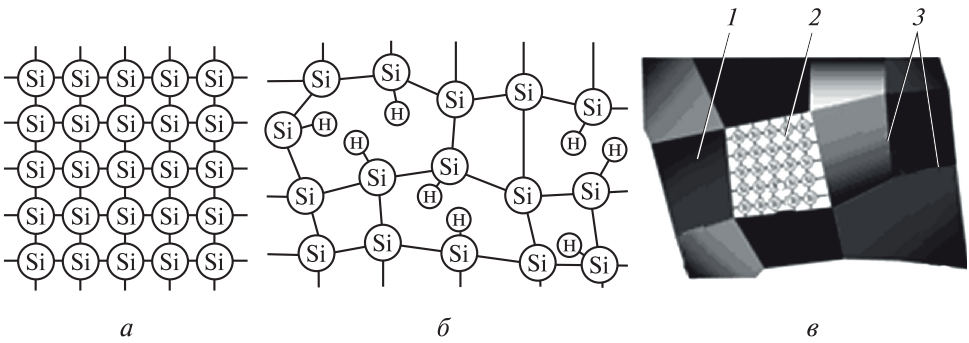


Рис. 1.58. Структуры кремния:

а — однокристальный кремний; *б* — аморфный кремний; *в* — поликристаллический кремний LTPS (*1* — одиночный кристалл; *2* — атом кремния; *3* — граница между кристаллами)

Преимущества поликремниевой технологии:

• более высокая (до 100 раз) надежность транзисторов;

• более высокий апертурный коэффициент: более высокая подвижность носителей означает, что можно обеспечить требуемое время заряда пикселя с помощью меньшего тонкопленочного транзистора. Это обусловливает бóльшую площадь элемента, задействованную под область пропускания света;

• возможность изготовления на стеклянной подложке в едином технологическом цикле интегральных схем драйверов, что позволяет уменьшить необходимое число периферийных устройств и их стоимость;

• компактность модуля: за счет наличия встроенного драйвера требуется меньшая площадь ПП для схемы управления.

При производстве полупроводников поликристаллический кремний обычно получают химическим осаждением при низком давлении из газообразной фазы, а затем отжигают при температуре более 900 °С. Это так называемый метод кристаллизации твердой фазы. Однако для производства ЖК-дисплеев данный метод не подходит из-за высокой температуры отжига.

Для формирования поликремниевой пленки в ЖК-дисплеях используется другая технология. Рассмотрим три метода формирования пленки на стеклянной или пластиковой подложке, которые применяются в настоящее время.

1. MIC (*Metal Induced Crystallization* — кристаллизация, вызываемая металлом). Это разновидность метода кристаллизации твердой фазы, который позволяет получить поликристаллический кремний при более низкой температуре (приблизительно 500...600 °С). Достигается это за счет металлизации пленки перед отжигом. Металл позволяет снизить энергию, необходимую для активизации процесса кристаллизации.

2. Метод осаждения непосредственно поликристаллической пленки, которая в дальнейшем не подвергается термической обработке (отжигу). В настоящее время уже имеется возможность выполнять осаждение при температуре ниже 300 °С. Однако механизм выращивания при каталитическом взаимодействии приводит к растрескиванию смеси SiH_4–H_2 и, как следствию, образованию дефектов.

3. Лазерный отжиг широко применяется в настоящее время. В качестве источника энергии используется эксимерный лазер. Он нагревает и расплавляет аморфный кремний с низким содержанием водорода. После этого кремний повторно кристаллизуется в виде поликристаллической пленки. Данный метод позволяет получить поликристаллический кремний при температуре менее 400 °С.

1.14.3. ПЛАЗМЕННЫЕ ПАНЕЛИ

Газоразрядный экран — плазменная панель — устройство отображения информации (монитор), использующее в своей работе явления электрического разряда в газе и возбуждаемого им свечения люминофора.

Схематически конструкция плазменной панели представленна на рис. 1.59. Плазменная панель представляет собой матрицу ячеек, наполненных специальным газом, находящихся между двумя параллельными стеклянными поверхностями. В качестве газовой среды обычно применяются инертные газы — неон или ксенон. Разряд в газе протекает между прозрачным электродом на лицевой стороне экрана и адресными электродами, проходящими по его задней стороне. В цветных плазменных панелях каждый пиксель экрана состоит из трех идентичных микроскопических полостей, содержащих инертный газ и имеющих два электрода — спереди и сзади. Размер субпикселя плазменной панели порядка 200×200×100 мкм. На панели находится несколько миллионов таких пикселей. Передний электрод должен быть

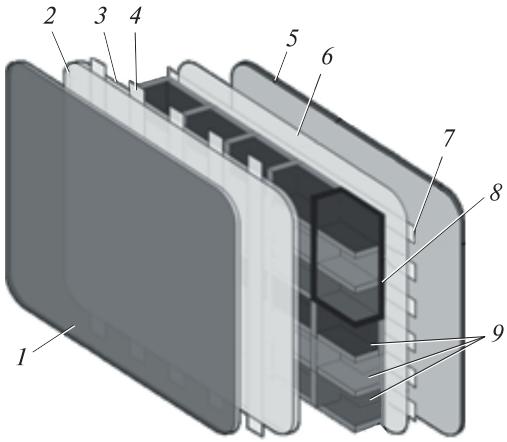


Рис. 1.59. Конструкция плазменной панели:

1 — передняя стеклянная пластина; *2* — диэлектрический слой; *3* — оксид магния; *4* — передний электрод; *5* — задняя стеклянная пластина; *6* — диэлектрический слой; *7* — адресные электроды; *8* — пиксель; *9* — люминесцентное покрытие

максимально прозрачным. Обычно для изготовления передних электродов используются оксиды индия и олова. Однако в плазменных панелях бóльших размеров приходится применять промежуточные соединительные проводники из хрома для уменьшения сопротивления.

После того как к электродам будет приложено высокое напряжение, плазма начнет перемещаться (рис. 1.60). При этом она излучает ультрафиолетовый свет, который попадает на люминофоры в нижней части каждой полости. Это приводит к тому, что люминофоры начинают излучать один из основных цветов: красный, зеленый или синий (для получения одного из этих цветов используют различные люминофоры). Затем свет от люминофоров проходит через переднее стекло. Таким образом, в плазменной технологии пиксели работают подобно люминесцентным трубкам. Длительность свечения люминофора при отсутствии воздействия УФ-излучения очень мала, поэтому время отклика плазменных панелей высокое.

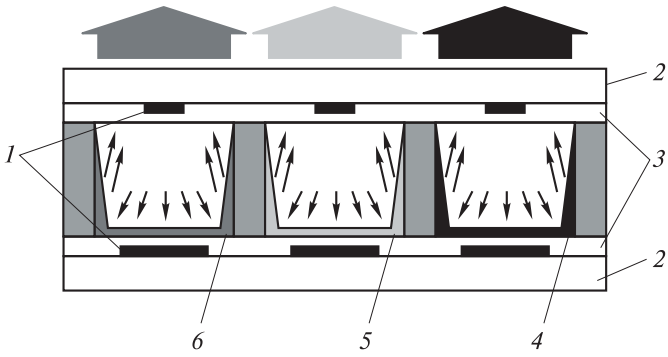


Рис. 1.60. Принцип работы плазменной панели (стрелками обозначена плазма):

1 — электроды; *2* — стекло; *3* — диэлектрик; *4–6* — сцинтилляторы

Встроенная в плазменную панель электроника с помощью матрицы дорожек выбирает пиксель, который необходимо зажечь на панели. Операция происходит очень быстро и незаметно для человеческого глаза.

К основным плюсам плазменных панелей относят насыщенность цветов, глубину черного цвета, высокую яркость и контрастность изображения, долговечность, к минусам — минимальный размер пикселя. Его нельзя уменьшить, так как для работы требуется определенное количества газа, которое не помещается в меньший объем. Поэтому плазменными бывают только телевизоры. К другим недостаткам относят значительное энергопотребление.

Тесты к лекции 1.14

1. ***Закончите предложение: при отсутствии жидких кристаллов...***

а) свет, пропускаемый первым поляризационным фильтром, полностью блокируется вторым;

б) свет свободно проходит через оба поляризационных фильтра;

в) свет не проходит ни через один поляризационный фильтр.

2. ***Для чего в ЖК-дисплеях формируются конденсаторы на каждый пиксель/субпиксель?***

а) для поддержания напряжения на каждом пикселе/субпикселе;

б) для увеличения времени отклика;

в) для дополнительной защиты пикселя/субпикселя от высокого напряжения.

3. ***Выберите верное утверждение:***

а) верны оба утверждения ниже;

б) в дисплеях с пассивной матрицей время отклика значительно ниже, чем в дисплеях с активной матрицей;

в) для получения тонкопленочных транзисторов (TFT) необходим поликристалический кремний, для формирования тонкой пленки которого используют преимущественно лазерный отжиг.

4. ***Что вызывает излучение света люминофорами в плазменных панелях?***

а) ультрафиолетовое излучение, излучаемое плазмой при высоком напряжении;

б) свет от внутреннего источника, например от подсветки из светодиодов;

в) высокая температура.

5. ***Выберите неверное утверждение:***

а) в плазменных панелях никогда не используется цветовая модель RGB для формирования оттенков;

б) в плазменных панелях свет узлучает непосредственно каждый пиксель, а в ЖК-дисплеях необходима сторонняя подсветка;

в) работа плазменных панелей основана на явлении электрического разряда и возбуждаемого им свечения люминофора.

1.15. ОПТОВОЛОКОННЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Цель лекции: изучение оптических коммуникаций и проводящих сред, оптического волокна, классификации, основных параметров, конструкционных особенностей, технологии изготовления.

1.15.1. ОПТИЧЕСКИЕ КОММУНИКАЦИИ И ПРОВОДЯЩИЕ СРЕДЫ

Оптоволокно — стеклянная или пластиковая нить, используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения. Волоконная оптика — раздел приборостроения, описывающий такие волокна. Оптоволокна используются в оптоволоконной связи, которая позволяет передавать цифровую информацию на большие расстояния и с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Оптическое волокно играет ту же роль, что и медный провод, используемый для передачи различной информации (телефонные линии, компьютерные сети и др.). Однако в отличие от медного провода по оптоволокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях.

Отметим наиболее важные преимущества волоконной оптики.

1. *Широкая полоса пропускания*. Волоконная оптика может работать в диапазоне до 1 ТГц, что в сотни раз больше максимальной полосы пропускания медных проводников. Более широкая полоса пропускания оптических систем обусловливает более высокую скорость передачи информации в линии. Полоса пропускания волоконной оптики допускает мультиплексирование различных сигналов (аудио, видео, передачу данных и др.).

2. *Низкие потери*. Потери (затухание) определяют расстояние, на которое может передаваться сигнал. В медных проводниках затухание увеличивается с ростом частоты модуляции — чем больше частота сигнала, тем больше потери. В оптическом кабеле затухание не зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот вплоть до очень высоких и, как правило, неиспользуемых частот. Графики влияния частоты сигнала на скорость затухания приведены на рис. 1.61.

3. *Нечувствительность к электромагнитным полям*. В отличие от медных проводников, оптоволокно не излучает и не воспринимает электромагнитные волны. Важнейшим результатом нечувствительности оптического волокна к наводкам от электромагнитного излучения является то, что световые сигналы не искажаются под их влиянием. Эта особенность дает возможность

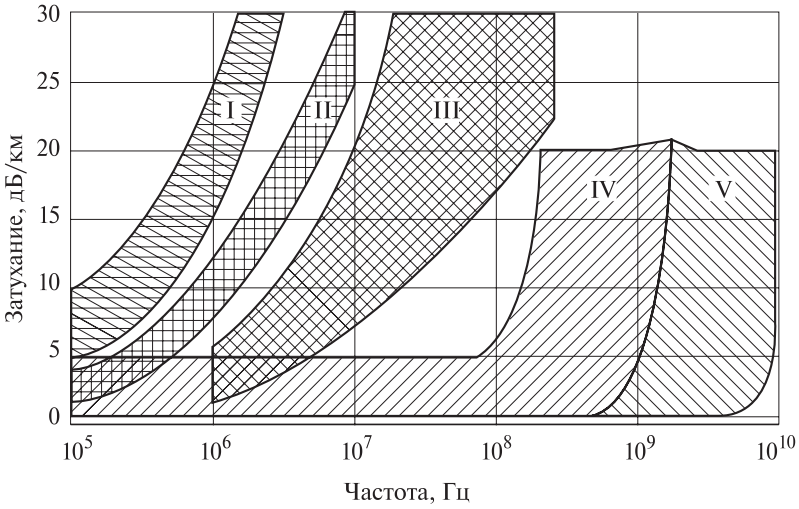


Рис. 1.61. Влияние частоты сигнала на затухание:
I — телефонный кабель; II — специальная высокочастотная пара; III — коаксиальный кабель; IV — многомодовый оптический кабель; V — одномодовый оптический кабель

прокладки оптоволоконных линий передачи вблизи высоковольтных без необходимости использования специальной защиты.

4. *Малая масса.* Масса оптического волокна значительно меньше массы медного проводника. Этот параметр является одним из важнейших в таких областях, как автомобиле- и самолетостроение. Оптоволоконные линии имеют полосу пропускания намного шире, чем медные, и, как следствие, необходимо меньше линий для передачи одного и того же количества информации.

5. *Малый размер*. Оптический кабель меньше по размеру, чем его медный аналог. Типичный диаметр оптоволоконного кабеля 125 мкм. Кроме того, достаточно часто одно оптическое волокно может заменить несколько медных проводников.

6. *Безопасность*. Оптоволокно является диэлектриком и не проводит электрический ток. Его использование безопасно с точки зрения искро- и пожаробезопасности. Волоконно-оптический кабель может использоваться в опасных местах, в которых из соображений безопасности вообще не применялись кабели (топливные баки и др.).

7. *Секретность*. Оптическое волокно является сверхбезопасной средой для передачи информации. Оно не излучает волны, которые могут быть перехвачены специализированным оборудованием. Кроме того, подключение к оптоволоконному проводнику крайне затруднено и требует специальных инструментов и микроскопа.

Все приведенные выше особенности делают оптические волокна наиболее перспективными для коммутационных структур. В настоящее время

оптические коммутационные структуры только начинают развиваться, а коммутационные структуры с помощью медных кабелей близки к своим теоретическим пределам.

В действительности не все оптические кабели имеют низкие потери и широкую полосу пропускания. В тех случаях, когда потери и высокие скорости не являются критическими (например, в автомобилестроении) достаточно хорошо работают более дешевые оптические линии на основе пластиковых волокон.

Следует отметить, что оптические коммуникации не лишены ряда недостатков. Основные факторы, обусловливающие ограниченное применение оптоволоконных коммуникаций, приведены ниже.

1. *Хрупкость.* Основным материалом для изготовления оптического волокна является стекло. Как известно, этот материал очень хрупок. Это не означает, что оптоволокно не может быть изогнуто, однако допустимые углы изгиба намного меньше, чем у металлических проводников. При этом наличие изгибов увеличивает потери при передаче сигнала.

2. *Трудности в обслуживании*. В отличие от медных проводников, микротрещины в оптоволокне приводят к резкому ухудшению его параметров. Из-за того что оптоволокно имеет очень маленький диаметр (диаметр ядра 3...100 мкм), обнаружение изломов и дефектов является сложной и длительной процедурой.

3. *Сложность сопряжения волокон*. Для соединения медных линий передачи используется пайка либо (в редких случаях) сварка. Как правило, это достаточно простая процедура, не требующая специализированного оборудования. Сопряжение же оптических волокон является трудоемкой процедурой, требующей применения специальных микроскопов и инструментов. От точности сопряжения и полировки концов сопрягаемых частей напрямую зависят потери в оптоволокне.

4. *Использование дополнительного оборудования.* Использование оптоволоконного кабеля требует специальных оптических приемников и передатчиков, преобразующих световые сигналы в электрические и обратно, что порой существенно увеличивает стоимость сети в целом.

Все эти недостатки не позволяют оптоволоконным линиям связи вытеснить привычные медные. Однако стоимость оптоволоконных линий постоянно снижается, а необходимость в высокоскоростных коммуникациях увеличивается. Это делает оптические линии связи незаменимыми в системах, требующих передачи данных с высокой скоростью на большие дистанции и с малым числом ошибок.

1.15.2. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В настоящее время основным применением оптоволоконных линий передачи являются телефония и компьютерные сети. Это обусловлено высокой скоростью передачи данных и широкой полосой пропускания.

Для сравнения, медный кабель диаметром 4,5 дюйма может передавать 40 300 двусторонних разговоров на короткие расстояния. Оптоволоконный кабель диаметром 0,5 дюйма, содержащий 144 волокна, обеспечивает 24 192 разговора на каждую оптоволоконную пару или около 1,75 млн звонков на весь кабель в целом. Таким образом, емкость оптоволоконного кабеля существенно превосходит емкость коаксиального, несмотря на то что его диаметр почти в 10 раз меньше.

Высокое быстродействие и нечувствительность к электромагнитным помехам дают оптоволоконным линиям передачи широкое применение в компьютерных сетях. Применяют оптоволоконный кабель только в сетях с топологией типа «звезда» и «кольцо». Никаких проблем согласования и заземления в данном случае не существует. Кабель обеспечивает идеальную гальваническую развязку компьютеров сети.

Также оптоволокно применяется в отраслях, где критичны масса и помехозащищенность, например в автомобиле- и авиастроении широко используют оптические кабели для соединения бортового оборудования. В данном случае высокая скорость передачи данных не требуется, поэтому используется в основном пластиковое оптическое волокно. Данный тип коммуникаций применяется для передачи информации в условиях сильных электромагнитных помех. В частности, допускается прокладка оптических кабелей вместе с высоковольтными линиями электропередачи.

Как и в случае с коммуникациями медным кабелем, сигнал в оптоволоконных линиях мультиплексируется. В частности, для оптоволоконных систем это технология спектрального уплотнения WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), позволяющая одновременно передавать по оптоволокну несколько сигналов с различной длиной волны. У спектрального уплотнения есть один принципиальный недостаток: для усиления и коммутации оптический сигнал сначала преобразуется в электрический, а затем — обратно в оптический. Это усложняет и удорожает построение магистральных сетей. Однако в настоящее время имеется ряд наработок для решения данной проблемы. Одна из них — использование усилителей на основе оптоволокна, легированного эрбием (EDFA), позволяющая передавать данные по оптическим сетям на расстояние больше тысячи километров.

Постоянно растущие тактовые частоты процессоров и периферии требуют более высокоскоростных линий для передачи информации. Здесь уже необходимо повышение скорости соединения не целых сетей или отдельных компьютеров, а межсоединений в самом устройстве. Сегодня разрабатывается и внедряется новая технология оптических межсоединений и встроенных оптических волноводов на ПП для быстродействующих устройств. Данная технология позволит решить проблемы, связанные с ростом частоты передачи данных свыше 10 ГГц и перехода на скорость передачи несколько терабит/секунду. Применение оптоэлектроники в этих областях должно существенно повысить вычислительную мощность.

1.15.3. ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО

Оптическое волокно — диэлектрическая структура, по которой распространяется оптический сигнал. Как правило, волокно используется в виде кабеля, т. е. окружено защитной оболочкой, предохраняющей его от механических повреждений и воздействий окружающей среды.

Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. На рис. 1.62 представлены поперечные сечения и диаметры для ядра и оптической оболочки четырех наиболее распространенных видов волокон.

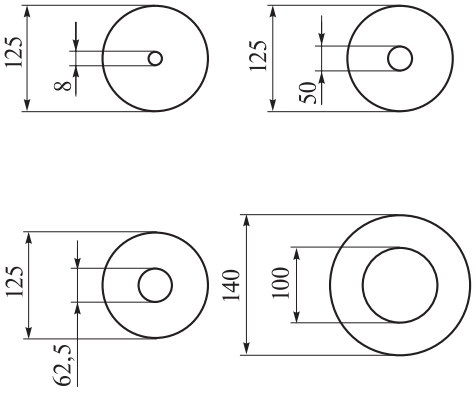


Рис. 1.62. Типичные диаметры (мкм) ядра и оптической оболочки

Оптическое волокно имеет два концентрических слоя: ядро (сердцевину) и оптическую оболочку. Внутреннее ядро предназначено для переноса светового сигнала. Окружающая его оптическая оболочка имеет отличный от ядра показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в ядро. Характерные показатели преломления — 1,47 для ядра и 1,46 — для оптической оболочки.

Свет с углом, меньшим критического, поглощается защитной оболочкой.

Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической. Она представляет собой один или несколько слоев полимера и предохраняет ядро и оптическую оболочку от внешних воздействий. Защитная оболочка не влияет на процесс распространения света по волокну.

Свет удерживается внутри сердцевины и распространяется по зигзагообразной траектории вдоль оси волокна вследствие эффекта полного внутреннего отражения при условии:

$$\sin\alpha \le \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где α — угол падения; n_1, n_2 — соответственно показатели преломления ядра и оптической оболочки.

Схема распространения света по волокну представлена на рис. 1.63. Свет инжектируется внутрь волокна под углом, бóльшим критического к границе ядро/оптическая оболочка, и испытывает полное внутреннее отражение на этой границе.

Поскольку углы падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Свет распространяется за счет полного внутреннего отражения. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

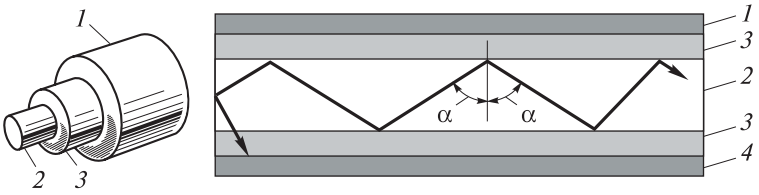


Рис. 1.63. Схема полного внутреннего отражения в оптическом волокне:

1 — защитная оболочка; *2* — ядро; *3* — оптическая оболочка; *4* — защитная оболочка

Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного оптического волокна. При этом учитываются только меридианные лучи, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые асимметричными, движутся вдоль волокна, не проходя через его центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накручивающуюся вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются при анализе большинства волоконно-оптических процессов.

1.15.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Оптические волокна в зависимости от области применения, требуемых характеристик и стоимости изготовляют из различных материалов.

1. *Стеклянные волокна* имеют стеклянное ядро и стеклянную оболочку и обладают наилучшими характеристиками из всех остальных, однако это волокно является самым дорогостоящим. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого диоксида кремния или плавленого кварца. Для получения требуемого показателя преломления в стекло добавляют различные примеси: для увеличения показателя — германий и фосфор, а для уменьшения — бор и фтор. Также в стекле присутствуют другие примеси, ухудшающие характеристики волокна (в основном мельчайшие капли воды).

2. *Стеклянные волокна с пластиковой оптической оболочкой*. Как промежуточный вариант, они имеют не столь хорошие характеристики по сравнению с волокнами со стеклянной оптической оболочкой, однако являются вполне приемлемыми. В отличие от стеклянных волокон не имеют дополнительной защитной оболочки.

3. *Полимерные волокна* имеют пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку, а также самые худшие характеристики из всех. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к значениям затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным. Они не имеют защитной оболочки.

Также оптические волокна могут быть классифицированы по индексу преломления ядра и модовой структуре света (рис. 1.64). В соответствии с этой классификацией выделяют три основные особенности оптических волокон:

1) различие входного и выходного импульсов. Уменьшение амплитуды импульса связано с затуханием его мощности, а расширение — с конечной полосой пропускания волокна и ограниченной информационной емкостью;

2) траектория лучей, возникающих при распространении света;

3) распределение значений показателей преломления в ядре и оптической оболочке для различных типов волокон.

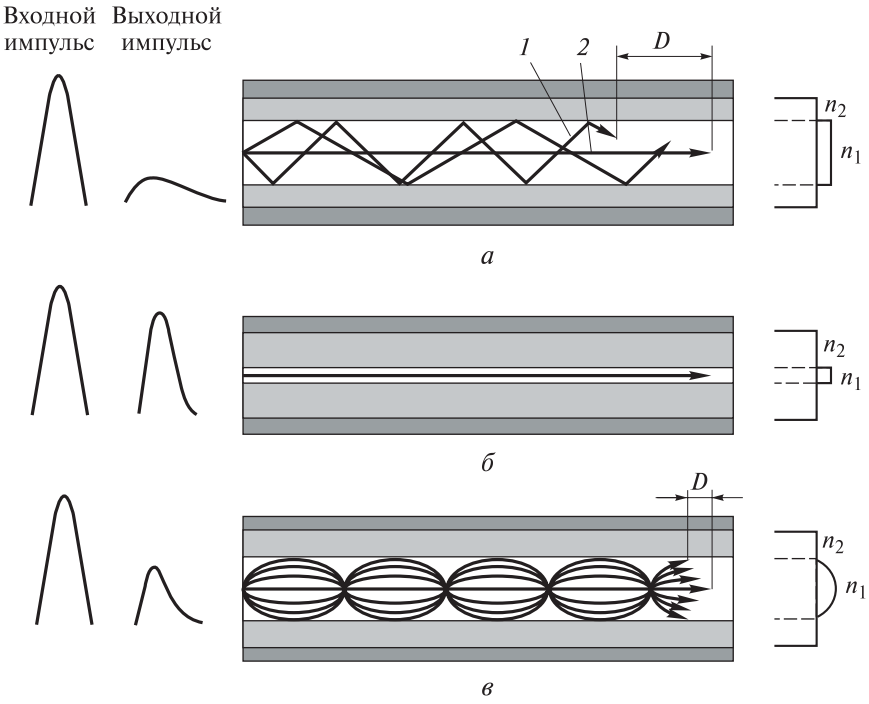


Рис. 1.64. Типы распространения света в оптическом волокне:

а, *б* — многомодовый и одномодовый ступенчатый индекс; *в* — многомодовый градиентный (сглаженный) индекс; *1*, *2* — режимы множественного и малого числа отражения; *D* — дисперсия; n_1, n_2 — показатели преломления ядра и оболочки

Мода — математическое или физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. Под модой можно понимать вид траектории, вдоль которой может распространяться свет. Количество мод в волокне может быть в районе от одной до сотен тысяч и зависит от размеров и свойств волокна.

Профиль индекса преломления отображает соотношение между показателями преломления ядра и оптической оболочки. Существуют два основных вида профиля — ступенчатый и градиентный.

Волокно со *ступенчатым* профилем имеет ядро с однородным показателем преломления на любом расстоянии от центра. На границе ядра и оптической оболочки показатель преломления резко изменяется.

В волокнах со *сглаженным* профилем показатель преломления плавно изменяется — он максимален в центре ядра и уменьшается по мере приближения к границе с оптической оболочкой. Резкого скачка показателей на границе не наблюдается.

В соответствии с данной классификацией все оптические волокна можно подразделить на три основных типа.

1. *Многомодовое волокно со ступенчатым индексом.* Является наиболее простым типом волокон. Разные моды затрачивают различное время на прохождение одного и того же отрезка волокна. Луч, направленный параллельно оси световода, проходит меньшее расстояние, чем луч, распространяющийся по ломаной траектории. Как следствие, лучи достигнут конца сердечника в разные моменты времени. В результате этого световой импульс «расплывается» (расширяется) во времени. Это явление называется модовой дисперсией и выражается максимальной разностью скорости распространения мод (рис. 1.65).

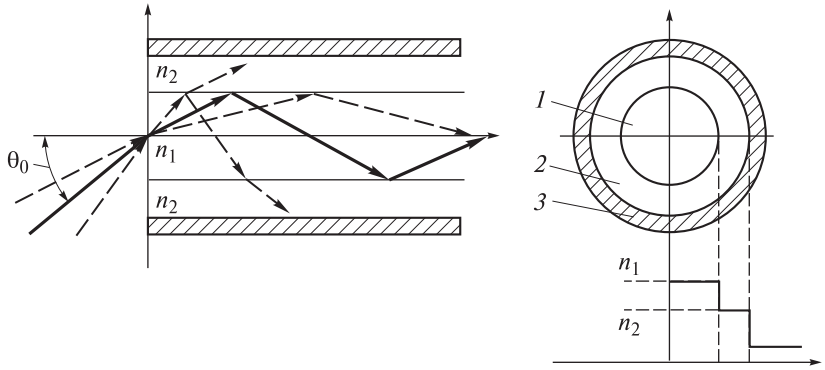


Рис. 1.65. Многомодовое волокно со ступенчатым индексом преломления:

1 — ядро; *2* — оптическая оболочка; *3* — защитная оболочка

2. *Многомодовое волокно со сглаженным индексом.* В этом типе волокон ядро состоит из множества слоев, показатели преломления которых уменьшаются при удалении от центральной оси *r*. Каждый слой ядра отражает световой луч. В отличие от волокна со ступенчатым индексом преломления здесь свет более плавно испытывает отражение от каждого слоя ядра (рис. 1.66). При этом траектория движения светового луча по волокну приобретает синусоидальную форму.

Использование сглаженного профиля показателя преломления приводит к значительному уменьшению модовой дисперсии. Однако полностью

устранить межмодовую дисперсию в многомодовом волокне не удается, что обусловлено как несовершенством профиля показателя преломления, так и наличием спиральных мод, возникающих вследствие осевой симметрии оптоволокна.

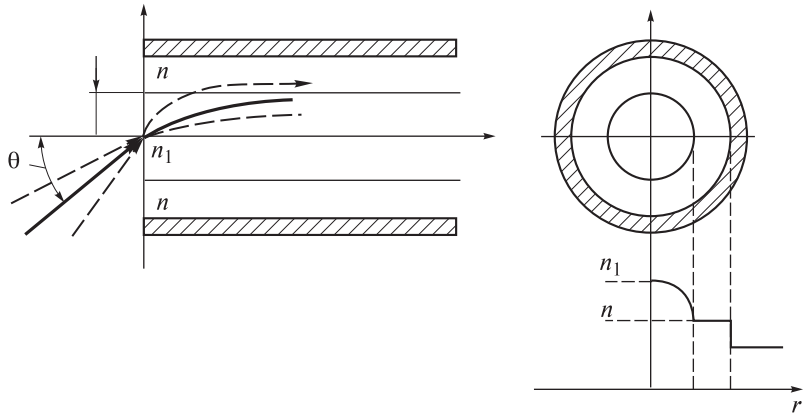


Рис. 1.66. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления (n, n_1 — показатели преломления слоев волокна)

3. *Одномодовое волокно со ступенчатым индексом.* Как следует из названия, одномодовое волокно способно передавать лишь одну моду. Явление межмодовой дисперсии в таком волокне отсутствует, а ширина полосы пропускания ограничивается молекулярной дисперсией.

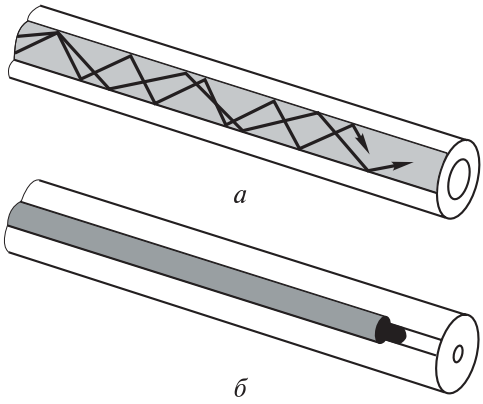


Рис. 1.67. Оптическая мощность в многомодовом (*а*) и одномодовом (*б*) волокне

Одномодовое волокно имеет малый диаметр ядра: от 5...10 мкм. Для работы с этим типов волокон используются лазерные источники излучения с длинами волн 1300 и 1550 нм при ширине спектра несколько нанометров.

Существует различие в распространении излучения в одномодовом и многомодовом волокне. Некоторая часть электромагнитной энергии переносится в оптической оболочке (рис. 1.67). Эта особенность обусловливает повышенные требования к прозрачности и качеству в целом оптической оболочки ядра. Кроме того, диаметр светового пучка, вводимого в волокно, превышает его диаметр.

1.15.5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛОКОН

Рассмотрим некоторые основные параметры оптических волокон. Дисперсия ограничивает такие важные характеристики волокна, как ширина полосы пропускания и информационная емкость. Наличие дисперсии вынуждает снижать скорость передачи информации. Существуют три вида дисперсии.

1. *Модовая дисперсия*. Присуща только многомодовым волокнам. Возникает в результате того, что лучи в волокне отражаются под различными углами и, следовательно, проходят разный путь. Типичное значение задержки сигнала для стеклянных волокон порядка 4...5 нс/км.

2. *Молекулярная дисперсия*. Присуща всем видам волокон. Возникает в результате того, что волны различной длины движутся с различными скоростями.

Зависимость молекулярной дисперсии от длины волны сигнала показана на рис. 1.68. Видно, что в области ниже 1300 нм более длинные волны движутся быстрее коротких. Для длин волн >1300 нм возникает обратная ситуация — более длинные волны движутся медленнее коротких.

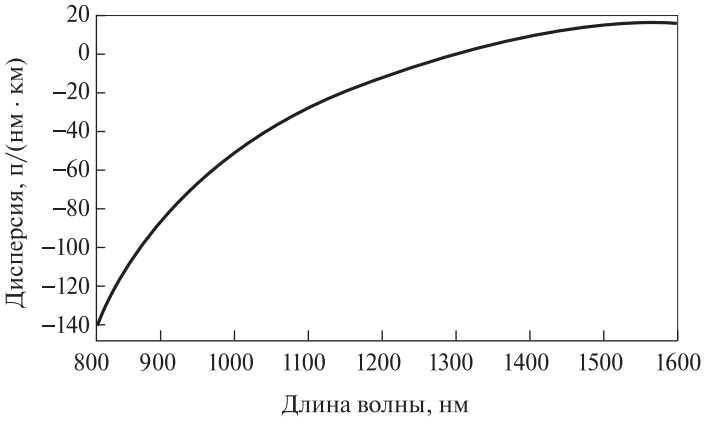


Рис. 1.68. Зависимость молекулярной дисперсии от длины волны излучения

Молекулярная дисперсия является основным видом дисперсии в одномодовых системах.

3. *Волноводная дисперсия*. Имеет значение в основном для одномодовых волокон. Обусловлена тем, что оптическая энергия движется как по ядру, так и по оптической оболочке, имеющим различные показателя преломления. Вследствие этого скорости распространения в ядре и оптической оболочке различаются.

Затухание — потеря оптической энергии по мере движения света по волокну. Оптический сигнал, распространяясь по оптоволоконной линии,

испытывает потери (уменьшение мощности) вследствие поглощения и рассеивания света в волокне из-за взаимодействия с веществами сердцевины и оболочки. Поглощение связано с возбуждением в материале световода электронных переходов и резонансов. В результате этого увеличивается тепловая энергия, накапливаемая в оптическом волокне. Поглощение зависит как от свойств материала, из которого изготовляется оптоволокно, так и от длины волны источника света. Разброс значений поглощения от 300 дБ/км для пластиковых волокон до 0,2 дБ/км для одномодовых. Затухание зависит от длины волны излучения. В материале существует несколько областей с пониженным затуханием, которые называются окнами прозрачности, в которых функционируют оптические линии связи (рис. 1.69).

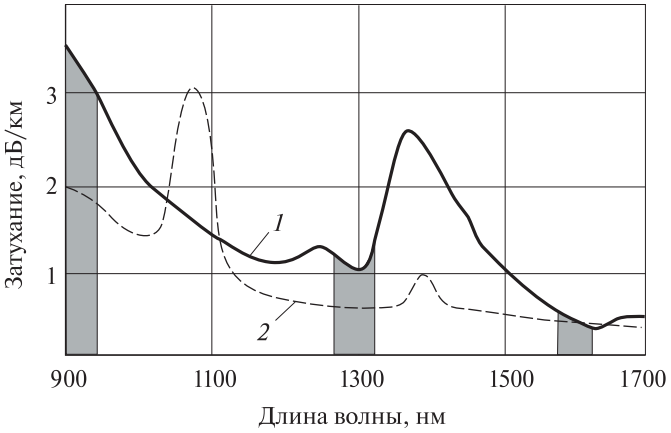


Рис. 1.69. Зависимость затухания от длины волны излучения (заштрихованные участки — рабочие окна):
1 — многомодовое волокно; *2* — одномодовое волокно

Снижение потерь в волокне требует, чтобы источник света работал в области длин волн с наименьшим затуханием.

Важнейшей особенностью затухания в оптическом волокне является его независимость от частоты модуляции внутри полосы пропускания. Для сравнения, в медных кабелях затухание увеличивается с частотой сигнала.

Численной апертурой *NA* называется способность волокна собирать лучи. Только лучи, которые инжектируются в волокно под углами большими критического, смогут распространяться вдоль него. Параметр *NA* зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления ядра и оптической оболочки:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Параметр *NA* является безразмерной величиной; чем меньше значение *NA*, тем меньше мод проводит оптическое волокно.

Предел прочности характеризует способность волокна или провода противостоять натяжению или изгибу без повреждения.

Основная причина, обусловливающая хрупкость волокна, — наличие микротрещин на поверхности и дефектов внутри самого волокна. При этом трещины на поверхности являются более существенными. Расширяющиеся дефекты приводят к обрыву волокна.

Достаточно резкий изгиб может разорвать волокно, поэтому все волокна имеют минимальный радиус изгиба.

Изгибы в волокне приводят к увеличению затухания (это связано с изменением углов падения в местах изгиба, некоторые из мод падают под углами меньше критического и покидают волокно), а также уменьшению предела прочности волокна на разрыв.

Обычно минимальный радиус изгиба равен пяти диаметрам кабеля.

1.15.6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Основные компоненты конструкции простого оптического кабеля с одним волокном представлены на рис. 1.70.

Конструкция кабелей может быть достаточно разнообразной, но общими являются следующие компоненты:

– *оптическое волокно*;

– *буферная оболочка*. Наиболее простой вид буфера представляет собой пластиковую оболочку, расположенную поверх оптической. Бывает пустотелый и плотный буфер. Основная задача буфера — защита волокна от механических и температурных воздействий;

– *силовой элемент*. Повышает механическую прочность кабеля, принимая на себя растягивающие напряжения;

– *внешняя оболочка*. Обеспечивает защиту от трения, коррозии, химических воздействий и др.

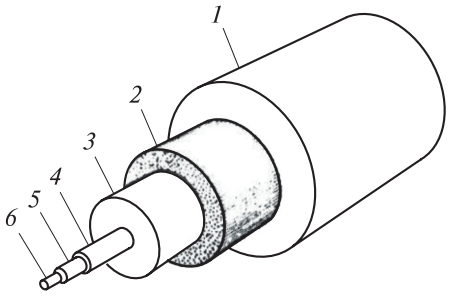


Рис. 1.70. Конструкция волоконно-оптического кабеля:

1 — черная полиуретановая внешняя оболочка; *2* — силовой элемент; *3* — буферная оболочка; *4* — силиконовая оболочка; *5* — оптическая оболочка (пластик); *6* — ядро (пластик)

1.15.7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Технологический процесс изготовления световодов на основе кварцевого стекла подразделяют на два этапа.

Первый этап — получение заготовки, которая представляет собой стеклянный стержень длиной порядка 1 м и диаметром около 10...20 мм. Для этого существует несколько способов; каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Первый способ назван «*модифицированным методом химического осаждения из газовой фазы*» (MCVD). Представьте себе подобие токарного станка,

в котором на место резца установлена кислородно-водородная горелка. В станок зажимается стеклянная трубка, и через нее на первом этапе пропускается хлорид кремния и кислород (на самом деле состав смеси более сложен). В горячей зоне напротив горелки синтезируется оксид кремния. Образуются мельчайшие частицы оксида, которые дрейфуют из горячей области в более холодную и прилипают к стенке. Этот процесс называется *термофорезом*. Важно, что осаждение происходит не в месте нагрева пламенем, а перед ним — там, куда пламя еще не дошло. На поверхности трубки образуется пористый слой оксида, и, двигаясь дальше, горелка его проплавляет — остекловывает. Так получается слой чистого стекла. При следующих проходах через трубку пропускают еще и германий в виде хлорида 3. Таким образом, легируют материал световода, создавая в нем градиент коэффициента преломления. После того как необходимое число слоев осаждено, подачу хлоридов выключают, а температуру пламени увеличивают — в результате трубка плавится и схлопывается просто под действием сил поверхностного натяжения.

Данный способ является самым простым. Однако для него нужна очень хорошая труба-заготовка без включений, так как включения — это центры напряжений, из которых может начать расти трещина. С этим успешно борются путем химической или огневой полировки поверхности трубок.

Второй способ называют «*внешним осаждением*» (в отличие от первого — внутреннего): стекло осаждается на огнеупорный стержень прямо из пламени горелки, куда подают хлориды исходных веществ. Поскольку осаждение происходит в атмосфере пламени, в таком материале остается много воды, получившейся в результате окисления водорода. Поэтому, после того как центральный стержень вынимают, приходится продувать заготовку хлором, который экстрагирует воду. И только после этого заготовка остекловывается.

В третьем способе реализована более сложная конструкция. Заготовка растет из затравки, расположенной на определенном расстоянии выше пламени горелки, имеющего сложную слоевую структуру. В середину пламени подают смесь хлоридов германия и кремния, затем слой буферного газа, потом только хлорид кремния для чистого стекла, потом опять буферный газ, и, в конце концов, на краю горелки — кислород с водородом. Вещество осаждается на только что созданную в этом же процессе поверхность. Однако расстояние до этой поверхности должно быть строго фиксированным, и заготовка постоянно отодвигается от пламени горелки. Таким способом можно создавать заготовки, которых хватает на несколько тысяч километров волокна, в принципе этот процесс может быть непрерывен — по мере изготовления заготовки из нее же можно вытягивать волокно.

На втором этапе конец заготовки размягчают в печи и тянут из него волокно. При вытяжке не происходит смешивания отдельных слоев, т. е. если диаметры сердцевины и оболочки заготовки относились как 1/10, то так будет и в вытянутом волокне. Вытяжка световодов проводится в таких же

чистых помещениях, как и при производстве микросхем, чтобы на их поверхность не попадали включения пыли.

После того как волокно остынет, на него наносится защитная пленка полимера, который защищает волокно от механических воздействий и от окружающей среды, прежде всего от водорода и воды. Это обусловлено тем, что вода ускоряет рост трещин, а водород, диффундируя вглубь волокна, повышает коэффициент затухания.

1.15.8. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ С ОПТОВОЛОКОННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ

Современные процессоры работают на частотах порядка 2...4 ГГц. В действительности быстродействие КМОП-логики (КМОП — комплементарная структура металл — оксид — полупроводник), на основе которой в настоящее время изготовляют все интегральные микросхемы, составляет порядка 10 ГГц. Основная проблема заключается не в том, что микросхемы не способны работать на таких частотах, а в передаче сигналов между этими микросхемами. Особенно чувствительными являются соединения между процессорами и оперативной памятью.

При повышении частоты передачи сигнала по медным проводникам резко возрастают потери и появляются искажения сигнала. В результате увеличивается число ошибок при работе. Было показано, что потери на ПП стандарта FR-4 (*Flame Resistance 4*) с медной разводкой быстро растут при частотах свыше 1 ГГц; при этом ухудшается отношение сигнал/шум и появляются ошибки в синхронизации. Кроме того, перекрестные помехи ограничивают плотность разводки.

Использование оптических линий связи для высокоскоростных шин может решить данную проблему. Высокоскоростные оптические каналы длиной до 10 см между микросхемами имеют ряд преимуществ по сравнению с медными. У них меньшие потери при большей полосе пропускания, и они не подвержены перекрестным электромагнитным помехам. В настоящее время ведутся работы по внедрению подобного типа коммутационных структур в ПП.

Возможные варианты построения систем на основе оптических соединений представлены на рис. 1.71.

Для передачи оптических сигналов по ПП фирма IBM разработала технологию, основанную на полимерных многомодовых волноводах размером 50×50 мкм. При этом для коротких расстояний при внутрисистемной связи модовая дисперсия не ограничивает скорости передачи сигналов до ожидаемого уровня 20 Гбит/с.

Единой технологии получения оптических волноводов на ПП в настоящее время не существует. Различные компании работают над разработкой дешевой и производительной технологией их получения.

Одна из возможных технологий получения оптических волноводов состоит из следующих этапов: 1) плакирование на основание слоя полимера;

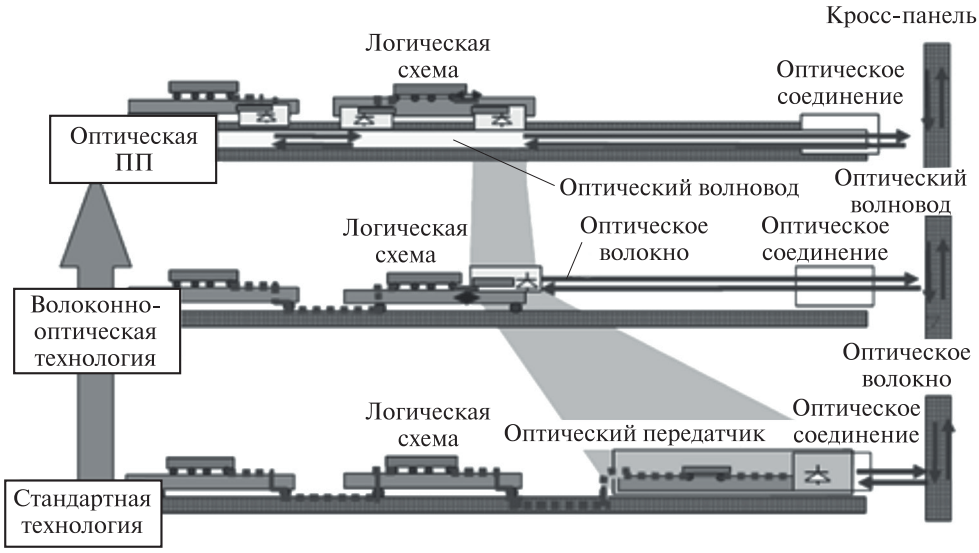


Рис. 1.71. Варианты систем на основе оптических соединений

2) нанесение слоя волновода на плакированный слой; 3) формирование изображения волновода; 4) удаление слоя волновода травлением; 5) заполнение полимером плакированного слоя.

Фотография ПП с двумя полимерными волноводными слоями приведена на рис. 1.72.

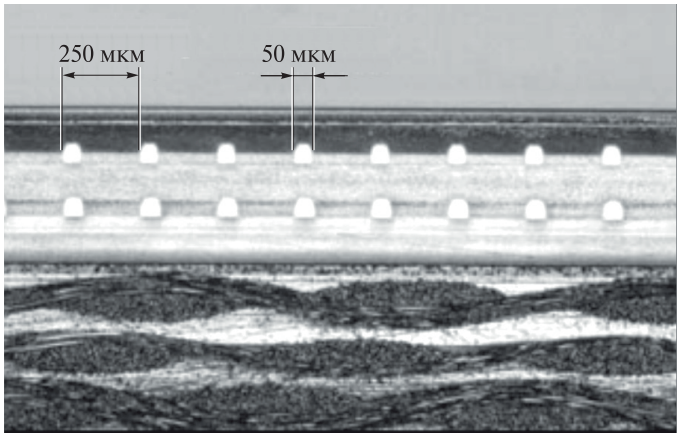


Рис. 1.72. Фотография ПП с двумя полимерными волноводными слоями

Сердцевина волноводов имеет квадратное сечение со сторонами 50 мкм, расстояние между волноводами по горизонтали равно 250 мкм, затухание на длине волны 850 мкм — 0,05 дБ/см.

Тесты к лекции 1.15

1. ***Укажите главное отличие оптоволокна от медного провода:***

а) по оптоволокну переносится свет, а по медному проводу — электрический сигнал;

б) для подключения оптоволоконного кабеля требуется специалист;

в) оптоволоконный кабель стоит дороже, чем медный.

2. ***Как соотносятся между собой показатели преломления оптической оболочки и ядра оптоволоконного кабеля?***

а) показатель преломления ядра больше, чем показатель преломления оптической оболочки;

б) показатель преломления ядра меньше, чем показатель преломления оптической оболочки;

в) они равны.

3. ***Какой тип оптического волокна имеет дополнительную защитную оболочку?***

а) стеклянные волокна;

б) стеклянные волокна с пластиковой оптической оболочкой;

в) полимерные волокна.

4. ***Что показывает модовая дисперсия?***

а) максимальную разность во времени распространения разных мод на одном отрезке волокна;

б) минимальное время, за которое луч проходит 1 км отрезка волокна;

в) число мод в конкретном волокне.

5. ***Какую роль играет легирование в изготовлении световода?***

а) легирование позволяет получить требуемый показатель преломления;

б) в основном легирование используют для увеличения прочности волокна;

в) в процессе изготовления световода не используют операцию легирования.

1.16. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель лекции: изучение методов электрического контроля и диагностики коммутационных структур (КС). Рассмотрение аналоговых сигнатур базовых элементов. Анализ режимов и принцип работы локализатора неисправностей. Методика проведения входного контроля с использованием локализатора неисправностей.

1.16.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Одним из важнейших этапов производства КС являются контроль и диагностика. Контроль КС — это процесс проверки и оценки правильности соединений и функционирования коммутационных элементов в ИЭТ. Этот этап играет важную роль в обеспечении надежности и безопасности эксплуатации ИЭТ.

Применяются следующие основные методы контроля КС:

– *электрический* — КС проверяется на целостность проводников, правильность трассировки, наличие короткого замыкания между проводниками, качество изоляции;

– *оптический* — позволяет обнаружить такие дефекты, как проколы, царапины, выступы на проводниках; неточности в размещении контактных площадок и проводников; неточность размеров контактных площадок и проводников; подтравливание, дефекты металлизации и др.;

– *рентгеновский* — применяется для поиска пустот в слоях; при базировании слоев КС для определения места сверления базового отверстия нижнего слоя; для контроля качества просверленных отверстий и металлизации.

Для электрического тестирования применяют различные анализаторы производственных дефектов, в которых контактирование осуществляется следующими способами:

– через односторонний или двусторонний тестовый адаптер (поле подпружиненных контактов);

– с помощью пробниковой системы с подвижными пробниками (летучий пробник);

– использованием вакуумных, кассетных и пневматических адаптеров;

– большим числом разъемов.

Вариант использования специализированных адаптеров (рис. 1.73) целесообразен для крупносерийного и массового производства. Используемые адаптеры не универсальны, их изготовляют под конкретную КС. Данный способ характеризуется высокой производительностью, так как имеется возможность одновременной проверки всех цепей.

Использование летучего пробника (рис. 1.74) оправдано для мелкосерийного производства. Данный вид контроля универсален и может быть применен практически к любой КС. Однако этот метод имеет значительно более низкую производительность по сравнению с методом контроля с помощью поля подпружиненных контактов.

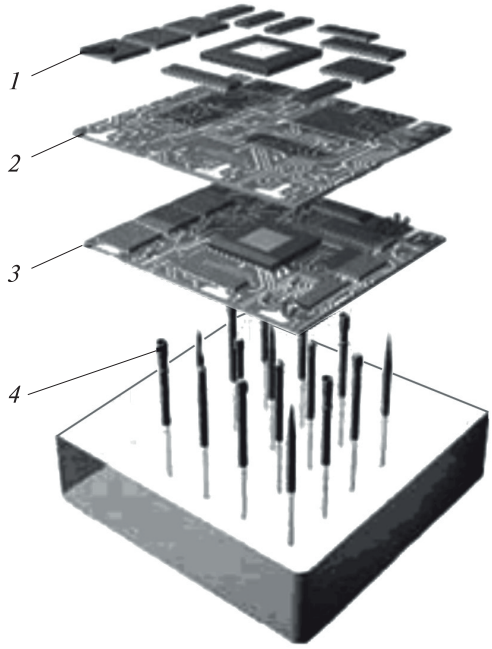


Рис. 1.73. Электрический контроль КС с помощью поля подпружиненных контактов:
1 — компоненты; *2* — ПП; *3* — монтированные ПП; *4* — зонды

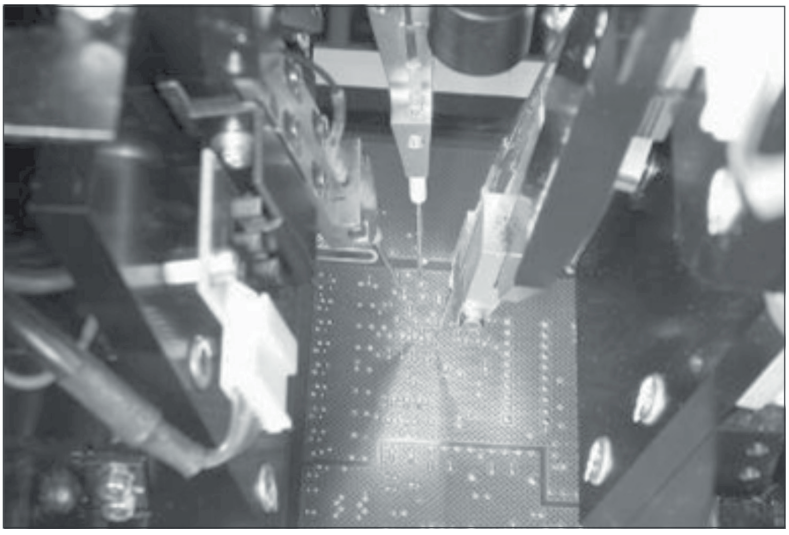


Рис. 1.74. Электрический контроль КС с помощью летучего пробника

1.16.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Оборудование для проверки электрических соединений и снятия характеристик используется повсеместно. Оно представляет собой как простые устройства для ручного контроля и проверки, так и частично автоматизированные и полностью автоматизированные. Последние по загруженной программе способны с помощью щупов обнаружить обрывы и некорректную работу. Частично автоматизированные работают в следующем режиме: работник вручную выставляет щупы в необходимые места, и устройство выводит или на свой экран, или на экран компьютера вольт-амперные характеристики (ВАХ), множественные значения, которые можно посмотреть в таблицах.

Также удобно использовать оборудование для проверки целостности электрических соединений, отсутствия дефектов в компонентах, уже смонтированных на ПП. Это поможет обнаружить скрытые дефекты, которые впоследствии можно конкретизировать при помощи дорогостоящего оборудования. Например: если не удалось установить видимые дефекты на ПП, можно определить некорректную работу с помощью менее дорогостоящего оборудования, снять необходимые характеристики, сравнить их с теоретическими или с практическими результатами, снятыми с образца. Далее при необходимости перейти к нахождению дефекта на рентгеновском оборудовании.

Например, методика контроля элементной базы ЭА с использованием аналогового сигнатурного анализатора ориентирована на применение локализатора неисправностей SFL1500 (ООО «Совтест АТЕ», г. Курск) и управляющей прибором программы SFLPro.

Методика охватывает тестирование пассивных компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) и тестирование полупроводниковых компонентов (диодов, стабилитронов, транзисторов).

Аналоговый сигнатурный анализ (АСА) (*Analogue Signature Analysis*, *ASA*) — современная технология диагностики неисправностей на смонтированных печатных узлах (ПУ) или компонентах РЭА. Данный метод основан на сравнении аналоговых сигнатур корректно работающих изделий (эталона) с сигнатурами тестируемых изделий. В случае совпадения сигнатур тестируемое изделие считается исправным, сигнатурные различия указывают на проблему или неисправность.

При сигнатурном анализе переменный синусоидальный сигнал, ограниченный по току, подается на тестируемый компонент, а результирующие значения тока, падения напряжения и фазовые сдвиги отображаются на дисплее измерителя. Значение протекающего тока отображается как вертикальное отклонение графика сигнатуры, падение напряжение на тестируемом компоненте отображается горизонтальным отклонением графика сигнатуры. Результирующий график на дисплее измерительного прибора называется «аналоговой сигнатурой» или ВАХ.

Упрощенная структурная схема сигнатурного анализатора, работающего с использованием технологии ACA, приведена на рис. 1.75.

На тестируемый компонент *RL* подается синусоидальный сигнал через токоограничивающий резистор *Rs*. Напряжение на тестируемом компоненте отображается на горизонтальной оси LCD-дисплея, а сила тока — на вертикальной оси. Каждый тестовый сигнал имеет следующие основные параметры: напряжение *Vs* источника, сопротивление *Rs* источника и частоту *Fs* сигнала источника, варьирующиеся для получения соответствующих аналоговых сигнатур в различных тестовых точках.

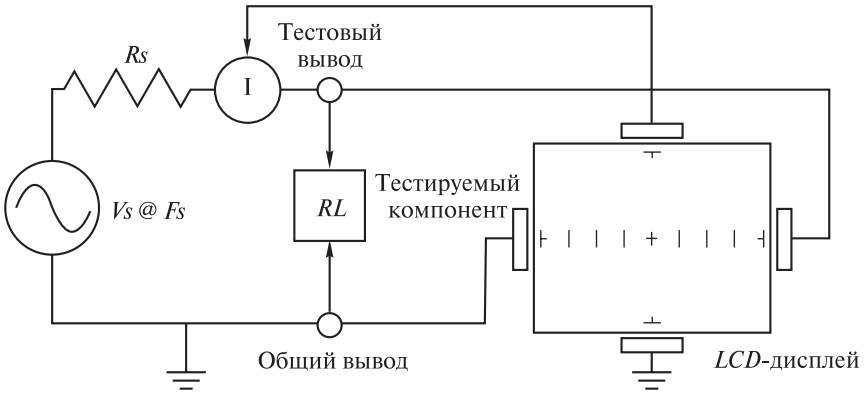


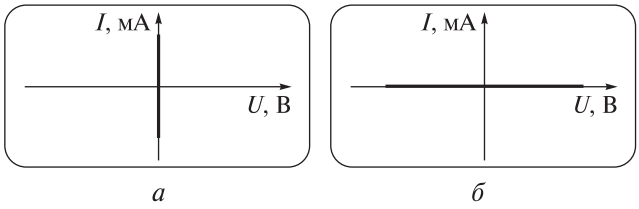
Рис. 1.75. Упрощенная структурная схема сигнатурного анализатора

Из закона Ома ($R = V/I$) следует, что результирующая характеристика представляет собой импеданс тестируемого устройства. Изменение частоты необходимо для тестирования частотно-зависимых компонентов, таких как конденсаторы и катушки индуктивности.

Сопротивление *RL* включено последовательно с внутренним сопротивлением *Rs* сигнатурного анализатора или сопротивлением источника. Поскольку сопротивление *Rs* является постоянным, то значение падения напряжения на исследуемом компоненте и значение тока, протекающего через компонент, зависят только от значения *RL*.

Аналоговые сигнатуры базовых компонентов. Большинство ошибок на отказавших ПП — это грубые сбои, такие как короткое замыкание или разомкнутые цепи, и их легко обнаружить с помощью сигнатурного анализа. Короткое замыкание будет отображаться как вертикальная линия, так как ток для любого приложенного напряжения теоретически бесконечен, тогда как разомкнутая цепь (бесконечное сопротивление) отображает горизонтальную линию, потому что ток всегда равен нулю независимо от приложенного напряжения. Сигнатуры короткого замыкания и разомкнутой цепи представлены на рис. 1.76.

Различные типы компонентов и устройств генерируют разные сигнатуры в зависимости от силы тока и от изменения приложенного напряжения. Рассмотрим сигнатуры четырех базовых элементов: сопротивления, емкости,



а *б*

Рис. 1.76. Сигнатуры короткого замыкания (*а*) и разомкнутой цепи (*б*)

индуктивности и полупроводника. Каждый из этих четырех основных компонентов по-разному реагирует на синусоидальный тестовый сигнал.

Сигнатура резистора указывается прямой линией под углом от 0 до 90°, наклон которой зависит от сопротивления, поскольку ток пропорционален приложенному напряжению (рис. 1.77). Чем выше значение тестируемого резистора, тем ближе линия проходит к горизонтали (разомкнутая цепь). Для обеспечения максимальной точности следует выбирать импеданс источника сигнатурного анализатора, чтобы наклон линии для хорошего резистора был близок к 45°. Разность в наклоне кривой при сравнении хорошей и тестируемой ПП указывает на разность в значениях резисторов на двух ПП.

Сигнатура конденсатора — круг или эллипс (рис. 1.78).

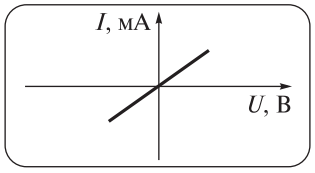


Рис. 1.77. Сигнатура резистора

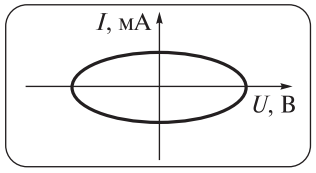


Рис. 1.78. Сигнатура конденсатора

Вследствие способности накапливать энергию данные реактивные компоненты осуществляют фазовый сдвиг между напряжением и током. Это свойство приводит к получению характеристик в виде кругов или эллипсов. Конденсаторы с относительно низкими значениями имеют сглаженные, горизонтальные, эллиптические сигнатуры, а конденсаторы с относительно высокими значениями — уплощенные, вертикальные, эллиптические сигнатуры. Оптимальная сигнатура представляет собой почти идеальный круг, который можно получить, выбирая соответствующую частоту испытания и импеданс источника.

Как правило, чем выше емкость, тем ниже тестовое сопротивление и частота. Негерметичный конденсатор дает наклонную кривую из-за эффективного сопротивления параллельно с конденсатором.

Сигнатура индуктивностей имеет круглую или эллиптическую форму, обусловленную внутренним сопротивлением, и может показывать гистерезис (рис. 1.79). Индуктивности с относительно высокими значениями имеют сглаженные, горизонтальные, эллиптические сигнатуры, аналогичные показателям

конденсаторов. Оптимальная сигнатура — идеальный круг. Индукторы с одинаковым значением могут иметь очень разные сигнатуры, если они используют разные материалы сердечника или если сердечник расположен по-другому.

Для индуктивности обычно требуется низкий импеданс источника и более высокие тестовые частоты для проявления эллиптической сигнатуры.

Сигнатура полупроводникового диода состоит из двух или более линейных отрезков прямых, которые напоминают прямой угол, с проводимостью как в прямом, так и в обратном направлениях (рис. 1.80). Сигнатура диода отражает саму природу полупроводникового *p*–*n*-перехода. Как известно, для

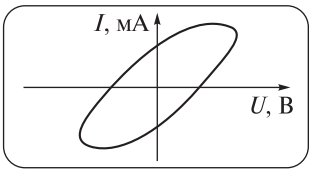


Рис. 1.79. Сигнатура индуктивности

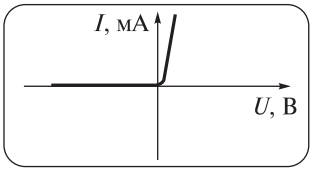


Рис. 1.80. Сигнатура диода

p–*n*-перехода существует пороговое напряжение (напряжение включения), при котором диод начинает проводить ток. Это напряжение составляет около 0,6 В для диодов, изготовленных на основе кремния. Пока разность напряжений между анодом и катодом прибора будет оставаться ниже порогового значения, диод будет вести себя подобно открытой цепи. Как только пороговое значение будет превышено, диод начнет проводить ток. Как только диод перейдет в область проводимости, малое увеличение напряжения на аноде будет приводить к значительному увеличению тока через диод.

Светодиодные индикаторы имеют сигнатуры, аналогичные обычным полупроводниковым диодам (рис. 1.81), за исключением более высокого значения падения напряжения на открытом элементе — примерно 1,5 В.

Дефектные диоды можно легко идентифицировать по отклонению от этой характеристики. Например, диод, который имеет значительную обратную утечку, будет иметь диагональную кривую в обратной области, подобную резистору.

Фактическая сигнатура в схеме представляет собой совокупность сигнатур основных компонентов в этой цепи.

Стабилитроны имеют абсолютно аналогичные обычным полупроводниковым диодам сигнатуры (рис. 1.82), но лишь до напряжений их

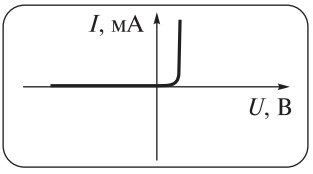


Рис. 1.81. Сигнатура светодиода

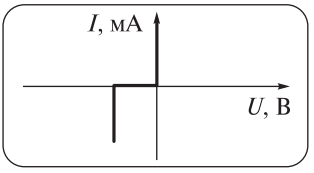


Рис. 1.82. Сигнатура стабилитрона

стабилизации. При достижении стабилитроном соответствующего напряжения стабилизации будет наблюдаться появление низкоимпедансной сигнатуры.

Транзисторы имеют два полупроводниковых перехода (один — между базой и коллектором, второй — между базой и эмиттером), соединенных друг с другом.

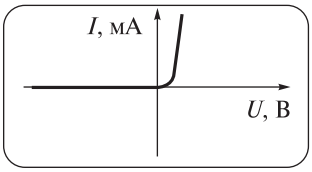


Рис. 1.83. Транзистор *n*–*p*–*n*-типа с переходом база–эмиттер

Типовые характеристики *n*–*p*–*n*-транзисторов (эмиттер и коллектор изготовлены из полупроводника *n*-типа, а база имеет *p*-тип) представлены на рис. 1.83.

Сигнатура перехода база–коллектор аналогична сигнатурам обычных полупроводниковых диодов.

Сигнатура перехода коллектор–эмиттер аналогична сигнатурам стабилитрона. Когда тестирующее напряжение положительно (правый квадрант), переход коллектор–база смещен в обратном направлении, а база–эмиттер — в прямом. Смещенный в обратном направлении переход коллектор–эмиттер препятствует прохождению тока, что на сигнатуре отражается в виде горизонтальной линии (отсутствие контакта).

Когда напряжение тестирования отрицательно (левый квадрант), переход коллектор–база смещен в прямом направлении, а база–эмиттер — в обратном. Переход база–эмиттер отображается аналогично пробою стабилитрона — в виде пологой линии, параллельной оси абсцисс. Следует отметить необходимость осторожного обращения с обратно смещенным переходом база–эмиттер.

Сигнатуры транзисторов *p*–*n*–*p*-типа являются зеркальными отображениями сигнатур транзисторов *n*–*p*–*n*-типа.

Тестирование работоспособности транзистора заключается в подаче на базу транзистора управляющего напряжения и в дальнейшем наблюдении за изменением проводимости между коллектором и эмиттером.

Анализаторы сигнатур оснащены источником напряжения постоянного тока для проверки режимов работы активных устройств, таких как транзисторы. Для этой цели также можно использовать внешний источник питания.

Прибор функционирует как обычный характериограф, напряжение подается на вывод базы транзистора, а сигнатура эмиттер–коллектор выводится на экран дисплея. Полученная сигнатура схожа с сигнатурами, получаемыми с помощью характериографов. Однако, так как используется постоянное значение тока, выводится одна кривая вместо семейства кривых. Такой подход может быть полезным при проверке работоспособности и коэффициента усиления транзистора.

Для транзисторов *n*–*p*–*n*-типа главное значение принадлежит части характеристики, находящейся в верхнем правом квадранте дисплея.

Для транзисторов *p*–*n*–*p*-типа наоборот (зеркально) наиболее важной частью характеристики является ее часть, находящаяся в левом нижнем квадранте.

Устанавливая на импульсном генераторе режим PULSE 1 «+», можно получить на дисплее сигнатуры отображение как проводящего, так и непроводящего состояний транзистора.

Если оставить уровень напряжения импульсного генератора LEVEL в аналогичном предыдущему состоянии и увеличить длительность импульсов с помощью кнопок WIDTH, то при установке достаточной длительности переход база–эмиттер смещается в прямом направлении, транзистор начинает пропускать ток. При недостаточном значении длительности импульсов транзистор закрыт и на дисплее отображается сигнатура, аналогичная сигнатурам компонентов, имеющим открытые выводы.

Обзор сигнатур транзисторов:

– транзисторы являются полярными устройствами, поэтому их сигнатуры могут иметь обратную форму, если исследуемый компонент или тестовые щупы (пробники) размещены обратным образом. Транзисторы *n–p–n*-типа и *p–n–p*-типа при сравнении имеют схожие, но противоположные сигнатуры;

– анализаторы сигнатур могут определить тип транзистора (биполярный, Дарлингтона и т. д.), его полярность (*n–p–n* или *p–n–p*), расположение выводов (база, эмиттер, коллектор), а также могут быть использованы как характериограф для оценки коэффициента усиления;

– гибкость в выборе тестовых параметров прибора позволяет выделить или скрыть детали составной (композитной) сигнатуры исследуемой схемы.

Локализатор неисправностей (аналоговый сигнатурный анализатор) SFL1500 (рис. 1.84) предназначен для поиска неисправностей в электронных модулях на компонентном уровне. Прибор прост в эксплуатации, получаемая с его помощью информация позволяет выявлять самые сложные неисправности в электронных модулях и может быть использована производителями электроники и сервисными центрами. Кроме того, он может применяться для входного контроля электронных компонентов.

Рис. 1.84. Общий вид локализатора неисправностей SFL1500

Приборы разработаны специалистами предприятия ООО «Совтест АТЕ» и успешно прошли испытания на базе предприятия, а также в независимой лаборатории на соответствие требованиям ГОСТ Р.

Особенности прибора SFL1500:

– локализация неисправностей на компонентном уровне без подачи питания на проверяемый электронный модуль методом АСА;

– обнаружение неисправных конденсаторов, транзисторов, симисторов и ИМС без выпаивания их из электронных модулей;

– программирование по эталонному модулю в режиме самообучения;

– функция RLC для распознавания типов SMD-компонентов на платах и определения их номиналов.

Прибор имеет широкий диапазон режимов тестирования и частотных режимов. Это позволяет достоверно оценить большое число различных компонентов. Можно одинаково безопасно подвергать тестированию как полупроводниковые компоненты и микросхемы, так и мощные радиоэлементы. Так, режим MIN удобен при проверке цепей схемы электронного модуля, состоящей из пассивных и полупроводниковых компонентов, а в режиме HIGH возможно тестирование высокоомных компонентов и диодов, имеющих обратное напряжение 20...50 В. Варьируя частотными режимами, удобно оценивать работу компонентов, накапливающих энергию, — конденсаторов и индуктивностей.

Функция RLC — еще один полезный инструмент локализатора неисправностей SFL1500. Ее использование незаменимо на платах с высокой плотностью монтажа SMD-компонентов, когда требуется распознавание типов компонентов и определение их номиналов.

Основные достоинства локализатора неисправностей SFL1500:

– *автоматизация*. Прибор обеспечивает автоматическое сравнение проверяемого модуля с эталонным и сообщает результат тестирования ГОДЕН/НЕ ГОДЕН. Как следствие, обеспечивается высокая производительность;

– *универсальность*. Позволяет диагностировать любые виды электронных компонентов и их комбинации;

– *простота в освоении и эксплуатации*. Поиск неисправностей может осуществлять сервисный персонал со средней квалификацией. Не требует наличия электрической схемы изделия;

– *безопасность тестирования*. Тестирование проводится без подключения питания к проверяемым и эталонным изделиям;

– *сохранение целостности тестируемого изделия*. Поиск неисправности не требует выпаивания компонентов из платы, не повреждает ее печатные проводники.

Рассмотрим состав и интерфейс локализатора неисправностей SFL, представленный на рис. 1.85.

На передней панели локализатора неисправностей расположены два разъема каналов A и B для подсоединения тестовой клипсы к тестируемому компоненту. Два запараллеленных разъема COM (общий) предназначены для присоединения тестовой клипсы COM к общему проводу тестируемой

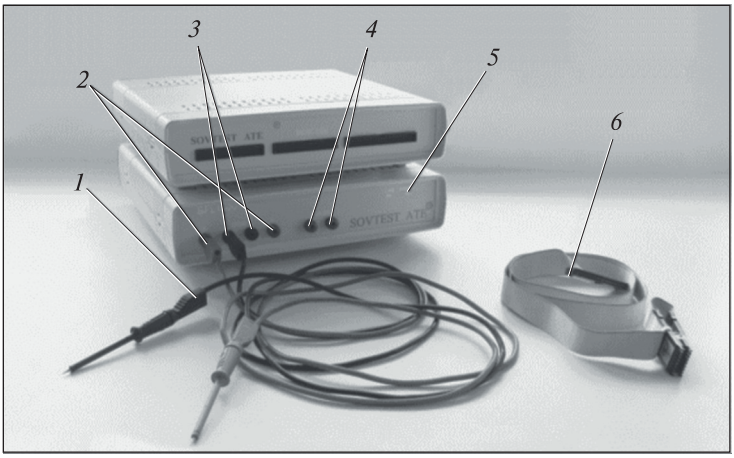


Рис. 1.85. Состав и интерфейс локализатора неисправностей SFL1500:

1 — локализатор неисправностей SFL1500; *2* — игольчатый щуп (2 шт.); *3* — 16-канальная тестовая клипса; *4* — два разъема каналов A и B; *5* — два запараллеленных разъема COM; *6* — два разъема импульсного генератора PULSE

платы (плат). Если сравнивают две платы, то оба их общих провода должны подсоединяться к разъемам COM прибора. Два разъема импульсного генератора PULSE позволяют работать в режиме тестирования двух испытываемых плат. Импульсный генератор генерирует идентичные сигналы между каждым разъемом PULSE и гнездами COM. Сигналы на разъемах PULSE генерируются индивидуально: хотя на каждый из данных разъемов направляется один и тот же импульс, нагрузка на каждом из них не влияет на сигнал, снимаемый с другого разъема. Выводы генератора можно объединять для увеличения воздействующего тока на управляющий вывод компонента.

На задней панели локализатора неисправностей расположены:

– разъем для подсоединения сетевого шнура;
– кнопка включения (выключения) прибора ВКЛ/ВЫКЛ;
– разъем типа B интерфейса USB 2.0;
– разъем для подключения мультиплексора (IDC26).

Оснастка для проведения входного контроля полупроводниковых изделий. Для повышения производительности при входном контроле большого числа элементов было принято решение разработать оснастку для закрепления объектов тестирования. Сборочный чертеж оснастки представлен на рис. 1.86.

Данная оснастка позволяет осуществлять подключение необходимого числа выводов сигнатурного анализатора к исследуемым объектам тестирования, при этом значительно сокращает время на смену этого объекта. Достаточно один раз определить число и место установки выводов объекта тестирования, чтобы подключить тестовые клипсы сигнатурного анализатора к соответствующим разъемам и в дальнейшем проводить операции только по замене объектов тестирования в оснастке.

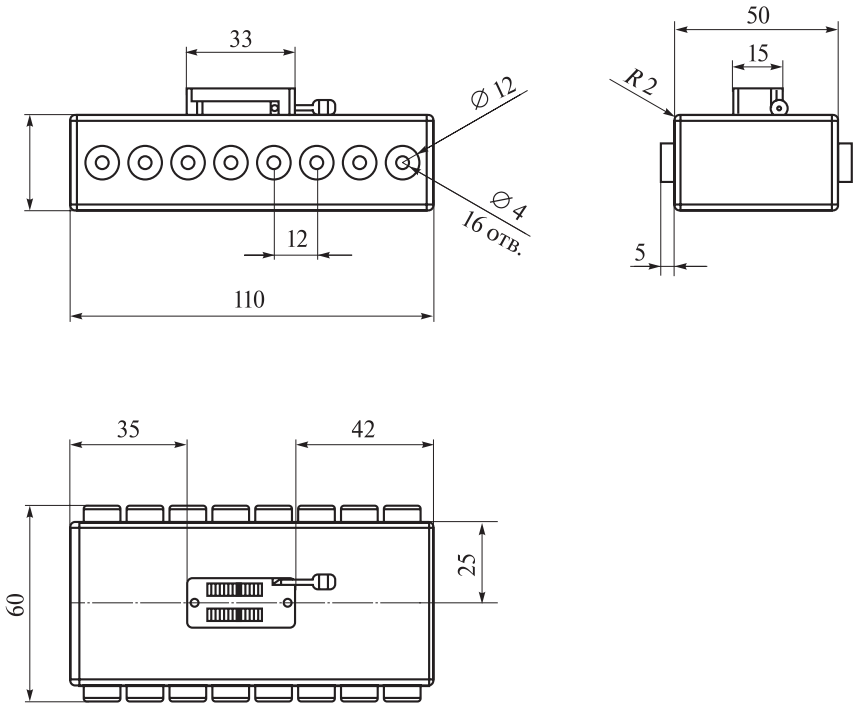


Рис. 1.86. Сборочный чертеж оснастки для входного контроля

Трехмерная модель оснастки представлена на рис. 1.87.

Тестовые клипсы сигнатурного анализатора необходимо подключить к соответствующим разъемам. Испытуемый образец устанавливается в соответствующей разъем с нулевым усилием вставки.

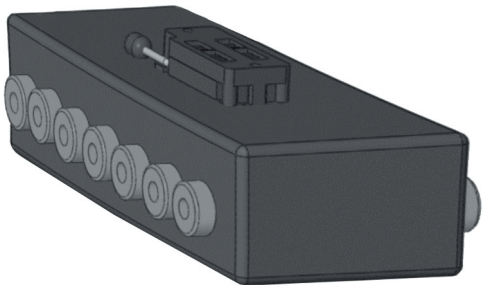
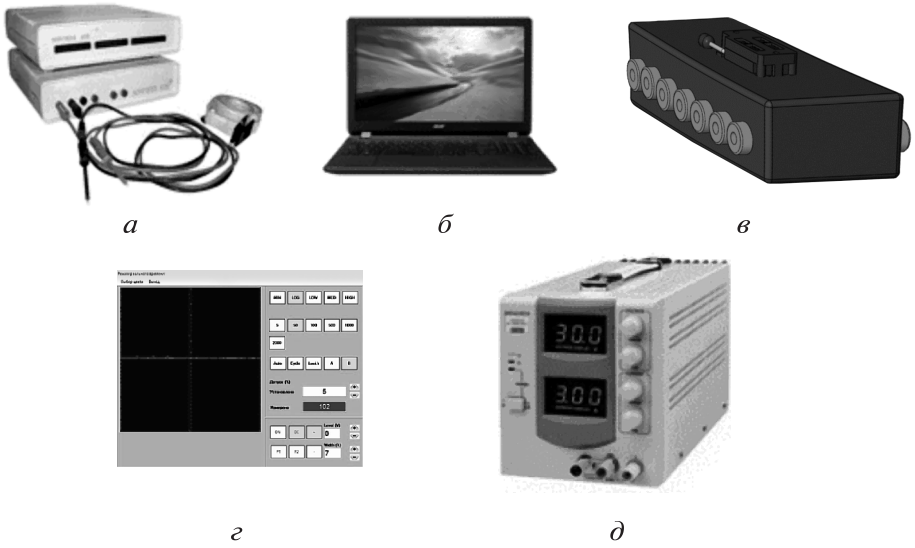


Рис. 1.87. Трехмерная модель оснастки для входного контроля

Структура измерительного комплекса. Измерение электрических параметров полупроводниковых приборов осуществляется с помощью измерительного стенда аналогового сигнатурного анализа (рис. 1.88).

В состав измерительного комплекса входит: сигнатурный анализатор SFL1500, персональный компьютер, оснастка для входного контроля, программное обеспечение, внешний источник питания.

Рабочее место на базе измерительного стенда аналогового сигнатурного анализа приведено на рис. 1.89.



а *б* *в*

г *д*

Рис. 1.88. Структура измерительного комплекса:
а — сигнатурный анализатор; *б* — персональный компьютер; *в* — оснастка для входного контроля; *г* — программное обеспечение; *д* — источник питания

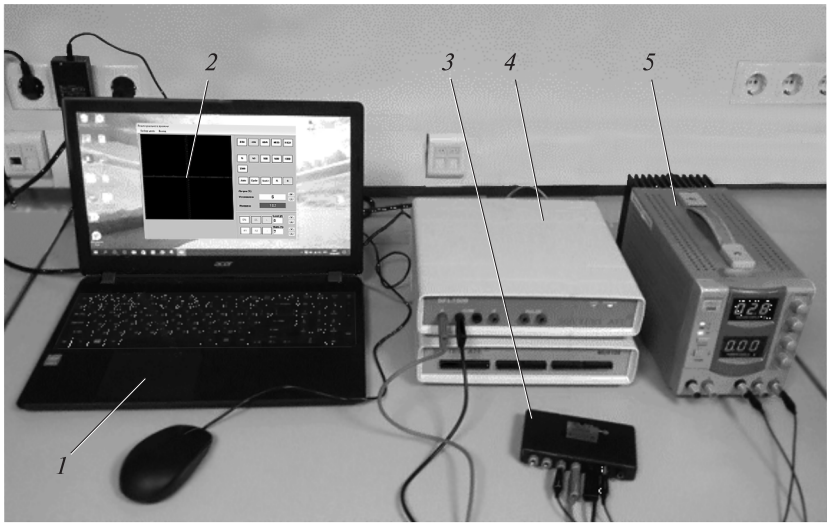


Рис. 1.89. Внешний вид измерительного комплекса:
1 — программное обеспечение; *2* — персональный компьютер; *3* — оснастка для входного контроля; *4* — сигнатурный анализатор SFL1500; *5* — внешний источник питания

С помощью данного измерительного комплекса возможен как входной контроль качества работы определенного элемента, так ИМС в целом. Также можно проводить изучение ВАХ радиоэлектронных приборов без необходимости подключения внешнего источника питания.

Анализ режимов и принципа работы локализатора неисправностей SFL1500. В режиме реального времени (непосредственного сравнения) прибор сравнивает два одинаковых устройства — эталонное и тестируемое, и результат тестирования выводится на дисплей локализатора неисправностей (ЛН) или монитор персонального компьютера (ПК).

В режиме программирования прибор проводит проверку изделия по заданной программе тестирования. Оператор устанавливает пробники согласно командам программы, а сравнение сигналов выполняется прибором автоматически. Наличие файла эталонных сигнатур (тестовой программы) позволяет обойтись при тестировании без использования второго (эталонного) устройства.

Диапазоны тестирования ЛН:

	$U_{пик}$, В	$I_{пик}$
MIN	1	500 мкА
LOW	10	5 мА
LOGIC	10	150 мА
MED	20	1 мА
HIGH	40	1 мА

Частоты тестирования: 5 Гц; 50 Гц; 100 Гц; 500 Гц; 1000 Гц; 2000 Гц.

Импульсный генератор:

DC	Постоянный ток
*P*1, *P*2	Режимы импульсов: 1, 2
WIDTH	Регулировка длительности импульса
LEVEL	Уровень 0...7 В

Регулировка чувствительности	1...99 %
Собственная память	128 сигнатур
Подключение к ПК по USB	Управление работой прибора (чтение/сохранение результатов тестирования)

Рассмотрим принцип работы ЛН SFL1500. Структурная схема ЛН представлена на рис. 1.90.

Локализатор неисправностей SFL1500 работает следующим образом.

Центральный процессор на базе микроконтроллера MSP430F1611 (*1*) с помощью программного обеспечения и встроенного 12-битного ЦАП генерирует эталонный аналоговый синусоидальный сигнал частотой 50 Гц, 100, 500, 1000 и 2000 Гц и амплитудой 50 В, 20, 10, 1 В, частота сигнала и амплитуда устанавливаются с клавиатуры (*2*), клавиатура сканируется центральным процессором. Эталонный сигнал усиливается высоковольтным усилителем (*3*) и усилителем (*4*) до требуемой амплитуды, после чего подается через измерительные шунты (*6–9*) на выводы электромагнитных реле (*10*),

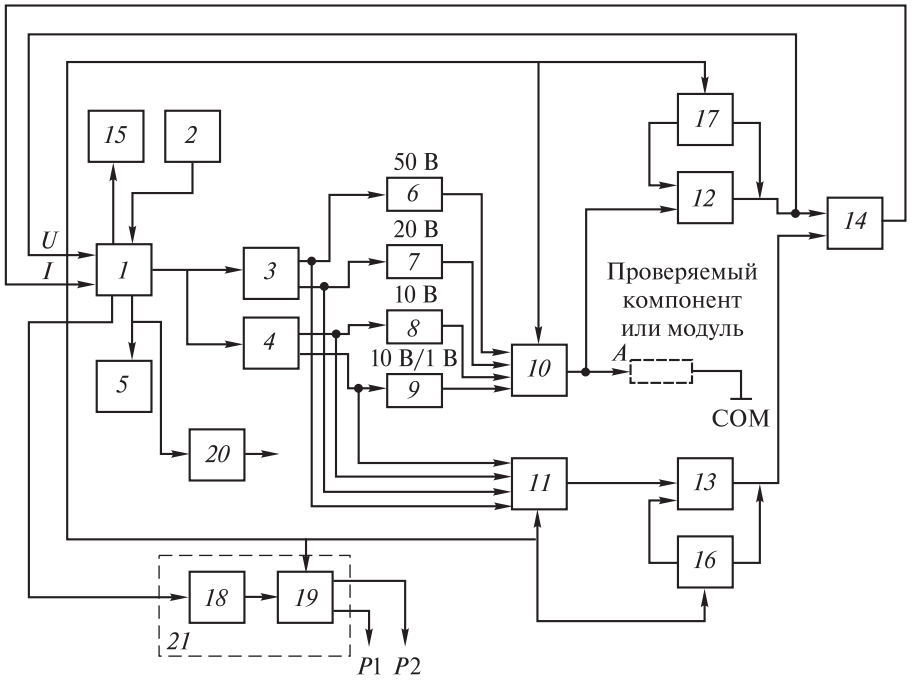


Рис. 1.90. Структурная схема ЛН SFL1500:

1 — центральный процессор на базе микроконтроллера MSP430F1611; *2* — клавиатура; *3* — высоковольтный усилитель; *4* — усилитель; *5* — регистр управления реле; *6–9* — измерительные шунты; *10*, *11* — электромагнитные реле; *12*, *13* — операционные усилители с программируемым коэффициентом усиления; *14* — операционный усилитель; *15* — цветной монитор; *16*, *17* — аналоговые мультиплексоры; *18* — операционный усилитель; *19* — электромагнитное реле; *20* — блок буферных регистров защелок; *21* — импульсный генератор

управление которыми осуществляет микроконтроллер через общую шину данных и регистр управления реле (*5*).

В зависимости от выбранного диапазона напряжения тестирования центральный процессор устанавливает управляющий код на шине данных регистра управления реле, и соответствующий измерительный шунт подключается к каналу А.

Проверяемый компонент или электронный модуль подключается между каналом А и «общим» выводом (COM). Напряжение, снимаемое до измерительного шунта, через электромагнитное реле (*11*) подается на вход операционного усилителя с программируемым коэффициентом усиления (*13*). В обратной связи усилителя установлен аналоговый мультиплексор (*16*), который в зависимости от управляющего кода процессора изменяет коэффициент усиления. Аналогично с помощью электромагнитного реле (*10*) и операционного усилителя с программируемым коэффициентом (*12*) преобразуется напряжение, снятое после измерительного шунта, непосредственно на измеряемом компоненте. Значение напряжения, полученное на

выходы операционного усилителя (*12*), пропорционально напряжению на тестируемом компоненте. Преобразованные напряжения с выходов усилителя (*12*) и (*13*) подаются на вход операционного усилителя (*14*), который производит вычитание амплитудных значений напряжения. Значение напряжения, полученное на выходе операционного усилителя (*14*), пропорционально току в цепи шунта информационного канала А, к которому подключен тестируемый компонент.

Напряжение с выхода операционного усилителя (*14*) и операционного усилителя (*12*) подается на вход встроенного 12-битного АЦП центрального процессора. Центральный процессор оцифровывает полученные значения напряжения и строит график зависимости напряжения от тока (аналоговую сигнатуру), которую выводит на цветной монитор (*15*).

Схема импульсного генератора (*21*) содержит операционный усилитель (*18*), на вход которого с выхода ЦАП 2 центральный процессор подает импульсный сигнал прямоугольной формы, синхронизированный с частотой эталонного аналогового синусоидального сигнала; частота сигнала соответствует выбранному частотному диапазону. Операционный усилитель усиливает сигнал по напряжению и току. Амплитуда (от 0 до ±7,5 В), полярность сигнала и длительность импульса (от 0...99 %) задаются кнопками управления импульсного генератора на передней панели прибора. Усиленный сигнал с выхода операционного усилителя подается на выводы электромагнитного реле (*19*), которое по управляющему коду с регистра управления реле (*5*) подключает сигнал к выходам *P*1 и *P*2 импульсного генератора (*21*).

Для подключения сканера на 1024 вывода, который является дополнительным оборудованием, в схему прибора введен блок буферных регистров защелок (*20*). Центральный процессор по общей шине данных устанавливает управляющий код на входах буферных регистров, выходы буферных регистров выведены на разъем для подключения сканера.

Маршрут измерения характеристик элементов. Обобщенный маршрут измерений характеристик элементов можно представить в виде алгоритма (рис. 1.91).

Маршрут измерений характеристик радиоэлектронных компонентов начинается с подключения ЛН к ПК. Для установки связи ЛН с ПК необходимо выполнить следующие действия:

1) подключить ЛН к ПК с помощью USB-кабеля, входящего в комплект поставки;

2) подключить мультиплексор к ЛН;

3) включить тумблер питания ЛН на задней панели;

4) запустить файл SFL.exe рабочей директории;

5) после запуска исполнительного файла Sfl.exe на мониторе ПК появится окно конфигурации COM-порта (рис. 1.92).

В поле Portmode необходимо выбрать номер порта, к которому подключен ЛН и нажать кнопку «Открыть порт». Должно появиться сообщение об

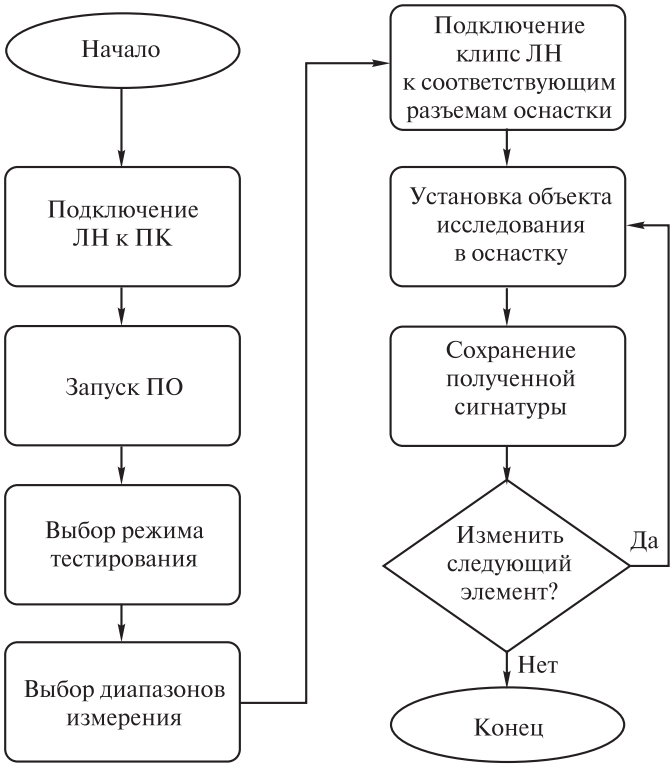


Рис. 1.91. Алгоритм измерения ВАХ полупроводниковых приборов

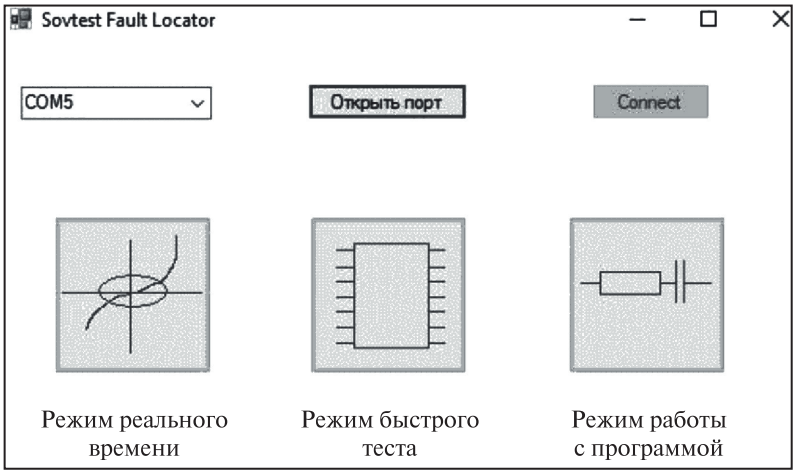


Рис. 1.92. Окно конфигурации COM-порта

успешном открытии порта. В противном случае необходимо проверить правильность подключения ЛН к ПК.

Далее осуществляется переход в главное окно программ SFLPro. Основное рабочее окно программы показано на рис. 1.93.

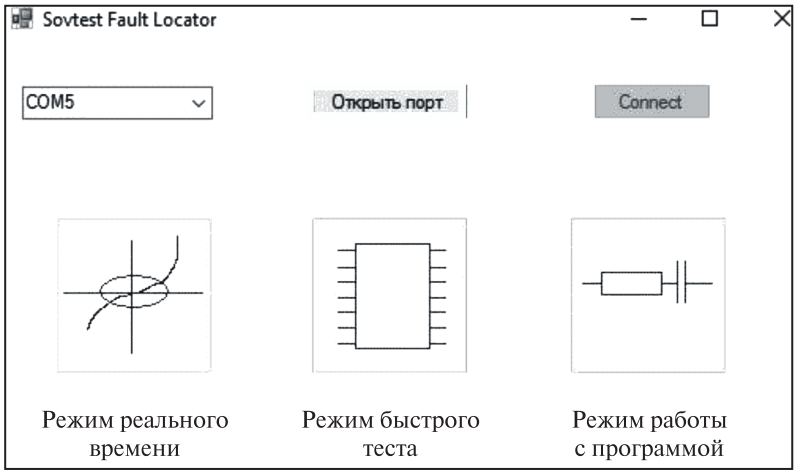


Рис. 1.93. Основное рабочее окно программы

Выбрать «Режим реального времени».

Исследование аналоговых сигнатур проводится в режиме реального времени.

Рабочее окно программы показано на рис. 1.94.

Располагаем объект исследования в оснастку для входного контроля. При необходимости образец можно закрепить с помощью рычага.

Подключаем тестовые клипсы сигнатурного анализатора к соответствующим разъемам оснастки.

Выбираем необходимые параметры измерения в программном обеспечении.

Полученная сигнатура выводится на экран ПК.

В данном примере получена сигнатура диода 1N4148 (рис. 1.95).

Маршрут проведения входного контроля элементов. Обобщенный маршрут входного контроля элементов можно представить следующим образом:

Выбрать «Режим быстрого теста» (рис. 1.96).

Располагаем объект исследования в оснастку для входного контроля. При необходимости образец можно закрепить с помощью рычага.

Подключаем тестовые клипсы сигнатурного анализатора к соответствующим разъемам оснастки.

Сначала необходимо создать базу эталонных сигнатур, с которыми будет сравниваться вся партия (рис. 1.97).

Для этого следует установить работоспособный элемент и сохранить в базу его сигнатуру. Затем выбрать в меню пункт «Сканировать эталонные»,

Рис. 1.94. Рабочее окно программы «Режим реального времени»

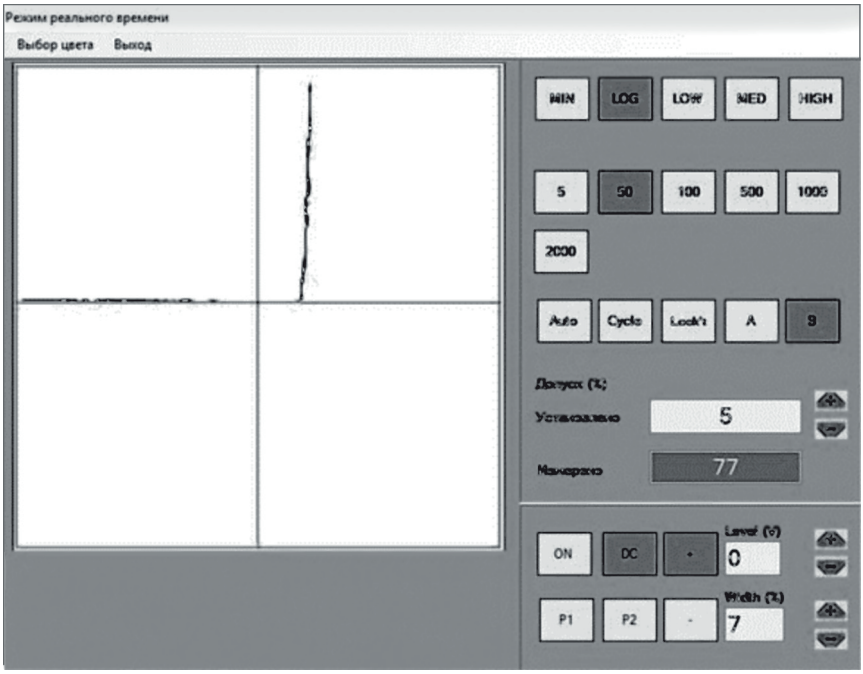


Рис. 1.95. Сигнатура диода 1N4148

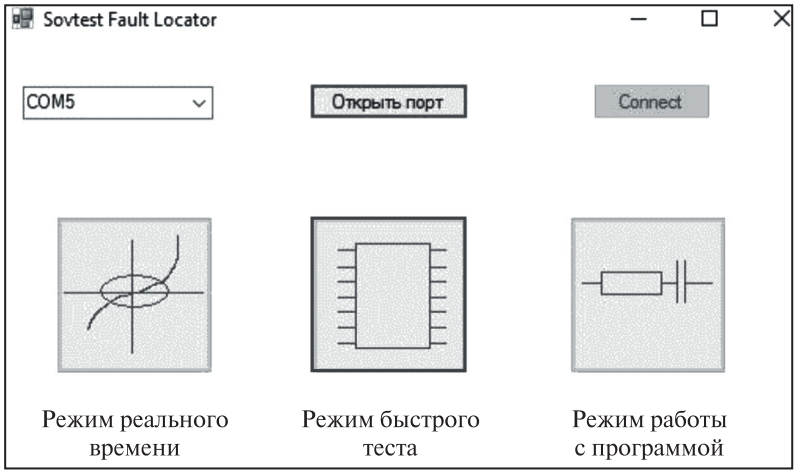


Рис. 1.96. Главное окно программы

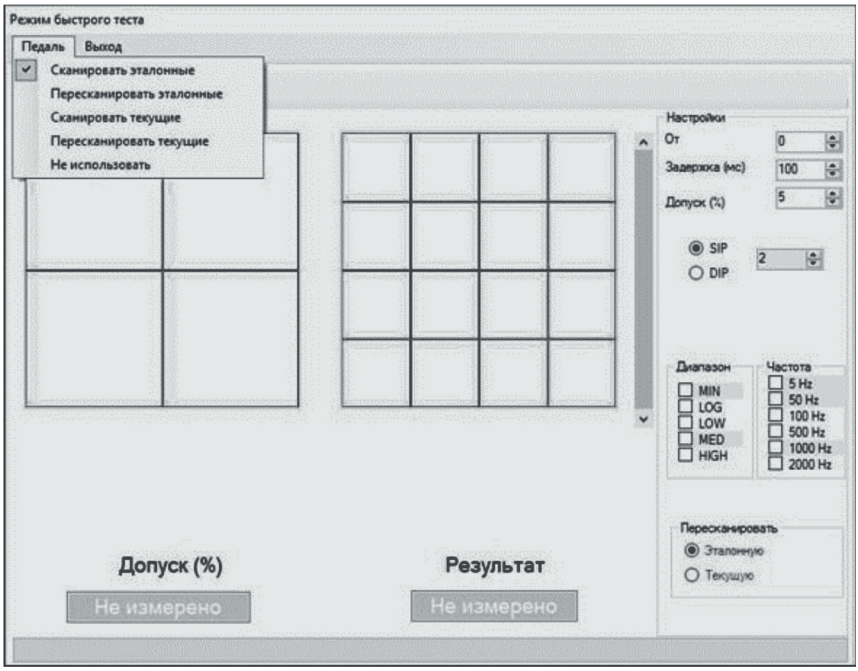


Рис. 1.97. Рабочее окно программы «Режим быстрого теста»

задать параметры измерения и нажать кнопку «Сканировать эталонную сигнатуру».

После получения эталонной сигнатуры ее необходимо добавить в базу сигнатур — нажать кнопку «Сохранить сигнатуру». Для последующей работы с данным элементом его сигнатуру можно будет загрузить из базы сигнатур с помощью кнопки «Загрузить сигнатуры».

После загрузки эталонной сигнатуры можно приступать к проверке партии элементов. Для этого устанавливаем проверяемый элемент в оснастку и нажимаем на кнопку «Сканировать текущую сигнатуру».

В случае совпадения сигнатур тестируемого и эталонных элементов программа выдаст результат «Годен» (рис. 1.98).

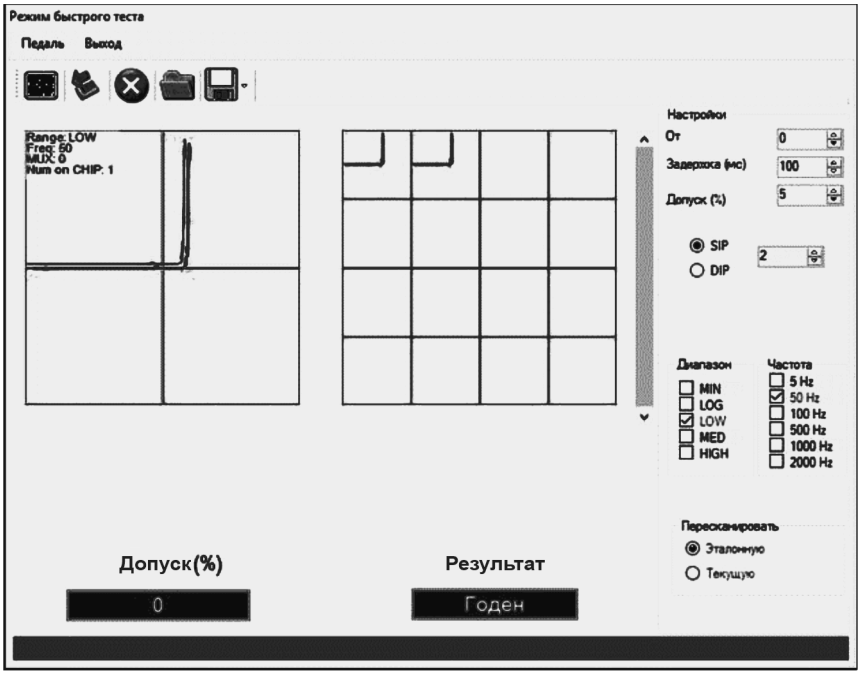


Рис. 1.98. Результат тестирования исправного элемента

При несовпадении сигнатур программа выведет результат «Не годен» (рис. 1.99).

В данном случае протестирована партия диодов 1N4148, и у одного из них обнаружена неисправность — пробой. При пробое диод превращается в обычный проводник и свободно пропускает ток в прямом и обратном направлениях, что видно на его сигнатуре.

Практическая ценность предложенных инструментов состоит в том, что они позволяют сделать правильный выбор необходимых методов контроля и диагностики в зависимости от решаемых задач на предприятии и необходимого набора функций требуемой системы.

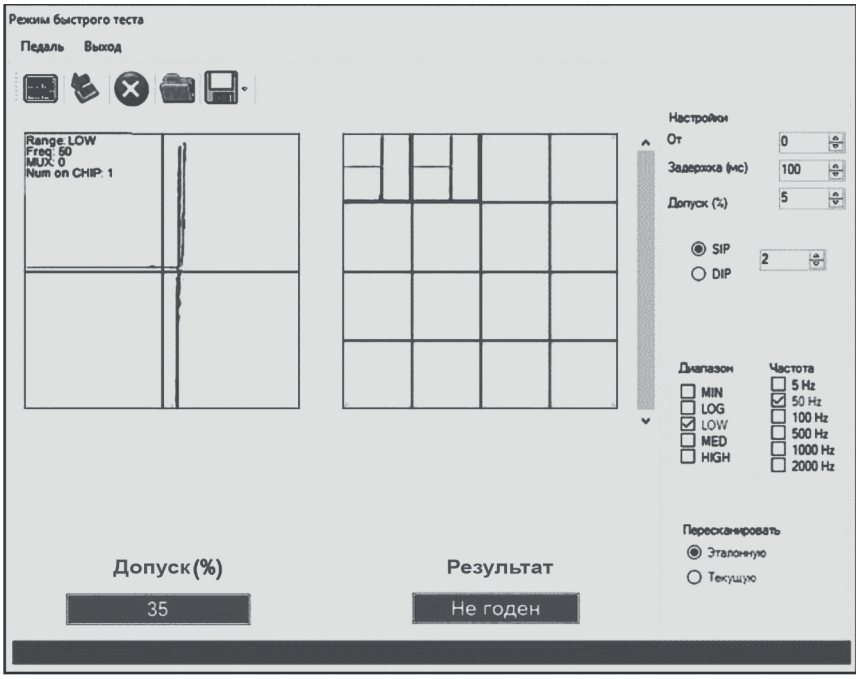


Рис. 1.99. Результат тестирования неисправного элемента

Рассмотренный подход к автоматизации анализа результатов входного контроля может быть использован на малых и средних предприятиях в качестве инструмента для визуализации результатов контроля и в качестве инструмента для принятия управленческих решений на основе обрабатываемых показателей качества ЭА.

Тесты к лекции 1.16

1. ***При тестировании работоспособности транзисторов наблюдают за изменением проводимости между ...***

а) коллектором и эмиттером;

б) базой и коллектором;

в) базой и эмиттером.

2. ***Что представляет собой сигнатура конденсатора?***

а) эллипс;

б) горизонтальную прямую;

в) ломаную линию.

3. ***Какой метод контроля позволяет обнаружить места сверления базовых отверстий нижнего слоя?***

а) рентгеновский;

б) оптический;

в) электрический.

4. ***Локализатор неисправностей предназначен для поиска неисправностей на …***

а) компонентном уровне;

б) уровне модулей;

в) микронном уровне.

5. ***Сигнатура короткого замыкания и разрыва цепи имеет вид:***

а) вертикальной и горизонтальной прямых;

б) прямых под углом 45° и 135°;

в) эллипсов, смещенных относительно вертикальной оси.

1.17. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель лекции: изучение методов контроля качества и диагностики коммутационных структур. Основы дефектоскопии. Рассмотрение оптического метода контроля паяных соединений. Изучение дефектов паяных соединений, переходных отверстий и причин их появления.

1.17.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Для управления качеством коммутационных структур (КС) на предприятии-изготовителе могут быть введены следующие этапы:

– входной контроль базовых материалов;

– промежуточный (межоперационный) контроль качества, верификация технологического процесса;

– контроль процессов изготовления КС (например, мониторинг параметров процесса);

– автоматическая оптическая инспекция (АОИ);

– рентгеновский контроль;

– электрическое тестирование продукции;

– финишный контроль качества;

– обучение и повышение квалификации персонала;

– регулярное обновление и модернизация оборудования;

– анализ брака и устранение причин его возникновения. Для выявления причин могут использоваться различные методы — статистический анализ, причинно-следственный анализ, анализ отказов.

Требования к параметрам и характеристикам КС определяют государственные стандарты и нормативные документы. Например, предприятие-изготовитель ПП «Резонит» (https://www.rezonit.ru) обладает сертификатом соответствия системы менеджмента качества, распространяющейся на производство и реализацию ПП, о соответствии ГОСТ Р ИСО 9001–2015 (ISO 9001:2015). Сертификат соответствия выдается в результате проверки соответствия стандартам. Этот сертификат является документом, подтверждающим выполнение организацией требований стандарта и наличие у нее эффективной системы менеджмента качества. Сертификат соответствия не является бессрочным документом, он требует периодической проверки и обновления. Организация должна поддерживать и улучшать свою систему менеджмента качества, чтобы сохранять сертификат соответствия.

1.17.2. ОСНОВЫ ДЕФЕКТОСКОПИИ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Дефектоскопию можно проводить различными методами в зависимости от вида дефекта, его размера и расположения. Обобщенная классификация методов дефектоскопии представлена на рис. 1.100.

Рис. 1.100. Обобщенная классификация методов дефектоскопии

Визуальный осмотр паяных соединений. Образование «мостиков припоя», «паутины» из припоя, «сосулек припоя», больших полостей и прочих дефектов в паяных соединениях можно оценить визуально без применений специального оборудования.

Рентгеновский метод. Применяя данный метод оценки, можно выявить широкий спектр дефектов на ранней стадии (как внутренних, так и внешних). В процессе контроля данным методом на экране специального оборудования формируется изображение ПП с ее дефектами. При этом есть возможность задания параметров автоматического обнаружения дефектов и осмотра изображения сотрудником, что ускоряет процесс дефектоскопии в разы. Также метод позволяет оценивать бессвинцовые сплавы, что является его большим достоинством.

Недостатком данного метода оценки является дорогостоящее оборудования, а также необходимость правильного задания параметров программы автоматического поиска дефектов паяного соединения для быстрой оценки. Если паяные приборы не являются конструктивно сложными, к ним не предъявляются высокие требования по качеству и отсутствуют BGA-компоненты, целесообразнее использовать другие методы дефектоскопии.

Оптический контроль позволяет оценить внешние дефекты как в автоматическом, так и в ручном режиме. Выявляет дефекты типа «мостики припоя», «сосульки» из припоя, «паутина» из припоя, оголенный металл, микроотверстия (внешние) и прочие перечисленные выше дефекты, которые имеют поверхностный характер. Метод оценки отличается высокой производительностью, но при этом не позволяет оценить внутренние дефекты паяных соединений. При массовом производстве является необходимым методом контроля, так как произвести массовую визуальную оценку паяных приборов не представляется возможным.

Разрушающий метод с изготовлением микрошлифа применяется, если оценку внутренних пустот нельзя провести визуальным осмотром. Микрошлиф тщательно изучается под микроскопом, вследствие чего принимается

решение о правильности ТП пайки. Следует учитывать, что данный метод требует достаточно больших временны́х затрат.

В массовом производстве для быстрого автоматического выявления дефектов рекомендуется использовать комбинированное оборудование, в котором применяется сразу и рентгеновский, и оптический контроль. Это позволяет быстро выявлять как внешние, так и внутренние дефекты, сдвиги компонентов и излишки (недостатки) паяльной пасты.

Испытания, которые целесообразно проводить на стадиях разработки, прототипирования, а также перед запуском в серийное производство аппаратуры, не требующей высоких показателей надежности, а также варианты установок, на которых проводится контроль, приведены на рис. 1.101. Начальный вариант контроля позволяет обнаружить потенциальные проблемы и дефекты, связанные с производством и эксплуатацией устройств.

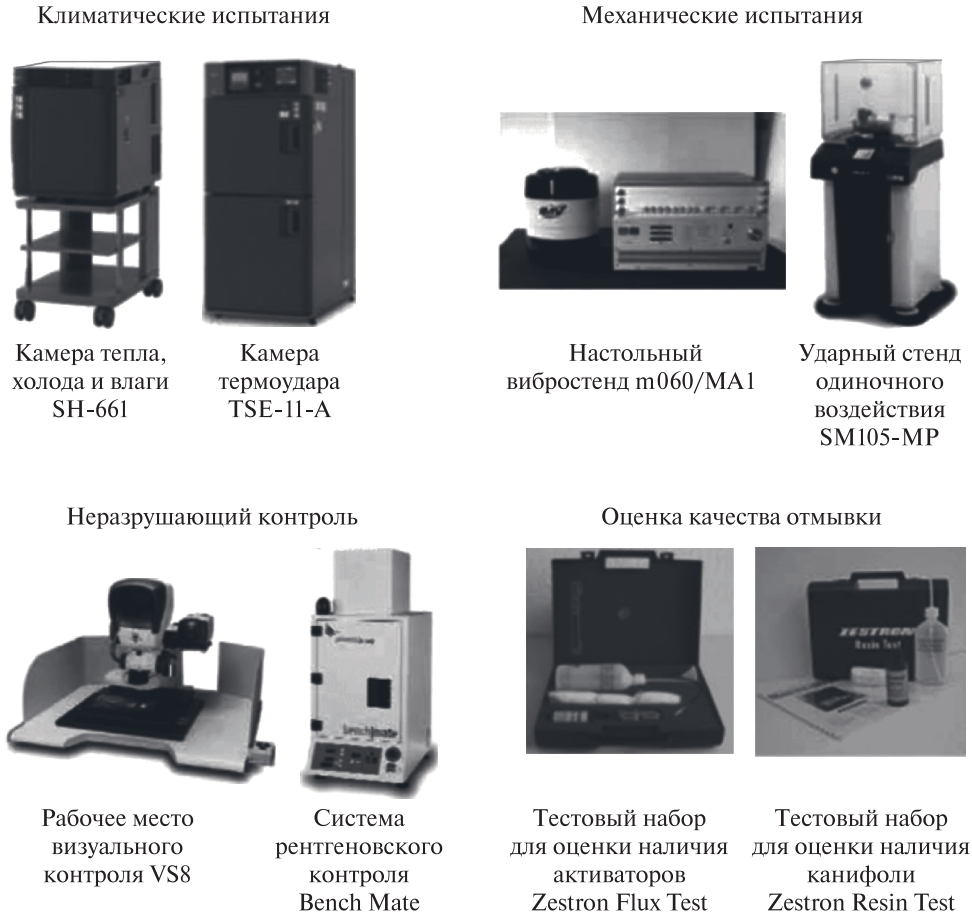


Рис. 1.101. Начальный вариант контроля электронной аппаратуры

При проектировании сложной, специализированной и высокоточной электронной аппаратуры, предназначенной для эксплуатации в особых условиях, проводят более тщательный контроль. Вариант такого контроля и используемых установок приведен на рис. 1.102.

Климатические испытания

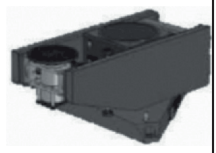
Камера тепла, холода и влаги SH-661

Камера термоудара TSA-71S-A

Механические испытания

Вибростенд i210/SA 1 с горизонтальным столом

Ударный стенд одиночного воздействия SM 105-MP



Центрифуга TES-4C-300

Комбинированные испытания

Установка комбинированных испытаний (тепла,холода, влаги и вибрации) PVS-3KPH+i210/SA1M

Специализированные испытания

Камера соляного тумана TDC 600

Камера солнечного излучения TCC 7120SR

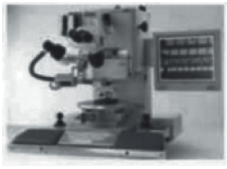
Камера пыли TSD 100FSP

Термовлаго-барокамера MZH-05H-H

Камера дождя TRT 1000

Настольная универсальная испытательная машина TIRAT Test 2805

Испытания на отрыв/сдвиг



Установка тестирования проволочных соединений Dage 4000P

Рис. 1.102 (начало). Типовой вариант комплектации участка контроля электронной аппаратуры (www.ostec-group.ru)

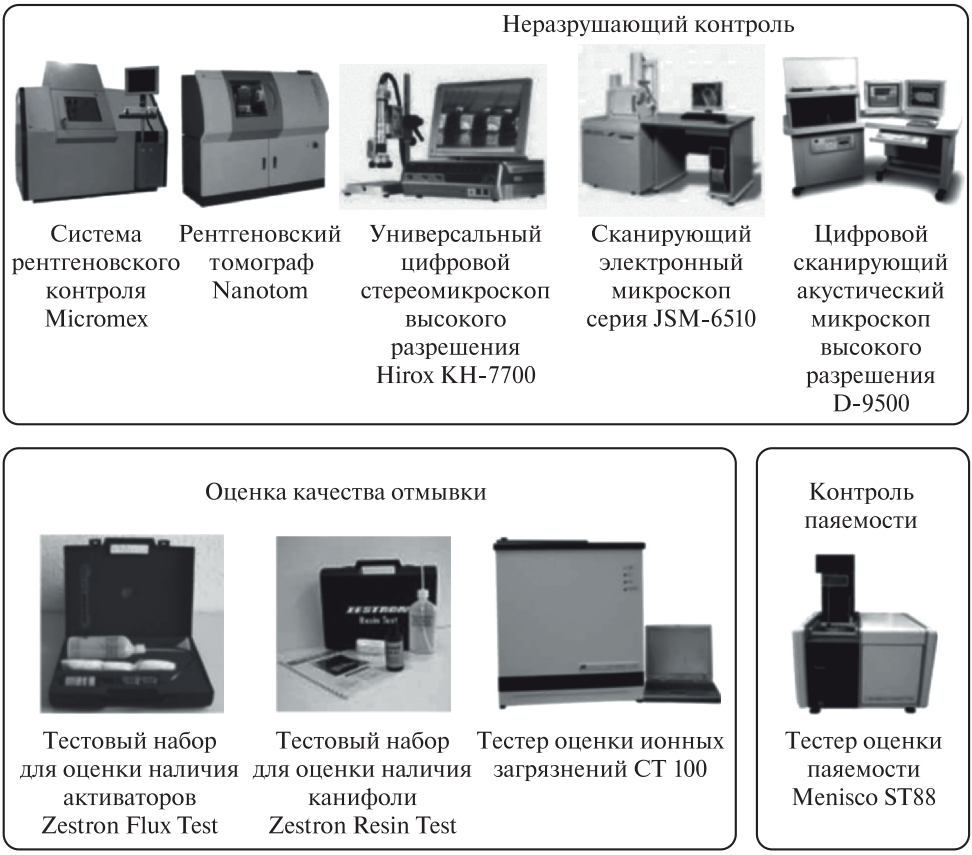


Рис. 1.102 (окончание). Типовой вариант комплектации участка контроля электронной аппаратуры (www.ostec-group.ru)

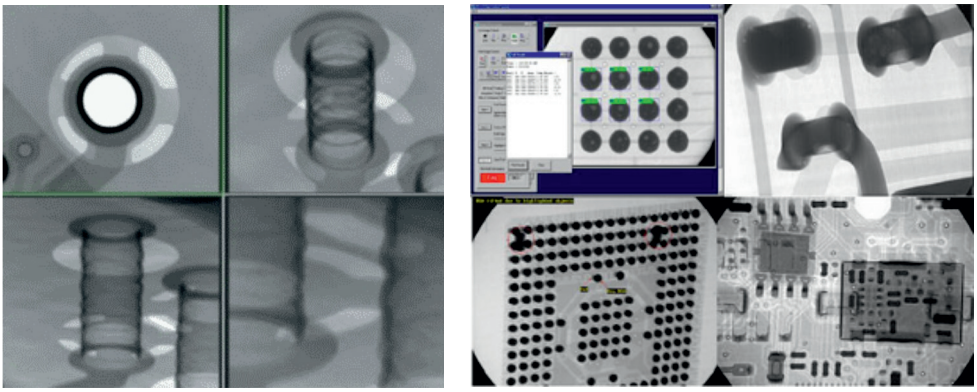
1.17.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Рентгеновский контроль КС (рис. 1.103) — метод неразрушающего контроля, который применяется в случае использования дорогостоящих компонентов, имеющих мелкий шаг выводов. К таким компонентам можно отнести микросхемы в BGA- и μBGA-корпусах. Метод позволяет обнаружить трещины, включения и неправильные размеры, которые могут негативно влиять на качество и безопасность продукции.

Также с помощью рентгеновского контроля можно «увидеть» переходные отверстия и внутренние слои КС. Универсальное оборудование рентгеновского контроля позволяет без изготовления специальной оснастки провести диагностику и локализацию наиболее часто встречающихся дефектов:

– отклонения диаметров переходных отверстий и смещения слоев;

– качество металлизации переходных отверстий.



а *б*

Рис. 1.103. Рентгеновский контроль КС:
а — переходные отверстия и внутренние слои; *б* — аппаратура и оборудование для рентгеновского контроля

Возможности современных систем рентгеновской инспекции позволяют получить для анализа дефектов металлизации переходных отверстий качественные изображения под углом к объекту (до 70°) при максимальном (до 1500 крат) увеличении с разрешением выше 1 мкм.

Для проведения рентгеновского контроля требуется специальное оборудование, включающее источник рентгеновского излучения, детектор и систему обработки изображений. Объект исследования помещается между источником рентгеновского излучения и детектором. Рентгеновское излучение проходит через объект и попадает на детектор, который регистрирует проходящее излучение и создает изображение.

1.17.4. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Согласно ГОСТ Р 56542–2015, оптически неразрушающий контроль — вид неразрушаемого контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения после взаимодействия с контролируемым объектом или собственного оптического излучения исследуемого объекта. Способ получения информации об объекте — визуальное наблюдение или наблюдение с помощью оптических приборов.

Оптическая (визуальная) инспекция — неотъемлемая часть тестирования КС.

Объект оптического контроля — несмонтированная ПП (включая внутренние слои) до момента нанесения финишных покрытий (защитной маски, олова, гальванической меди и пр.).

Оптический контроль (рис. 1.104) позволяет не только определить наличие таких дефектов, как разрыв и короткое замыкание, но и дефектов,

а *б*

Рис. 1.104. Установка оптического контроля (*а*) и система технического зрения (*б*)

которые не приводят непосредственно к потере электрического контакта (смещение контактной площадки (КП), утончение или утолщение проводников, трещины, изгибы и др.). Скорость контроля автоматических оптических систем сравнима с контролем летучим пробником.

1.17.5. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Коммутационные структуры применяются на всех уровнях электронных модулей, и на каждом уровне существуют свои типы дефектов, относящиеся к определенному виду КС. В настоящее время постоянное увеличение сложности ЭА и уменьшение ее габаритных размеров обусловливает снижение размеров используемых соединительных связей, что позволяет увеличить плотность монтажа и точность изготовления ПП, однако приводит к повышению вероятности появления дефектов. К основным дефектам паяных соединений относятся: эффект «подушки»; местное расширение КП; образование шариков припоя; образование бусинок припоя; разбрызгивание припоя; сдвиг компонента; эффект «надгробного камня»; капиллярное затекание; образование перемычек; образование пустот; отслаивание галтели.

Эффект «подушки». Результатом данного дефекта является отсутствие непрерывности электрического контакта при механическом контакте в паяном соединении или без него. Проявляется он в следующем: вследствие отсутствия хорошего смачивания между контактами припоем, большого краевого угла смачивания между припоем и основным металлом, из-за плохого качества сплава припоя и низкой активности флюса, нарушения времени и температуры пайки вывод компонента поступает на припой сверху, тем самым пропадает электрический контакт, что приводит к нарушению дальнейшей работы схемы. Внешне это выглядит так, будто вывод лежит сверху на «подушке» из припоя, соответственно такой дефект был назван — эффектом «подушки» (рис. 1.105).

Причины возникновения данного дефекта:

– отсутствие хорошего смачивания контактов припоем;

– большой краевой угол смачивания между припоем и основным металлом;

– низкое качество сплава припоя;

– низкая активность флюса;

– недостачное время пайки;

– низкая температура пайки.

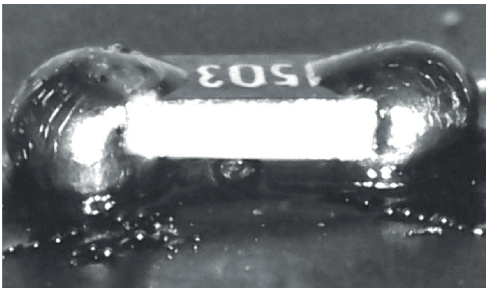


Рис. 1.105. Эффект «подушки»

Местное расширение КП (рис. 1.106) — это не дефект, а логическое решение отсутствия электрического контакта. Отсутствие контакта может быть вызвано разбросом компланарности выводов компонента, а также колебанием толщины паяльной пасты на ПП.

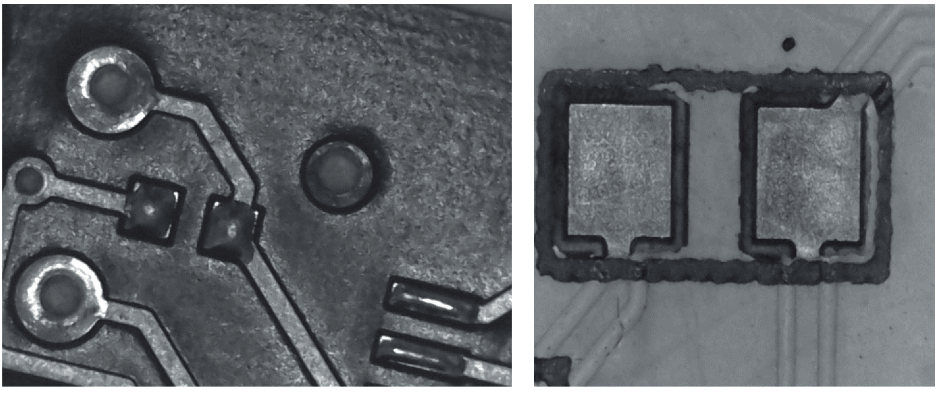


Рис. 1.106. Виды местного расширения КП

Отсутствие электрического контакта можно предотвратить, уменьшив некомпланарность выводов компонентов, что ограничено возможностями производителя компонентов. Другой вариант — увеличить толщину отпечатков пасты, что может привести к образованию перемычек из-за избыточного количества припоя. Наконец, было предложено решение этой проблемы путем местного расширения КП, когда на прямоугольной КП появляются чередующиеся по высоте расширения в форме эллипса или окружности.

Отсутствие электрического контакта может быть вызвано следующими причинами:

– различными дефектами пайки;

– короблением плат или компонентов;

– рассовмещением;

– несоответствием температурных коэффициентов расширения;

– большим числом интерметаллических соединений на разделе паяных соединений;

– разбросом компланарности выводов компонентов;
– разбросом толщины отпечатков паяльной пасты.

Образование шариков припоя — это самый частый дефект при использовании паяльных паст. Данный дефект появляется из-за отделения некоторых частиц от общей массы припоя вследствие использования паяльной пасты или из-за черезмерного количества припоя либо расползания паяльной пасты. Шарики припоя попадают на ПП, на проводящие дорожкии и на элементы. Все это приводит к возникновению токов утечки, появлению ненужных перемычек в схеме, а также возможному формированию соединений с недостаточным количеством припоя.

Предотвратить или уменьшить данный дефект можно сушкой паяльной пасты перед пайкой. Виды данного дефекта представлены на рис. 1.107.

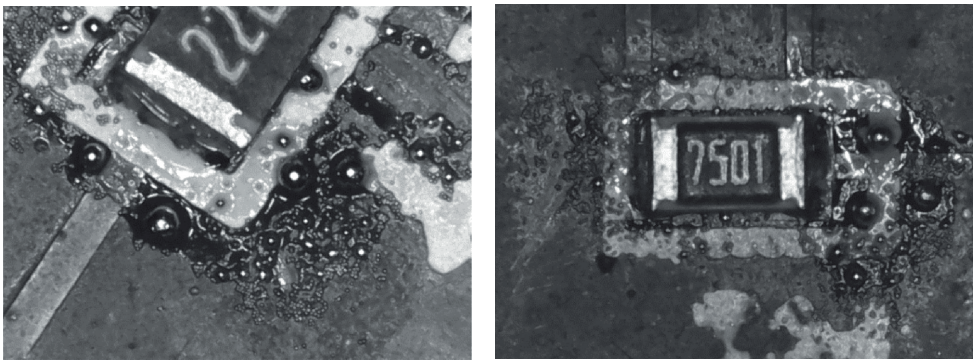


Рис. 1.107. Образование шариков припоя

Причины возникновения шариков припоя:
– смазывание вследствие несоответствующего процесса трафаретной печати;
– слишком толстый слой припоя;
– чрезмерное расползание паяльной пасты;
– чрезмерное окисление припоя;
– загрязнение припоя, флюса, компонентов и ПП;
– плохая паяемость выводов компонента и металлизация отверстий;
– длительное воздействие на паяльную пасту окислительной среды;
– плохие условия сушки;
– высокая скорость нагрева при пайке;
– слишком высокая температура припоя;
– несоответствующие летучие соединения, включенные в состав флюса, используемого в определенном процессе пайки;
– плохие флюсующие свойства средств для пайки;
– пайка во влажной среде;
– капиллярное затекание;
– малый зазор между компонентами.

Образование бусинок припоя — частный случай образования шариков припоя, но отличие заключается в том, что бусинки — это шарики припоя больших размеров. Зачастую они являются нежелательным дефектом с точки зрения эстетического вида изделия.

Бусинки припоя, которые появились вследствие пайки оплавлением, могут быть удалены на этапах промывки изделия водой или растворителем. При использовании пайки волной применяют вибрационные испытания и манипуляции с ПП, хотя это же не помогает при бусинках, образованных в результате пайки предыдущим способом. Поскольку дефекты образования шариков и бусинок похожи, то к причинам их возникновения следует добавить:

– дегазацию флюса;

– высокую температуру предварительного нагрева;

– выбор некорректной температуры активации флюса (для каждого флюса она индивидуальная, но зачастую при увеличении температуры активации образуется больше бусинок);

– использование пасты с высоким содержанием оксидов.

Виды дефектов образования бусинок приведены на рис. 1.108.

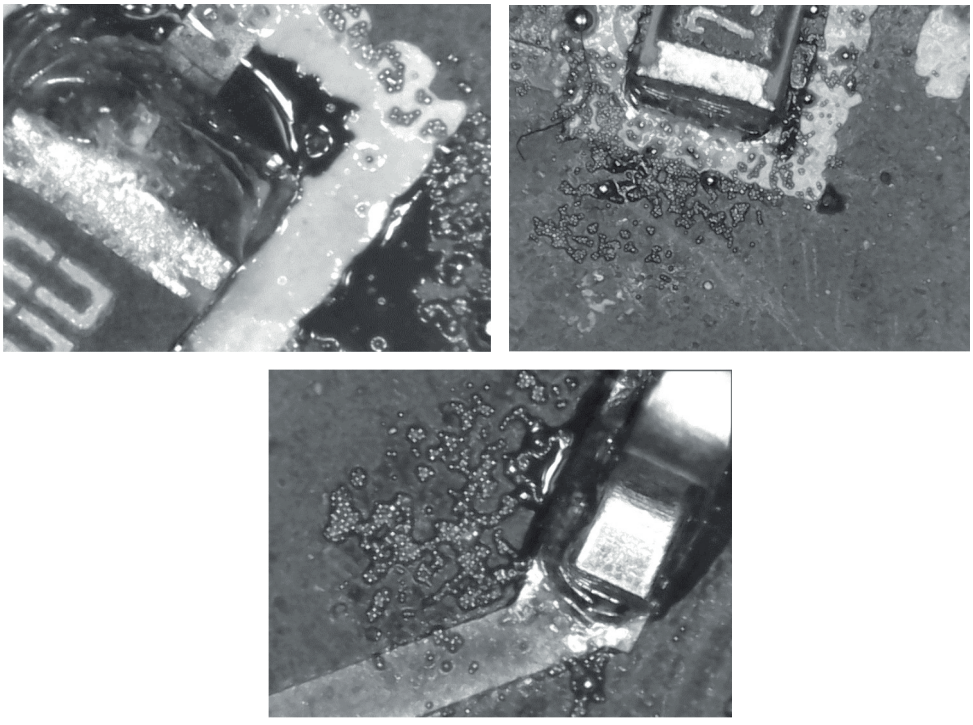


Рис. 1.108. Виды дефектов образования бусинок припоя

Разбрызгивание — дефект, который происходит во время пайки и заключается в разбрызгивании частичек припоя или флюса на поверхность изделия.

При разбрызгивании припоя он может попасть на позолоченные контакты и тем самым образовать «выпуклости», которые могут нарушить плоскостность поверхности выводов, что приведет к плохому контакту. Образующиеся выпуклости значительно подвержены окислению по сравнению с покрытием золота, кроме того, они обладают меньшей электропроводностью. Разбрызгивание флюса приводит к образованию капелек флюса и линиям «водяных знаков», что не влияет на эксплуатационные качества и зачастую называется обесцвечиванием золота (рис. 1.109).

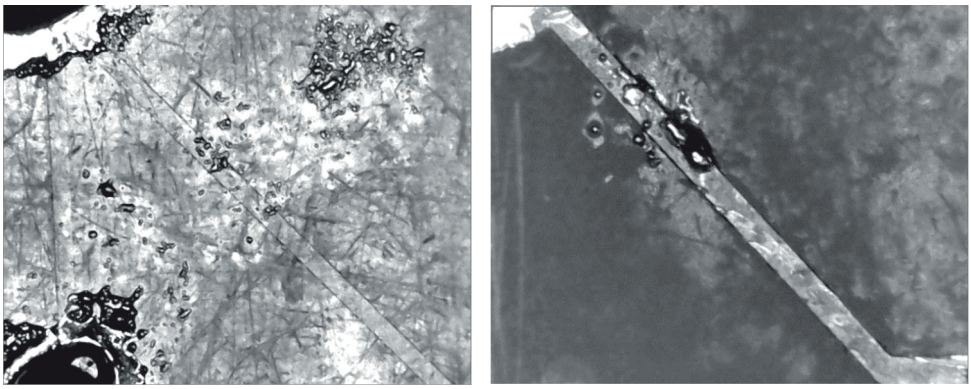


Рис. 1.109. Виды разбрызгивание припоя

Причины возникновения разбрызгивания припоя:
– поглощение влаги паяльной пастой;
– влажная среда;
– использование паяльных паст с гигроскопичными флюсами;
– использование флюса с большой скоростью смачивания;
– слияние частиц припоя;
– низкая температура припоя;
– отсутствие операции сушки;
– пайка в неинертной среде;
– загрязнения компонентов, ПП и флюса с припоем.

Сдвиг компонента (рис. 1.110) — дефект, приводящий к неточному совмещению компонента и контактной площадки при пайке. Проявляется в смещении компонента в горизонтальной плоскости и может считаться начальным этапом появления эффекта «надгробного камня».

Он возникает из-за неравномерности разбалансировки сил поверхностного натяжения припоя, действующих на выводы, и, как следствие, неравномерного их смачивания. Также причины возникновения эффекта надгробного камня усиливают эффект сдвига.

Причины дефекта сдвига компонента:

– несимметричность конструкции КП и их недостаточная ширина;

– малая ширина, металлизация поверхности вывода компонента и их плохая паяемость;

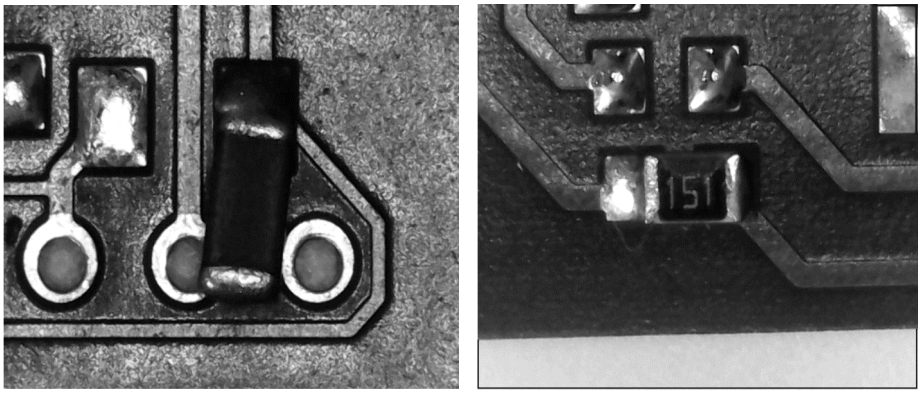


Рис. 1.110. Виды сдвига компонента

– ошибка в координатах заданного положения компонента;
– смещение КП;
– неправильная фиксация или закрепление ПП;
– коробление ПП;
– слишком высокая скорость или вибрация транспортера.

Эффект «надгробного камня» — дефект, при котором один из выводов чип-компонента поднимается над КП. Также известен как эффект подъемного моста или эффект Стоунхенджа. Вид дефекта представлен на рис. 1.111. Данный дефект возникает вследствие неравномерности сил поверхностного натяжения припоя, действующих на выводы, при значении вертикальной составляющей внешней относительно центра компонента силы большем, чем вертикальные проекции массы самого компонента и внутренней силы.

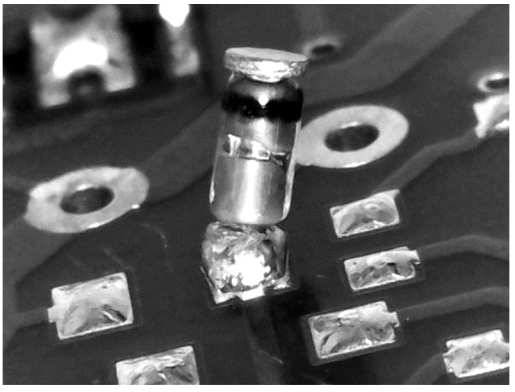


Рис. 1.111. Эффект «надгробного камня»

Причины возникновения данного дефекта:

– слишком высокая скорость нагрева;
– рассогласование в размерах КП;
– слишком большое или слишком малое расстояние между КП;
– при малой площади КП эффект усиливается, при излишне большой увеличивается риск смещения;
– эффект затенения (из-за ограничения потока теплоносителя соседними компонентами происходит полное сопротивление нагреванию);
– сильная дегазация флюса и слишком малое время смачивания, как следствие — излишне высокая скорость пайки.

Капиллярное затекание припоя — дефект, вызывающий обеднение паяного соединения и отсутствие электрического контакта при смачивании вывода и подъема по нему припоя вверх, из зоны соединения (рис. 1.112).

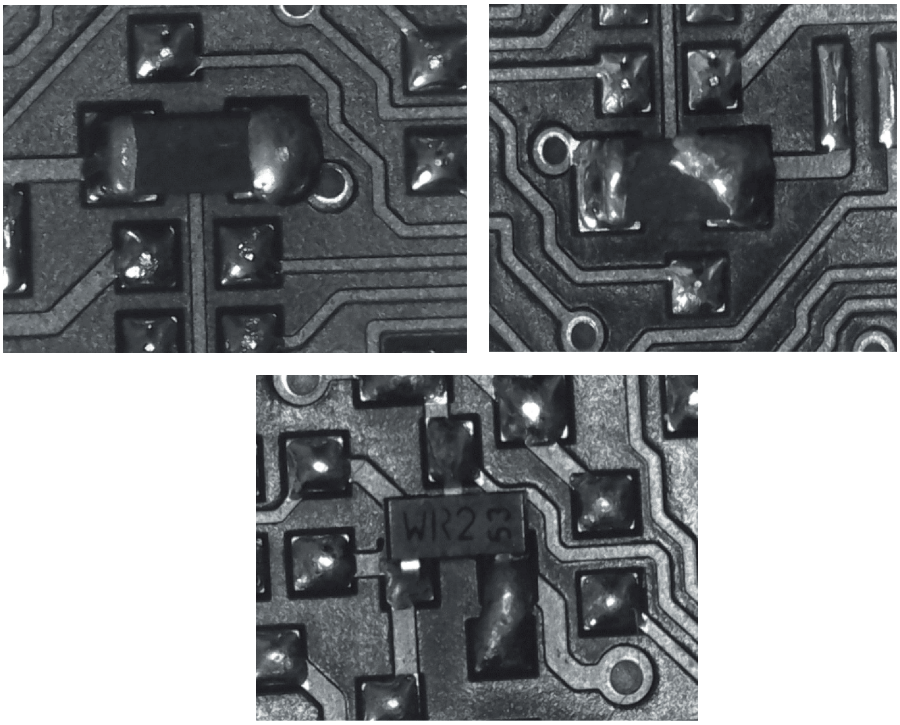


Рис. 1.112. Вид капиллярного затекания припоя

Вывод компонента имеет меньшую, по сравнению с платой, способность накапливать теплоту, поэтому на этапе оплавления возникает перепад температур, который вместе с поверхностным натяжением припоя и потенциально различным в разных точках давлением припоя создает движущие силы капиллярного затекания, направленные из зоны контакта.

Причины возникновения капиллярного затекания припоя:

– слишком высокая скорость нагрева;
– плата является окисленной;
– смещение маски;
– рассогласование в размерах КП;
– излишняя кривизна выводов компонентов;
– малая вязкость паяльной пасты.

Образование перемычек — образование соединений между соседними контактными паяными соединениями, не предусмотренных конструкцией печатных узлов (рис. 1.113).

Избыточное количество паяльной пасты, ее расползание и смазывание, а также избыточное давление при монтаже приводят к образованию

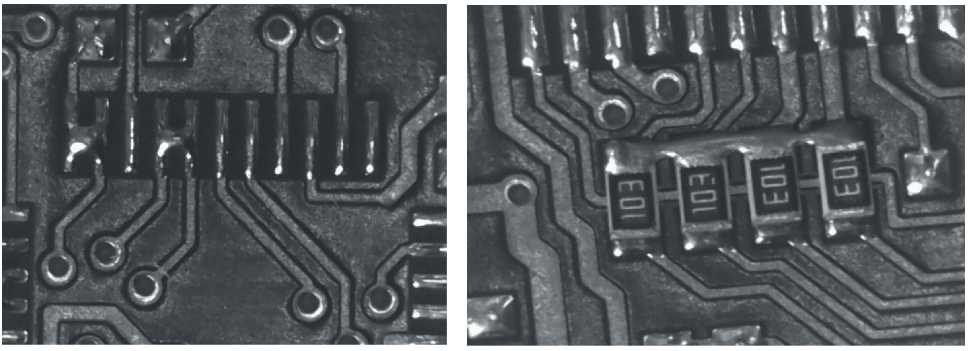


Рис. 1.113. Образование перемычек

перемычек из паяльной пасты, которые в процессе пайки могут стать спаянными выводами.

Причины образования перемычек:
– малый шаг выводов компонентов;
– высокая смачиваемость флюса;
– значительное давление при установке компонентов;
– избыточный объем паяльной пасты;
– высокая температура профиля пайки;
– большая скорость транспортера.

Образование пустот — дефект, характеризующийся возникновением маленьких ячеек в материале паяного соединения.

Пустоты негативным образом влияют на механические свойства соединений, их прочность, усталостную долговечность. Такие дефекты могут снижать надежность соединений из-за точечного перегрева, усиливают напряжения и деформации.

В основном образование пустот зависит от паяемости металлизации, так, при уменьшении паяемости металлизации, уменьшении активности флюса, увеличении зоны покрытия под соединяемыми выводами, повышении содержания припоя в пасте возрастает образование пустот.

Причины возникновения данного дефекта:
– дегазация припоем захваченного флюса;
– сжатие припоя при затвердевании;
– слишком высокая температуры при предварительном нагреве;
– малая скорость транспортера;
– плохая паяемость;
– загрязнение платы;
– значительная активность флюсов.

Отслаивание галтели — отрыв галтели припоя от КП при отсутствии непрерывности электрического контакта. Главная причина этого дефекта — механические напряжения, возникающие в выводах компонентов при механических испытаниях после пайки оплавлением. Решением данной проблемы является требование проводить механические испытания после пайки

волной, а не до нее. Другим вариантом может быть минимизация различия коэффициентов теплового расширения компонентов и платы и усиление предварительного нагрева сверху при пайке волной.

Причины отслаивания галтели:

– механические напряжения в выводах, их деформация;

– механические повреждения в процессе производства;

– деформированные выводы, создающие механические повреждения.

1.17.6. АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ПО МИКРОШЛИФАМ

Вопросы обеспечения качества металлизации монтажных отверстий ПП имеют важное значение при их изготовлении. Контроль качественных характеристик ПП осуществляется методом изготовления микрошлифов с последующей оценкой параметров слоев металлизации и сравнения с эталоном. Контроль проводится прямым визуальным методом, что обусловливает высокую вероятность ошибок такого контроля и его большую длительность. Исполнитель, как правило, не может выполнить глубокий анализ дефектов. Он не имеет возможности выявлять причины их возникновения, проводить необходимые для этого обобщения и анализ, классифицируя дефекты только субъективно по принципу «брак» или «не брак».

Внедрение средств автоматизации на этапах визуальной инспекции печатных плат по микрошлифам позволяет получить ряд преимуществ:

– сокращение времени операций визуального контроля;

– снижение вероятности появления ошибки контроля, возможность дополнительно, в режиме реального времени, контролировать правильность принятия решения с автоматизированного рабочего места;

– возможность достоверно оценить вероятную причину появления брака и выработки рекомендаций по методам его снижения (устранения) с использованием возможностей экспертной подсистемы (она аккумулирует сведения о структуре ТП, его параметрах и режимах и т. п.);

– широкие возможности по сбору и обработке статистической информации принятия решений по выбору и корректировке режимов ТП.

Наиболее распространенные дефекты монтажных отверстий ПП:

– бочкообразная форма отверстий;

– наросты меди;

– дефект типа «гвоздь»;

– разрывы металлизации;

– дефекты типа «слезы» и т. п.

На первом этапе изготовления ПП многие отказы связаны непосредственно с технологией начальной обработки ПП, и наиболее значительная их доля — это результат некачественного сверления отверстий и недостаточной их очистки.

Примеры отказов и их причины: разрывы и изгибы проводников из-за слишком медленного сверления; втягивание проводников в отверстия при слишком быстром сверлении; остатки смолы на проводниках вследствие их недостаточной очистки.

Использование раствора пирофосфатной меди на операции металлизации стенок отверстий может привести к растрескиванию слоя металлизации в отверстиях при пайке жидким припоем.

Процесс травления также может привести к образованию дефектов, так как слой металлизации при травлении может быть удален с кромки отверстий.

Для обеспечения надежности ПП первостепенное значение имеет само межсоединение двух проводящих слоев платы, т. е. металлизация переходного отверстия. При этом часто встречаемыми видами дефектов являются разрыв электрического контакта или соединение с высоким сопротивлением. Использование толстого слоя металлизации может обеспечить необходимую механическую прочность, однако в этом случае увеличиваются размеры проводящих дорожек и возрастает боковое подтравливание при химических обработках. Для схем с близко расположенными элементами проводящего рисунка такое решение по созданию качественной металлизации не рекомендуется. Таким образом, *для металлизации отверстий необходим конструктив, состоящий из меди с покрытием, обеспечивающим хорошую паяемость*.

Медь, осажденная из цианидных ванн, является механически прочной и наиболее пластичной из известных видов медных покрытий, нанесенных гальванически. Один из недостатков такого способа осаждения состоит в том, что раствор металлизации влияет на силу сцепления материала основания ПП с металлом. Компромиссным решением может быть создание начального слоя, состоящего из слоя пирофосфатной меди, на который нанесен слой осажденной цианидной меди. Эта комбинация обеспечивает определенную гарантию защиты материала платы, а также получение монтажных отверстий с нерастрескивающимся покрытием. Печатные платы с металлизированными сквозными отверстиями, изготовленные по этому методу, удовлетворяют требованиям наиболее жестких стандартов.

Монтажные отверстия выполняют роль монтажного элемента или межслойного соединения. Диаметры сквозных монтажных отверстий для выполнения нормальных условий пайки должны быть на 0,2...0,4 мм больше диаметра вывода радиоэлемента. Вместе с этим гальваническое покрытие получается удовлетворительным при определенном соотношении между диаметром отверстия и толщиной ПП. Это соотношение связано с рассеивающей способностью электролитов и отчасти с режимами гальванического осаждения.

Переходные сквозные отверстия должны быть отделены от монтажных КП, чтобы предотвратить перетекание припоя с монтажных поверхностей в отверстия. Неглубокие глухие отверстия и тем более глухие отверстия могут выполняться в поле монтажных КП.

В процессе эксплуатации ПП в составе аппаратуры металлизация отверстий постоянно испытывает переменные во времени термомеханические напряжения, вызванные разностью в термическом расширении меди и диэлектрического основания. Устойчивость к термомеханическим нагрузкам обеспечивается соответствующей толщиной и пластичностью металлизации отверстий. ГОСТ 23752–79 устанавливает среднее значение толщины слоя

меди в металлизации отверстия 25 мкм, при возможном минимальном значении 20 мкм (с отношением толщины ПП к минимальному диаметру отверстия 1...3). Практика анализа отказов металлизированных переходных отверстий, не заполненных припоем, показывает, что при толщине металлизации около 7 мкм отказ соединения неизбежно возникает, при толщине 15 мкм вероятность отказа примерно 0,9, и только толщина 20 мкм обеспечивает надежность соединений в течение длительного периода эксплуатации аппаратуры. Поэтому основное условие гарантии надежности соединений по металлизированному отверстию состоит в том, что толщина медного гальванопокрытия без дефектов должна быть не менее 20...25 мкм. Для того чтобы не допустить дефектов металлизации в виде незначительных неметаллизированных участков, создающих очаги повышенной концентрации напряжений, толщину металлизации увеличивают до 30...35 мкм.

Металлизация монтажных отверстий участвует в теплопередаче в процессе пайки. Поэтому для удовлетворительного прогрева при пайке желательно, чтобы толщина металлизации была тем больше, чем глубже сквозное отверстие. Дефекты металлизации в виде кольцевых утончений или трещин неизбежно приводят к непропаю, так как создают заметные препятствия для теплопереноса.

Увеличение толщины ПП сверх отношения толщины к диаметру 4:1 приводит к значительным осложнениям в обеспечении надежности металлизированных отверстий, так как такие отверстия менее устойчивы к воздействию термомеханических напряжений.

Проблема анализа качества ПП по микрошлифам является сложной задачей. Производство тест-образцов микрошлифов на все разнообразие ПП является затратным способом. Визуальная обработка результатов дефектоскопии и последующий ее анализ требует от оператора глубоких технологических знаний, что в условиях серийного производства является не технологичным. Для повышения эффективности контроля должна применяться автоматическая система распознавания, которая не только обеспечит классификацию анализируемых образов дефектов, но и будет формировать заключения по выявленным дефектам и рекомендации по их устранению.

Исследование видов дефектов монтажных и переходных отверстий. Рассмотрим основные виды дефектов монтажных и переходных отверстий ПП. Отверстия в ПП диаметром от 0,2 до 1,5 мм сверлят на станках с ЧПУ специальными твердосплавными сверлами. Качество отверстий зависит от режимов сверления (величина подачи, скорость резания, скорость извлечения сверла из отверстия), геометрии и качества режущих кромок сверла. Его контролируют визуально с помощью микроскопов (заусенцы на входе и выходе сверла, смещение центров отверстий относительно координатной сетки), визуально на микрошлифах (в разрезе) с помощью микроскопов (заусенцы, шероховатость стенок, эпоксидные пятна на стенках, развальцовка торцев КП внутренних слоев МПП, качество отверстий после металлизации). *Микрошлиф* представляет собой поперечный разрез ПП для проведения микроскопического исследования структуры внутренних слоев ПП.

Контроль диаметров отверстий проводят только выборочно калибрами-пробками или на микрошлифах. Вид микрошлифа ПП с отверстием правильной формы со слоем меди хорошего качества (плотный слой, равномерная толщина по всей стенке, отсутствие наростов, разрывов) представлен на рис. 1.114.

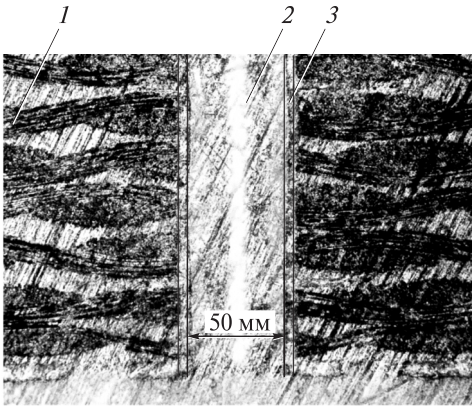


Рис. 1.114. Вид микрошлифа ПП с качественным отверстием:

1 — стеклотекстолит; *2* — отверстие; *3* — металлизация отверстия

Рассмотрим хорошо распознаваемые дефекты металлизированных отверстий.

Заусенцы на входе и выходе отверстия (рис. 1.115, 1.116).

Причины возникновения таких заусенцев:

– тупое сверло с недопустимым износом режущих кромок;

– сколы на режущих кромках сверла;

– неудаляемая стружка внутри пакета обрабатываемых заготовок ПП;

– мягкий подкладной материал или недостаточное усилие прижима пакета;

– неоптимальное соотношение скорости вращения и подачи сверла.

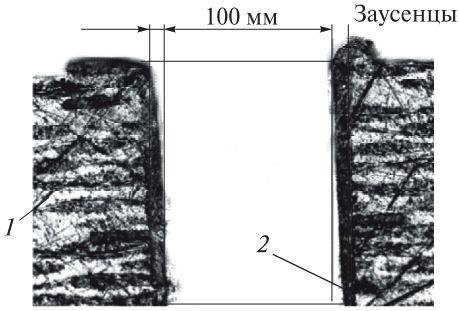


Рис. 1.115. Заусенцы на кромках отверстий ПП:

1 — стеклотекстолит; *2* — металлизация отверстия

на стенках отверстия

Рис. 1.116. Наросты меди на стенках отверстий ПП

Шероховатость стенок отверстий (рис. 1.117).

Причины шероховатости: разогрев и оплавление эпоксидной смолы стеклотекстолита с образованием на стенках эпоксидных пятен из-за несоблюдения режимов; работа тупым сверлом; недопустимая толщина пакета заготовок; плохой отвод стружки.

Дефекты металлизации стенок отверстия — неравномерность слоя металлизации, нарушение контакта (рис. 1.118).

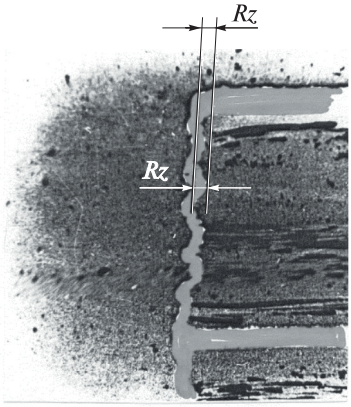


Рис. 1.117. Шероховатость стенок отверстий ($Rz \le 40$ мкм)

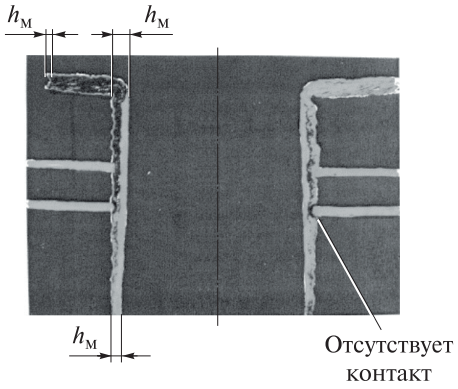


Рис. 1.118. Дефекты металлизации стенок отверстия
(толщина слоя меди $h_м \ge 25$ мкм; сплава олово–свинец 10...15 мкм)

Неравномерное распределение слоя металлизации по глубине отверстия (у кромок $h_{м.нар}$ — 60...70 %$h_м$; на середине глубины отверстия $h_{м.вн}$ — 30 % $h_м$). Причины дефекта:

– плохая рассеивающая способность электролита;

– нарушение режимов осаждения (времени, плотности тока, интенсивности качания заготовок, отклонения в составе электролита);

– наличие неудаленных заусенцев на кромках отверстия.

Дефекты металлизации стенок отверстия вследствие нарушения контакта приведены на рис. 1.118.

Нарушение контакта слоя металлизации с торцами внутренних КП отверстий МПП (рис. 1.119). Причины возникновения:

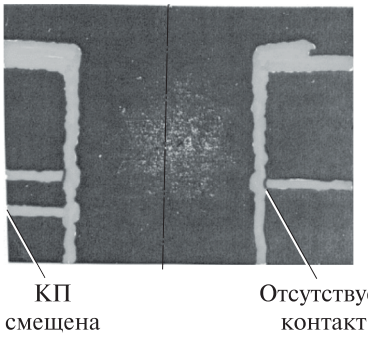


Рис. 1.119. Нарушение контакта слоя металлизации

– разогрев и оплавление эпоксидной смолы из-за несоблюдения режимов сверления и наволакивание смолы на торцы внутренних КП;

– нарушение режимов и условий химического и гальванического осаждения меди.

Неметаллизированные участки или наросты в отверстиях. Причины возникновения данных дефектов:

– нарушение режимов сверления;

– плохая очистка отверстий после сверления (остатки реагентов, пыли, наличие заусенцев);

– нарушение режимов активации диэлектрика в отверстиях (состав раствора, малое содержание палладия, недостаточное время активации).

Неправильная форма отверстия (бочкообразная), которая образовалась за счет слоя металлизации разной толщины на стенках отверстия видна на рис. 1.120, также можно выделить разрывы металлизации, разрастание слоя меди на кромках отверстия.

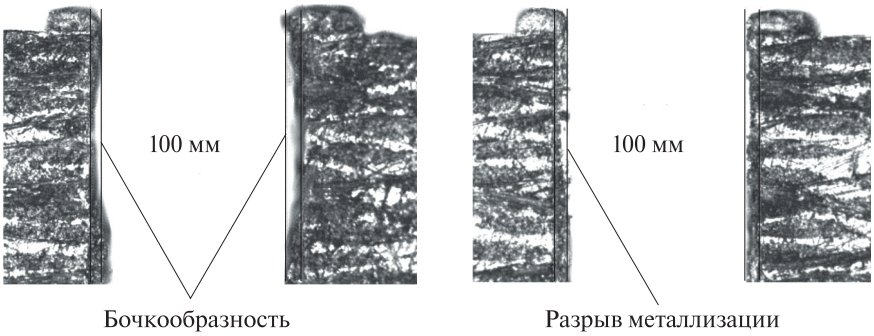


Рис. 1.120. Неправильная форма отверстий (бочкообразность), разрывы металлизации

Рыхлый стой (рис. 1.121) возникает при неправильно подобранных технологических режимах осаждения меди при большой плотности тока.

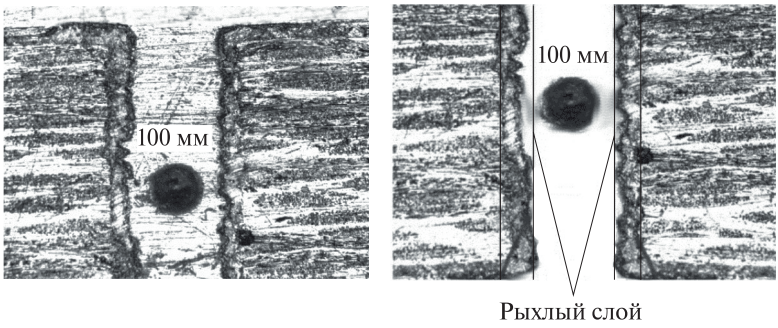


Рис. 1.121. Рыхлый слой

Смещение центров отверстий относительно узлов координатной сетки и центров КП. Положение отверстий относительно центров КП проводящего рисунка регламентируется обязательным наличием гарантированного пояска *b* (рис. 1.122), значение которого должно соответствовать выбранному классу точности ПП. Смещение центров происходит из-за погрешностей при сверлении отверстий и при нанесении проводящего рисунка на заготовку.

Причины возникновения дефекта при сверлении:

– погрешности установки (базирования) заготовки на столе сверлильного станка;

– погрешности настройки станка;

– точность станка.

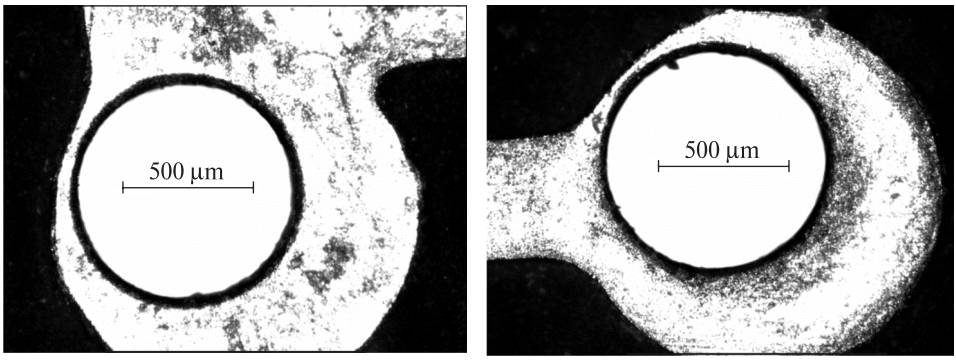
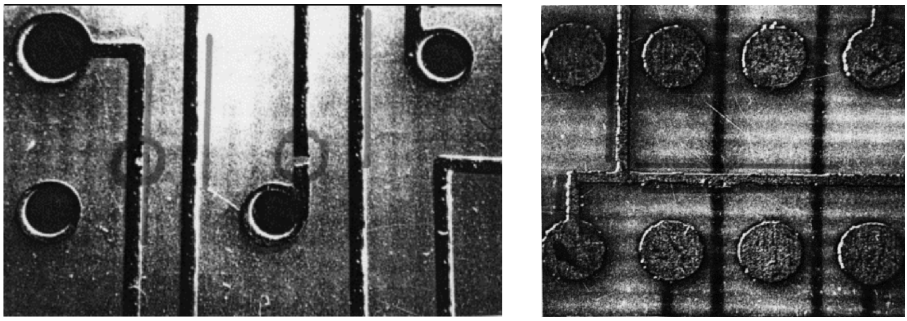


Рис. 1.122. Виды смещения центров отверстий

Причины возникновения дефекта при нанесении проводящего рисунка:
– точность изготовления фотошаблона;
– погрешности взаимной ориентации шаблона и заготовки ПП;
– погрешности при экспонировании проводящего рисунка (дифракция).

Смещение центров отверстий в пределах одной заготовки имеет однонаправленный характер в случае сверления на станке с ЧПУ за один установ без перебазирования заготовки.

Протравы на проводниках. Характерные виды протравов на проводниках: сквозной протрав (рис. 1.123, *а*), краевой протрав (рис. 1.123, *б*), пора при переходе проводника к КП.



а *б*

Рис. 1.123. Протравы на проводниках

Причины возникновения дефектов:
– наличие участков проводящего рисунка, не покрытых гальванически осажденным металлорезистом (олово–свинец);
– повреждение металлорезиста при межоперационной транспортировке и в процессе травления меди с пробельных мест.

Неровности края проводящего рисунка обусловлены следующими причинами:
– большим временем травления меди;

– остановкой конвейера в оборудовании травления;
– неровностями края осажденного металлорезиста.

Подтравливание проводящего рисунка возникает вследствие большого времени травления, остановки конвейера (рис. 1.124).

Таким образом проанализированы наиболее часто встречаемые дефекты переходных и монтажных отверстий и проводящего рисунка ПП, которые представляют собой сложные графические образы. Несмотря на сложность, возможно формализовать отдельные классификационные признаки, позволяющие сгруппировать их по видам дефектов. Сложность решения задачи распознавания определяется тем, что указанные дефекты могут встречаться как индивидуально, так и в совокупности, что увеличивает вероятность ложного принятия решения по классификации конкретного дефекта.

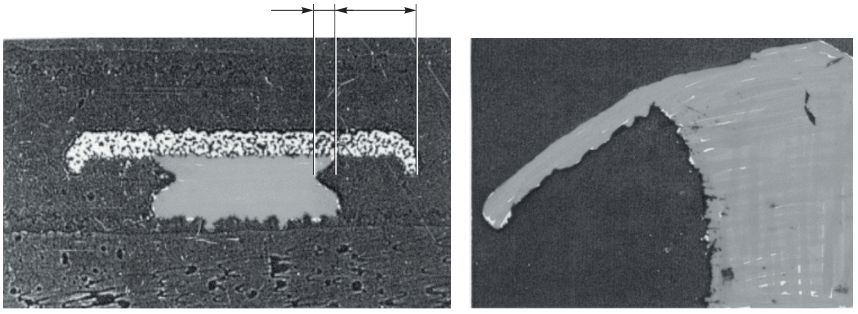


Рис. 1.124. Подтравливание проводящего рисунка (области подтравливания обозначены стрелками)

Методика изготовления микрошлифов. Для наибольшей достоверности оценки качества металлизации отверстий ПП изготовляются микрошлифы, которые подвергают визуальной инспекции. Полученные статистические данные по видам дефектов ПП картируются (заносятся в специализированные дефектные карты) и далее обрабатываются одноступенчатым, двухступенчатым, многоступенчатым или последовательным методами контроля качества.

Для того чтобы изготовление микрошлифов приводило к разрушению ПП, шлифы выполняют на специальных тестовых элементах, расположенных на технологическом поле ПП. Такой подход может привести к некоторым ошибкам, которые возникают из-за неравномерности толщины гальванической меди на поверхности ПП в отверстиях вследствие рассеивающей способности электролита. Контроль по микрошлифам может проводиться для каждой платы на этапе отработки отдельных операций ТП и выборочно.

Контролируемую ПП направляют в металлографическую лабораторию. С помощью универсальных ножниц вырезают образец размером 15×30 мм в тестовой зоне. Приготовляют состав на основе самотвердеющей пасты массой 5 г (АСТ-Т, ТУ 16-2-17–69) или технического бутакрила (МРТУ 64-2-9–69) путем смешивания с 15...20 мл жидкости АСТ-Т. Получившимся составом заполняют отверстия, предназначенные для контроля, неоднократно погружая образец в состав. После покрытия образца самотвердеющим составом

его устанавливают между двумя пластинами оргстекла. Далее пакет сжимают с небольшим усилием, потом сушат в вытяжном шкафу в течение 2 ч. Затем образец шлифуют абразивным кругом до контролируемых отверстий, которые вскрываются шлифованием на крупнозернистой абразивной шкурке (К310). Шлифовка ведется до середины отверстия с постепенным уменьшением зернистости шкурки (М40, М28) и со сменой направления шлифования. По окончании шлифовки образец полируется на сукне суспензией на основе оксидов хрома и воды (2 г на 1 л). Полировка происходит в течение 2...3 мин. Далее образец промывают водой, сушат фильтрованной бумагой, протирают спиртом и вновь сушат. В конце всех этих операций образец можно исследовать под микроскопом.

Для определения кристаллической структуры осажденных в отверстиях металлов (химико-гальванической меди, гальванического слоя олово–свинец) шлиф травят. Травитель имеет следующий состав: хлорное железо (10 г), соляная кислота (25 г), вода (100 г). После травления шлиф протирают и сушат.

Методика автоматизированной обработки изображений микрошлифов. Обработка изображений является важным направлением применения современной вычислительной техники. Многие задачи обработки изображений требуют высокой производительности, с которой невозможно справиться без использования нейрокомпьютеров. Проблемы распознавания изображений (фильтрация и восстановление изображений, сегментация изображений, скелетонизация изображений) характерны как для классической задачи распознавания фигур заданной формы, так и для задачи распознавания линий и углов на изображении, распознавания края изображения. При этом решается задача обеспечения инвариантности к группе преобразований, которую часто трудно решить классическими методами, характерными для последовательности машин.

Для решения перечисленных выше задач активно используются нейросетевые алгоритмы. При выборе структуры нейронной сети для решения задачи распознавания изображений необходимо учитывать следующие аспекты:

– способность сети к обучению, т. е. возможность научить систему распознавать требуемое число объектов. Чем больше в сети слоев и нейронов, тем выше способности и потребности в аппаратных ресурсах;

– быстродействие, которое достигается уменьшением сложности сети — чем меньше необходимо аппаратных ресурсов, тем быстрее осуществляется работа нейронной сети.

Аппаратно-программный комплекс дефектоскопии ПП по микрошлифам предназначен для неразрушающего контроля ПП, а именно определения качества металлизации сквозных отверстий. Основной задачей является определение вида дефекта предложенного образца (исследуемым образцом является микрошлиф).

Алгоритм функционирования комплекса в режиме дефектоскопии заключается в следующем. Исследуемый микрошлиф помещают на рабочий стол микроскопа. Цифровая видеокамера получает изображение от микроскопа, имеющего штатное увеличение 10, 60 и 200 единиц, и передает его

в управляющую ПЭВМ по USB-интерфейсу. Далее изображение оцифровывается и поступает на вход специализированного программного обеспечения (СПО). Нейросетевой модуль СПО, обученный возможным видам дефектов, анализирует изображение и формирует результат распознавания. Результат вместе с распознаваемым изображением поступает на сервер обработки и хранения данных. Оператор и (или) технолог имеет возможность в реальном времени наблюдать за процессом работы. Кроме того, сервер накапливает результаты работы и (при наличии экспертной системы) позволяет оценивать причины брака, давать рекомендации к их устранению, предсказывать процент выхода годных ПП при данной технологии и данных технологических режимах.

Математическим обеспечением комплекса являются нейросетевые алгоритмы обработки изображений. Применение в создаваемом программном комплексе какого-то определенного вида нейронной сети и алгоритма обработки образов не представляется возможным, поэтому необходимо использовать несколько видов нейронной сети с разными выходными параметрами, а окончательное решение должно формироваться методом «голосования» с различными весовыми коэффициентами. В общем случае искусственная нейросеть не является универсальной по своей структуре. Для ряда прикладных задач существует множество различных структур реализации, алгоритмов, методов обучения и т. п.

Дефектоскопия является хорошим инструментом для увеличения выхода годной продукции, особенно сложных многослойных ПП.

1.17.7. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Каждый дефект имеет свои уникальные особенности. Эти особенности необходимо учитывать при разработке технологического маршрута производства ячейки, при этом многие особенности связаны с человеческим фактором, например, ошибка хранения паяльных паст, неверно заданные параметры оборудования (могут также быть вызваны опечаткой) возникают чаще всего из-за недостаточной квалификации персонала, поэтому следует проводить несколько ступеней проверки на производстве. Несмотря на широкую автоматизацию производства, автоматика дает совсем малый процент сбоев в производстве ЭА. Каждый дефект требует специального метода контроля, при этом нельзя выделить какой-то универсальный метод, который позволит достаточно хорошо выявить все дефекты (внутренние и внешние), методы необходимо комбинировать.

Изготовление шлифов с травлением дает информацию о состоянии меди, которая определяет качество металлизации сквозных отверстий. Кроме представления об общем качестве шлифы дают информацию о толщине слоев и возможных проблемах, возникающих при сверлении; растрескивании; кавернах; размазывании многослойного материала ПП. Шлифы, демонстрирующие мелкозернистую структуру осажденной меди и равнозначное

травление по всем осям, свидетельствуют о высоком качестве выполнения металлизации стенок отверстий.

В зависимости от типа производства необходимо подбирать свой метод контроля и оценки паяных соединений. Так, для единичных производств достаточно недорогих, но требующих временны́х затрат методов, а для массового производства необходимо дорогостоящее оборудование.

Тесты к лекции 1.17

1. ***Назовите методы дефектоскопии:***

а) визуальный осмотр, оптический и рентгеновский методы, микрошлиф;

б) оптический, электрический и рентгеновский методы;

в) тактильный метод, микрошлиф, визуальный метод.

2. ***В каких случаях применяется рентгеновский контроль КС?***

а) при использовании дорогостоящих компонентов, имеющих мелкий шаг выводов;

б) при подозрении на внутренние дефекты;

в) всегда.

3. ***Как можно снизить дефект образования шариков припоя?***

а) сушкой паяльной пасты перед пайкой;

б) паять в более влажной среде или при более высоких температурах;

в) не использовать паяльную пасту.

4. ***Что не является дефектом монтажного отверстия ПП?***

а) эффект «подушка»;

б) разрыв металлизации;

в) наросты меди.

5. ***Что не является причиной возникновения дефектов монтажного отверстия в ПП?***

а) некачественное изготовление микрошлифа;

б) неверный выбор режима сверления, плохая очистка отверстий;

в) нарушение режимов активации диэлектрика в отверстиях.

1.18. РАЗРАБОТКА ПАКЕТА ДОКУМЕНТАЦИИ НА КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Цель лекции: изучение структуры и состава пакета документации на коммутационные структуры. Изучение требований к документации.

1.18.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Технические условия на КС определяются конкретными требованиями проекта.

Исходя из технических условий, необходимо выбирать завод-изготовитель КС, обращая внимание на технологические возможности производства, используемые на производстве базовые материалы и доступные технологии. Технологические возможности производства ООО «Резонит» можно посмотреть по ссылке https://www.rezonit.ru/directory/tekhnologicheskie-osobennosti-proizvodstva/

1.18.2. ДОКУМЕНТАЦИЯ НА КОММУТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ И ЕЕ КОМПЛЕКТНОСТЬ

Документация на КС электронных средств включает в себя электрическую структурную схему (Э1), электрическую принципиальную схему (Э3), чертеж ПП, сборочный чертеж электронной ячейки, спецификацию к сборочному чертежу, маршрутно-операционную карту операций, схему сборки.

Электрическая принципиальная схема (см. примеры на рис. 1.125, 1.126) — документ, определяющий полный состав элементов и взаимосвязи между ними и, как правило, дающий полное (детальное) представление о принципах работы изделия. Схема может быть выполнена как на одном, так и на нескольких листах.

Компоненты на электрической принципиальной схеме указывают условными графическими обозначениями (УГО), которые нормируются ГОСТами. Например, ГОСТ 2.728–74 устанавливает УГО резисторов и конденсаторов на схеме. При размещении элементов на схемах применяют совмещенный и разнесенный методы компоновки схем. В первом примере УГО элементов изображают рядом, во втором — УГО располагают без учета их размещения

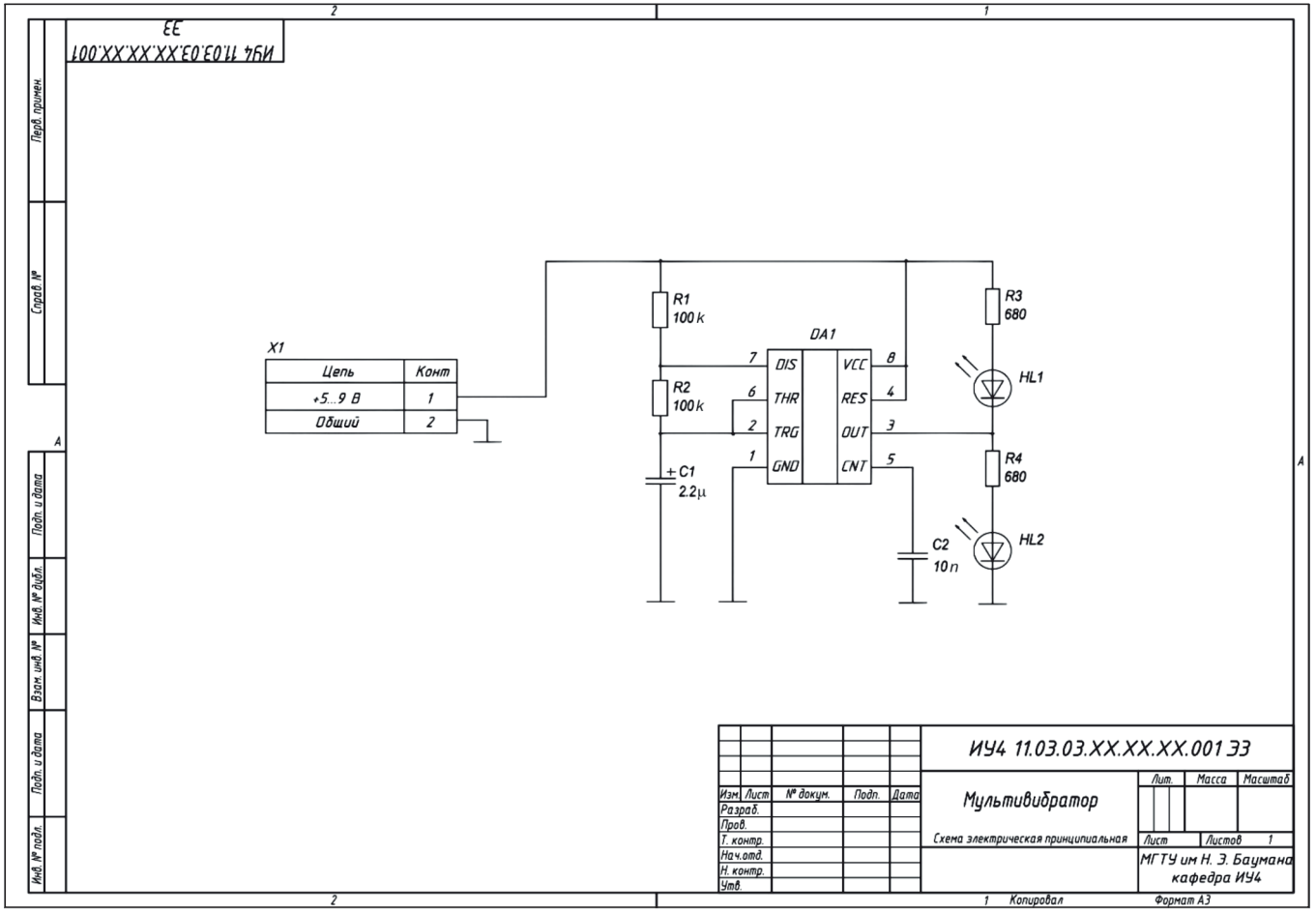


Рис. 1.125. Электрическая принципиальная схема (Э3) мультивибратора

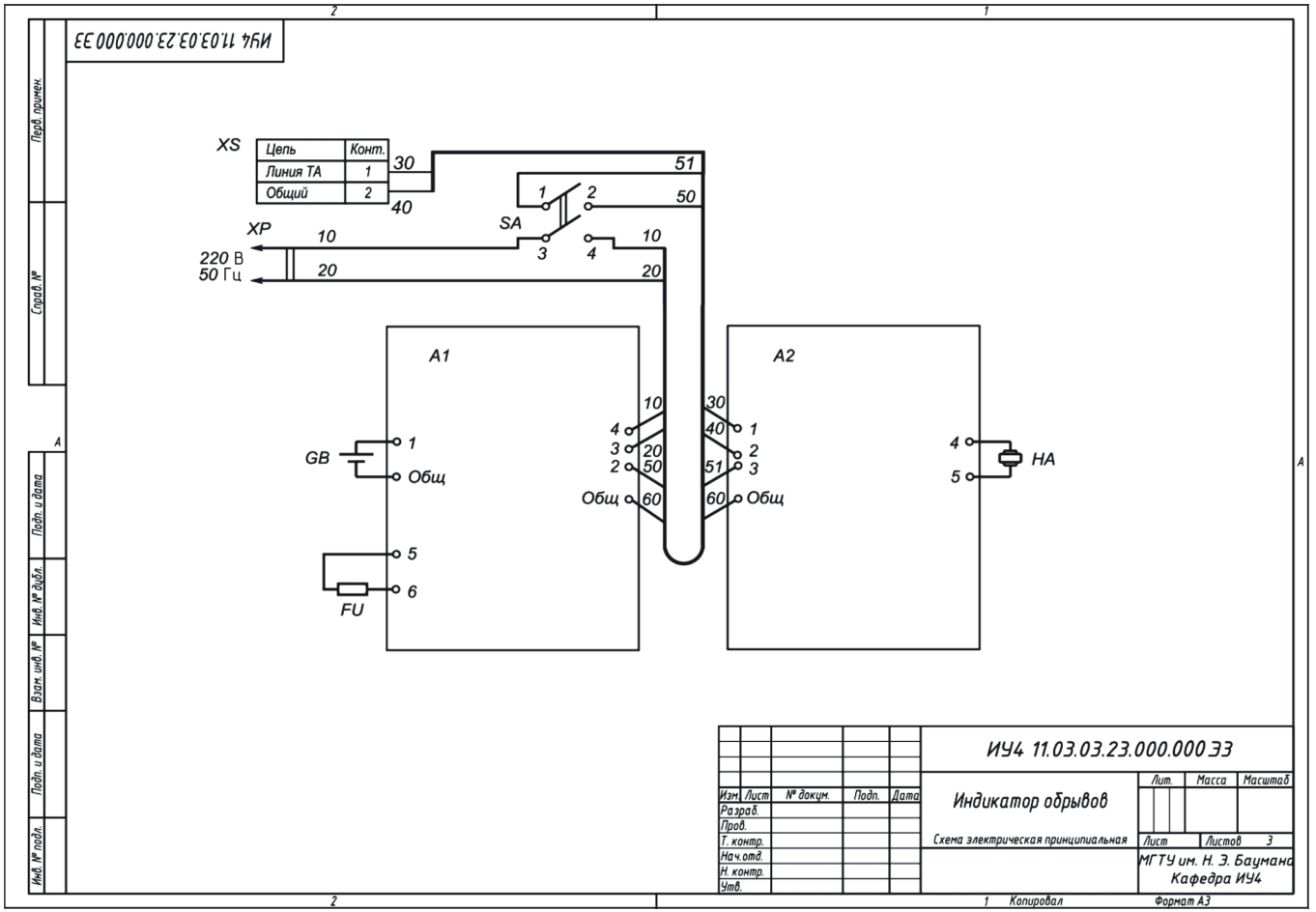


Рис. 1.126 (начало). Электрическая принципиальная схема индикатора обрывов (лист 1)

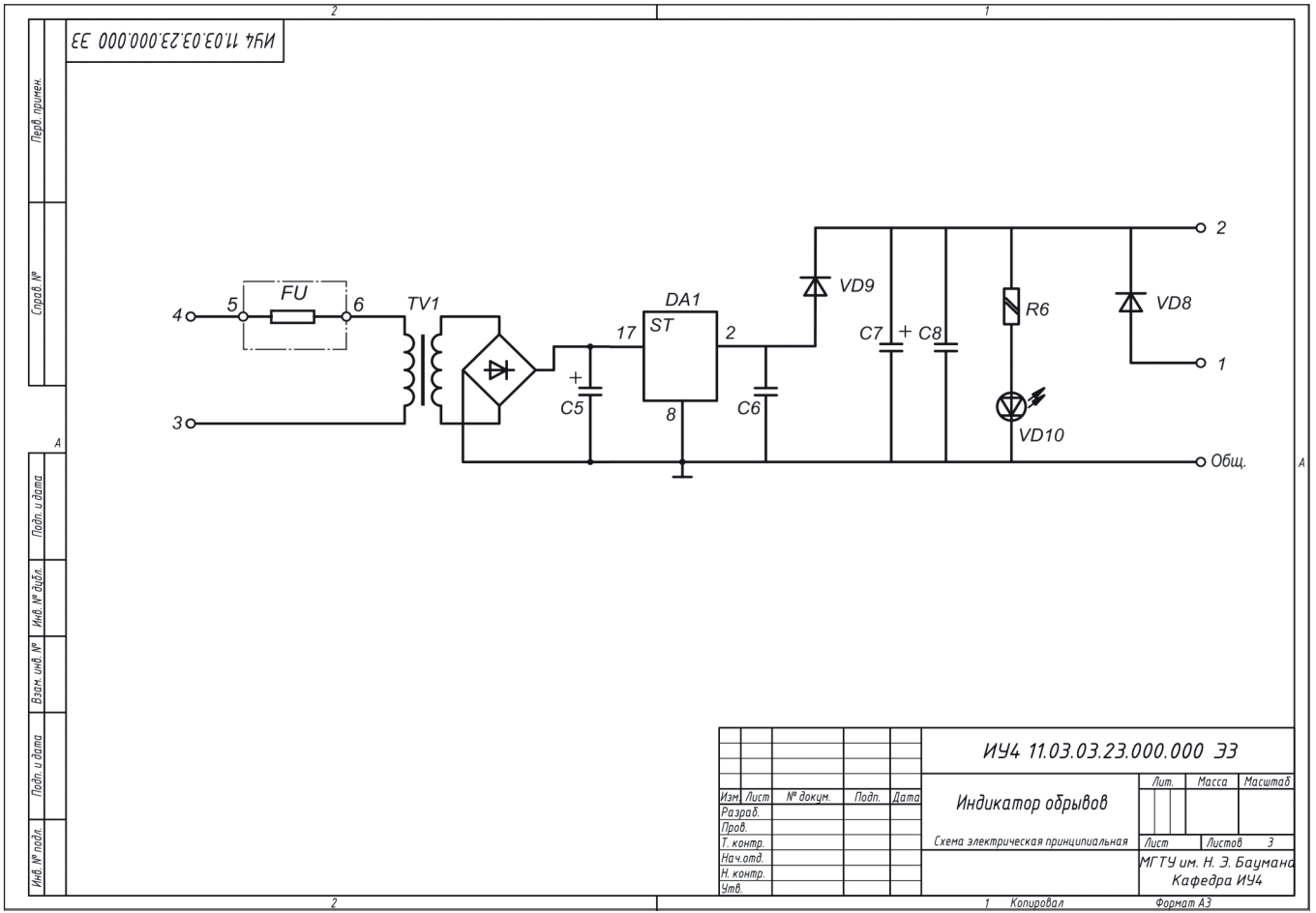


Рис. 1.126 (продолжение). Электрическая принципиальная схема индикатора обрывов (лист 2)

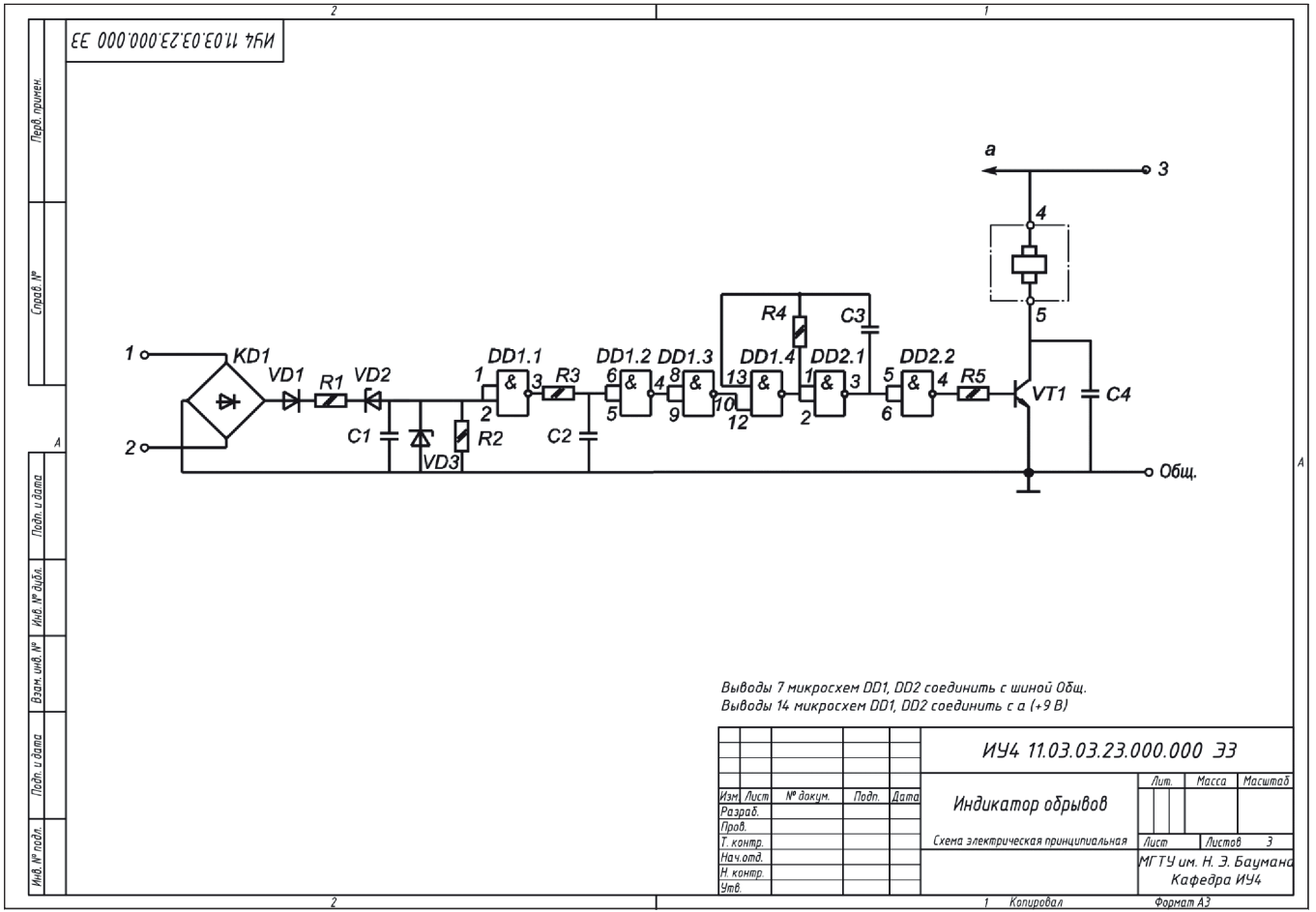


Рис. 1.126 (окончание). Электрическая принципиальная схема индикатора обрывов (лист 3)

в конструкции, а лишь с учетом наглядного изображения передачи и обработки потоков информации. Можно рекомендовать размещение УГО в соответствии с функциональным назначением в горизонтальные и вертикальные ряды.

Компоненты должны иметь буквенно-цифровую маркировку (позиционное обозначение) согласно ГОСТ 2.710–81 «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах». Цифровое обозначение (порядковый номер) присваивают элементам в пределах группы с одинаковым буквенным обозначением, начиная с единицы согласно последовательности элементов на схеме сверху вниз и слева направо. Примеры позиционных обозначений элементов: конденсаторы — C_1, C_2, ..., C_n; резисторы — R_1, R_2, ..., R_m; транзисторы — VT_1, VT_2, ..., VT_k. Позиционные обозначения указывают рядом с УГО по возможности с правой стороны или над ним.

Линии связи (проводники) изображают в виде горизонтальных и вертикальных отрезков, имеющих минимальное число изломов и пересечений.

На схеме изображают электрические соединители, клеммы и другие элементы, которыми заканчиваются входные и выходные цепи, характеристики входных и выходных цепей изделия, параметры, подлежащие измерению на контрольных контактах, гнездах.

Сборочный чертеж содержит изображение сборочной единицы и информацию, необходимую для ее сборки (изготовления) и контроля. Спецификация к сборочному черчежу определяет полный состав сборочной единицы. Сборочный чертеж — схема расположения элементов, на нем изображают составные части изделия, при необходимости жгуты, провода, кабели и конструкцию, на которой это все расположено. Составные части изделия дают упрощенными внешними очертаниями; провода, жгуты и кабели — отдельными линиями или упрощенными внешними очертаниями.

Государством, предприятиями и организациями страны разработаны стандарты разных уровней по установке элементов на платы (например, ОСТ 4ГО.010.030). Ссылка на эти стандарты приводится в технических требованиях на чертеж. Если в приводимом ссылочном документе элемент схемы отсутствует (например, это уникальный компонент или он недавно разработан), то на него выполняют вид или сечение с необходимыми размерами, которые и приводят на сборочном чертеже.

Чертеж ПП (рис. 1.127–1.133) показывает топологический рисунок проводников, КП, отверстий, а также основные конструктивные размеры ПП.

При необходимости электромонтажа изделия может быть выполнен электромонтажный чертеж. Если монтаж несложный и содержит небольшое число соединений, возможно нанесение электромонтажной схемы на сборочный чертеж и на принципиальную электрическую схему.

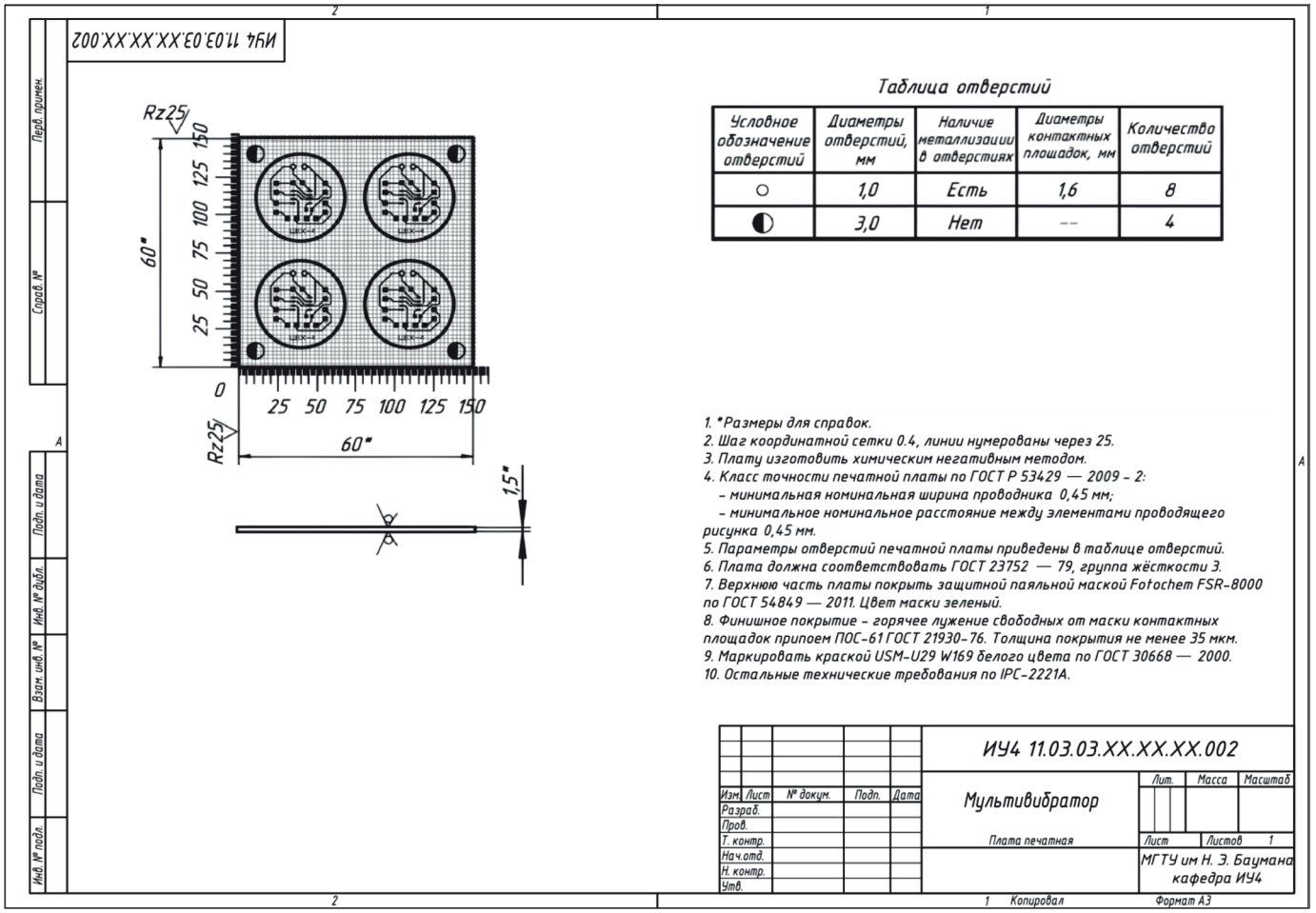


Таблица отверстий

Условное обозначение отверстий	Диаметры отверстий, мм	Наличие металлизации в отверстиях	Диаметры контактных площадок, мм	Количество отверстий
○	1,0	Есть	1,6	8
◐	3,0	Нет	--	4

1. *Размеры для справок.
2. Шаг координатной сетки 0.4, линии нумерованы через 25.
3. Плату изготовить химическим негативным методом.
4. Класс точности печатной платы по ГОСТ Р 53429 — 2009 – 2:
   – минимальная номинальная ширина проводника 0,45 мм;
   – минимальное номинальное расстояние между элементами проводящего рисунка 0,45 мм.
5. Параметры отверстий печатной платы приведены в таблице отверстий.
6. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752 — 79, группа жёсткости 3.
7. Верхнюю часть платы покрыть защитной паяльной маской Fotochem FSR-8000 по ГОСТ 54849 — 2011. Цвет маски зеленый.
8. Финишное покрытие – горячее лужение свободных от маски контактных площадок припоем ПОС-61 ГОСТ 21930-76. Толщина покрытия не менее 35 мкм.
9. Маркировать краской USM-U29 W169 белого цвета по ГОСТ 30668 — 2000.
10. Остальные технические требования по IPC-2221A.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИУ4 11.03.03.XX.XX.XX.002			
Разраб.					Мультивибратор	Лит.	Масса	Масштаб
Пров.								
Т. контр.					Плата печатная	Лист	Листов 1	
Нач.отд.						МГТУ им Н. Э. Баумана кафедра ИУ4		
Н. контр.								
Утв.								

Копировал Формат А3

Рис. 1.127. Чертеж ПП мультивибратора

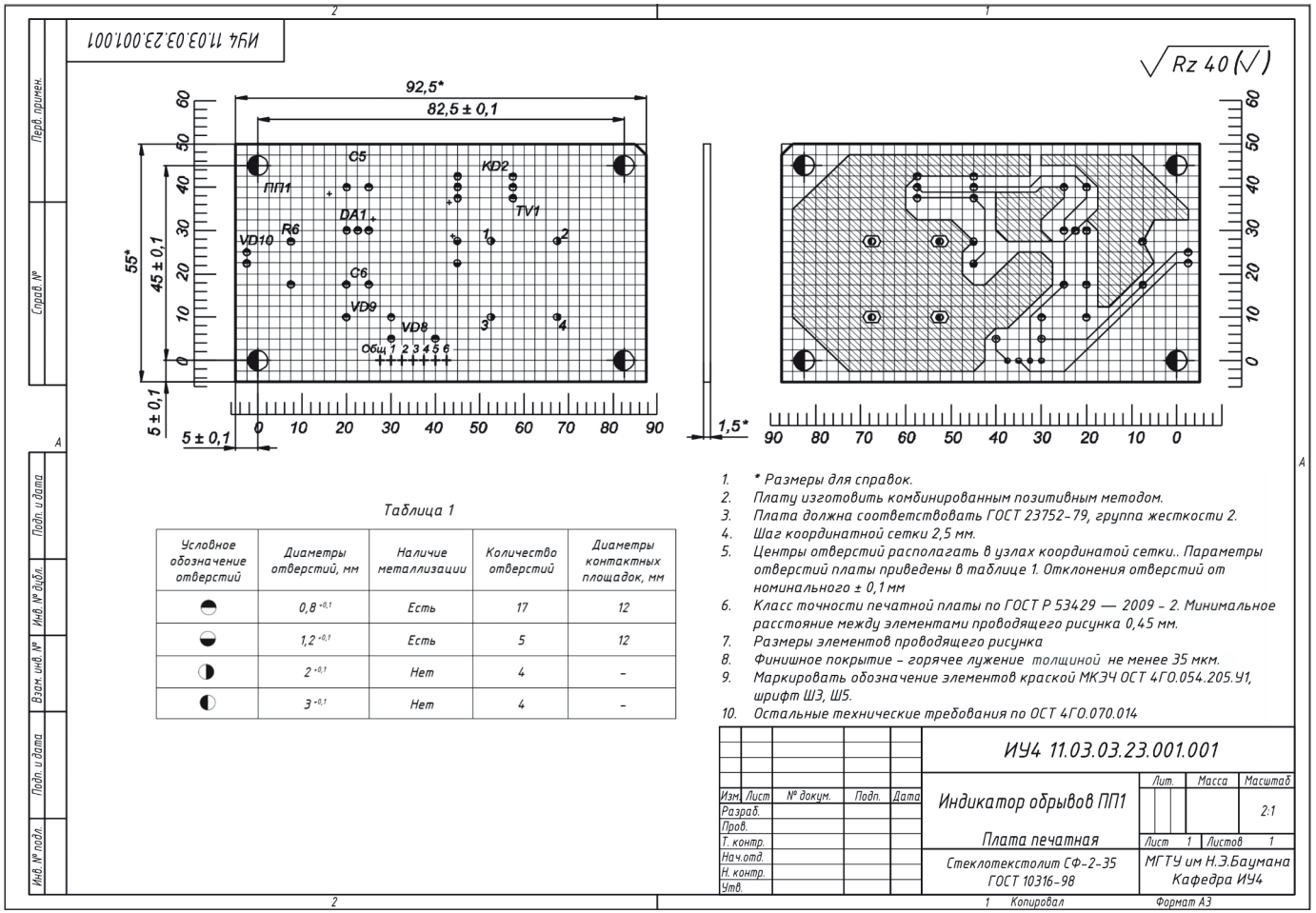


Таблица 1

Условное обозначение отверстий	Диаметры отверстий, мм	Наличие металлизации	Количество отверстий	Диаметры контактных площадок, мм
◓	0,8 +0,1	Есть	17	12
◒	1,2 +0,1	Есть	5	12
◑	2 +0,1	Нет	4	–
◐	3 +0,1	Нет	4	–

1. * Размеры для справок.
2. Плату изготовить комбинированным позитивным методом.
3. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752–79, группа жесткости 2.
4. Шаг координатной сетки 2,5 мм.
5. Центры отверстий располагать в узлах координатой сетки.. Параметры отверстий платы приведены в таблице 1. Отклонения отверстий от номинального ± 0,1 мм
6. Класс точности печатной платы по ГОСТ Р 53429 — 2009 – 2. Минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка 0,45 мм.
7. Размеры элементов проводящего рисунка
8. Финишное покрытие – горячее лужение толщиной не менее 35 мкм.
9. Маркировать обозначение элементов краской МКЭЧ ОСТ 4ГО.054.205.У1, шрифт Ш3, Ш5.
10. Остальные технические требования по ОСТ 4ГО.070.014

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИУ4 11.03.03.23.001.001			
Разраб.					Индикатор обрывов ПП1	Лит.	Масса	Масштаб
Пров.								2:1
Т. контр.					Плата печатная	Лист 1	Листов 1	
Нач.отд.					Стеклотекстолит СФ-2-35 ГОСТ 10316-98	МГТУ им Н.Э.Баумана Кафедра ИУ4		
Н. контр.								
Утв.								

Перв. примен. | Справ. № | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

1 Копировал Формат А3

Рис. 1.128. Чертеж ПП индикатора обрывов ПП1

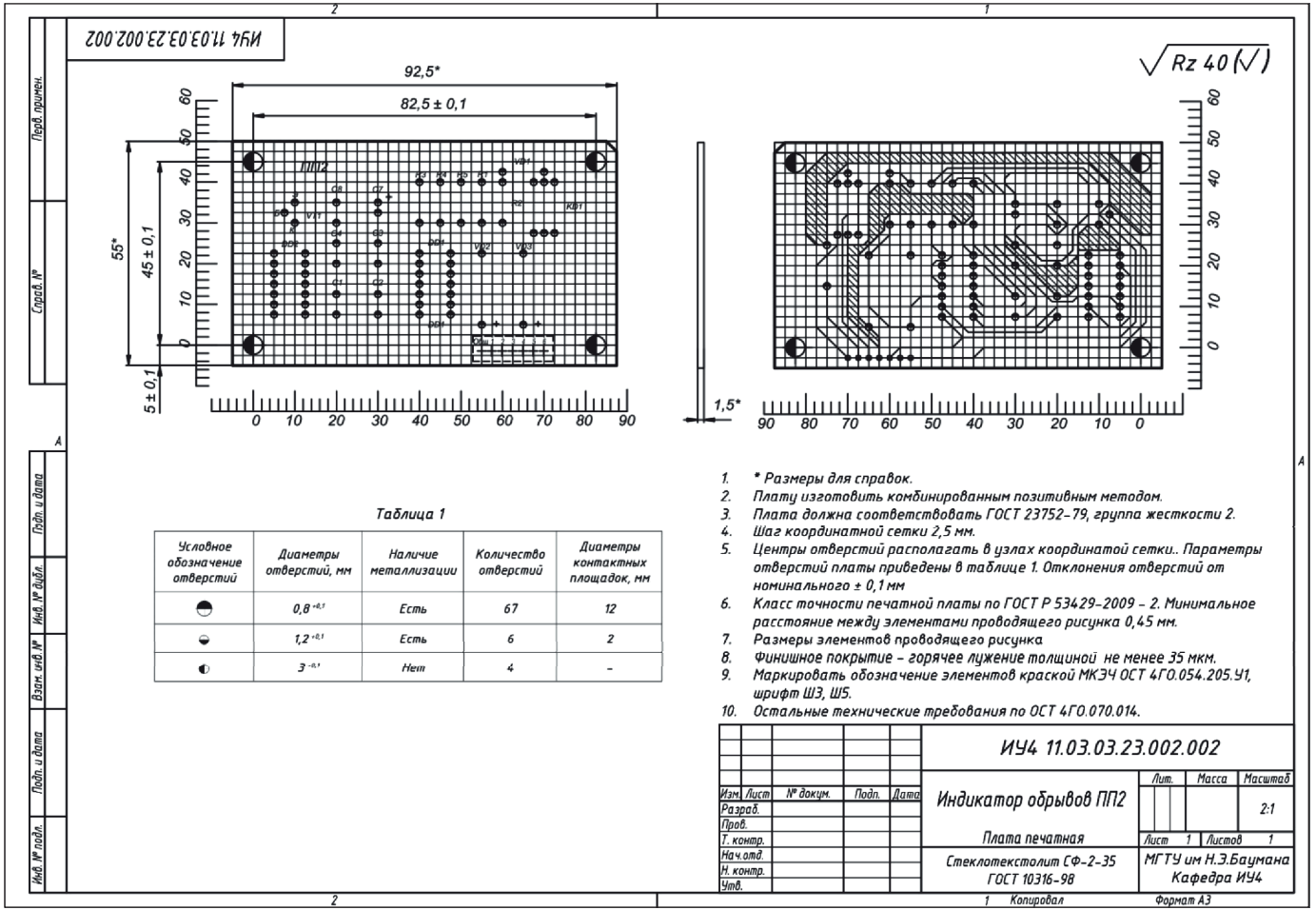


Таблица 1

Условное обозначение отверстий	Диаметры отверстий, мм	Наличие металлизации	Количество отверстий	Диаметры контактных площадок, мм
◓	$0{,}8^{+0{,}1}$	Есть	67	12
◒	$1{,}2^{+0{,}1}$	Есть	6	2
◐	$3^{-0{,}1}$	Нет	4	–

1. * Размеры для справок.
2. Плату изготовить комбинированным позитивным методом.
3. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752–79, группа жесткости 2.
4. Шаг координатной сетки 2,5 мм.
5. Центры отверстий располагать в узлах координатой сетки.. Параметры отверстий платы приведены в таблице 1. Отклонения отверстий от номинального ± 0,1 мм
6. Класс точности печатной платы по ГОСТ Р 53429–2009 – 2. Минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка 0,45 мм.
7. Размеры элементов проводящего рисунка
8. Финишное покрытие – горячее лужение толщиной не менее 35 мкм.
9. Маркировать обозначение элементов краской МКЭЧ ОСТ 4ГО.054.205.У1, шрифт Ш3, Ш5.
10. Остальные технические требования по ОСТ 4ГО.070.014.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИУ4 11.03.03.23.002.002			
Разраб.					Индикатор обрывов ПП2	Лит.	Масса	Масштаб
Пров.								2:1
Т. контр.					Плата печатная	Лист 1	Листов 1	
Нач. отд.					Стеклотекстолит СФ-2-35 ГОСТ 10316-98	МГТУ им Н.Э.Баумана Кафедра ИУ4		
Н. контр.								
Утв.								

Перв. примен. | Справ. № | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Копировал | Формат А3

Рис. 1.129. Чертеж ПП индикатора обрывов ПП2

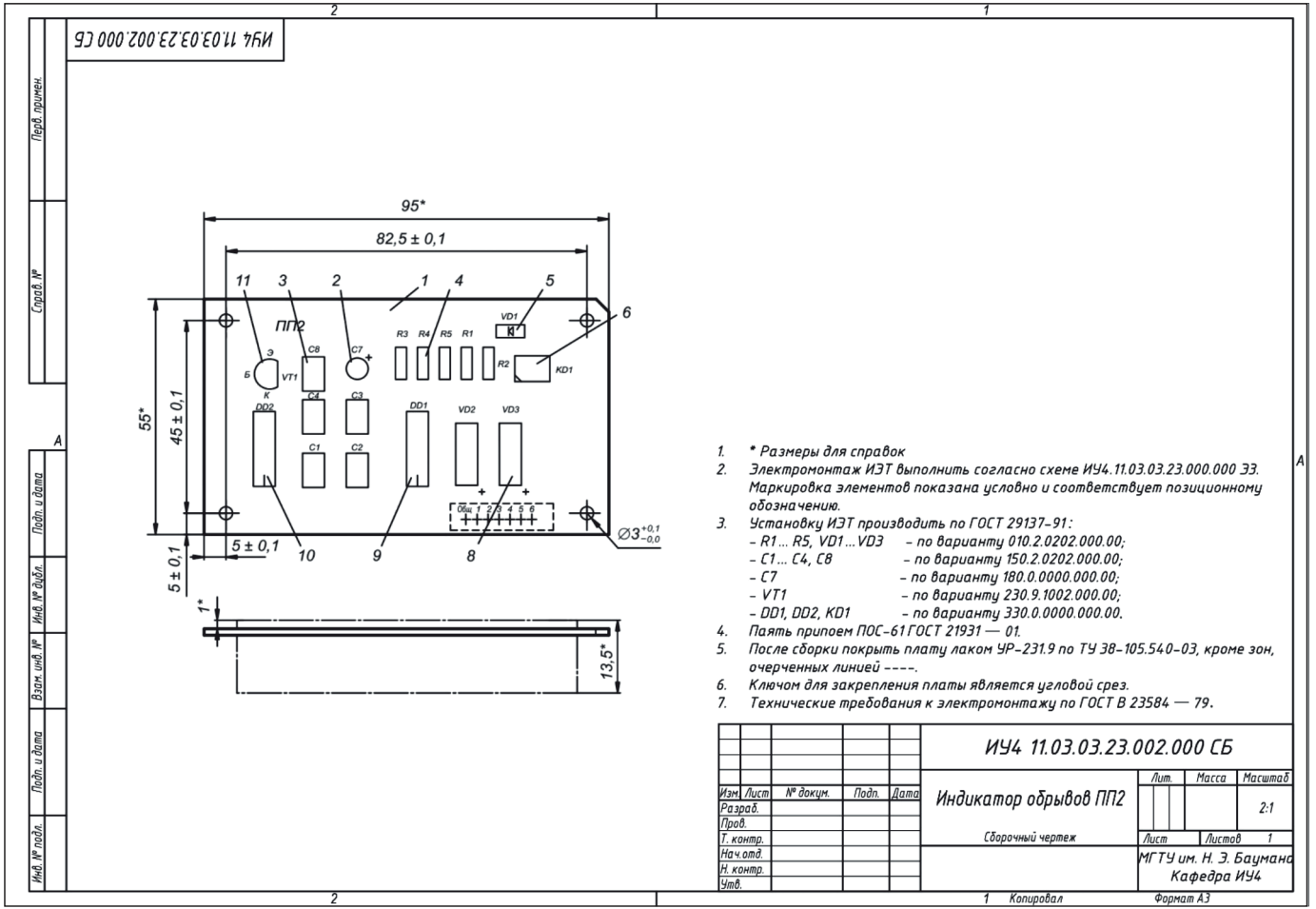


Рис. 1.130. Сборочный чертеж индикатора обрывов ПП2

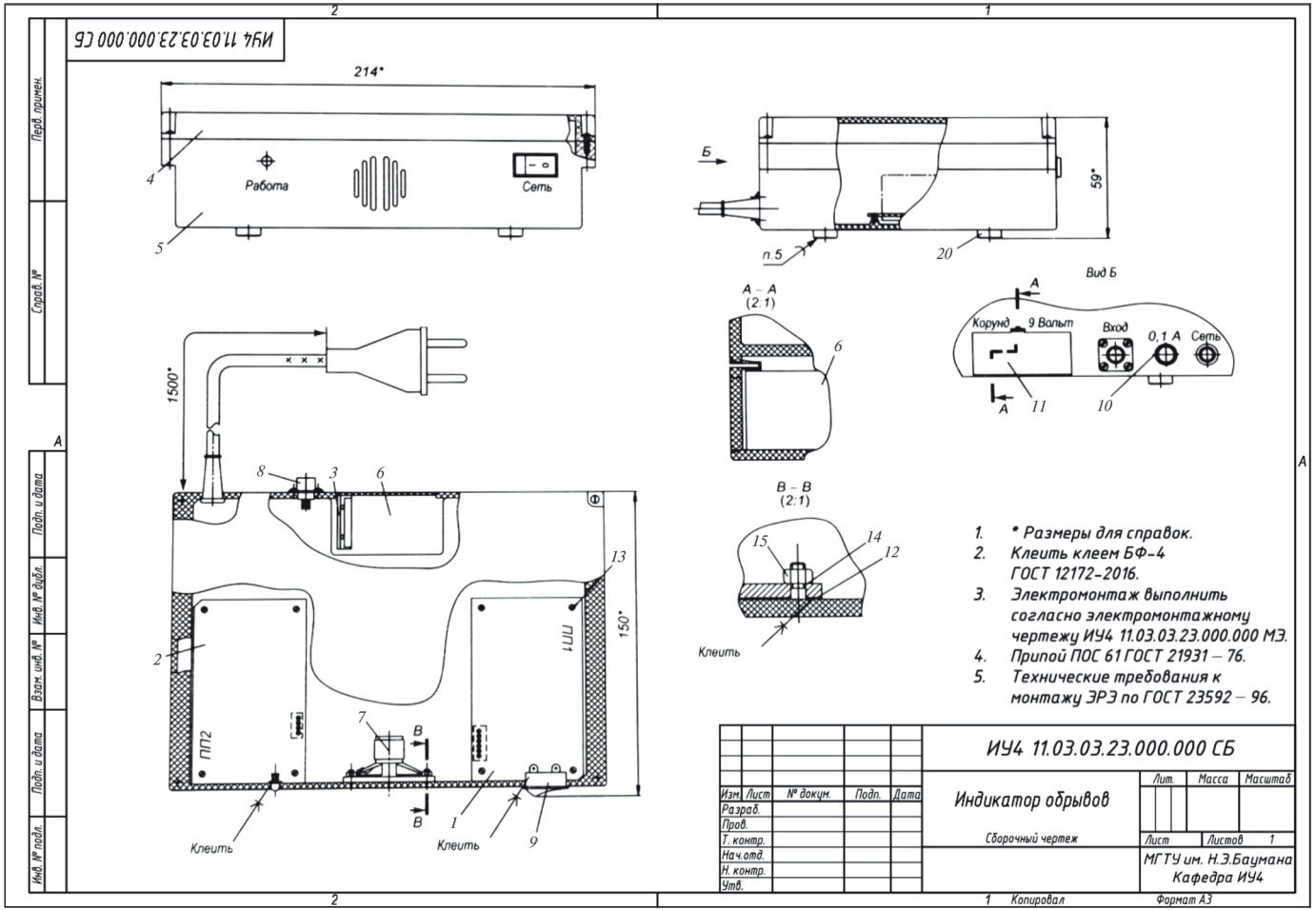


Рис. 1.131. Сборочный чертеж индикатора обрывов

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				Документация		
А4			ИУ4 11.03.03.23.000.000 Э1	Схема электрическая	1	
				структурная		
А4			ИУ4 11.03.03.23.000.000 Э3	Схема электрическая	1	
				принципиальная		
А3			ИУ4 11.03.03.23.000.000 СБ	Сборочный чертеж	1	
А3			ИУ4 11.03.03.23.000.000 МЭ	Электромонтажный чертеж	1	
			ИУ4 11.03.03.23.000.000 ПЭ3	Перечень элементов		
			ИУ4 11.03.03.23.000.000 ПД	Плакат демонстрационный		
				Сборочные единицы		
А3		1	ИУ4 11.03.03.23.001.000 СБ	Плата ПП1	1	
А3		2	ИУ4 11.03.03.23.002.000 СБ	Плата ПП2	1	
А3		3	ИУ4 11.03.03.23.003.000 СБ	Микроплата контроля питания	1	
				Детали		
А3		11	ИУ4 11.03.03.23.000.002	Крышка батареи	1	
А3		4	ИУ4 11.03.03.23.000.003	Крышка корпуса	1	
А3		5	ИУ4 11.03.03.23.000.001	Основание	1	
А3		9	ИУ4 11.03.03.23.000.004	Переключатель клавишный	1	
А4		10	ИУ4 11.03.03.23.000.005	Электроустановочное изделие	1	
А4		12	ИУ4 11.03.03.23.000.006	Фланец	1	
А4		20	ИУ4 11.03.03.23.000.007	Прокладка фетровая	4	

Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл

ИУ4 11.03.03.23.000.000 СП

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
Разраб.				
Пров.				
Нач.отд.				
Н.контр				
Утв.				

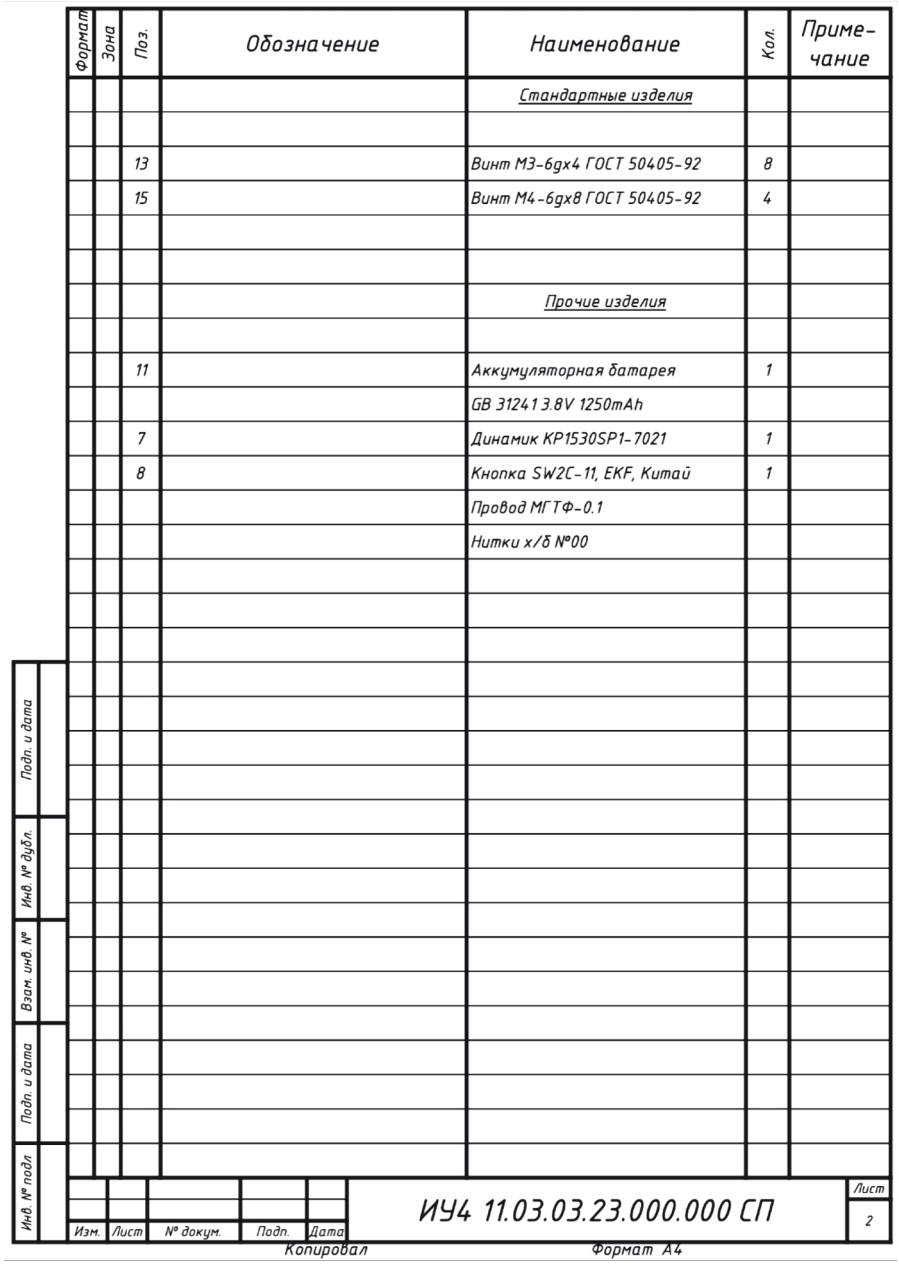
Индикатор обрывов

Литера	Лист	Листов
	1	2

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра ИУ4

Копировал Формат А4

Рис. 1.132 (начало). Спецификация к сборочному и электромонтажному чертежу индикатора обрывов (лист 1)



Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
				Стандартные изделия		
		13		Винт М3-6gх4 ГОСТ 50405-92	8	
		15		Винт М4-6gх8 ГОСТ 50405-92	4	
				Прочие изделия		
		11		Аккумуляторная батарея	1	
				GB 31241 3.8V 1250mAh		
		7		Динамик KP1530SP1-7021	1	
		8		Кнопка SW2C-11, EKF, Китай	1	
				Провод МГТФ-0.1		
				Нитки х/б №00		

Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИУ4 11.03.03.23.000.000 СП	Лист 2

Копировал Формат А4

Рис. 1.132 (окончание). Спецификация к сборочному и электромонтажному чертежу индикатора обрывов (лист 2)

1.18.3. ЧЕРТЕЖИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Выделим основные термины, применяемые при описании документации. Дополнительно рекомендуется ознакомиться с ГОСТ Р 53386–2009 «Платы печатные. Термины и определения».

Печатный монтаж — процесс формирования системы электропроводящих покрытий заданной формы и размеров в объеме или на поверхности диэлектрического основания.

Печатная плата — изделие, представляющее собой диэлектрическое основание с нанесенным на него печатным монтажом. Печатный монтаж может состоять из одного или двух проводящих рисунков, расположенных на поверхности основания или из системы проводящих рисунков, расположенных в объеме и на поверхности основания.

Функция печатной платы — обеспечивать электрическое соединение элементов схемы.

Печатный проводник — участок токопроводящего покрытия, нанесенного на изоляционное основание, выполняющий функции обычного монтажного провода.

Навесные элементы — объемные электро- и радиоэлементы, установленные и закрепленные на ПП и имеющие электрический контакт с печатными проводниками.

Контактная площадка — часть проводящего рисунка ПП, используемая для электрического подсоединения устанавливаемых изделий. Контактная площадка имеет электрический контакт с печатным проводником, обеспечивающий электрическое соединение навесных элементов схемы с печатным монтажом.

Монтажное отверстие — отверстие в ПП, предназначенное для закрепления выводов навесных элементов и электрического соединения их с печатными проводниками.

Координатная сетка — сетка, наносимая на изображение ПП и служащая для определения положения монтажных отверстий, печатных проводников и других элементов ПП.

Шаг координатной сетки — расстояние между соседними параллельными линиями координатной сетки. Шаг координатной сетки выбирается согласно ГОСТ Р 51040–97 «Платы печатные. Шаги координатной сетки» и должен быть кратным основным шагам координатной сетки: 0,05 мм и 0,5 мм (0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 2,50 и т. д.).

Узел координатной сетки — точка пересечения двух линий координатной сетки.

Узкие места — участки ПП, где при размещении проводников их ширина и расстояния между ними и КП выполняются меньше рекомендуемых (вплоть до минимально допустимых).

Конструкторская документация на ПП и блоки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109–2023, ГОСТ 2.417–91 и действующими нормативно-техническими документами. Чертеж ПП односторонней или

двусторонней классифицируется как чертеж детали и может быть выполнен как на одном, так и на двух листах. При выполнении чертежа МПП необходимы сборочный чертеж ПП, спецификация и чертежи топологии каждого слоя ПП.

Чертеж ПП должен содержать все сведения, необходимые для ее изготовления и контроля: изображение ПП со стороны печатного монтажа; габаритные и присоединительные размеры; предельные отклонения и параметры шероховатости поверхностей ПП и всех ее элементов (отверстий, проводников), а также размеры расстояний между ними; необходимые технические требования; сведения о материале.

Размеры каждой стороны ПП должны быть кратными 2,5 при длине до 100 мм, 5 при длине до 350 мм, 20 при длине более 350 мм. Соотношение линейных размеров сторон ПП должно быть не более 3:1 и выбирается из ряда 1:1; 1:2; 2:3; 2:5. Толщину ПП определяют исходя из механических требований, предъявляемых к конструкции печатного блока, с учетом метода изготовления. Рекомендуются ПП толщиной 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

Разработку чертежа ПП начинают с нанесения координатной сетки. Ее использование позволяет не наносить размеры конструктивных элементов ПП, расположенных в узлах и на линиях координатной сетки, а упростить разводку печатного монтажа, проводя трассы по линиям координатной сетки. Центры всех отверстий на ПП, в том числе крепежных, должны располагаться в узлах координатной сетки. Если из-за конструктивных особенностей элемента этого сделать нельзя, то центр отверстий располагают согласно указаниям чертежа на этот элемент. Такое расположение центров отверстий используют для ламповых панелей, малогабаритных реле, разъемов и других элементов. При этом должны соблюдаться следующие требования: центр одного отверстия, принятого за основное, должен быть расположен в узле координатной сетки; центры остальных отверстий необходимо по возможности располагать на вертикальных или горизонтальных линиях координатной сетки.

Диаметры монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий выбирают из ряда (0,2); 0,4; (0,5); 0,6; (0,7); 0,8; (0,9); 1,0; (1,2); 1,3; 1,5; 1,8; 2,0; 2,2; (2,4); (2,6); (2,8); (3,0). Диаметры, не взятые в скобки, являются предпочтительными. Не рекомендуется на одной печатной плате иметь более трех различных диаметров отверстий. Диаметры металлизированных отверстий выбирают в зависимости от диаметров выводов навесных элементов и толщины ПП, а диаметры неметаллизированных отверстий — в зависимости от диаметров выводов навесных элементов, устанавливаемых в эти отверстия. Разность между диаметром металлизированного отверстия и диаметром вывода должна быть не более 0,4 мм для выводов диаметром от 0,4 до 0,8 мм и 0,6 мм для выводов диаметром свыше 0,8 мм.

Параметр шероховатости поверхности монтажных неметаллизированных отверстий и торцев ПП должен быть $Rz \le 80$. Параметр шероховатости поверхности монтажных переходных металлизированных отверстий $Rz \le 40$.

Для упрощения изображения платы отверстия допускается показывать окружностями одинакового диаметра с условным цветовым обозначением. При выполнении отверстий таким способом на поле чертежа помещают таблицу отверстий. Размеры, количество граф и форма таблицы ГОСТом не устанавливаются.

Условное обозначение отверстий на печатных платах

Диаметр отверстия, мм....	0,6	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	5,0
Условное обозначение								

Все монтажные отверстия должны иметь КП. Форма КП может быть произвольной, круглой, прямоугольной или близкой к ним. Центр КП симметричной формы должен совпадать с центром монтажного отверстия, для КП прямоугольной и овальной формы центры монтажных отверстий могут быть смещены. Круглые КП изображают одной окружностью, диаметр которой должен соответствовать минимальному размеру контактной площадки. Рекомендуется делать плавный переход КП в проводник. Расстояние от края проводника и КП неметаллизированного отверстия до края ПП должно быть не менее толщины ПП. Печатные проводники следует изображать в виде отрезков линий, совпадающих с линиями координатной сетки или под углом, кратным 15°. Допускается выполнение проводников произвольной конфигурации и округление перегибов проводников.

Печатные проводники следует выполнять одинаковой ширины на всем протяжении. В узких местах сужают проводники до минимально допустимых значений. Взаимное расположение проводников не регламентируется.

При прокладке печатных проводников следует по возможности избегать ответвлений проводников. Концы печатных проводников, предназначенные для подключения печатной схемы, рекомендуется располагать с учетом удобства применения переходных элементов.

Габаритные размеры ПП, диаметры и координаты отверстий, КП и их относительное расположение показывают на чертеже одним из следующих способов:

а) в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307–2024 с помощью размерных и выносных линий;

б) нанесением координатной сетки;

в) комбинированным способом с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки.

При задании размеров нанесением координатной сетки линии сетки следует нумеровать. Шаг нумерации определяют конструктивно с учетом насыщенности и масштаба изображения. Допускается наносить не все линии координатной сетки, при этом на поле чертежа помещают запись типа «Линии координатной сетки нанесены через одну». За нуль в прямоугольной системе координат на главном виде ПП принимают центр крайнего левого или правого нижнего отверстия, левый или правый нижний угол ПП, левую или

правую нижнюю точку, образованную построениями, например продолжением линии контура ПП, углы которого срезаны.

На чертеже ПП указывают габаритные размеры ПП, проводников, имеющих строго определенную или переменную ширину (при этом расчетную ширину следует указывать на каждом участке между двумя соседними КП, переходными или монтажными отверстиями), диаметры и координаты крепежных, технологических и других отверстий, не связанных с печатным монтажом.

На поле чертежа указывают метод изготовления ПП; технические условия; жесткость ПП; шаг координатной сетки; класс точности ПП; ширину проводников и расстояния между ними; расстояния между КП, между КП и проводником; допуски на выполнение проводников, КП, отверстий и расстояний между ними; особенности конструкции, технологии и другие параметры ПП.

Перечисленные ниже технические требования располагают над основной надписью.

1. Размеры для справок.
2. Общие допуски (ГОСТ).
3. Общие допуски формы и расположения (ГОСТ).
4. Шаг координатной сетки.
5. Плату изготовить ... методом.
6. Класс точности ПП по ГОСТу:
   – минимальная номинальная ширина проводника;
   – минимальное номинальное расстояние между элементами проводящего рисунка.
7. Параметры отверстий ПП (приведены в таблице отверстий).
8. Печатная плата должна соответствовать ГОСТ. Группа жесткости.
9. Часть ПП закрыть защитной маской. Указать цвет маски.
10. Финишное покрытие, толщина покрытия.
11. Маркировать: шрифт, цвет маркировки, ГОСТ.
12. Остальные технические требования (ГОСТ или ссылка на стандарт).

К числу особенностей печатного монтажа относятся: плоское расположение печатных проводников, что не позволяет осуществлять переход с одной ПП на другую без перемычек, переходных колодок или разъемов; установка навесных элементов и крепление выводов только путем пропускания их в отверстия; одновременная пайка всех элементов, установленных на ПП.

Навесные элементы следует размещать правильными рядами, параллельно один другому, на той стороне ПП, где отсутствуют печатные проводники. Такое размещение позволяет устанавливать и закреплять навесные элементы на автоматических линиях и выполнять пайку погружением или волной, исключая воздействие припоя на навесные элементы.

Все навесные элементы крепятся на плате с помощью выводов, которые вставляют в монтажные отверстия и подгибают. Не рекомендуется в монтажном отверстии размещать два и более выводов. Некоторые элементы, например маломощные транзисторы, крепят клеем.

Сборочный чертеж печатной платы при минимальном числе изображений должен давать полное представление о расположении и выполнении всех печатных и навесных элементов и деталей. Сборочный чертеж выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109–2023 и с учетом требований ГОСТ 2.702–2011 «Правила выполнения электрических схем». Конструкции навесных элементов вычерчивают в виде упрощенных изображений, им присваивают буквенно-цифровое позиционное обозначение в соответствии с электрической принципиальной схемой (схема Э3 согласно ГОСТ 2.701–2008 «Схемы. Виды и типы. Требования к выполнению»), по которой выполняют электрический монтаж ПП. На сборочном чертеже ПП должны быть указаны номера позиций всех составных частей, габаритные и присоединительные размеры и сведения о способах присоединения навесных элементов к ПП.

В технических требованиях сборочного чертежа должны быть ссылки на документы (ГОСТы и другие стандарты), устанавливающие правила подготовки и закрепления навесных элементов, сведения о припое и др.

Основным конструкторским документом сборочного чертежа ПП является спецификация. При записи в спецификацию составных частей, являющихся элементами электрической принципиальной схемы, в графе «Примечание» указывают буквенно-цифровые позиционные обозначения этих элементов.

1.18.4. ЧЕРТЕЖИ ЖГУТОВ И КАБЕЛЕЙ, ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫЙ ЧЕРТЕЖ

Жгут — изделие, состоящее из двух и более изолированных проводников (проводов, кабелей), скрепляемых сплетением, связыванием или каким-либо другим способом, и других составных частей (соединительных устройств, наконечников и т. п.). Кабель представляет собой изделие, состоящее из одного кабеля или провода и каких-либо других составных частей (соединительных устройств). Исходя из этого чертежи жгутов и кабелей следует рассматривать как сборочные чертежи.

Маркировка жгутов, кабелей и других соединителей обозначается согласно ГОСТ Р 59820–2021.

Чертеж жгута (кабеля) должен содержать изображение изделия, дающее представление о расположении и связи его составных частей (проводов, разъемов, наконечников, бирок и т. п.); габаритные и присоединительные размеры, а также размеры и предельные отклонения длин всех участков жгута; номера позиций составных частей, входящих в жгут (кабель); технические требования к изготовлению и контролю жгута (кабеля). Основным конструкторским документом чертежа жгута является спецификация, выполняемая на отдельных листах формата А4 по правилам, установленным ГОСТ Р 2.106–2019 «Текстовые документы».

При выполнении чертежа жгута изображают: проводники и их соединения, запасные проводники, переходные контакты, соединительные

устройства (разъемы, наконечники), маркировочные бирки, которыми проводится маркировка кабелей, жгутов, отдельных ветвей, размеры длин всех участков жгута с указанием допустимых отклонений (размеры радиусов изгиба допускается не указывать), указания о присоединении проводников.

Ленту, нитки и другой подобный материал, которым должен быть обмотан жгут или кабель, на чертеже не изображают. Данные об этих материалах указывают в спецификации, а об их применении — в технических требованиях чертежа.

Чертеж жгута может быть выполнен упрощенно или условно. Упрощенное выполнение чертежа предполагает изображение всех составных частей внешними очертаниями. При этом неэкранированные проводники показывают одной или двумя линиями, экранированные выделяют шриховкой (рис. 1.133). Электрические соединители (штепсельные разъемы), наконечники и т. п. изображают внешними очертаниями. На чертеже жгута, выполненном условно, проводники показывают одной линией, штепсельные разъемы, наконечники — прямоугольником.

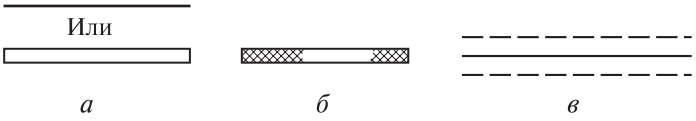


Рис. 1.133. Изображение проводников:
а — неэкранированных; *б* — экранированных; *в* — УГО экранированной линии связи

На чертеже жгута (кабеля) должны быть помещены сведения о присоединении проводников. Поэтому для каждого проводника указывают цифровое обозначение, присвоенное ему на чертеже для электромонтажа или на электрической схеме. Обозначение проводника наносят около обоих концов изображения проводника и при необходимости у мест разветвления.

Указания о присоединении проводов можно приводить в таблице, помещаемой около изображения соединительного устройства или на свободном поле чертежа. В таблице указываются контакт разъема, номер проводника или адрес присоединения вторых концов проводов. В последнем случае обозначения проводников не наносят.

В некоторых случаях сведения о присоединении удобно помещать в таблице, приведенной на поле сборочного чертежа, или оформлять последующими листами сборочного чертежа. Таблицу присоединений выполняют по форме табл. 1.21. В графах таблицы указывают:

– в графе «Проводник» — обозначение проводника;

– в графе «Поз.» — номер позиции материала провода жгута по спецификации;

– в графе «Присоединения» — адреса присоединений обоих концов проводника. Если конец проводника снабжается наконечником или остается свободным, следует давать ссылку на номер позиции. При этом

допускается ссылаться на обозначение, присвоенное группе проводников, например «А. поз...»;

– в графе «Длина» — длину провода жгута, если она не указана на изображении.

Таблица 1.21

Таблица присоединений

Проводник	Поз.	Присоединения	Длина	Примечание

На сборочном чертеже изображение жгута выполняется условно. Проводники обозначаются арабскими цифрами в пределах жгута. Сведения о присоединении проводников приведены в таблицах колодок *XT*1...*XTn*, размещенных на свободном поле чертежа; данные проводника (марка, сечение) указаны в спецификации; длина отдельных проводников и сведения о присоединениях даны в таблице присоединений, оформленной на последующих листах сборочного чертежа.

Для жгутов и кабелей, применяемых в радиоэлектронной промышленности, сведения о присоединениях проводов удобно указывать на схеме соединений, выполненной на поле чертежа. Оформление схемы соединений должно соответствовать ГОСТ 2.702–2011 «Правила выполнения электрических схем», при этом должны быть изображены все незадействованные контакты, на которые заведены запасные провода. Расстояния между линиями, изображающими электрические связи, выбираются в пределах 8...10 мм. Разъемы, одинаковые наконечники и т. п. изображают разнесенным способом: контакты соединяют сплошной тонкой линией, на концах которой указывают буквенно-цифровые позиционные обозначения соединительных устройств, присвоенные им на принципиальной схеме. Располагать разъемы рекомендуется по возрастанию порядковых номеров позиционных обозначений сверху вниз. Запасные провода и свободные контакты разъемов следует изображать упрощенно в конце схемы в правой ее части. Обозначение контактов соединительных устройств наносят у точки, обозначающей присоединение. При выполнении отдельных цепей жгута проводами различных марок и сечений на линиях электрической связи указывают номера позиций этих проводов по спецификации жгута. Указания о марках и сечениях проводов, которыми выполнена большая часть соединений, помещают в технических требованиях чертежа.

Переход от одной цепи к нескольким цепям или от проводов одного сечения к проводам другого сечения в кабеле необходимо выполнять с помощью переходных контактов. Место установки переходных контактов определяется конструктором и указывается на чертеже.

На чертеже жгута (кабеля) должны быть помещены технические требования к их изготовлению и контролю. Первым пунктом технических

требований является ссылка на ГОСТ, устанавливающий правила выполнения внешнего электромонтажа кабельных изделий.

В следующих пунктах технических требований помещают указания о технологических особенностях выполнения жгута или кабеля, данные по дополнительным испытаниям с учетом специфики данного жгута или кабеля, сведения о применении наружной изоляции и другие указания, уточняющие конструкцию.

Электромонтаж — соединение составных частей с помощью электрических проводников. В электротехнике значительная группа изделий изготовляется с применением электромонтажа, например электрорадиоприборы, электроустановки и т. п. Конструкторскую документацию на такие изделия выполняют с учетом требований ГОСТ 2.702–2011 «Правила выполнения электрических схем» и ГОСТ 2.709–89 «Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах».

Электромонтажный чертеж представляет собой сборочный чертеж, на котором изображены изделия электроники, жгуты, провода, кабели, а также приведены данные, необходимые для электромонтажа. Все конструктивные элементы на чертеже изображаются условно в виде контурных очертаний без графических подробностей при условии сохранения приближенного сходства. Поскольку чертежи изделий с применением электромонтажа относятся к сборочным, они содержат как минимум два документа: спецификацию и сборочный чертеж.

В состав чертежа с применением электромонтажа, как правило, входят элементы электрической принципиальной схемы или схемы соединений: трансформаторы, резисторы, конденсаторы и др. Таким элементам должны быть присвоены буквенно-цифровые позиционные обозначения по соответствующей схеме.

Для удобства чтения чертежа допускается смещать изображения составных частей, при этом от смещенного изображения проводят линию-выноску, на полке которой наносят надпись «Смещено», или указывают в технических требованиях чертежа «Изображения ... смещены». В тех же целях допускается условно изменять (укорачивать, удлинять и т. д.) очертания составных частей, если изображения закрывают друг друга. При этом искажения очертаний не должны нарушать ясности чертежа.

Разветвления, изломы, слияния проводников и кабелей изображают отрезками под углом 45° (рис. 1.134, *а*). Пересечения проводников показывают в соответствии с рис. 1.134, *б*. Обрывы проводников изображают по общим правилам, указывая номер проводника арабскими цифрами и обозначение листа или вида, на котором содержится продолжение проводника.

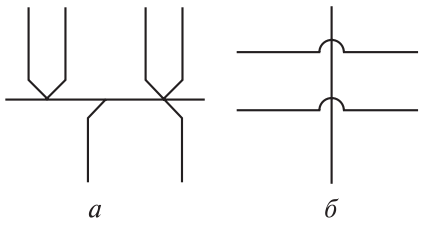


Рис. 1.134. Изображение проводников: *а* — разветвление проводников, *б* — пересечение проводников

Линию, изображающую два и более проводников, у мест обрыва обозначают одним порядковым номером римскими цифрами или указывают у мест обрыва линии обозначения всех проводников, изображаемых этой линией.

Каждый проводник (провод, кабель, жгут, шину) обозначают в соответствии со схемой соединений. При отсутствии схемы соединений проводнику на чертеже присваивают шифр, состоящий из цифрового обозначения соответствующей цепи в электрической принципиальной схеме, знака «дефис» и порядкового номера проводника в цепи: например 2-1, 2-2 следует читать как 1-й и 2-й проводники цепи 2.

При отсутствии обозначений в схемах проводники обозначают на чертежах одним из следующих способов:

а) нумеруют арабскими цифрами одиночные провода и жилы кабелей, записанные в спецификацию как материал, — в пределах чертежа; жилы кабеля, оформленного самостоятельным документом, — в пределах кабеля, провода жгутов — в пределах жгута;

б) нумеруют арабскими цифрами цепи в пределах чертежа и проводники в пределах цепи; обозначения проводников составляют из номера цепи, дефиса и номера проводника в пределах цепи.

Обозначение короткого проводника, изображение которого отчетливо просматривается на чертеже, допускается проставлять на чертеже один раз посредине изображения, а у длинных проводников — около обоих их концов. Проводники, идущие рядом, допускается изображать в виде одной линии; жгуты, кабели и их проводники изображать одной линией не разрешается.

На чертеже для электромонтажа должны быть однозначно определены все соединения между составными частями. При этом линии, изображающие проводники, присоединяемые к многоконтактному изделию, допускается не проводить до изображения контактов, заканчивать у линии, показывающей внешние очертания изделия. Указания о присоединении проводников к контактам приводят следующими способами: обозначения проводников указывают около обозначения контакта или обозначения проводников приводят в таблице. Если контакты изделия, к которому должны быть присоединены проводники, не имеют обозначений, то на чертеже им присваивают обозначения, поясняют их схемой соединений или указанием в технических требованиях чертежа.

Электрическое соединение, осуществляемое пайкой или сваркой, изображают точкой диаметром от 1 ,5S до 2S, где S — толщина сплошной основной линии данного чертежа. Обозначение соединений приводят по принятым правилам. В технических требованиях чертежа указывают припой и другие данные о соединениях.

Связь чертежа для изделий с применением электромонтажа со спецификацией осуществляется через позиционные обозначения. Допускается не наносить на чертеже номера позиций, под которыми в спецификации записаны элементы электрической принципиальной схемы в разделах «Стандартные изделия» и «Прочие изделия» и провода и кабели в разделе «Материалы».

На чертеже для электромонтажа (рис. 1.135) указывают следующие технические требования:

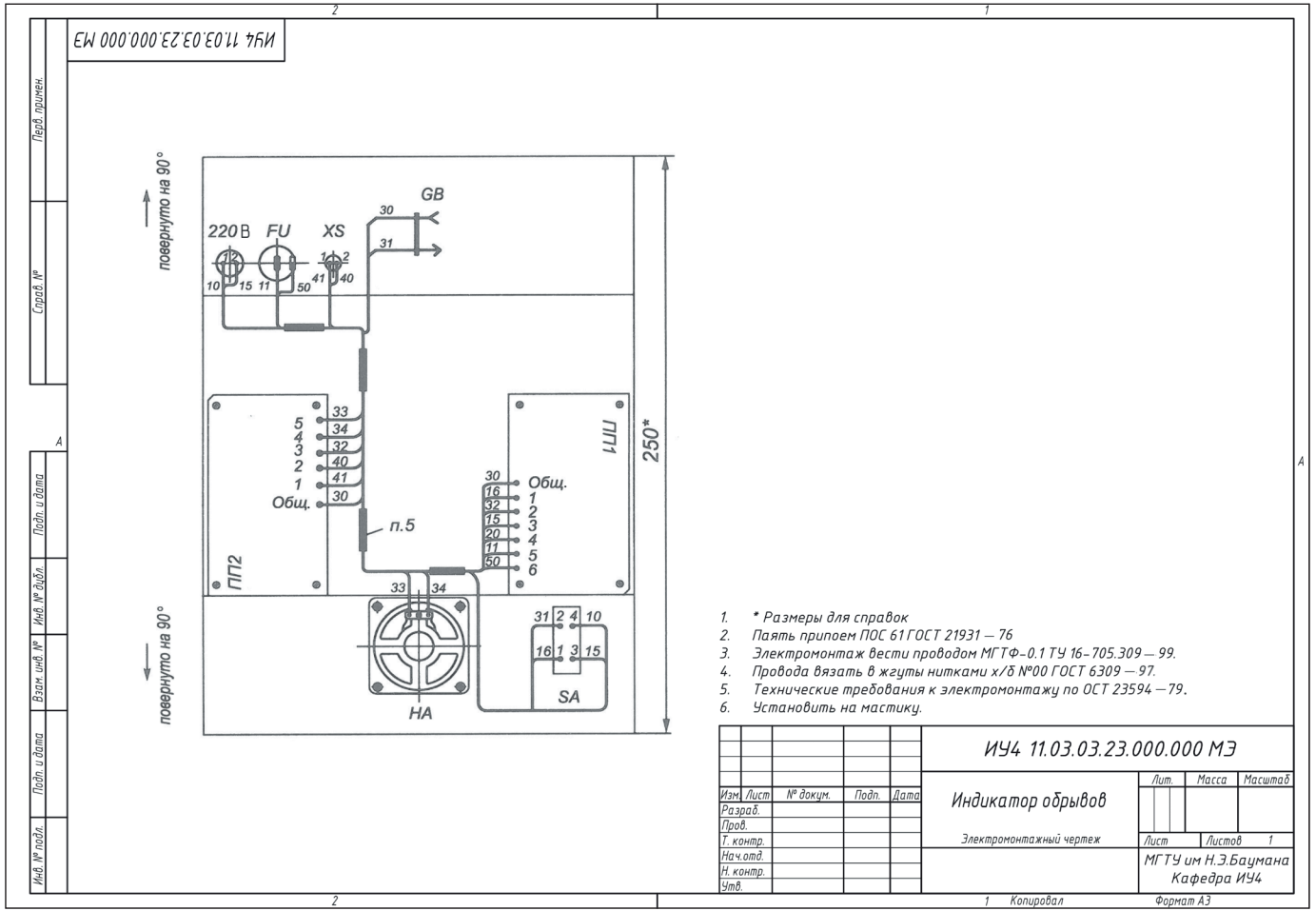


Рис. 1.135. Электромонтажный чертеж индикатора обрывов

– технические требования к электромонтажу: паять припоем ... ГОСТ ...;
– технические требования на жгуты (ГОСТ);
– технические требования к конструкциям разделки проводов и креплению их жил;
– технические требования к монтажу навесных элементов;
– изображения плат/разъемов ... смещены;
– места распайки проводов на платах залить клеем ... ГОСТ ...;
– после настройки прибора места распайки проводов покрыть лаком ...;
– на выводы разъемов надеть трубку поз. ...;
– конденсаторы, резисторы, дроссели, диоды ставить на клей ...;
– маркировка элементов показана условно;
– проводники имеют обозначения для монтажа по схеме ... .

На электромонтажном чертеже может быть выполнена схема соединений, размещаемая на первом листе или оформляемая последующими листами. Таблица соединений разрабатывается согласно электрической принципиальной схеме в том случае, когда на чертеже не указаны адреса присоединения проводников. Таблицу соединений рекомендуется выполнять по форме, приведенной на табл 1.22. Размеры граф таблицы стандартом не регламентированы.

Таблица 1.22

Форма таблицы соединений

Проводник	Поз.	Откуда поступает	Куда поступает	Длина	Примечание

В таблице соединений проводники перечисляют по возрастанию номеров в следующем порядке: провода жгутов; жилы кабелей, записанных в спецификацию как материал; одиночные провода.

В графе «Проводник» указывают номер проводника (одиночного провода, жилы кабеля, провода жгута).

В графе «Поз.» указывают номер позиции, под которым соответствующий жгут, кабель или отдельный проводник записан в спецификации. В строках таблицы соединений, в которых записаны жилы кабелей и провода жгутов, оформленных самостоятельными документами, графу «Поз.» не заполняют.

В графе «Откуда идет» указывают наименования разделов, например, «Жгуты», «Кабели», «Провода»; наименование и обозначение соответствующих изделий, например «Жгут ХХХХ.ХХХХХХ.010», «Кабель ХХХХ. ХХХХХ.Х.020», и адреса присоединения проводников или жил кабеля (рис. 1.136).

В графе «Откуда поступает» указывают адреса присоединения проводников.

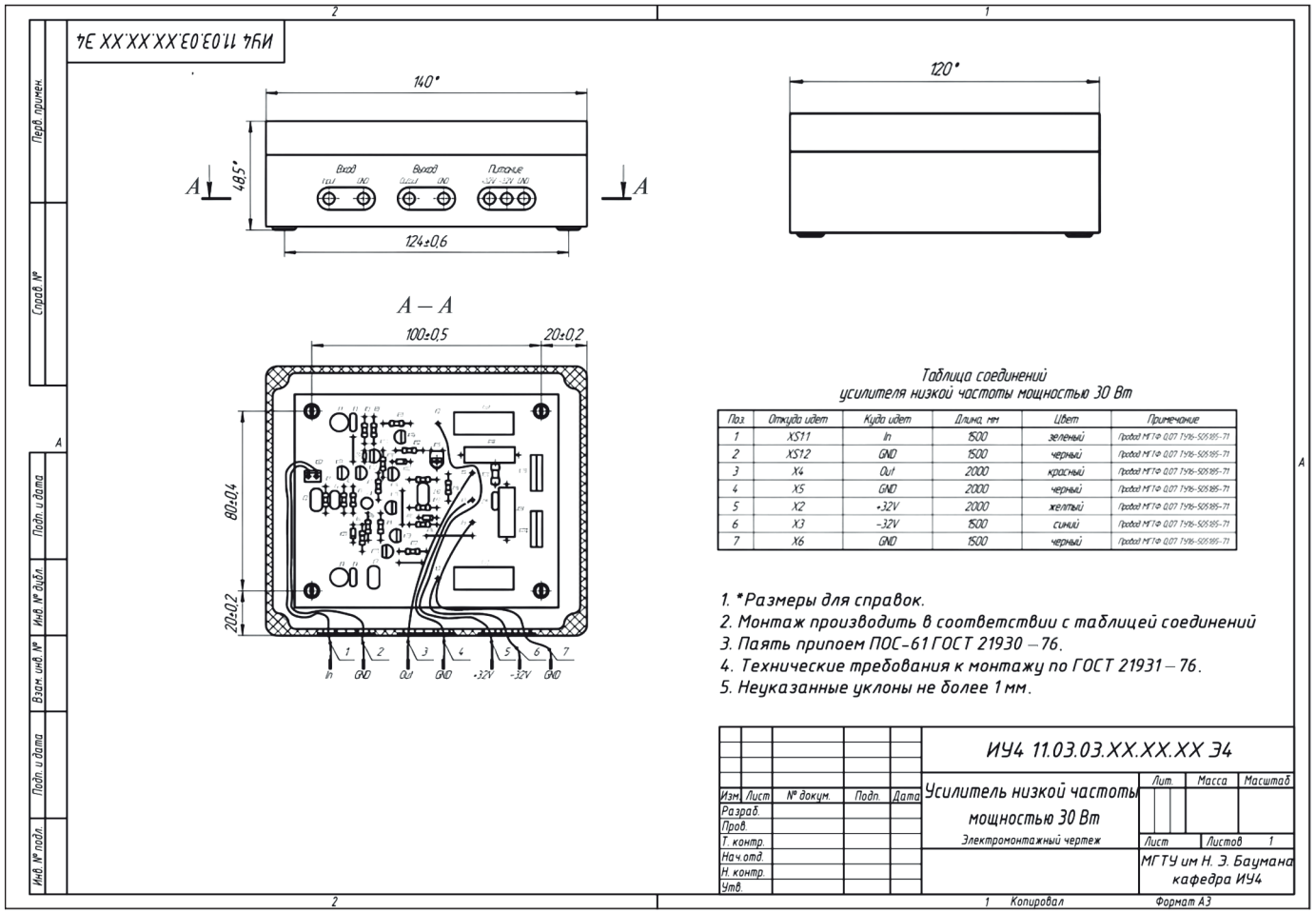


Рис. 1.136. Электромонтажный чертеж (Э4) усилителя низкой частоты мощностью 30 Вт

Графа «Длина» заполняется только для изделий, записанных в разделе «Материалы» спецификации, т. е. для тех изделий, на которые не оформляются самостоятельные чертежи. Длина провода указывается в миллиметрах.

Если при электромонтаже используется одна и та же марка провода одинакового сечения и расцветки, то необходимые данные о проводах приводятся в технических требованиях на чертеж. В противном случае в таблицу вводятся три новые графы: «Марка провода», «Сечение», «Расцветка».

В зависимости от объема, сложности и характера производства чертежи изделий с применением электромонтажа выполняют по одному из следующих вариантов.

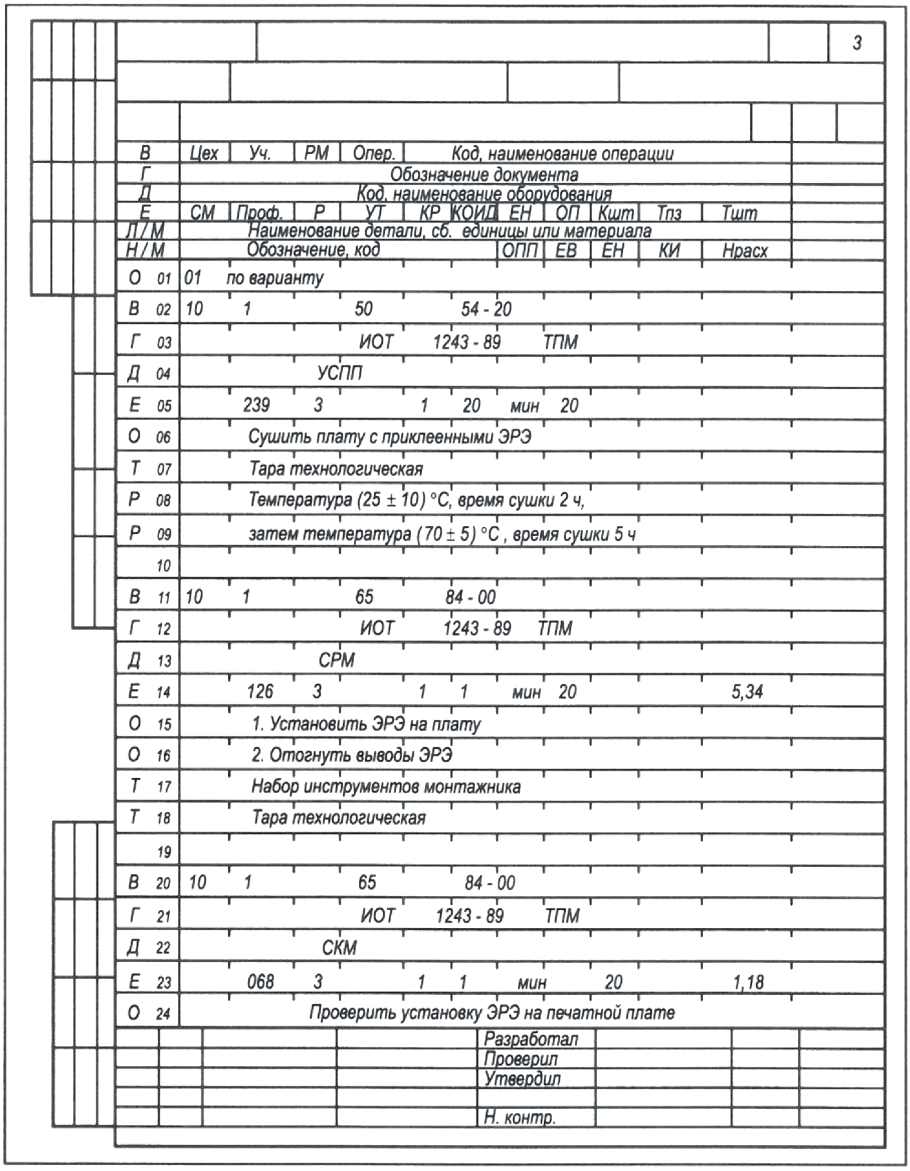
1. Механическая сборка и электромонтаж изделия проводятся по одному и тому же чертежу. В этом случае разрабатывают сборочный чертеж с учетом требований ГОСТ 2.109–2023 и ГОСТ 2.702–2011 и спецификацию с учетом ГОСТ 2.106–2019. На сборочном чертеже изображают составные части и для механической сборки, и для электромонтажа. При заполнении спецификации к этому чертежу составные части, являющиеся элементами электрической принципиальной схемы, записывают в разделы «Стандартные изделия» или «Прочие изделия» в начале соответствующего раздела группами в порядке расположения буквенных позиционных обозначений. Внутри группы составные части записывают в графе «Примечание» спецификации. Допускается буквенно-цифровые обозначения элементов не указывать, если им присвоены позиционные обозначения по спецификации.

2. Электромонтаж изделия проводят по самостоятельному чертежу. При этом разрабатывают четыре конструкторских документа: сборочный чертеж и спецификацию для механической сборки с учетом требования ГОСТ 2.109–2023 и ГОСТ 2.106–2019, сборочный чертеж и спецификацию для электромонтажа с учетом ГОСТ 2.702–2011 и ГОСТ 2.709–89. На электромонтажном сборочном чертеже (выполняется после сборочного чертежа механической части) составные части, входящие в изделие механической сборки, изображают упрощенно сплошными тонкими линиям. Если составные части изделия расположены на стенках, находящихся в разных плоскостях, допускается изображать стенки развернутыми в плоскость чертежа. Такое изображение должно сопровождаться надписью: «Стенка развернута». При выполнении спецификации чертежа с электромонтажом в раздел «Сборочные единицы» включают запись изделия механической сборки первой позицией. Составные части, являющиеся элементами электрической принципиальной схемы, записывают в спецификацию в раздел «Стандартные изделия» и «Прочие изделия». Провода и кабели, которыми проводится монтаж изделия, записывают в раздел «Материалы», при этом в графе «Примечание» указывают «Устанавливают при электромонтаже».

3. Электромонтаж изделий проводят по электромонтажному чертежу (шифр МЭ). При этом разрабатывают три конструкторских документа: сборочный чертеж со спецификацией для механической сборки и электромонтажный чертеж (МЭ) по ГОСТ 2.702–2011. Составные части, устанавливаемые по электромонтажному чертежу, вносят в спецификацию сборочного чертежа для механической сборки в дополнительные разделы. Электромонтажный чертеж выполняют в том же масштабе, что и сборочный чертеж изделия. При необходимости отдельные изделия допускается выполнять в том же масштабе. Все изделия, устанавливаемые до электромонтажа, изображают тонкими линиями упрощенно — в виде контурных очертаний без графических подробностей; составные части, устанавливаемые при электромонтаже, и места присоединения проводников — сплошными основными линиями. Для удобства изображения составных частей допускается разворачивать стенки и совмещать с плоскостью чертежа, поворачивать составные части, сопровождая такие изображения соответствующими надписями. Составные части, устанавливаемые при электромонтаже, записывают в спецификацию сборочного чертежа для механической сборки в дополнительные разделы: «Сборочные единицы», «Детали», «Стандартные изделия», «Прочие изделия», «Материалы». Дополнительные разделы размещают, начиная с нового листа, под общим заголовком «Устанавливают по ХХХХ.ХХХХХХ.ХХХ МЭ».

4. Электромонтаж изделия проводят по другим документам. При этом разрабатывают два конструкторских документа: сборочный чертеж и спецификацию для механической сборки. В технических требованиях сборочного чертежа указывают документ, по которому выполняют электромонтаж: электрическую принципиальную схему (Э3), электрическую схему соединений (Э4) или таблицу соединений (ТБ) в зависимости от характера производства. Составные части, устанавливаемые при электромонтаже, записывают в спецификацию сборочного чертежа в дополнительных разделах. Это могут быть электрические схемы (принципиальная или соединений) или таблица соединений, выполненная как самостоятельный документ. В спецификацию сборочного чертежа вносят составные части, устанавливаемые при электромонтаже (в дополнительные разделы).

В стандартный комплект документации обычно включают маршрутно-операционнцю карту, формат которой определен ГОСТ 3.1118–82 (рис. 1.137). Она используется для планирования и контроля производственных процессов, помогает организовать и стандартизировать операции.



													3
	В	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции							
	Г	Обозначение документа											
	Д	Код, наименование оборудования											
	Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
	Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
	Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Нрасх	
О	01	01 по варианту											
В	02	10	1		50		54 - 20						
Г	03	ИОТ 1243 - 89 ТПМ											
Д	04	УСПП											
Е	05	239	3		1	20	мин	20					
О	06	Сушить плату с приклеенными ЭРЭ											
Т	07	Тара технологическая											
Р	08	Температура (25 ± 10) °С, время сушки 2 ч,											
Р	09	затем температура (70 ± 5) °С , время сушки 5 ч											
	10												
В	11	10	1		65		84 - 00						
Г	12	ИОТ 1243 - 89 ТПМ											
Д	13	СРМ											
Е	14	126	3		1	1	мин	20				5,34	
О	15	1. Установить ЭРЭ на плату											
О	16	2. Отогнуть выводы ЭРЭ											
Т	17	Набор инструментов монтажника											
Т	18	Тара технологическая											
	19												
В	20	10	1		65		84 - 00						
Г	21	ИОТ 1243 - 89 ТПМ											
Д	22	СКМ											
Е	23	068	3		1	1	мин	20				1,18	
О	24	Проверить установку ЭРЭ на печатной плате											
							Разработал						
							Проверил						
							Утвердил						
							Н. контр.						

Рис. 1.137. Пример маршрутно-операционной карты (операции сушки приклеенных ЭРЭ и установки их на ПП):

В — номер цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция, номер операции, код или наименование операции; Г — обозначение документов, применяемых при выполнении операции; Д — код или наименование оборудования; Е — информация по трудозатратам (Проф. — код профессии; Р — разряд исполнителей; КР — количество исполнителей; КОИД — количество одновременно обрабатываемых деталей; ЕН — единица нормирования; ОП — объем производственной партии; $T_{пз}$ — норма подготовительно-заключительного времени; $T_{шт}$ — норма штучного времени); О — содержание операции (перехода); Т — информация о применяемой технологической оснастке; Л/М — наименование применяемых материалов; Н/М — нормы расхода материалов; Р — режим обработки

Тесты к лекции 1.18

1. ***Из чего состоит чертеж ПП?***

а) чертежи топологии всех слоев ПП показывают расположения печатных проводников, КП и отверстий, таблица отверстий, технические требования (указывают способ изготовления, шаг координатной сетки, класс точности, группу жесткости, материалы финишных покрытий);

б) чертежи топологии всех слоев ПП, показывают расположения печатных проводников, КП и отверстий, габаритные и присоединительные размеры, указание вариантов присоединения изделий электронной техники, монтируемых на ПП, в том числе тех, монтаж которых не указан в ГОСТах;

в) в чертеж ПП входят чертеж электронной ячейки, габаритные размеры, присоединительные размеры, технические требования, таблица соединений для электромонтажа.

2. ***Что должен содержать в себе сборочный чертеж ПП?***

а) изображение электронной ячейки, номера позиций всех составных частей, габаритные и присоединительные размеры, сведения о способах присоединения элементов к ПП, технические требования к способам присоединения элементов;

б) чертежи топологии всех слоев ПП, показывающие расположения печатных проводников, КП и отверстий, таблицу отверстий, технические требования;

в) сведения о присоединении проводников, данные проводника (марка, сечение), длину отдельных проводников и сведения о присоединениях.

3. ***Что НЕ указывается на чертеже ПП?***

а) электро- и радиоэлементы, устанавливаемые на ПП, способы установки элементов;

б) способ изготовления ПП;

в) сведения об отверстиях в ПП: диаметр, отклонения, число отверстий, наличие металлизации, диаметр КП.

4. ***Что НЕ указывается в технических требованиях к сборочному чертежу?***

а) указания к способам очистки ПП после монтажа, указания к методу контроля паяных соединений;

б) варианты установки изделий электронной техники, устанавливаемых на ПП;

в) ссылка на документ (таблицу), согласно которому выполняется электромонтаж изделий электронной техники.

5. ***Как называется чертеж, отображающий соединения жгутов, кабелей, проводов?***

а) электромонтажный чертеж (или схема соединений на сборочном чертеже);

б) электрическая принципиальная схема;

в) чертеж печатной платы.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении лабораторных работ применяются химические реагенты и специальное оборудование, представляющие опасность для здоровья. Поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать определенные требования по технике безопасности.

К выполнению работ в лаборатории допускаются лица, прошедшие обучение, инструктаж и проверку по охране труда, освоившие безопасные методы и приемы выполнения работ, методы и приемы правильного обращения с приспособлениями, инструментом и оборудованием, имеющиеся в лаборатории. В случае возникновения вопросов по безопасному выполнению работы необходимо прервать выполнение работы и обратиться к своему непосредственному преподавателю или дежурному преподавателю.

1. Перед началом работы необходимо:

– убрать волосы под шапочку или косынку;

– застегнуть манжеты одежды.

2. Включить электропитание на рабочих местах и убедиться, что электросоединения плотные, не греются, провода изолированные, не болтаются и не мешают работе.

3. При работе с химическими реагентами надеть защитные перчатки и защитные очки.

4. При смешивании реагентов держать лицо на расстоянии не ближе 30...40 см от емкости с реагентами.

5. При включении ламинатора и установки ультрафиолетовой обработки (экспонирования) фоторезиста убедиться, что установки подключены к электропитанию, рабочие зоны чистые и исправные; перед использованием ламинатора проконсультироваться с преподавателем о толщине текстолита, при которой он может пройти через валы ламинатора; после окончания процесса закрепления фоторезиста на ламинаторе незамедлительно его выключить во избежание перегрева устройства.

6. Выполнять работы на установках, точно соблюдая требования и указания, изложенные в методическом пособии и инструкциях к установкам.

7. При работе на сверлильном станке:

– убедиться в исправности станка;

– включить освещение рабочего места;

– проверить наличие посторонних предметов рядом со станком;

– проверить крепление сверла в патроне: сверло не должно перемещаться и должно быть выставлено строго по прямой, перпендикулярно плоскости, в которой выполняются отверстия;

– установку и замену сверла проводить с помощью ключа;

– ПП должна быть зафиксирована в тиски;

– при сверлении категорически запрещается держать ПП в руках;

– при работе станка запрещается наклоняться близко к ПП;

– сверло к ПП необходимо подводить плавно, без рывков;

– по окончании работы отключить электропитание станка, сверла аккуратно положить в коробку и убрать на полку стеллажа, стружку убрать с помощью пылесоса или влажной салфетки.

8. При работе с паяльником или термофеном могут возникать следующие затрудняющие факторы:

– повышенная загазованность воздуха рабочей зоны парами вредных химических веществ;

– повышенная температура ПП и инструмента, пожароопасность;

– брызги флюса или припоя;

– поражение электрическим током.

9. Рабочие места должны быть обеспечены местной вытяжной вентиляцией:

– воздухоприемники местных отсосов должны крепиться на гибких или телескопических воздуховодах, перемещенных к месту пайки;

– система местных отсосов должна включаться до начала работы и выключаться после окончания работы.

10. Работа с паяльником:

– паяльник должен проходить проверку не реже одного раза в год с записью в журнале;

– кабель паяльника должен быть защищен от случайного повреждения и соприкосновения с горячими деталями;

– паяльник и термофен должны надежно фиксироваться на специальных подставках;

– перед началом работы проверить техническое состояние паяльника: кабель питания и соединительный кабель, штепсельную вилку, защитный кожух изоляции рукоятки — они не должны иметь повреждений;

– излишки припоя и флюса удалять хлопчатобумажными салфетками или куском ткани, смоченной ацетоном;

– растворители должны храниться в таре из цветного металла с крышкой, либо в стеклянной таре на расстоянии не менее 20 см от включенного паяльника.

11. По окончании работы с паяльником необходимо:

– отключить от электросети паяльник, пульт питания, освещение;

– отключить местную вентиляцию;

– флюсы, тару с растворителем закрыть крышкой;

– использованные салфетки, обрезки провода и бракованные детали собрать и выкинуть в урну;

– убрать инструменты и приспособления в коробку для инструментов.

2.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ЛАЗЕРНО-УТЮЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Цель работы: ознакомление с процессом изготовления ПП методом лазерно-утюжной технологии (ЛУТ), изучение этапов изготовления.

Задание по лабораторной работе

В лабораторной работе необходимо изучить этапы изготовления ПП методом ЛУТ: проектирование тестовой ПП в пакете САПР Altium Designer, подготовка стеклотекстолита, изготовление шаблона, перевод проводящего рисунка на стеклотекстолит, вытравление, сверление отверстий. После выполнения лабораторной работы требуется ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце.

Теоретическая часть

Ознакомиться с базовыми положениями технологии ЛУТ (см. лекцию 1.5 «Способы получения рисунка печатной платы»).

Подготовка к лабораторной работе

Перед началом лабораторной работы необходимо ознакомиться с техникой безопасности, заранее подготовить тестовую ПП в пакете САПР Altium Designer (https://www.altium.com), убедиться в наличии необходимых для лабораторной работы материалов: стеклотекстолит, термотрансферная или глянцевая бумага, раствор для травления (перекись водорода, лимонная кислота и поваренная соль), обезжириватель, перманентный маркер, наждачная бумага.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Проектирование тестовой ПП в пакете САПР Altium Designer по варианту задания (см. семинары).

2. Подготовка стеклотекстолита.

2.1. Вырезать заготовку из фольгированного стеклотекстолита с помощью ножниц по металлу с запасом 10 мм от размера ПП.

2.2. Зачистить неровности боковых поверхностей наждачной бумагой. Поверхность ПП зачистить мелкой наждачной бумагой (при выполнении данной операции следует защищать дыхательные пути от попадания в них мелких частиц, образующихся в процессе зачистки) (рис. 2.1).

2.3. Нанести на поверхность фольги чистящее средство, например «Пемолюкс», для удаления жировых пятен с поверхности стеклотекстолита; смочить губку водой; используя смоченную губку и моющее средство, тщательно прочистить поверхность стеклотекстолита.

Рис. 2.1. Внешний вид готового текстолита с размеченными краями ПП

2.4. Для окончательного очищения поверхности ПП протереть поверхность салфеткой, смоченной обезжиривателем, растворителем, ацетоном или спиртом. Поверхность фольги должна блестеть.

2.5. Просушить заготовку на воздухе при комнатной температуре до полного высыхания.

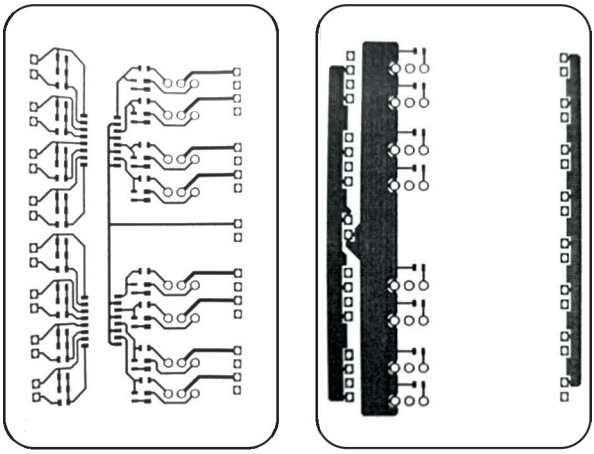
2.6. До следующей операции запрещается трогать руками подготовленный стеклотекстолит; в случае наличия визуальных дефектов на поверхности платы (жировые пятна или неравномерная толщина фольги) рекомендуется повторить всю операцию зачистки снова.

3. Изготовление шаблона.

3.1. Выгрузить ПП из пакета САПР Altium Designer.

3.2. Отзеркалить по горизонтали относительно оси *Y* для SMD ПП. Проводящий рисунок для DIP ПП обычно расположен на нижнем слое, тогда как компоненты — на верхнем слое платы, поэтому в этом случае зеркалить не нужно!

3.3. Распечатать получившуюся картинку на глянцевой журнальной бумаге, глянцевой фотобумаге или на специальной термотрансферной бумаге с помощью лазерного принтера; при печати отключить все функции экономии тонера, поставить цвет печати максимально темный (черный), максимальное разрешение, качество печати. Главное — печатать ПП в реальном размере без масштабирования (рис. 2.2).



а *б*

Рис. 2.2. Топология ПП на термотрансферной бумаге:

а — с одной стороны ПП;
б — с другой стороны ПП

4. Перевод рисунка на стеклотекстолит.

Необходимая информация для выполнения четвертого этапа лабораторной работы:

– материалы — распечатанная на термотрансферной или глянцевой бумаге топология, подготовленный текстолит, раствор для травления (перекись водорода, лимонная кислота и поваренная соль), обезжириватель (ацетон, изопропиловый спирт или любой другой спиртосодержащий растворитель);

– инструмент — утюг;

– приспособления — вода, перманентный маркер, наждачная бумага.

Потребуются емкость для травления, например пластиковый контейнер. Контактировать с жидкостью для травления и ацетоном желательно в перчатках.

Рис. 2.3. Наложение рисунка на заготовку и его закрепление

4.1. Нагреть утюг до 140...200 °С.

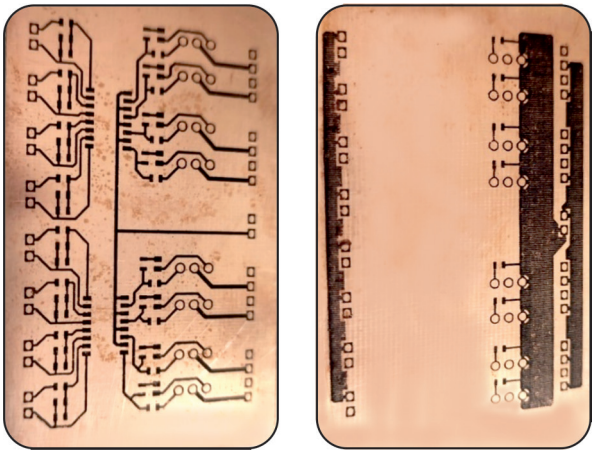
4.2. Поместить стеклотекстолит на жаростойкую поверхность и накрыть листом бумаги (рис. 2.3).

4.3. Разогреть ПП утюгом в течение 30 с; разогрев необходим для того, чтобы стеклотекстолит заранее расширился, и тем самым предотвращаем порчу рисунка при последующем переносе на ПП.

4.4. Наложить рисунок на ПП и выдержать под утюгом в течение 2 мин, при этом необходимо надавливать на утюг, чтобы рисунок лучше был перенесен.

4.5. Охладить ПП.

4.6. Снять бумагу с ПП; рекомендуется снимать под проточной водой, тогда бумага легко сходит (рис. 2.4).



а *б*

Рис. 2.4. Рисунок на заготовке после прогрева утюгом:
а — вид с одной стороны ПП;
б — вид с другой стороны ПП

Проводим визуальный контроль качества перенесенного рисунка: если есть непереведенные дорожки, то их необходимо прорисовать маркером для подписей на дисках или лаком (рис. 2.5).

5. Вытравление.

5.1. Приготовить раствор для травления, рекомендованные пропорции реагентов для раствора:

– перекись водорода H_2O_2 — 100 мл;
– лимонная кислота $C_6H_8O_7$ — 30 г;
– поваренная соль NaCl — 5 г.

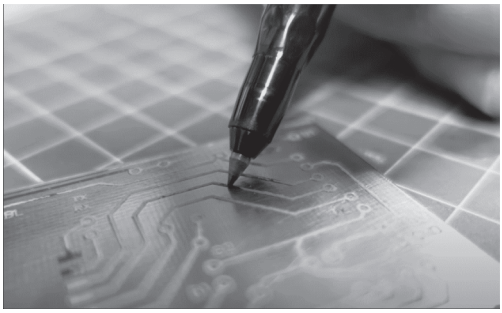


Рис. 2.5. Исправление дефектов перманентным маркером

Алгоритм создания раствора:

а) воспользоваться мерным стаканом или же другой тарой. В случае тары без маркировки воспользоваться электронными весами до 100 г и отмерить 100 мл 3%-ного раствора перекиси водорода;

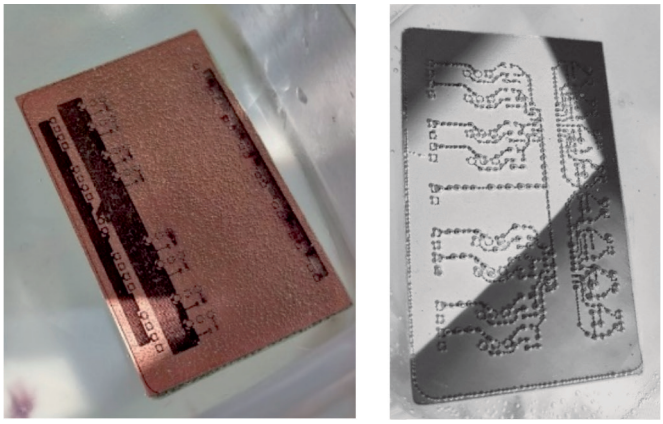
б) перелить весь объем перекиси в ванночку для травления;

в) взвесить на электронных весах 30 г лимонной кислоты и добавить их в ванночку;

г) взвесить на электронных весах 5 г поваренной соли и добавить их в ванночку;

д) размешать раствор до полного растворения кристаллов лимонной кислоты и поваренной соли.

5.2. Поместить в ванночку ПП рисунком вверх, раствор должен полностью покрывать ее поверхность; рекомендуется оставлять между краем ванночки и верхним слоем раствора не менее 2 см (рис. 2.6).



а *б*

Рис. 2.6. Процесс вытравливания заготовки:
а — начало процесса травления; *б* — раствор зеленого цвета

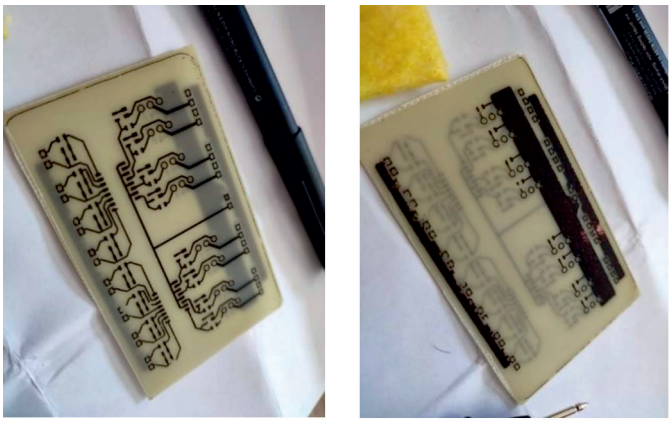
5.3. Для ускоренного прохождения процесса травления рекомендуется обновлять слои раствора около поверхности ПП, покачивая ванночку рукой.

5.4. По окончании процесса на ПП остаются только медные дорожки; извлечь ПП из раствора.

5.5. Промыть ПП под струей проточной воды.

5.6. Удалить тонер с помощью салфетки и ацетона, изопропилового спирта или любого другого растворителя.

5.7. Просушить ПП на воздухе до полного высыхания (рис. 2.7).



а *б*

Рис. 2.7. Внешний вид готовой печатной платы:
а — до удаления тонера; *б* — после удаления тонера

6. Сверление отверстий.

После сверления отверстий необходимо повторно очистить ПП спиртовым раствором. Печатная плата готова к лужению и пайке. Если эти процессы запланированы позднее, а не сразу после изготовления ПП, то непосредственно перед лужением рекомендуется слегка зачистить медь от оксидов мелкой наждачной бумагой и промыть ПП в спиртовом растворе.

Завершение работы

После выполнения лабораторной работы необходимо привести рабочее место в порядок: убрать мусор, вымыть использованные емкости, выключить электронные приборы после использования.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Краткий конспект теоретической части и расчеты.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
5. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Что запрещается делать после подготовки стеклотекстолита и до нанесения на него рисунка?
2. Каково назначение наждачной бумаги при подготовке стеклотекстолита?
3. Какие приборы необходимы для наложения рисунка на стеклотекстолит?
4. Для чего необходим разогрев ПП утюгом перед наложением рисунка?
5. Если вы заметили, что при переносе рисунка некоторые дорожки оказались не переведены, каким образом можно исправить этот дефект?
6. Какие ингредиенты используются для приготовления раствора травления?
7. Опишите алгоритм создания раствора травления.
8. Что остается на ПП по окончании процесса травления?
9. С помощью чего после травления с дорожек удаляется тонер?
10. Что необходимо сделать с ПП после сверления отверстий?

2.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ТЕХНОЛОГИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Цель работы: ознакомление с процессом изготовления ПП с использованием фотолитографии, изучение этапов изготовления.

Задание по лабораторной работе

В лабораторной работе рассматривается метод изготовления ПП с использованием фотолитографии. Кратко изложены основные этапы метода с графическими иллюстрациями, изменения состояния исходного материала заготовки. После выполнения лабораторной работы требуется ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце.

Теоретическая часть

Изучить лекцию 1.5 «Способы получения рисунка печатной платы».

Подготовка к лабораторной работе

Перед началом лабораторной работы необходимо ознакомиться с техникой безопасности, заранее подготовить тестовую ПП в САПР Altium Designer, убедиться в наличии нужных для лабораторной работы материалов: стеклотекстолит, фоторезист, кальцинированная сода, 3%-ная перекись водорода H_2O_2, кислота лимонная, поваренная соль, ацетон, бязевая ткань.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Проектирование ПП в пакете САПР Altium Designer.

2. Подготовка стеклотекстолита.

Вырезать заготовку из фольгированного стеклотекстолита с помощью ножниц по металлу размером, на 10 мм превышающим размер ПП.

2.1. Зачистить неровности боковых поверхностей наждачной бумагой (при данной операции следует защищать дыхательные пути от попадания в них мелких частиц, образующихся в процессе зачистки).

2.2. Нанести на поверхность фольги чистящее средство, например «Пемолюкс», для удаления жировых пятен с поверхности стеклотекстолита; смочить губку водой; используя смоченную губку и моющее средство, тщательно прочистить поверхность стеклотекстолита.

2.3. Для окончательного очищения поверхности ПП протереть поверхность салфеткой, смоченной обезжиривателем, ацетоном или спиртом.

2.4. Просушить заготовку на воздухе при комнатной температуре до полного высыхания.

2.5. До следующей операции запрещается трогать руками подготовленный стеклотекстолит; в случае наличия визуальных дефектов на поверхности платы (жировые пятна или неравномерная толщина фольги) рекомендуется повторить всю операцию снова.

3. Наложение фоторезиста.

3.1. Вырезать заготовку из листа фоторезиста. Размер фоторезиста должен быть больше, чем габаритные размеры платы на 20...30 мм (рис. 2.8).

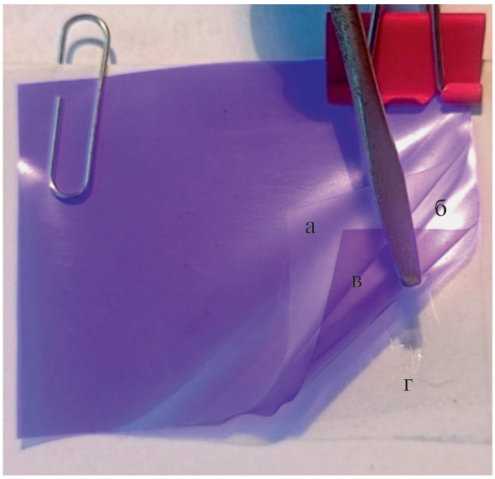


Рис. 2.8. Трехслойная структура фоторезиста:

а — внутренняя защитная пленка фоторезиста (снимают перед наклейкой фоторезиста на фольгированный стеклотекстолит); б — внутренняя сторона фоторезиста; в — внешняя сторона фоторезиста; г — внешняя защитная пленка фоторезиста (снимают перед проявкой фоторезиста в растворе кальцинированной соды)

3.2. Включить и подогреть ламинатор в течение 10...15 мин; на готовность к работе будет указывать световая индикация на приборной панели ламинатора.

3.3. Собрать «пакет».

Примеры пакетов и последовательность сборки представлены на рис. 2.9 и 2.10.

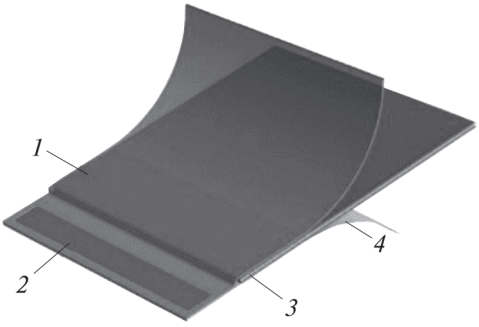


Рис. 2.9. Сборка пакета первого типа:

1 — фоторезист; *2* — закрепленный (феном для пайки) к бумаге фоторезист; *3* — двусторонний стеклотекстолит; *4* — лист бумаги

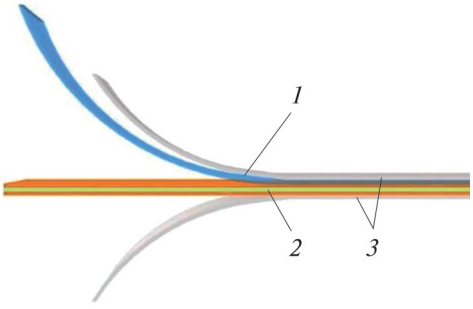


Рис. 2.10. Сборка пакета второго типа:

1 — фоторезист; *2* — двусторонний стеклотекстолит; *3* — лист бумаги

Для сборки пакета первого типа потребуется закрепить фоторезист феном для пайки (150°): поступательными движениями вдоль края бумаги провести горячим потоком воздуха по фоторезисту до его потемнения на два-три тона.

3.4. Положить заготовку с фоторезистом между двумя листами бумаги формата А4, скрепить листы между собой для предотвращения разделения бумажного пакета и протянуть между валками, поддерживая заготовку ПП параллельно плоскости стола.

3.5. Не вынимая заготовку из бумажного пакета, охладить ее.

3.6. Извлечь заготовку из бумажного пакета, провести визуальный контроль качества соединения фоторезиста с заготовкой.

Примечание: при наличии пузырей или отслоений фоторезиста рекомендуется провести пробное наложение и проверить, не пересекают ли дефекты рисунок топологии платы: в случае если дефекты совпадают с проводящим рисунком, следует очистить поверхность заготовки от фоторезиста и повторить технологическую операцию накатки фоторезиста.

4. Экспонирование.

Проверить чистоту стекла, установленного в прижимную пластину установки экспонирования, чтобы избежать появления дефектов при выполнении операции.

Для выполнения операции можно использовать любую ультрафиолетовую лампу или установку УФ-экспонирования (рис. 2.11). Время экспонирования определяется экспериментально. При использовании лабораторной установки время эспонирования будет колебаться от 30 с до 1,5 мин, а при использовании маломощной УФ-лампы может продолжаться даже более 10 мин. Перед проведением операции настоятельно рекомендуется провести опыт на образце, проэкспериментировав с различным временем экспонирования и последующей операцией проявки.

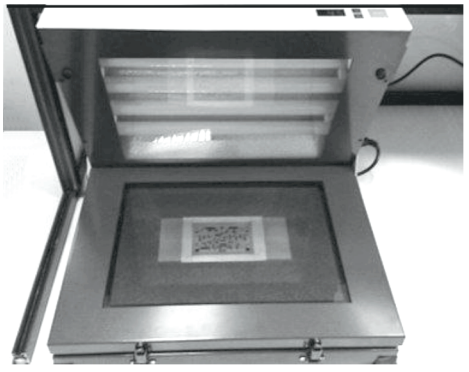


Рис. 2.11. Установка УФ-экспонирования

4.1. Открыть крышку установки LKPF УФ-экспонирования, положить заготовку фоторезистом вверх, наложить негативный шаблон проводящего рисунка.

4.2. Плавно опустить прижимную пластину установки и защелкнуть замки, чтобы избежать смещения шаблона с поверхности заготовки; затем опустить крышку установки (рис. 2.12).

4.3. Подать питание на установку.

4.4. Выставить на приборной панели значение времени экспонирования в секундах.

4.5. Нажать кнопку «Старт».

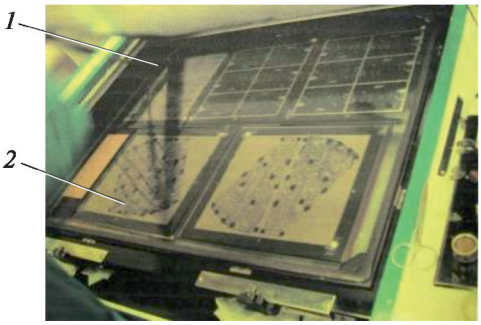


Рис. 2.12. Промышленная установка LKPF УФ-экспонирования:
1 — рама-стол; *2* — заготовка в пакете с фотошаблоном

4.6. По окончании процесса извлечь заготовку и отключить питание установки.

4.7. Дождаться, пока заготовка остынет естественным путем.

5. Проявка.

5.1. Взять пластмассовую ванночку большего размера, чем габаритные размеры ПП.

5.2. Приготовить раствор кальцинированной соды объемом в зависимости от площади, покрываемой фоторезистом (табл. 2.1).

Необходимое оборудование: электронные весы до 100 г; пластмассовый пинцет; металлический пинцет; щетинная кисть.

Использованные приспособления: пластмассовые ванны для проявки; мерный стакан емкостью 500 мл; местная вентиляция; электрический чайник, термометр (рекомендуется использовать термометр с градуировкой, имеющий температуру около 45 °С).

Таблица 2.1

Справочная таблица для приготовления проявочного раствора

Объем раствора, мл	Объем воды, мл	Масса кальцинированной соды, г	Площадь фоторезиста, мм^2
500	500	10	500
250	250	5	100
100	100	2	50

Раствор должен полностью покрывать поверхность ПП с нанесенным на нее фоторезистом!

Алгоритм создания раствора:

а) вскипятить воду в электрическом чайнике;

б) смешать воду комнатной температуры и кипяченую воду из чайника, чтобы получилось термодинамическое равновесие жидкости около 45 °С; контролировать температуру можно с помощью ртутного термометра;

в) поместить данную жидкость в ванночку, добавить кальцинированную соду в необходимой пропорции, воспользовавшись электронными весами;

г) помешивая, добиться полного растворения соды в жидкости.

5.3. Снять защитную пленку с фоторезиста.

5.4. Поместить ПП в раствор таким образом, чтобы он полностью покрывал сторону ПП с нанесенным фоторезистом.

5.5. Выдержать ПП в растворе в течение 1...3 мин, постоянно покачивая и обновляя слои раствора вблизи поверхности фоторезиста, для интенсификации растворения слоя фоторезиста.

5.6. Визуальное контролирование окончания процесса: слой фоторезиста на поверхности между токопроводящими дорожками начинает набухать, вспучиваться (в таком состоянии он легко удаляется кисточкой).

5.7. После окончания процесса на ПП должен остаться проэкспонированный и дубленый фоторезист в виде контура проводящего рисунка; вынуть ПП из раствора, промыть в проточной воде и очистить от оставшихся хлопьев фоторезиста (рис. 2.13).

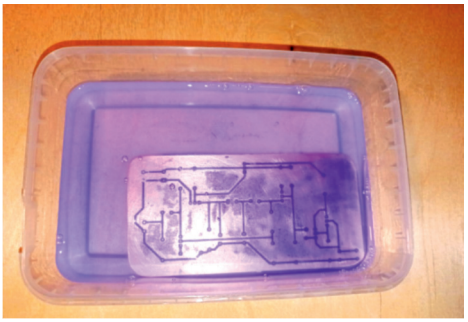


Рис. 2.13. Процесс смывки непроявленного фоторезиста в растворе кальцинированной соды (раствор синий или фиолетовый)

5.8. Охладить ПП на воздухе до комнатной температуры.

В случае выявления каких-либо дефектов на ПП следует дождаться ее полного высыхания и исправить их с помощью перманентного маркера или лака в случае, если сошло больше фоторезиста, чем требовалось, и острым ножом, проволокой или зубочисткой, если остался непроявленный фоторезист. Действовать следует очень аккуратно. Не все дефекты поддаются исправлению (рис. 2.14).

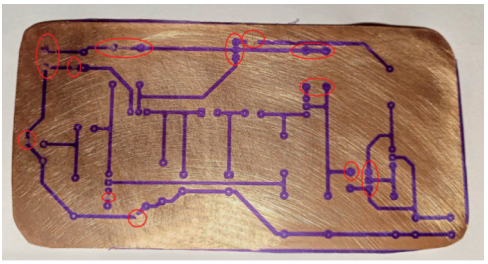


Рис. 2.14. Возможные дефекты при экспонировании: разрывы металлизации на дорожках и на посадочных местах, непроявка отверстий в фоторезисте на посадочных местах

6. Вытравление.

Ниже представлена справочная информация для выполнения шестого этапа лабораторной работы:

– оборудование — электронные весы до 100 г, микроскоп М;

– материалы — 3%-ная перекись водорода H_2O_2, лимонная кислота, поваренная соль, ацетон, бязевая ткань;

– инструменты — пластмассовый пинцет, металлический пинцет, плоская щетинная кисть.

Во время прохождения процесса травления тару с раствором рекомендуется держать в вытяжном шкафу или под трубой местной вентиляции, установленной около каждого рабочего места

6.1. Приготовить раствор для травления; рекомендованные пропорции реагентов для раствора:

– перекись водорода — H_2O_2 — 100 мл;

– лимонная кислота — $C_6H_8O_7$ — 30 г;

– поваренная соль — NaCL — 5 г.

Алгоритм создания раствора:

а) воспользоваться мерным стаканом или другой тарой. В случае тары без маркировки воспользоваться электронными весами до 100 г и отмерить 100 мл 3%-ного раствора перекиси водорода;

б) перелить весь объем перекиси в ванночку для травления;

в) взвесить на электронных весах 30 г лимонной кислоты и добавить в ванночку;

г) взвесить на электронных весах 5 г поваренной соли и добавить в ванночку;

д) размешать раствор до полного растворения кристаллов лимонной кислоты и поваренной соли.

6.2. Поместить в ванночку ПП рисунком вверх, раствор должен полностью покрывать ее поверхность; рекомендуется оставлять между краем ванночки и верхним слоем раствора не менее 2 см.

6.3. Для ускоренного прохождения процесса травления рекомендуется обновлять слои раствора около поверхности ПП, покачивая ванночку рукой.

6.4. По окончании процесса на ПП остается только засвеченный фоторезист и проводящий рисунок меди под ним; следует извлечь ПП из раствора.

6.5. Промыть ПП под струей проточной воды.

6.6. Удалить засвеченный фоторезист с помощью салфетки и ацетона.

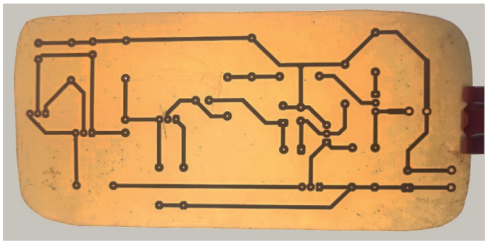


Рис. 2.15. Внешний вид ПП после смывки остатков фоторезиста

6.7. Просушить ПП на воздухе до полного высыхания.

6.8. Проверить качество травления под микроскопом при 16-кратном увеличении (рис. 2.15).

На ПП возможно образование следующих дефектов:

– отслоение металлизации;

– разрыв металлизации;

– боковое подтравливание металлизации;

– «усики» на боковой поверхности металлизации.

7. Сверление отверстий.

После сверления отверстий необходимо повторно очистить ПП спиртовым раствором. Печатная плата готова к лужению и пайке.

Завершение работы

После выполнения лабораторной работы необходимо привести рабочее место в порядок: убрать мусор, вымыть использованные емкости, выключить электронные приборы после использования.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.

2. Краткий конспект теоретической части и расчеты.

3. Результаты экспериментальных исследований.

4. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.

5. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего при подготовке стеклотекстолита поверхности ПП протирают салфеткой, смоченной обезжиривателем, ацетоном или спиртом?

2. Насколько больше, чем габаритные размеры, должен быть размер фоторезиста?

3. Каким образом для сборки пакета первого типа происходит закрепление фоторезиста феном для пайки?

4. Для чего при сборке пакета бумажные листы необходимо скреплять между собой?

5. Какое оборудование можно использовать для выполнения операции экспонирования?

6. Опишите алгоритм создания проявочного раствора.

7. Что должно остаться на ПП после окончания процесса проявки?

8. Что необходимо сделать в случае выявления каких-либо дефектов на ПП после процесса проявки?

9. Какие ингредиенты используются для создания раствора для травления?

10. Что остается на плате по окончании процесса травления?

2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель работы: изучение промышленной технологии комбинированного позитивного метода изготовления двусторонних печатных плат.

Задание по лабораторной работе

В лабораторной работе необходимо изучить комбинированный позитивный метод изготовления ПП, освоить его основные этапы, проанализировать изменения состояния исходного материала заготовки. В процессе выполнения лабораторной работы предлагается провести измерение геометрических параметров на образцах ДПП и изучение дефектов проводящего рисунка на фотографиях ДПП.

Теоретическая часть

Комбинированный позитивный метод применяют для изготовления ДПП различных классов точности (при ширине проводников t = 0,45; 0,25; 0,15 мм), а также наружных слоев МПП с металлизацией сквозных отверстий и МПП попарного прессования.

Печатные платы имеют проводящий рисунок в виде печатных проводников на двух сторонах диэлектрического основания (СФ, FR) и в объеме диэлектрика в виде металлизированных отверстий, электрически соединяющих обе стороны.

Сущность метода состоит в том, что проводники (сигнальные цепи), шины земли и питания, КП различных типов, ламели печатных разъемов получают путем удаления (травления) фольги (Cu) с пробельных мест обеих сторон заготовки ДПП, а металлизированные отверстия — путем сверления и осаждения на их стенки токопроводящего слоя из металла (Cu).

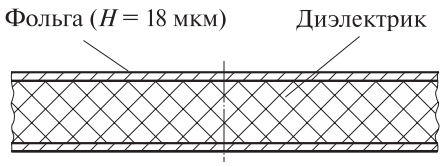
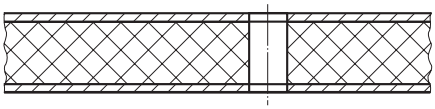
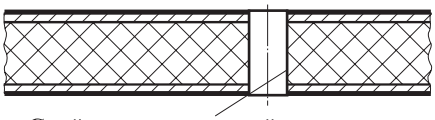
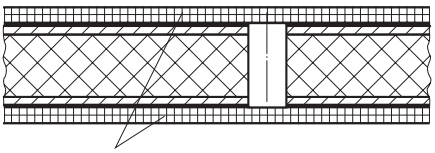
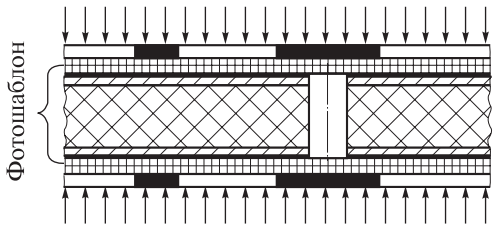
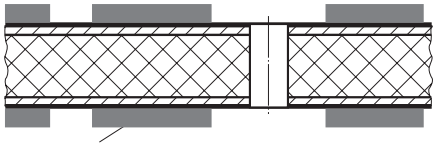
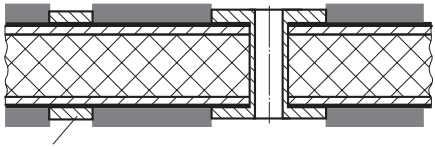
Геометрия проводящего рисунка печатной схемы обеспечивается с помощью позитивных фотошаблонов. Отсюда принятое название метода — **комбинированный позитивный**.

Рассмотрим основные этапы ТП комбинированного позитивного метода изготовления ДПП (табл. 2.2).

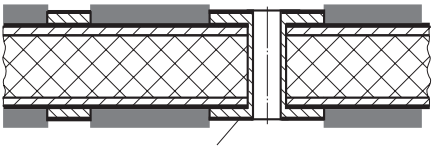
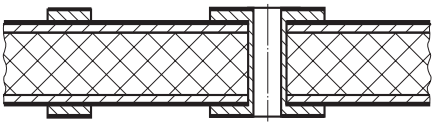
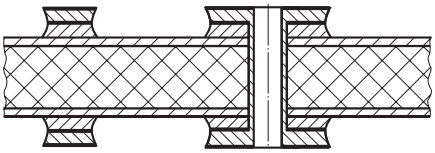
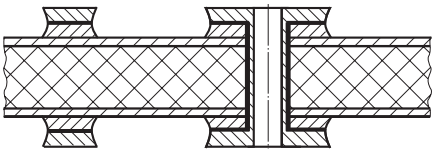
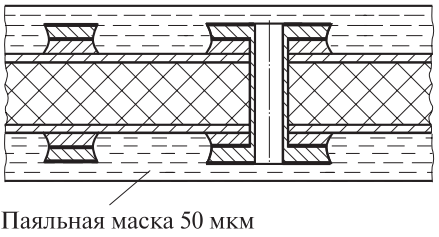
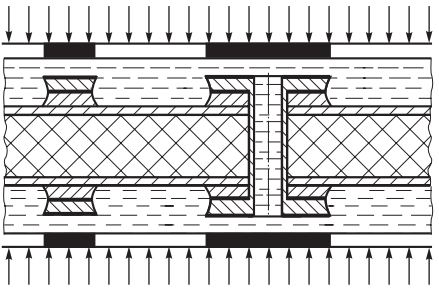
1. *Получение заготовки*. Исходным материалом является лист фольгированного с двух сторон диэлектрика. Медная фольга различной толщины ($h_ф$ = 5; 18; 20; 35; 50 мкм) приклеена к диэлектрическому основанию (СФ) на заводе-изготовителе материала.

Таблица 2.2

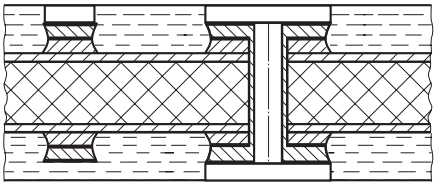
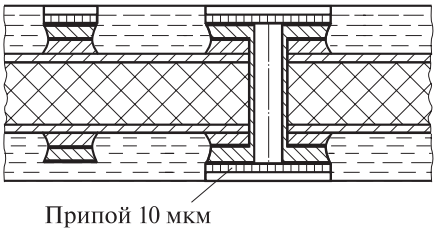
Эскизы изменений состояния исходного материала

Эскиз	Операция	Оборудование
	1. Получение заготовки	Гильотинные ножницы
	2. Сверление переходных и монтажных отверстий	Специальный станок с ЧПУ и автоматической сменой инструмента
	3. Предварительная металлизация отверстий	Линия химико-гальванической обработки
	4. Получение рисунка схемы. 4.1. Ламинирование фоторезиста (СПФ)	Ламинатор
	4.2. Экспонирование рисунка с фотошаблона	Установка экспонирования
	4.3. Проявление рисунка с образованием фоторезистивной маски	Установка химической обработки с удалением незасвеченных участков
	5. Гальваническое осаждение. 5.1. Осаждение меди (Cu)	Линия химико-гальванической обработки

Продолжение табл. 2.2

Эскиз	Операция	Оборудование
 Слой металлорезиста h = 4...6 мкм	5.2. Осаждение олова (Sn) — металлорезиста	То же
	6. Удаление фоторезистивной маски	Модульная линия конвейерного типа
	7. Травление. 7.1. Травление с пробельных мест	Установка струйного травления
	7.2. Травление олова с проводящего рисунка	
 Паяльная маска 50 мкм	8. Нанесение жидкой паяльной маски. 8.1. Нанесение и сушка	Установка для нанесения паяльной маски сеткографическим способом. Термошкаф
	8.2. Экспонирование	Установка экспонирования

Окончание табл. 2.2

Эскиз	Операция	Оборудование
	8.3. Проявление рисунка	Установка химической обработки
	9. Горячее лужение. 9.1. Флюсование. 9.2. Горячее лужение проводящего рисунка	Установка для нанесения флюса. Установка для горячего лужения

Основной метод получения заготовок ДПП — резка листа на гильотинных или дисковых ножницах с раскроем на полосы, полос — на заготовки. Размеры заготовки определяются ее типом: одинарная (для изготовления одной ДПП) или групповая (для изготовления нескольких ДПП); шириной технологического поля (20...30 мм) по периметру и между отдельными ПП групповой заготовки (5...10 мм) и принятым на предприятии оптимальным соотношением длины и ширины заготовки.

2. *Сверление переходных и монтажных отверстий*. В наружном технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия. Базовые отверстия получают на специальном станке, собрав несколько заготовок (обычно от двух до шести) в пакет, затем сверлят и, не меняя установа пакета, штифтуют. Штифты служат для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с ЧПУ. Для сверления применяют специальные одно-, двух- и четырехшпиндельные станки с точностью позиционирования в пределах ±(0,001...0,005) мм.

3. *Предварительная металлизация отверстий*. Стенки просверленных отверстий имеют дефекты в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют механическую обработку абразивной суспензией; химическую обработку растворами на основе соляной и серной кислот; комбинированную химико-механическую обработку; плазмохимическое травление.

Типовой ТП предварительной металлизации диэлектрика предусматривает сенсибилизацию (адсорбция олова Sn^{2+}), активацию (образование сверхтонкого слоя палладия Pd), химическое ($h_{м.х}$ = 1...2 мкм) и гальваническое ($h_{п.м}$ = до 5...7 мкм) меднение.

В настоящее время типовой ТП уступает место прямой металлизации диэлектрика на основе трехметаллического катализатора (Pd, Sn, Me). На стенках

отверстий образуется металлическая пленка (Pd, Sn, Me) толщиной 60...80 Å с хорошей адгезией и высокой проводимостью. Прямая металлизация завершается гальванической затяжкой медью до $h_{п.м}$ = 5...7 мкм.

Состав и длительность операций прямой металлизации (табл. 2.3) позволяют организовать ТП предварительной металлизации отверстий на модульной линии автооператорного типа с автоматическим переносом заготовки в вертикальные ванны в соответствии с последовательностью операций ТП. Следует отметить, что одновременно медь осаждается и на фольгированные поверхности заготовок.

Таблица 2.3

Операции предварительного меднения стенок отверстий заготовки ДПП

Наименование операции	Реактив и характер воздействия	Режимы	
		Время	Температура, °С
Обезжиривание	Кондиционер DS 270. Нейтрализация отрицательного и придание положительного заряда	7 мин	65
Промывка	Вода: струйная; проточная	30 с 1 мин	20 20
Активирование	Предактиватор DS 400. Активатор DS 500. Образование трехметалльного покрытия (Pd, Sn, Me)	~2 мин 7 мин	70 42
Промывка	Вода	2 мин	20
Интенсификация	Ускоритель DS 650. Образование мономолекулярной металлической пленки	7 мин	45
Промывка	Вода: струйная	30 с	20
Декапирование	10%-ный раствор серной кислоты	50 с	18–25
Промывка	Вода	2 мин	20
Гальваническая затяжка	Электролит / $CuSO_4$, N_2SO_4, хлориды, добавка J-PlateCu 400	~8 мин	18–25
Промывка	Вода	~1 мин	20
Сушка	Горячий воздух	~8 мин	

Примечание. Реактивы DS предложены фирмой-разработчиком системы прямой металлизации SYSTEM-S.

4. *Получение рисунка схемы*. Рисунок печатной схемы на заготовке ДПП может быть получен фотографическим способом (инструменты — фоторезист, фотошаблон) или сеткографическим способом (краска, сетчатый трафарет). Рассмотрим фотоспособ, который обеспечивает высокую точность

проводящего рисунка, однако отличается большей трудоемкостью по сравнению с сеткографическим способом.

Изображение схемы получают с помощью сухого пленочного фоторезиста (СПФ) путем экспонирования его с инструмента — позитивного фотошаблона на заготовку и проявления. Экспонированные и проявленные участки фоторезиста прочно удерживаются на пробельных местах заготовки, оставляя открытыми все зоны будущего проводящего рисунка.

Сухой пленочный фоторезист представляет собой трехслойную структуру (лавсановая основа — СПФ — полиэтиленовая защитная пленка) и наносится с двух сторон на заготовку с помощью валкового ламинатора. Адгезия обеспечивается предварительной химико-механической обработкой заготовки, подогревом (5 мин, 100 °С) в термошкафу, ламинированием (скорость 1,2...1,8 м/мин) с прижимом валков, нагретых до 115...120 °С и термостабилизацией ламинированной заготовки (20 °С, 20 мин).

Заготовки (две-четыре шт.), ламинированные СПФ, размещают на столе установки экспонирования, совмещая каждую с фотошаблоном с помощью кнопок и базовых отверстий, полученных в технологическом поле перед операцией сверления монтажных отверстий.

Использование базовых отверстий на операциях сверления и экспонирования рисунка позволяет с достаточной точностью обеспечить совмещение центров КП с центрами монтажных и переходных отверстий ДПП.

Для проявления проводящего рисунка схемы применяют механизированную модульную линию конвейерного типа, в которой загружаемые вручную заготовки проходят модули проявления (струйная подача проявителя Na_2CO_3), промывки и сушки. Качество проявленного рисунка контролируют визуально или при небольшом увеличении.

5. *Гальваническое осаждение меди* (Cu) в отверстиях и одновременно в остальных зонах проводящего рисунка (пробельные места закрыты фоторезистивной маской) выполняют на программируемой линии предварительного меднения. На этой же линии гальванически осаждают на проводящий рисунок олово (5...10 мкм) — металлорезист. Контроль качества рисунка визуальный.

6. *Травление меди* с пробельных мест осуществляется после удаления заготовки фоторезистивной маски на модульной линии конвейерного типа с ручной загрузкой. Роликовый конвейер перемещает заготовки через модули травления ($CuCl_2$), кислой промывки (HCl), каскадной промывки водой, модуль визуального промежуточного наблюдения, модуль снятия металлорезиста (травление олова с проводящего рисунка) и сушки. Химические растворы и воды подаются в рабочие зоны модулей распылением под давлением с воздействием на обе стороны заготовок ДПП. Операция завершается визуальным или оптическим контролем состояния проводящего рисунка.

7. *Нанесение паяльной маски*. Паяльная маска защищает полученный проводящий рисунок ДПП от внешних воздействий, оставляя открытыми места пайки навесных элементов, т. е. зоны контактных соединений с печатным

монтажом. Применяют сухие и жидкие паяльные маски (ЖПМ). Последние обладают более высокой разрешающей способностью.

Жидкие паяльные маски наносят на заготовку ДПП сеткографическим способом, высушивают ($T = 85$ °С), экспонируют и проявляют. Окончательные защитные свойства ЖПМ приобретают в сушильном шкафу при $T = 150$ °С ($t = 60$ мин). Геометрию рисунка паяльной маски контролируют визуально при соответствующем увеличении.

8. *Горячее лужение* осуществляют на специальной установке путем погружения и выдержки (около 6 с) заготовки в вертикальном положении в расплавленном припое (Sn — 63 %, Pb — 37 %), находящемся при температуре около 235 °С. Сбрасывание излишков припоя и выравнивание толщины слоя лужения до 5–8 мкм осуществляется ножами — форсунками, подающими горячий (200 °С) сжатый воздух с двух сторон извлекаемой из ванны заготовки.

Непосредственно перед горячим лужением на заготовку наносят водорастворимый флюс, а после лужения остатки его удаляют на установке отмывки конвейерного типа.

9. *Оптический контроль* качества проводящего рисунка ДПП позволяет выявить видимые дефекты печатной схемы. При двухкоординатном передвижении оператором стола с закрепленной заготовкой оптическая система установки контроля регистрирует контролируемые участки ПП, увеличивает их и сравнивает с данными бездефектного изображения ДПП.

Обнаруженные дефекты запоминаются, а по окончании контроля выводятся в виде изображений на мониторе, предоставляя оператору информацию для принятия решений. Некоторые дефекты оператор может немедленно удалить вручную.

10. *Автоматический электроконтроль* позволяет выявить короткие замыкания и разрывы в проводящем рисунке ДПП. Четыре специальных щупа установки со скоростью 800 точек в минуту по программе тестирования обходят все электрические цепи ПП. При этом контролируемый в данный момент участок отображается на экране монитора, а обнаруженные несоответствия с предварительно проконтролированной тест-платой вносятся в специальный чек со штрихкодом. Считывая штрихкод, легко определить место разрыва или короткого замыкания.

Подготовка к лабораторной работе

Подготовить опытные образцы и средства для проведения замеров и расчетов.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с ТП изготовления ПП комбинированным позитивным методом.
2. Изучить характерные дефекты рисунка ПП (табл. 2.2).
3. Получить опытные образцы у преподавателя для проведения замеров.
4. Ознакомиться с установкой для проведения замеров.

При работе с микроскопом (рис. 2.16) необходимо соблюдать следующий порядок операций:

1) работать с микроскопом сидя;

2) микроскоп установить перед собой, немного слева на 2...3 см от края стола. Во время работы его не сдвигать;

3) открыть полностью диафрагму, поднять конденсор в крайнее верхнее положение;

4) работу с микроскопом всегда начинать с малого увеличения;

5) опустить объектив на расстояние 1 см от предметного стекла;

6) установить освещение в поле зрения микроскопа, используя электроосветитель или зеркало. Глядя одним глазом в окуляр и пользуясь зеркалом с вогнутой стороной, направить свет от окна в объектив, а затем максимально и равномерно осветить поле зрения. Если микроскоп снабжен осветителем, то подсоединить микроскоп к источнику питания, включить лампу и установить необходимую яркость;

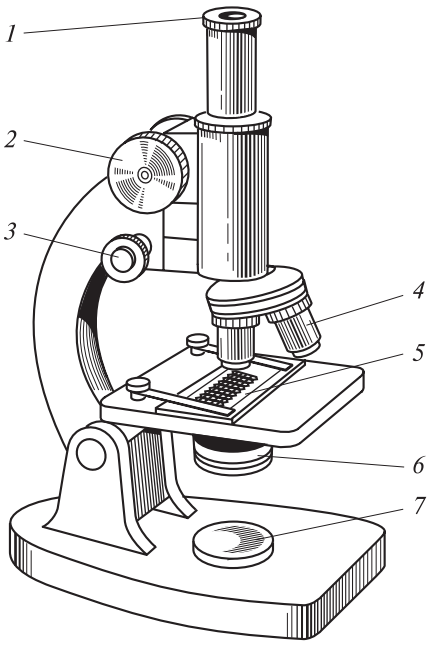


Рис. 2.16. Общий вид светового микроскопа:

1 — окуляр; *2* — макрометрический винт; *3* — микрометрический винт; *4* — объектив; *5* — предметное стекло со срезами; *6* — конденсор; *7* — зеркало

7) положить опытный образец на предметный столик так, чтобы изучаемый объект находился под объективом. Глядя сбоку, опускать объектив с помощью макровинта до тех пор, пока расстояние между нижней линзой объектива и микропрепаратом не достигнет 4...5 мм;

8) смотреть одним глазом в окуляр и вращать винт грубой наводки в направлении на себя, плавно поднимая объектив до положения, при котором хорошо будет видно изображение объекта;

9) передвигая опытный образец рукой, найти нужное место, расположить его в центре поля зрения микроскопа;

10) если изображение не появилось, то следует повторить операции из пунктов выше;

11) по окончании работы снять с рабочего столика опытный образец и сообщить преподавателю о завершении снятия измерений (рис. 2.17).

5. Исследовать ширину и длину проводников ДПП после некоторых операций ТП путем статистической обработки измерений.

6. Внести результаты измерений в отчет по лабораторной работе.

7. Сделать выводы по собранным измерениям об изменениях ширины дорожек после выполнения некоторых операций ТП.

8. Ответить на контрольные вопросы.

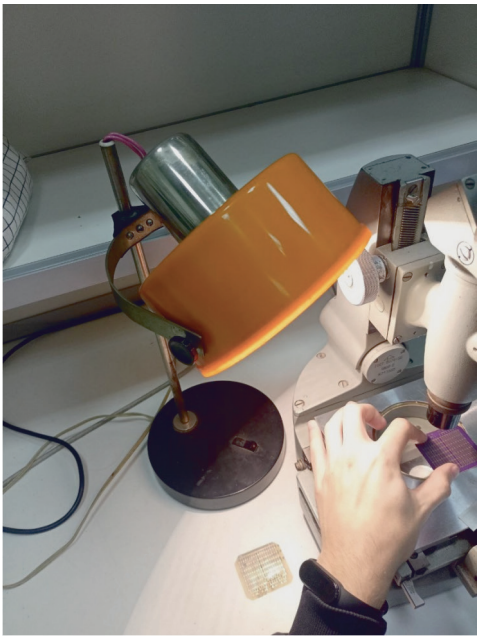


Рис. 2.17. Процесс выполнения замеров опытных образцов

Завершение работы

После выполнения работы необходимо вернуть опытные образцы преподавателю или лаборанту, привести в порядок рабочее место, выключить задействованные электронные приборы, а также подготовить отчет по лабораторной работе.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Краткий конспект теоретической части и расчеты.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
5. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему метод изготовления ДПП на фольгированном диэлектрике назван комбинированным позитивным методом?
2. Каково назначение в ДПП металлизированных отверстий?
3. Как определяют размеры заготовок ДПП?
4. Что представляет собой сухой пленочный фоторезист?
5. Какова роль металлорезиста в производстве ДПП?
6. Каково назначение паяльной маски?
7. На каких операциях возможны изменения геометрии рисунка печатной схемы на ПП?
8. На каких операциях и с какой целью используют базовые отверстия, выполненные в технологическом поле заготовки ДПП?
9. Укажите способы контроля геометрии проводящего рисунка в технологии ДПП.
10. Как проверить толщину и качество слоя металлизации в отверстиях ДПП?

2.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Цель работы: ознакомление с процессом металлизации переходных и монтажных отверстий в печатных платах, технологией «глухих» микропереходов, изучение возможных дефектов при изготовлении.

Задание по лабораторной работе

В лабораторной работе необходимо изучить методы исследования качества переходных отверстий ПП, научиться определять основные дефекты на различных стадиях металлизации отверстий. В процессе выполнения работы рассматриваются различные дефекты переходных отверстий и выявление их на опытных образцах.

Теоретическая часть

Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить лекцию 1.17.6 «Анализ дефектов печатных плат по микрошлифам».

Сквозные отверстия являются неотъемлемой частью структуры ПП. Данные отверстия могут служить для соединения элементов проводящего рисунка на разных слоях ПП (переходные отверстия), для обеспечения установки выводных элементов (монтажные отверстия), а также для крепления ПП в корпусе прибора или установки на ПП объемных элементов конструкции, таких как радиаторы, экраны и т. п. (крепежные отверстия). Отверстия ПП могут быть металлизированными и неметаллизированными. В данной работе будут рассматриваться металлизированные отверстия.

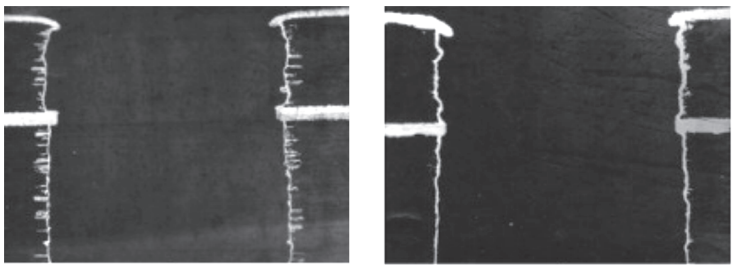
Одним из наиболее известных методов производства ПП с металлизированными отверстиями является комбинированный позитивный метод. В отличие от химического метода, монтажные или переходные отверстия получают до образования проводящего рисунка на слоях сверлением.

Стенки просверленных отверстий имеют дефекты (рис. 2.18) в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые

Рис. 2.18. Дефекты на стенках отверстия после сверления

необходимо устранить перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией; химическую обработку растворами на основе соляной и серной кислот; комбинированную химико-механическую обработку, а также плазмохимическое травление.

При попытке металлизировать просверленные отверстия без дополнительной обработки появляются различные дефекты (рис. 2.19). Проникновение меди в трещины (рис. 2.19, *а*) может привести к замыванию металлизированного отверстия и расположенных рядом проводников, особенно при высокой плотности разводки, а также к отсутствию контакта и, как следствие, браку при производстве ПП.



а *б*

Рис. 2.19. Фрагмент шлифта переходного отверстия:
а — металлизированного без дополнительной обработки стенок;
б — металлизированного после химической обработки стенок

После очистки отверстий следует операция химического меднения диэлектрика. Данная операция осуществляется за счет восстановления на его поверхности меди из растворов ее солей. При этом поверхность диэлектрика должна обладать каталитическими свойствами по отношению к реакции восстановления. Такие свойства диэлектрик приобретает после операции активирования — осаждения на его поверхности частиц металлов — катализаторов последующего химического меднения.

В производстве ПП широко распространен метод сенсактивирования — активирования с предварительной сенсибилизацией. Чаще всего для сенсибилизации используют растворы двухвалентного олова, а также соединения Ge, Fe, Ti.

Результат сенсибилизации — осаждение на поверхности диэлектрика солей двухвалентного олова $Sn(OH)Cl$ или других соединений, служащих катализатором в реакции восстановления металла-активатора.

Сенсибилизацию можно также проводить обработкой в красителях, например метиленовом синем, анилиновом синем, с последующей обработкой в восстановителе $Na_2S_2O_4$ (гидросульфит) и промывкой.

Активирование осуществляют обработкой сенсибилизированной поверхности растворами соединений каталитически активных металлов Pd, Pt, Au, Ag. Растворы могут быть кислыми или щелочными. При активировании диэлектрика в кислом растворе скорость химического меднения значительно

выше. Однако при концентрации кислоты в растворе более 15 %возможен подтрав внутреннего окисленного слоя фольги. Металл в растворах находится в виде простого или комплексного соединения. При взаимодействии с сенсибилизатором на поверхности ПП оседают коллоидные или малорастворимые соединения металла-катализатора.

При предварительной металлизации отверстий слой меди толщиной $h_{\text{п.м}} = 5...7$ мкм осаждается на всех поверхностях заготовки (рис. 2.20). Однако этой толщины недостаточно для надежного электрического соединения слоев металлизированными отверстиями.

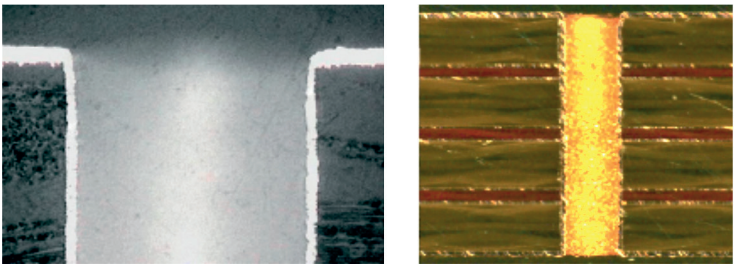


Рис. 2.20. Шлиф сквозного отверстия после операции предварительной металлизации

Химическое меднение требует тщательного соблюдения режимов и концентраций. Этот процесс обладает следующими недостатками: все растворы разового действия и имеют низкую плотность загрузки; растворы очень нестабильны и требуется тщательная отработка процесса. Химически осажденная медь обладает очень низким качеством. Ее удельное сопротивление значительно превышает сопротивление чистой меди.

Гальваническое осаждение меди проводят для получения основного слоя металла-проводника. Осаждение меди на ПП происходит в ванне с электролитом под действием электрического тока. При этом ПП с нанесенным слоем химической меди является катодом, а анодом — массивная медная пластина. Гальваническое меднение ПП предназначено обеспечивать толщину слоя меди в отверстиях не менее 25 мкм, равномерный по толщине слой меди на поверхности ПП. Для этого необходима высокая рассеивающая способность электролита, прочное сцепление гальванической меди с фольгой и химической медью. Скорость наращивания меди значительно выше, чем при химическом меднении, и составляет порядка 13 мкм/ч.

Шлиф металлизированного отверстия после гальванического осаждения приведен на рис. 2.21. Толщина слоя меди составляет порядка 25...30 мкм в отверстии и 40...50 мкм на поверхности ПП.

Для защиты поверхности токопроводящих участков при травлении меди с пробельных мест, а также для обеспечения условий пайки выводов ИЭТ печатный монтаж покрывают металлорезистом Sn–Pb (15...20 мкм). Металлорезист, содержащий 50...65 %Sn и 50...35 %Pb, осаждается во фторборатном электролите. Для получения покрытия Sn–Pb, соответствующего сплаву

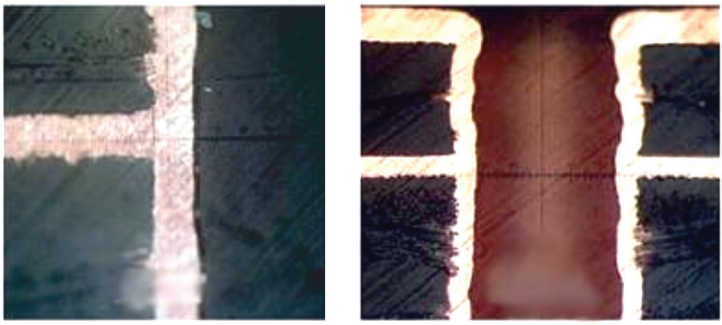


Рис. 2.21. Шлиф сквозного отверстия после операции гальванического осаждения меди

ПОС-61 (температура плавления сплава должна быть 210 °С, чтобы не повредить ПП), необходимо поддерживать в электролите отношение содержания металлов Sn : Pb = (2,0...2,5) : 1. На поверхности металлорезиста Sn–Pb не должно быть сульфатов и оксидов. Для их удаления применяют осветление в растворе, содержащем HCl (17 г/л), SnCl2 (20 г/л). После осаждения металлорезист оплавляют.

Отверстия, покрытые металлорезистом, представлены на рис. 2.22.

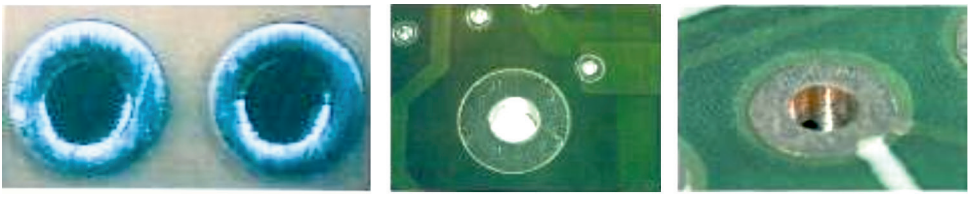


Рис. 2.22. Внешний вид отверстий, покрытых металлорезистом

При производстве ПП с печатными разъемами (ламелями) в качестве материала покрытия ламелей применяют палладий. Если ПП не была покрыта сер обходимо гальванически нанести под ебром перед палладированием, неслой никеля (3...6 мкм) для лучшего сцепления палладия с основанием. Эта операция осуществляется в обычном сернокислом электролите. Палладирование проводится в аммиакатных электролитах. Толщина покрытий из палладия составляет 1...2 мкм. Такие покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью; не тускнеют на воздухе до 400 °С.

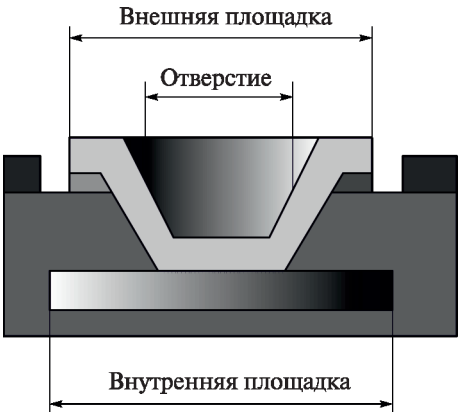


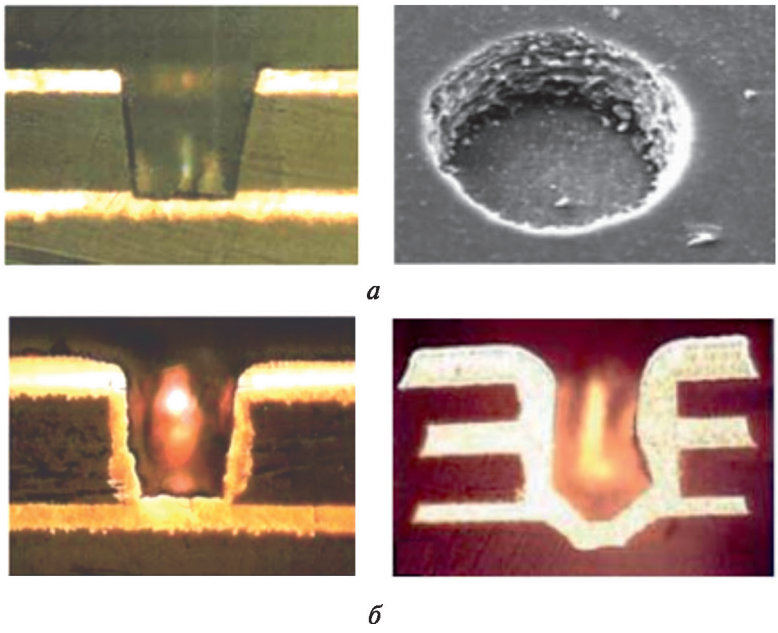
Рис. 2.23. Структура «глухого» микроотверстия

«Глухие» или «слепые» отверстия (рис. 2.23) соединяют наружный слой с одним или несколькими внутренними.

Обычно такой тип отверстий применяется в ПП классов точности 5 и более с большой плотностью проводящего рисунка. Чаще всего это могут быть портативные приборы либо приборы с микросхемами в корпусах BGA с мелким шагом выводов. Существует несколько способов получения данного типа отверстий. Рассмотрим некоторые из них.

Химическое травление. Использование полиимидных пленок для наращивания слоев МПП позволяет вытравливать в них глухие отверстия в крепких горячих щелочах. Для этого первоначально в соответствующих местах вытравливаются окна в фольге, которая в данном случае играет роль маски. Этот групповой метод оформления отверстий обладает высокой производительностью. Но отсутствие соответствующих установок со струйной обработкой горячими щелочами вынуждает использовать погружное травление, обусловливает нежелательное подтравливание диэлектрика под фольгой. Тем не менее при отсутствии соответствующего оснащения травление отверстий остается одним из наиболее применяемых способов выполнения глухих отверстий.

Лазерное сверление. Предлагается ряд совершенно новых решений для микросверления, основанного на использовании мощных лазеров (рис. 2.24). Лазерные системы позволяют сверлить сотни отверстий в секунду диаметром от 0,05 до 0,2 мм. Активная среда Cu–Br-лазера, излучающего на длинах волн 511 и 578 нм, или Nd: YAG-лазера с длиной волны на третьей гармонике 355 нм специально выбрана для хорошего поглощения энергии излучения медью в УФ-области спектра. Необходимость использования таких систем



а

б

Рис. 2.24. Микрошлифы глухих отверстий:
а — после лазерного сверления; *б* — после металлизации

обоснована большим числом микроотверстий в ПП с высокой плотностью межсоединений (MLB–HDI). Плотность размещения таких отверстий в MLB–HDI ПП достигает 10 тыс./дм^2. Для сверления комбинации фольги и диэлектрика приходится варьировать мощностью лазера так, что сверление фольги проводится при плотности энергии 4 Дж/см^2, диэлектрической подложки — при 0,1 Дж/см^2 (рис. 2.25).

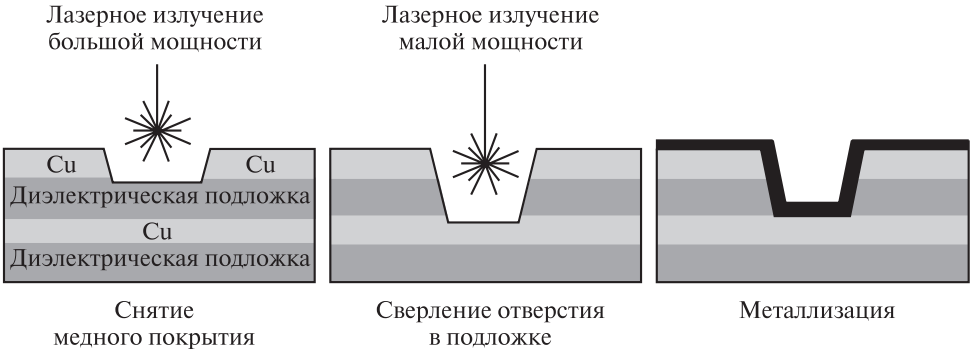


Рис. 2.25. Последовательность операций лазерного сверления глухих отверстий

При достаточно малых диаметрах глухих отверстий и в случаях, если они используются для межсоединений слоев МПП, применяют полную металлизацию, т. е. отверстие полностью заполняется медью (рис. 2.26). Также это позволяет в 2 раза увеличить плотность межсоединений, так как в этом случае их можно располагать друг над другом, а не со сдвигом в сторону на один шаг, как если бы глухие отверстия не были заполнены металлом.

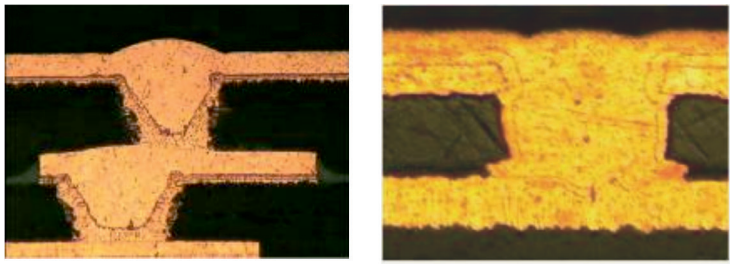


Рис. 2.26. Заполненное металлом глухое отверстие

При производстве ПП могут возникать дефекты на различных стадиях металлизации отверстий.

Раковины в медном покрытии (рис. 2.27) возникают на стадии предварительной или гальванической металлизации. Могут привести к отсутствию контакта, а также снижению механической прочности металлизации в отверстии.

Раковины в покрытии олово–свинец (рис. 2.28) возникают на стадии покрытия металлорезистом. Такие дефекты приводят к ухудшению паяемости отверстия, а также уменьшению коррозионной стойкости.

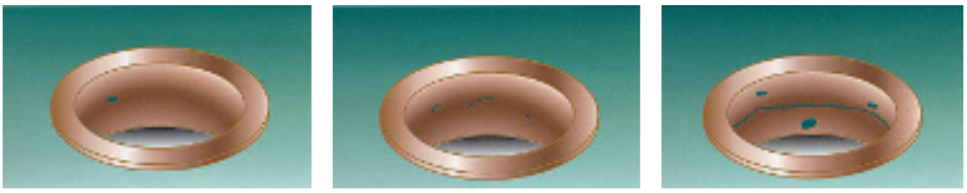


Рис. 2.27. Раковины в медном покрытии

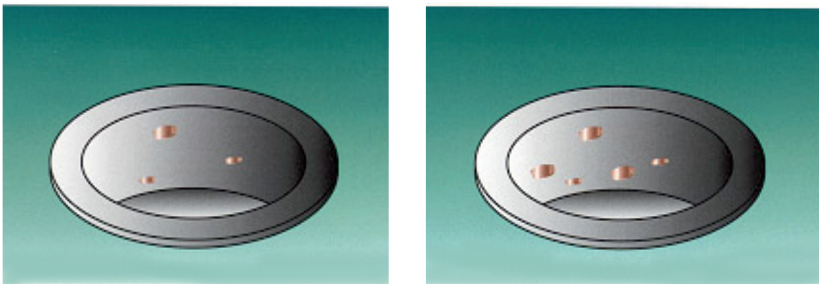


Рис. 2.28. Раковины в покрытии олово–свинец

Утолщения (*неровности*) *слоя покрытия* (рис. 2.29) также возникают на стадии покрытия металлорезистом. Могут привести к частичному или полному закрытию отверстия и, как следствие, невозможности монтажа КМО.

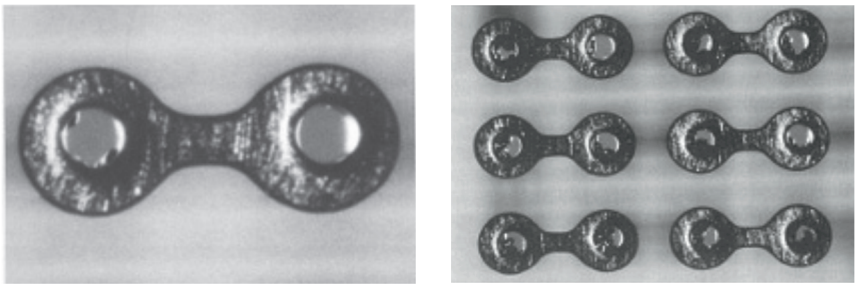


Рис. 2.29. Утолщения (неровности) слоя покрытия

Несмачивание (рис. 2.30) возникает на стадии покрытия металлорезистом. Приводят к ухудшению паяемости отверстия, а также снижению коррозионной стойкости.

Отслоение контактной площадки (рис. 2.31) возникает в результате плохой адгезии металла к диэлектрику (недостаточная активация диэлектрика) либо при тепловом ударе (при пайке или горячем лужении). Может привести к отрыву КП от диэлектрика, ухудшению контакта и механических свойств соединения.

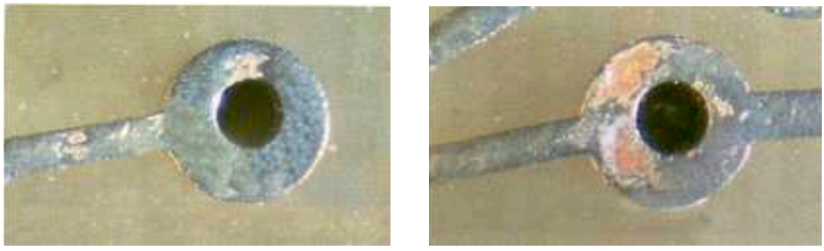
Подготовка к лабораторной работе

Необходимо получить у преподавателя опытные образцы и средства для проведения замеров и расчетов.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с теоретической частью к лабораторной работе.

2. Получить опытные образцы у преподавателя, примеры которых представлены на рис. 2.32 (отверстия на образцах показаны в разрезе).



а *б*

Рис. 2.30. Несмачивание КП:
а — несмачиваемость дорожки; *б* — несмачиваемость монтажного отверстия

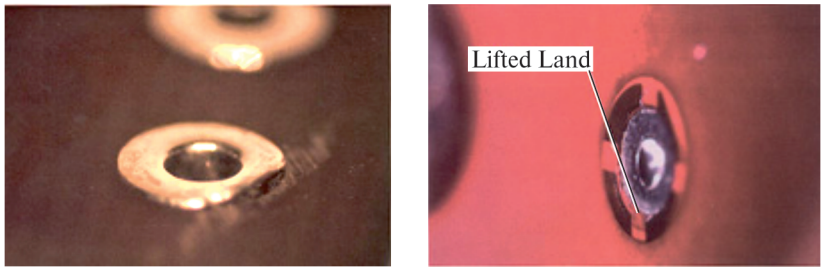


Рис. 2.31. Отслоение КП

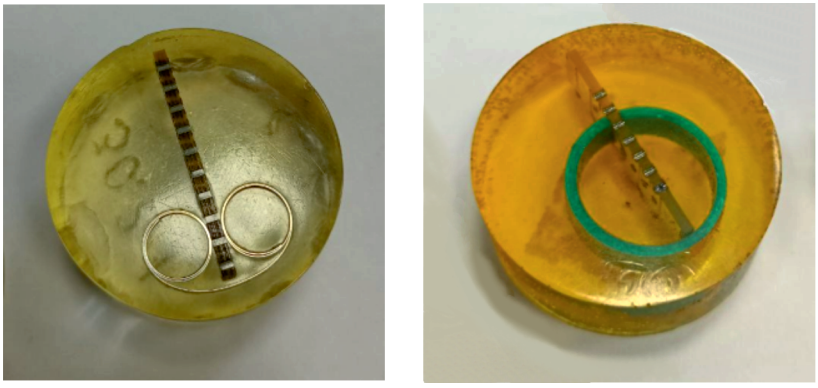


Рис. 2.32. Примеры опытных образцов для выполнения лабораторной работы

3. Провести визуальный анализ предоставленных образцов для выявления дефектов с помощью микроскопа.

4. Заполнить табл. 2.4 для отчета.

Таблица 2.4

Номер образца	Обнаруженные дефекты (зарисовать)	К чему могут привести данные дефекты	Причины данных дефектов

5. Проанализировать, вследствие каких ошибок ТП могли возникнуть обнаруженные дефекты. Перечислите эти ошибки.

Завершение работы

После выполнения лабораторной работы необходимо вернуть опытные образцы преподавателю, привести в порядок рабочее место, выключить задействованные электронные приборы, а также подготовить отчет по лабораторной работе.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Краткий конспект теоретической части и расчеты.
3. Заполненная таблица из описания к лабораторной работе.
4. Результаты экспериментальных исследований.
5. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
6. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные этапы металлизации отверстий. Коротко опишите каждый из них.
2. Что такое метод сенактивирования?
3. Что является результатом сенсибилизации?
4. Назовите недостатки химического меднения.
5. Опишите процесс галиванического осаждения меди.
6. Какой материал используют для покрытия ламелей? Опишите этот процесс.
7. Для чего используются глухие переходные отверстия?
8. Какие существуют методы получения глухих отверстий?
9. В каких случаях используется полная металлизация отверстия?
10. Назовите основные дефекты при металлизации отверстий и поясните, чем они обусловлены.

2.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КОМПОНЕНТОВ НА СМОНТИРОВАННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУРАХ

Цель работы: ознакомление с принципами применения технологии аналогового сигнатурного анализа (АСА) для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы ознакомиться с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с характеристиками эталонной. Подходит для тестирования электрических цепей как с пассивными, так и с активными компонентами. Причем не требуется подача питания на элементы, не повреждаются электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

Измерения проводятся двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине, в этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное

название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать о величине отклонения их формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

Согласно технологии АСА, на дисплей локализатора неисправностей выводится ВАХ (сигнатура) анализируемой цепи, которая сравнивается с эталонной сигнатурой.

Эталонная сигнатура может быть получена от исправного модуля.

Отличие сигнатуры проверяемой цепи от эталонной свидетельствует о наличии неисправности в данной цепи. В качестве примера ниже будут представлены сигнатуры, полученные с заведомо исправного (эталонного) модуля и точно такого же модуля с дефектами (ремонтируемого). Фрагмент принципиальной схемы этого печатного узла представлен на рис. 2.33.

Две идентичные сигнатуры приведены на рис. 2.34, где красным цветом выделена импедансная сигнатура по питанию VCC (20-я ножка ИМС DD1), снятая с эталонного печатного узла. Она полностью совпадает с сигнатурой желтого цвета, считанной с тестируемого печатного узла. О полном совпадении сигнатур можно судить исходя из параметра dev=0% (измеренное отклонение сигнатур 0%). Здесь же желтым цветом обозначена сигнатура, полученная с тестируемого печатного узла, имеющего утечку электролитического конденсатора C15 по цепи VCC. Наличие дефекта подтверждается параметром отклонения dev=54% при разрешенном отклонении tol=5%. После замены дефектного конденсатора C15 (или C17, установленного в цепи параллельно) на исправный цепь VCC приобрела сигнатуру, представленную на рис. 2.35.

Пример короткого замыкания на ножке 6 ИМС DD1 (желтый цвет тестируемого печатного узла) приведен на рис. 2.36. Наличие дефекта подтверждается параметром отклонения dev=96%. После замены дефектной ИМС DD1 на исправную на входе 6 этой ИМС тестируемого печатного узла появилась совершенно идентичная эталонной сигнатура (dev=0%) желтого цвета (рис. 2.37).

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Локализаторы неисправностей (ЛН) SFL1500 и SFL3000 являются автоматизированной тестовой системой, состоящей из ЛН с интегрированным в корпус прибора модулем интерфейса USB и управляющего ПК (рис. 2.38).

Локализаторы неисправностей SFL1500 и SFL3000 предназначены для поиска неисправностей в электронных модулях методом сравнения аналоговых сигнатур (ВАХ) тестируемого изделия с эталонными. Локализатор неисправностей предназначен для эксплуатации в отапливаемом производственном помещении, возможна его эксплуатация при температуре окружающей среды от 15 до 27 °С и относительной влажности до 70 %.

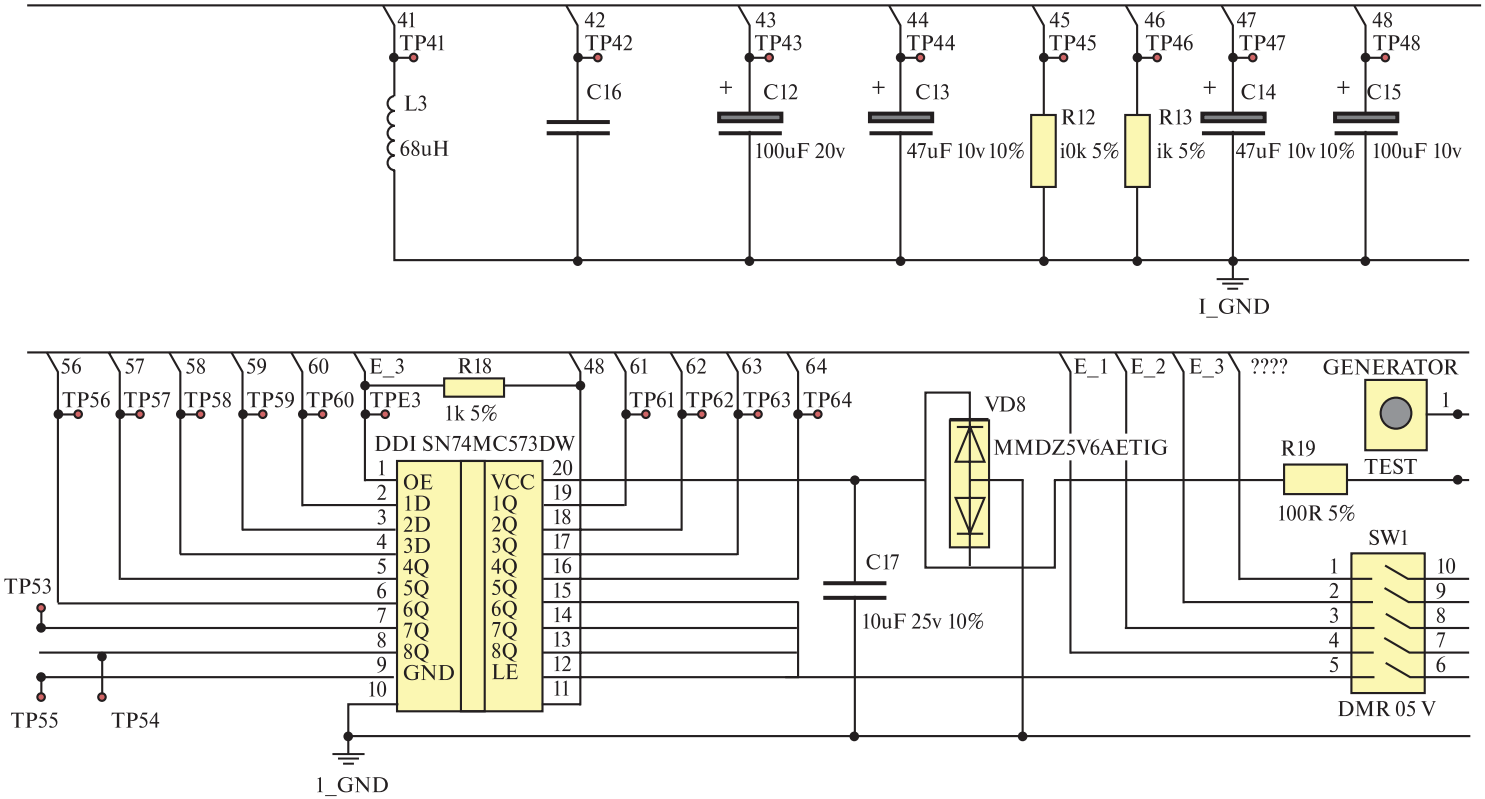


Рис. 2.33. Фрагмент принципиальной схемы ремонтируемого печатного узла

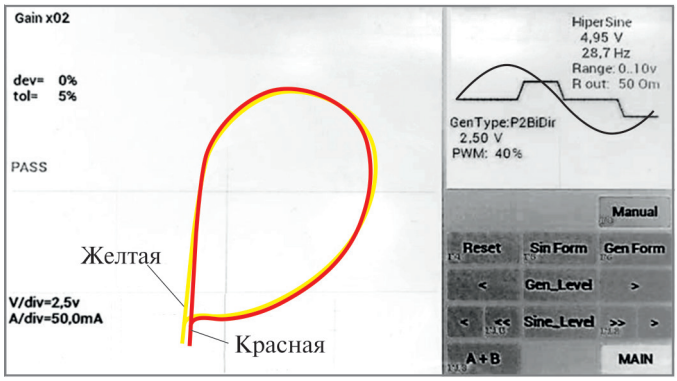


Рис. 2.34. Две идентичные сигнатуры, снятые с ножек 20 ИМС DD1 на двух печатных узлах:
эталонном (красный цвет) и тестируемом (желтый)

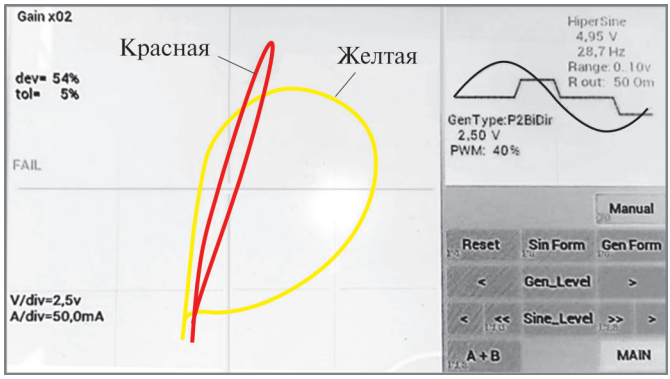


Рис. 2.35. Эталонная и дефектная сигнатуры, снятые с ножек 20 ИМС DD1 на двух печатных узлах:
эталонном (красный цвет) и тестируемом (желтый)

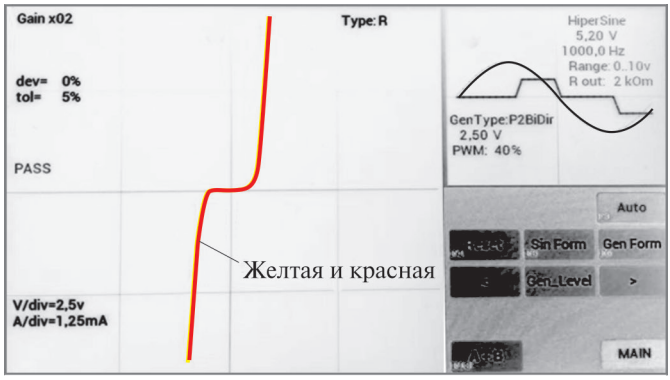


Рис. 2.36. Эталонная и дефектная сигнатуры, снятые с ножек 6 ИМС DD1 на двух печатных узлах

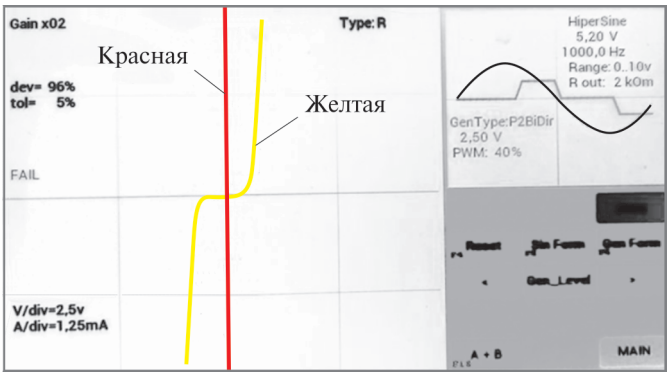


Рис. 2.37. Две идентичные сигнатуры, снятые с ножек 6 ИМС DD1 на двух печатных узлах

Рис. 2.38. Локализатор неисправностей SFL3600

Характеристики ЛН	SFL1500	SFL3000
Напряжение, В	100–240	100–240
Частота, Гц	50–60	50–60
Потребляемая мощность, Вт	не более 20	не более 20
Масса, кг	не более 3	не более 5
Габаритные размеры, мм	264×50×247	264×150×247
Электропитание	от однофазной сети	от однофазной сети

На передней панели ЛН расположены:
– экран ЖКИ (только для SFL3000);
– кнопки для выбора режимов тестирования (только для SFL3000);
– два разъема каналов A и B;
– два запараллеленных разъема COM (общий);
– два разъема импульсного генератора PULSE.

Прибор имеет два разъема для подсоединения тестовой клипсы к тестируемому компоненту.

Два запараллеленных разъема COM (общий) предназначены для подсоединения тестовой клипсы COM к общему проводу тестируемой ПП (или плат). Если сравниваются две ПП, то оба их общих провода должны подсоединяться к разъемам COM прибора.

Два разъема импульсного генератора позволяют работать в режиме непосредственного тестирования двух испытываемых плат.

Импульсный генератор выдает идентичные сигналы между каждым разъемом PULSE и гнездами COM. Сигналы на разъемах PULSE генерируются индивидуально, поэтому, хотя на каждом из данных разъемов имеется один и тот же импульс, нагрузка на одном из них не влияет на сигнал, снимаемый с другого разъема.

На задней панели ЛН расположены:

– разъем для подсоединения сетевого шнура;
– кнопка ВКЛ/ВЫКЛ прибора;
– разъем типа B интерфейса USB 2.0;
– разъем для подключения мультиплексора (IDC26).

Подготовка к лабораторной работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности по работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Получите у преподавателя локализатор неисправностей SFL1500. Проверьте его комплектность.

3. Проанализируйте схемы, представленные в плане лабораторной работы.

4. Проведите предварительные анализ схем. Используя основные законы электротехники, заполните таблицы с исходными данными, рассчитайте требуемые параметры в цепи и после проведения эксперимента сравните с показаниями прибора.

5. Найдите в касетах необходимые образцы по варианту задания, сформируйте сборочный комплект ЭРЭ.

6. Разместите на рабочем столе антистатический коврик.

7. Разместите перед собой коммутационную панель прибора контроля и необходимые контрольно-измерительные приборы, включите электропитание приборов, проверьте (установите) начальные настройки измерительных приборов.

8. После компоновки рабочего места можно приступать к сборке и экспериментальным исследованиям схемы.

9. После окончания экспериментов отключите электропитание, разберите образцы и разместите их в соответствующих кассетах. Сдайте упакованный комплект преподавателю.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Перед началом работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания следует разместить на рабочем столе антистатический коврик и на нем — центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа на ней ЭРЭ, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной ПП к периферии, наиболее связанные элементы располагать в центре, менее связанные элементы по периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено; необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к лабораторной работе, записать результаты экспериментов. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.
2. Назовите основные сигнатуры.
3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?
4. Что такое короткое замыкание?
5. Чем можно объяснить различия между теоретическими расчетами и показаниями прибора?
6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.

2.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.1 КОНТРОЛЬ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ: КОНТРОЛЬ РЕЗИСТОРОВ

Цель лабораторной работы: ознакомление с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы необходимо освоить принципы применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с ВАХ эталонной. Метод подходит для тестирования цепей как с пассивными, так и с активными компонентами. Причем не требуется подачи питания на элементы, не повреждаются электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

Измерения проводят двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине, в этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

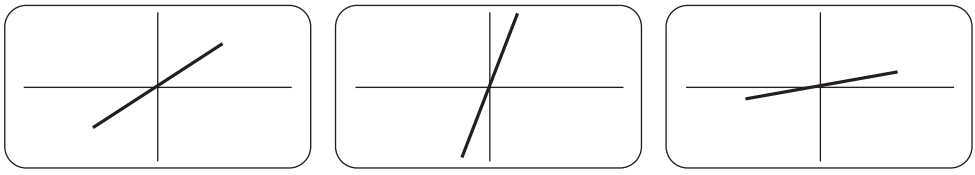
Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать о величине отклонения их формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

Зависимость силы тока от напряжения представляет собой наклонную прямую линию, градиент (наклон) которой зависит от сопротивления. При тестировании высокоомных резисторов напряжением диапазона MIN они будут пропускать малый ток. При тестировании в данном диапазоне бывает трудно отличить результирующую характеристику от горизонтального следа, который получается при разомкнутых (открытых) выводах тестируемой цепи. Переход на диапазон более высоких напряжений тестирования HIGH позволяет получить хорошо различимую характеристику.

Рекомендуемые диапазоны тестирования резисторов в зависимости от заявленного сопротивления:

MIN ..... 5 Ом — 5 кОм
LOGIC ..... 5 Ом — 5 кОм
LOW .....500 Ом — 10 кОм
MED ..... 5 кОм — 60 кОм
HIGH..... 12 кОм — 1 мОм

Типовые сигнатуры трех резисторов в диапазонах напряжений тестирования LOW и HIGH при частоте тестирования 100 Гц приведены на рис. 2.39.



а *б* *в*

Рис. 2.39. Типовые сигнатуры трех номиналов резисторов в различных диапазонах напряжений тестирования:
а — 2 кОм, LOW; *б* — 270 кОм, HIGH; *в* — 10 кОм, HIGH

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Подготовка к лабораторной работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности по работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Получите у преподавателя локализатор неисправностей SFL1500. Проверьте его комплектность.

3. Проанализируйте схемы, приведенные в плане лабораторной работы.

4. Проведите предварительный анализ схем. Используя основные законы электротехники, заполните таблицы с исходными данными, рассчитайте

требуемые параметры в цепи и после проведения эксперимента сравните с показаниями прибора.

5. Найдите в кассетах необходимые образцы по варианту задания, сформируйте сборочный комплект ЭРЭ.

6. Разместите на рабочем столе антистатический коврик.

7. Разместите перед собой коммутационную панель прибора контроля и необходимые контрольно-измерительные приборы, включите электропитание приборов, проверьте (установите) начальные настройки измерительных приборов.

8. После компоновки рабочего места можно приступать к сборке и экспериментальным исследованиям схемы.

9. После окончания экспериментов отключите электропитание, разберите образцы и разместите их в соответствующих касетах. Сдайте упакованный комплект преподавателю.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Перед началом работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты согласно рабочей тетради к лабораторной работе.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания разместить на рабочем столе антистатический коврик, на нем разместить центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа ЭРЭ на ней, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной платы к ее периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено, необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к работе, записать результаты экспериментов. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.

2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.

3. Краткий конспект теоретической части и расчеты.

4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).

5. Методика проведения измерений.

6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.

7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.

8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.

2. Назовите основные сигнатуры.

3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?

4. Что такое короткое замыкание?

5. Чем можно объяснить различия в теоретических расчетах и показаниях прибора?

6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.

7. Опишите составляющие стенда.

2.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.2 КОНТРОЛЬ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ: КОНТРОЛЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: ознакомление с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы студенты знакомятся с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — это безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с ВАХ эталонной. Подходит для тестирования цепей и с пассивными, и с активными компонентами, для него не требуется подача питания на элементы, он не повреждает электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

Измерения проводятся двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине, в этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем же случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать об отклонении их формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

Вследствие способности накапливать электрический заряд на графиках этих компонентов отображается фазовый сдвиг между значениями напряжения и силы тока.

Это свойство приводит к получению сигнатур в виде кругов или эллипсов. Типовые сигнатуры конденсаторов емкостью 22 мкФ, 10 мкФ и 82 пФ в различных диапазонах напряжений и частот тестирования представлены на рис. 2.40.

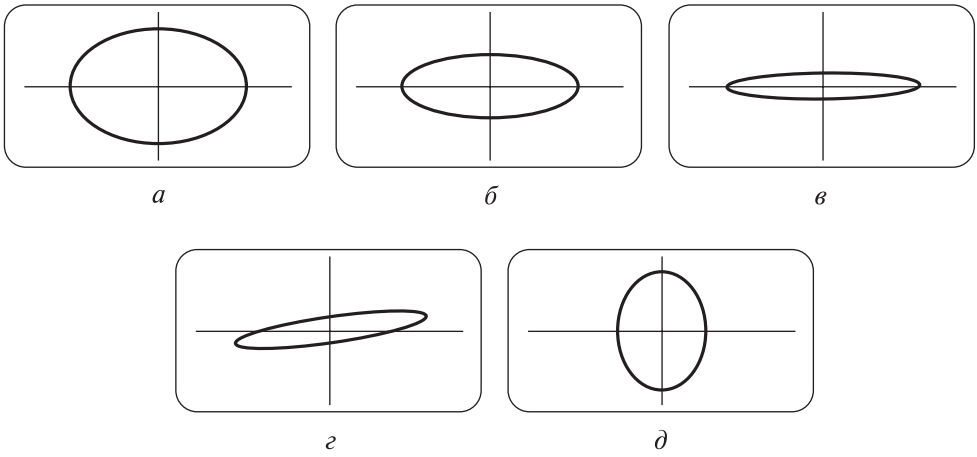


Рис. 2.40. Типовые сигнатуры пяти конденсаторов в различных диапазонах напряжений и частот тестирования:
а — 22 мкФ, LOGIC, 100 Гц; *б* — 10 мкФ, LOGIC, 100 Гц; *в* — 82 пФ, HIGH, 2000 Гц; *г* — 47 мкФ (с дефектом), LOGIC, 100 Гц; *д* — 47 мкФ (без дефектов), LOGIC, 100 Гц

Для чистых реактивных сопротивлений большие и малые оси эллипсов ориентированы по координатным осям. Если сопротивление цепи значительно или сопоставимо с импедансом реактивного компонента, то эллипсоидная характеристика наклонена по отношению к координатным осям.

Сигнатура конденсатора емкостью 47 мкФ с дефектом — большая утечка — представлена на рис. 2.40, *г*, сигнатура качественного конденсатора — на рис. 2.40, *д*.

Экспериментируя с различными частотными диапазонами, можно варьировать импеданс, т. е. увеличивать или уменьшать проводимость в зависимости от поставленной задачи. Рекомендуемые для тестирования конденсаторов диапазоны напряжений и частот приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Рекомендуемые для тестирования конденсаторов диапазоны напряжений и частот

Диапазон	5 Гц	50 Гц	100Гц	500Гц	1 кГц	2 кГц
MIN	220 мкФ — 4700 пФ	10 мкФ — 330 мкФ	4,7 мкФ — 100 мкФ	1 мкФ — 22 мкФ	0,1 мкФ — 10 мкФ	0,1 мкФ — 10 мкФ
LOGIC	220 мкФ — 4700 пФ	1 мкФ — 10 мкФ	0,1 мкФ — 5 мкФ	0,02 мкФ — 1 мкФ	0,01 мкФ — 0,5 мкФ	10 нФ — 0,2 мкФ
LOW	–	10 мкФ — 330 мкФ	4,7 мкФ — 100 мкФ	1 мкФ — 22 мкФ	0,1 мкФ — 10 мкФ	0,1 мкФ — 10 мкФ
MED	–	0,05 мкФ — 2,2 мкФ	0,05 мкФ — 2 мкФ	5 нФ — 0,5 мкФ	2 нФ — 0,1 мкФ	1 нФ — 0,05 мкФ
HIGH	–	0,01 мкФ — 0,5 мкФ	5 нФ — 0,1 мкФ	1 нФ — 0,05 мкФ	300 пФ — 0,02 мкФ	100 пФ — 5 нФ

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Подготовка к лабораторной работе

1. Перед началом лабораторной работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты согласно рабочей тетради к лабораторной работе.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания разместить на рабочем столе антистатический коврик, на нем разместить центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа на ней ЭРЭ, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной ПП к ее периферии, наиболее связанные элементы располагать в центре, менее связанные — по периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено, необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к лабораторной работе, записать результаты экспериментов. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.
2. Назовите основные сигнатуры.
3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?
4. Что такое короткое замыкание?
5. Чем можно объяснить различия в теоретических расчетах и показаниях прибора?
6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.

2.9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.3 КОНТРОЛЬ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ: КОНТРОЛЬ ИНДУКТИВНОСТЕЙ

Цель лабораторной работы: ознакомление с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы необходимо освоить принципы применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с ВАХ эталонной. Подходит для тестирования цепей как с пассивными, так и с активными компонентами. При этом не требуется подачи питания на элементы и не повреждаются электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

Измерения проводят двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине, в этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать об отклонении их формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

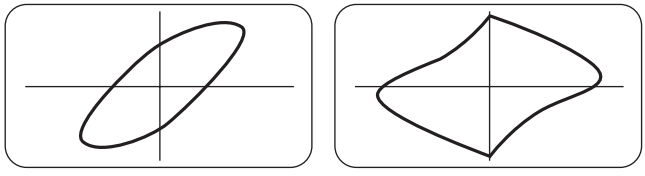
Рекомендуемые для тестирования индуктивностей диапазоны напряжений и частот представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Рекомендуемые для тестирования индуктивностей диапазоны напряжений и частот

Диапазон	5 Гц	50 Гц	100 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц
MIN	20–300 Гн	1 Гн — 500 Гн	30 мГн — 500 мГн	6 мГн — 100 мГн	3 мГн — 5 мГн	1,5 мГн — 25 мГн
LOGIC	20–300 Гн	1 Гн — 20 Гн	500 мГн — 11 Гн	100 мГн — 2 Гн	50 мГн — 2 Гн	25 мГн — 0,5 Гн
LOW	—	1 Гн — 500 Гн	30 мГн — 500 мГн	6 мГн — 100 мГн	3 мГн — 5 мГн	1,5 мГн — 25 мГн
MED	—	20 Гн — 300 Гн	10 Гн — 110 Гн	2 Гн — 10 Гн	1 Гн — 8 Гн	500 мГн — 5 Гн
HIGH	—	20 Гн — 300 Гн	20 Гн — 300 Гн	4 Гн — 50 Гн	2 Гн — 25 Гн	1 Гн — 12 Гн

Сигнатуры первичной обмотки ферритовых трансформаторов, полученные при тестировании в диапазоне напряжений LOGIC и частоты 2 кГц, приведены на рис. 2.41. Сигнатура хорошо иллюстрирует значительное влияние большого реактивного сопротивления на результирующую сигнатуру, приводящее к наклону эллипса относительно осей координат.



а *б*

Рис. 2.41. Сигнатура первичной обмотки ферритовых трансформаторов в диапазонах напряжений тестирования LOGIC и частот 2 кГц:

а — качественный трансформатор; *б* — дефектный трансформатор (короткозамкнутый виток)

С помощью кнопок FREQ можно выбирать оптимальный частотный диапазон. В конденсаторах больший ток наблюдается при использовании более высоких частот тестирования, кроме того, они приводят к большему

отклонению результирующей характеристики по вертикали. Для индуктивностей больший ток появляется при тестировании в низкочастотных диапазонах.

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Подготовка к лабораторной работе

1. Перед началом лабораторной работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты согласно рабочей тетради к лабораторной работе.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания разместить на рабочем столе антистатический коврик, на нем разместить центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа на ней ЭРЭ, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной ПП к ее периферии, наиболее связанные элементы располагать в центре, менее связанные — по периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено, необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к лабораторной работе, записать результаты экспериментов. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.

2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.

3. Краткий конспект теоретической части и расчеты.

4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).

5. Методика проведения измерений.

6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.

7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.

8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.
2. Назовите основные сигнатуры.
3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?
4. Что такое короткое замыкание?
5. Чем можно объяснить различия в теоретических расчетах и показаниях прибора?
6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.
7. Опишите составляющие стенда.

2.10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.4 КОНТРОЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ: КОНТРОЛЬ ДИОДОВ, СВЕТОДИОДОВ, СТАБИЛИТРОНОВ

Цель лабораторной работы: ознакомление с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы необходимо освоить принципы применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с ВАХ эталонной. Метод подходит для тестирования цепей как с пассивными, так и с активными компонентами. При этом не требуется подачи питания на элементы и не повреждаются электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

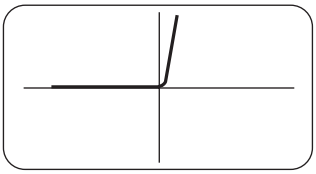
Измерения проводят двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине. В этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

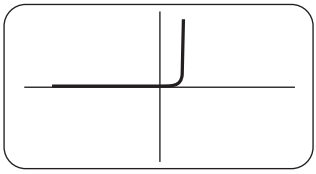
Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать об отклонении их

формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

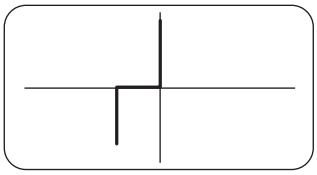
При падении напряжения примерно на 0,6 В и смещении в прямом направлении, диоды имеют малое сопротивление. На сигнатуре это выражается почти вертикальным следом около оси *Y* (рис. 2.42, *а*).



а



б



в

Рис. 2.42. Сигнатуры различных полупроводниковых компонентов в различных диапазонах напряжений тестирования, частотный диапазон — 50 Гц:
а — импульсный диод, LOW; *б* — светодиод, LOW; *в* — стабилитрон, 8,2 В, MED

При обратном смещении результирующая сигнатура объясняется высоким обратным сопротивлением диода, приближаясь к характеристикам, которые имеют компоненты с открытыми контактами. На сигнатуре это выражается почти горизонтальным следом около оси *X* (рис. 2.42, *б*).

Светодиодные индикаторы имеют сигнатуры, аналогичные обычным полупроводниковым диодам, за исключением более высокого значения падения напряжения на открытом элементе — примерно 1,5 В.

Стабилитроны имеют абсолютно аналогичные обычным полупроводниковым диодам сигнатуры, но лишь до напряжений их стабилизации. При достижении стабилитроном соответствующего напряжения стабилизации будет наблюдаться появление низкоимпедансной сигнатуры (рис. 2.42, *в*).

Рекомендуемые диапазоны напряжений тестирования диодов:

MIN.....импульсные диоды
LOGIC.....силовые диоды
LOW.....светодиоды
MED.....стабилитроны — до 20 В
HIGH .....стабилитроны — свыше 20 В

Следует отметить, что характеристики будут инвертироваться в том случае, если инвертируются щупы тестового пробника и разъема COM.

Измерение диода 1N4148. Основной характеристикой полупроводниковых диодов является ВАХ, представляющая собой зависимость тока во внешней цепи *p–n*-перехода от значения и полярности прикладываемого к нему напряжения.

1. С помощью соединительных проводников собрать схему для исследования ВАХ диодов в прямом включении (рис. 2.43).

2. Результаты измерения внесены в табл. 2.7.

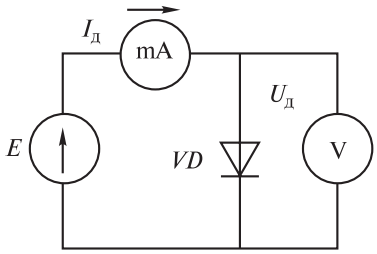


Рис. 2.43. Схема исследования ВАХ диодов в прямом включении

Таблица 2.7

Результаты измерений диода 1N4148

$U_д$, мВ	$I_д$, мА
0	0
200	0,00006
400	0,00014
450	0,00036
500	0,000117
550	0,000288
600	0,000823
650	0,0022
700	0,00525
750	0,0102
800	0,0208
850	0,0392
900	0,066
950	0,1154

Результаты измерения, внесенные в таблицу, можно обработать с помощью программного обеспечения для графического представления. Обрабатывая таким образом результаты измерения, получаем ВАХ диода 1N4148 (рис. 2.44).

По мере увеличения прямого напряжения $U_{пр}$ начинает возрастать и прямой ток $I_{пр}$. Это возрастание незначительно, линия графика имеет незначительный подъем, однако напряжение растет быстрее, чем ток. Другими словами, несмотря на то что диод включен в прямом направлении, ток через него не идет, диод практически заперт.

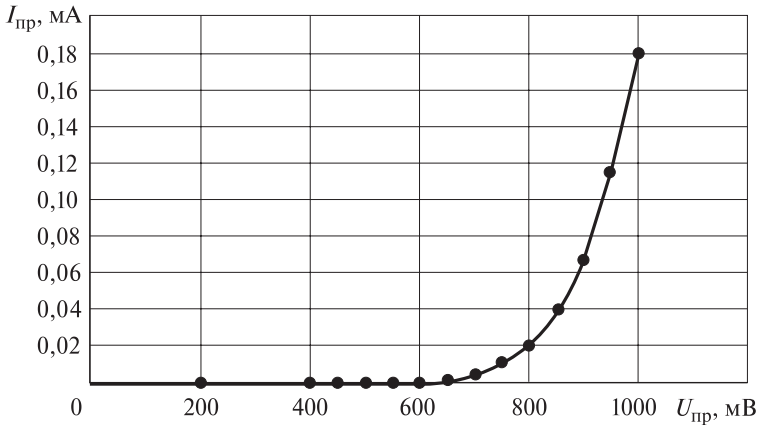


Рис. 2.44. ВАХ диода 1N4148

При достижении определенного уровня напряжения на характеристике появляется излом: напряжение практически не изменяется, а ток стремительно растет. Это напряжение называется прямым падением напряжения на диоде.

Сигнатурный анализ диода1N4148. Для снятия сигнатуры диода необходимо подключить катод диода к порту COM, а анод к порту — алокализатора неисправностей (рис. 2.45).

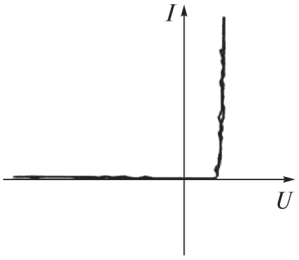


Рис. 2.45. Сигнатура диода 1N4148

Сигнатура диода отражает природу полупроводникового *p*–*n*-перехода. Для *p*–*n*-перехода существует пороговое напряжение (напряжение включения), при котором диод начинает проводить ток. Пока разность напряжений между анодом и катодом прибора будет оставаться ниже порогового значение, диод будет вести себя подобно открытой цепи. Как только пороговое значение будет превышено, диод начнет проводить ток. Как только диод перейдет в область проводимости, малое увеличение напряжения на аноде будет приводить к значительному увеличению тока через диод. Этот эффект называется эффектом колена и демонстрирует удовлетворительные характеристики *p*–*n*-перехода. Эффект колена виден между горизонтальной и вертикальной частями результирующей сигнатуры и ему соответствует напряжение включения $U_{вкл}$.

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Подготовка к лабораторной работе

1. Перед началом лабораторной работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты согласно рабочей тетради к лабораторной работе.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания разместить на рабочем столе антистатический коврик, на нем разместить центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа на ней ЭРЭ, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной ПП к ее периферии, наиболее связанные элементы располагать в центре, менее связанные — по периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено, необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к лабораторной работе, записать результаты экспериментов. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.
2. Назовите основные сигнатуры.
3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?
4. Что такое короткое замыкание?
5. Чем можно объяснить различия в теоретических расчетах и показаниях прибора?
6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.
7. Опишите составляющие стенда.

2.11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.5 КОНТРОЛЬ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ: КОНТРОЛЬ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель лабораторной работы: ознакомление с принципами применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, рассматривая контролируемый печатный узел как черный ящик.

Задание по лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы необходимо освоить принципы применения технологии АСА для локализации неисправности на смонтированных ПП на компонентном уровне, без принципиальной схемы, не зная, как работает этот контролируемый печатный узел.

Теоретическая часть

Аналоговый сигнатурный анализ — безопасный метод поиска неисправностей путем сравнения ВАХ исследуемой ПП или микросхемы с ВАХ эталонной. Метод подходит для тестирования цепей как с пассивными, так и с активными компонентами. При этом не требуется подачи питания на элементы и не повреждаются электрические цепи и компоненты.

Принцип работы прибора. Прибор является активным, т. е. самостоятельно подает на электрическую схему тестовый сигнал и регистрирует отклик схемы. В связи с этим с прибором работают только со схемами без подачи питания и предварительно разряженными конденсаторами.

Тестовый сигнал представляет собой двуполярный синусоидальный сигнал с изменяемыми параметрами напряжения, силы тока и частоты.

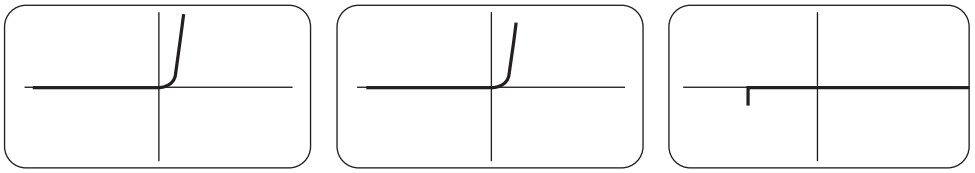
Измерения проводят двумя щупами между любыми произвольными узлами (точками) схемы. Как правило (но не обязательно), один из щупов располагают на общей шине, в этом случае можно говорить о сигнатуре в точке (т. е. относительно общей шины). В общем случае сигнатура может быть записана для любого двухполюсника.

Зарегистрированный отклик двухполюсника в ответ на тестовый сигнал, по сути, представляет собой ВАХ анализируемого двухполюсника. Вольтамперная характеристика зависит от электрических параметров двухполюсника и однозначно характеризует его. В англоязычной литературе ВАХ обозначается VI (*Volt — Intensité de courant* (фр.)), отсюда и англоязычное название VI-tester. По аналогии можно называть данный тип приборов ВАХ-тестер.

Программное обеспечение позволяет мгновенно в автоматическом режиме сравнить две сигнатуры (ВАХ) и просигнализировать об отклонении их формы. На основании этого можно сделать вывод об идентичности электрических параметров рассматриваемых двухполюсников.

Транзисторы имеют два полупроводниковых перехода (один между базой и коллектором, второй — между базой и эмиттером), соединенных друг с другом.

Типовые характеристики *n*–*p*–*n*-транзисторов (эмиттер и коллектор изготовлены из полупроводника *n*-типа, а база имеет *p*-тип) представлены на рис. 2.46.



а *б* *в*

Рис. 2.46. Типовые характеристики *n*–*p*–*n*-транзисторов в диапазоне напряжений тестирования MED и частотном диапазоне 50 Гц:
а — база–эмиттер; *б* — база–коллектор; *в* — эмиттер–коллектор

Сигнатура база–эмиттер аналогична сигнатуре стабилитрона.

Не рекомендуется выполнять тестирование маломощных импульсных транзисторов в частотном диапазоне 2 кГц в течение продолжительного времени.

Длительное смещение перехода база–эмиттер в обратном направлении может повредить полупроводник.

Сигнатура перехода база–коллектор аналогична сигнатурам обычных полупроводниковых диодов.

Сигнатура перехода коллектор–эмиттер аналогична сигнатурам стабилитрона. Если тестирующее напряжение положительно (правый квадрант), переход коллектор–база смещен в обратном направлении, а база–эмиттер — в прямом. Смещенный в обратном направлении переход коллектор–эмиттер препятствует прохождению тока, что на сигнатуре отражается в виде горизонтальной линии (отсутствие контакта).

Если напряжение тестирования отрицательно (левый квадрант), переход коллектор–база смещен в прямом направлении, а база–эмиттер — в обратном. Переход база–эмиттер отображается аналогично пробою стабилитрона — в виде пологой линии, параллельной оси абсцисс. Следует отметить необходимость осторожного обращения с обратно смещенным переходом база–эмиттер.

Сигнатуры *p*–*n*–*p*-транзисторов являются зеркальными отображениями сигнатур *n*–*p*–*n*-транзисторов.

Определение выводов (цоколевки) транзистора. Выводы неизвестного транзистора могут быть определены следующим образом:

1) установить диапазон напряжений LOW, частотный диапазон — 100 Гц;

2) соединить выход COM с одним из выводов транзистора, щупом пробника последовательно коснуться двух оставшихся выводов;

3) снять сигнатуры, добиваясь их соответствия с сигнатурами для *n*–*p*–*n*-транзисторов.

Если полученные характеристики зеркальны характеристикам данного руководства, тестируемый транзистор имеет *p*–*n*–*p*-структуру.

Измерение ВАХ биполярного транзистора. Для биполярного транзистора в схеме с общей базой активный режим (на эмиттерном переходе — прямое напряжение, на коллекторном — обратное) является основным. Эмиттерный переход работает в прямом направлении, и через него происходит инжекция неосновных носителей в базу: дырок в транзисторе *p*–*n*–*p*-типа и электронов в транзисторе *n*–*p*–*n*-типа. База должна иметь достаточно малую толщину (по сравнению с диффузионной длиной), чтобы инжектированные неосновные носители не успевали рекомбинировать. Коллекторный переход, нормально смещенный в обратном направлении, «собирает» инжектированные носители, прошедшие через слой базы. В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора.

1. Схема с общим эмиттером (ОЭ) является наиболее распространенной, так как она дает наибольшее усиление по мощности.

2. Схема с общей базой (ОБ) дает меньшее усиление по мощности, чем схема с ОЭ, но она значительно лучше по частотным и температурным свойствам.

3. Схема с общим коллектором отличается большим входным сопротивлением и малым выходным. Поскольку она не дает усиления по току, ее называют «эмиттерным повторителем».

Основными характеристиками биполярного транзистора являются входные и выходные характеристики. Что считать входом и выходом транзистора как усилительного элемента, зависит от схемы его включения. Наибольшее применение нашла схема включения с общим эмиттером, так как она дает наибольший коэффициент усиления по мощности и имеет вполне приемлемые значения входного и выходного сопротивления. Поэтому именно для этой схемы включения проведем исследования входных и выходных характеристик. Входной цепью для схемы ОЭ является цепь эмиттер–база, а выходной — цепь эмиттер–коллектор. Выходной характеристикой является зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения между эмиттером и коллектором при неизменном значении тока базы $I_б$.

Рассмотрим ВАХ биполярного транзистора BC548 в режиме с общим эмиттером. Схема измерения представлена на рис. 2.47.

Результаты измерений внесены в таблицу 2.8.

Результаты измерения, внесенные в табл. 2.8, можно обработать с помощью программного обеспечения для графического представления.

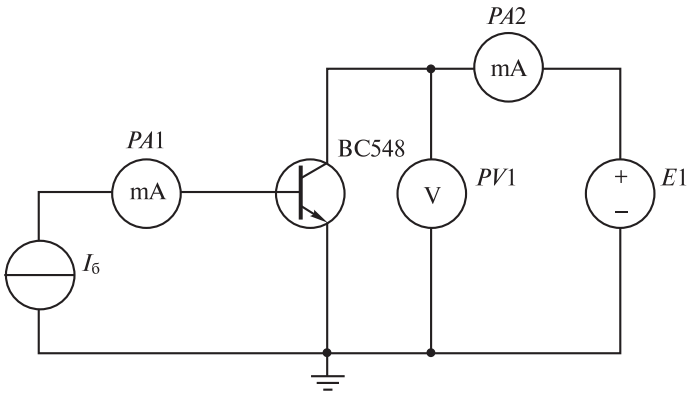


Рис. 2.47. Схема исследования ВАХ биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Обрабатывая таким образом результаты измерений, получаем ВАХ транзистора BC548 — зависимость изменения тока коллектора при изменении тока, подаваемого на базу транзистора (рис. 2.48).

Таблица 2.8

Результаты измерений транзистора BC548

$I_б$ = 0,2 мА		$I_б$ = 0,5 мА		$I_б$ = 1 мА		$I_б$ = 2 мА	
$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мА	$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мА	$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мА	$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мА
0	0	0	0	0	0	0	0
0,3	29,2	0,3	65	0,3	23,2	0,3	84
0,6	35,51	0,6	76	0,6	32,6	0,6	102
1	43,4	1	84	1	39,5	1	121
1,5	51,8	1,5	94,1	1,5	45,4	1,5	131
2	59,6	2	103,7	2	50	2	140
2,5	68	2,5	112	2,5	56	2,5	149
3	75	3	120	3	58	3	158
3,5	79	3,5	126,3	3,5	59	3,5	163
4	80	4	128	4	60	4	165
4,5	81	4,5	129	4,5	61	4,5	166
5	82	5	130	5	61	5	–

Примечание. КЭ — цепь коллектор–эмиттер.

Результаты измерений совпадают с ожидаемыми результатами, полученными схемотехническим моделированием.

Рассмотрим ВАХ биполяроного *p–n–p*-транзистора BC557 в режиме с общим эмиттером. Схема измерения представлена на рисунке 2.49.

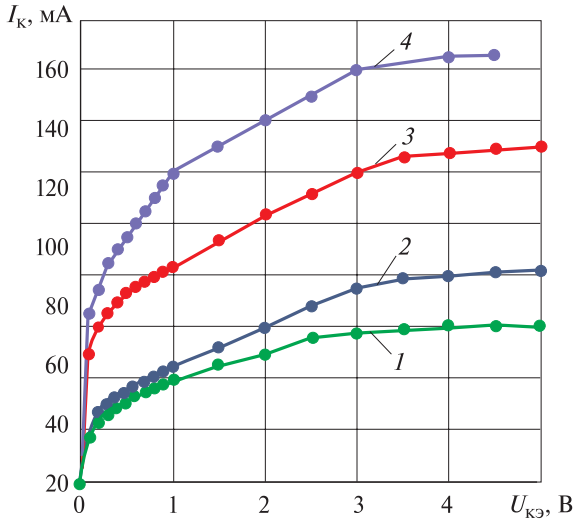


Рис. 2.48. ВАХ транзистора BC548:
1–4 — $I_б$ равно 0,2, 0,5, 1 и 2 мА соответственно

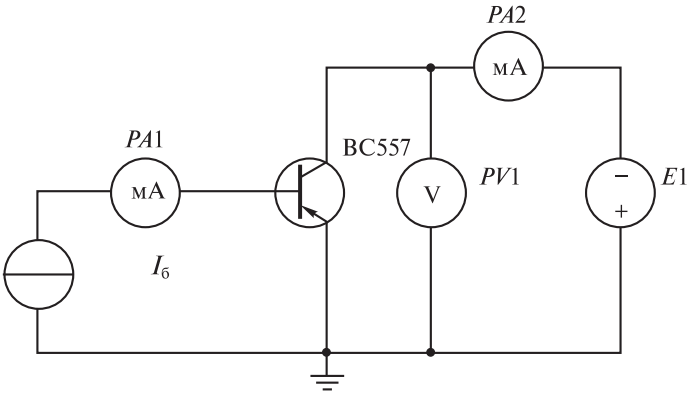


Рис. 2.49. Схема исследования ВАХ биполярного *p–n–p*-транзистора в схеме с общим эмиттером

Результаты измерений внесены в табл. 2.9.

Результаты измерений, внесенные в табл. 2.9, можно обработать с помощью программного обеспечения для графического представления. Обрабатывая таким образом результаты измерения, получаем ВАХ транзистора BC557 (рис. 2.50).

Результаты измерений совпадают с ожидаемыми результатами, полученными схемотехническим моделированием.

Таблица 2.9

Результаты измерений транзистора BC557

$I_б$ = 100 мкА		$I_б$ = 200 мкА		$I_б$ = 300 мкА	
$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мкА	$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мкА	$U_{КЭ}$, В	$I_к$, мкА
0	0	0	0	0	0
–0,5	–8	–0,5	–10	–0,5	–15
–1	–12	–1	–18	–1	–25
–1,5	–13	–1,5	–19,5	–1,5	–28
–2	–13,5	–2	–21	–2	–30
–2,5	–14	–2,5	–21,5	–2,5	–30,5
–3	–14,5	–3	–22	–3	–31
–3,5	–15	–3,5	–22,5	–3,5	–31,5
–4	–15,3	–4	–22,8	–4	–32
–4,5	–15,4	–4,5	–23	–4,5	–32,3
–5	–15,5	–5	–23,1	–5	–32,5

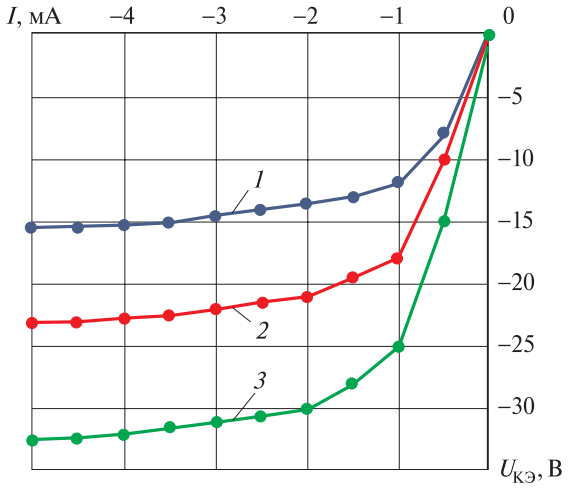


Рис. 2.50. Семество ВАХ транзистора BC557:
1–3 — $I_б$ равно 100, 200 и 300 мкА соответственно

Сигнатурный анализ биполярного транзистора. Тестирование работоспособности транзистора заключается в подаче на базу транзистора управляющего напряжения и дальнейшего наблюдения за изменением проводимости между коллектором и эмиттером.

Для этого необходимо собрать схему подключения к локализатору неисправностей, аналогичную схеме измерения ВАХ биполярного транзистора с ОЭ (рис. 2.51).

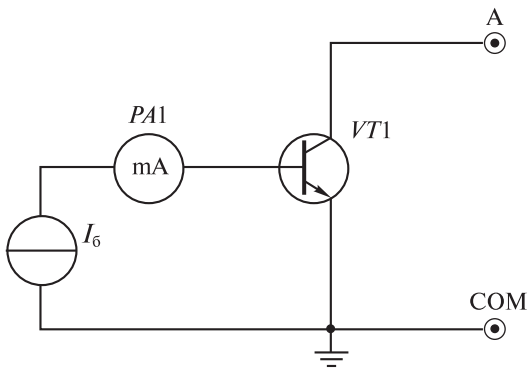


Рис. 2.51. Схема исследования ВАХ биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером методом сигнатурного анализа

В схеме необходимо соединить коллектор с каналом А локализатора неисправностей, эмиттер с каналом COM, а на базу подавать положительный ток от внешнего источника питания.

Результаты измерения ВАХ *n–p–n*-транзистора BC548 на сигнатурном анализаторе представлены на рисунке 2.52.

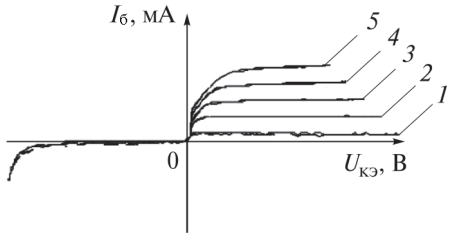


Рис. 2.52. Сигнатуры транзистора BC548 при различных значениях тока базы $I_б$:
1–5 — $I_б$ равно 0,1, 0,2, 0,5, 1 и 2 мА соответственно

При последовательном увеличении подаваемого тока на базу транзистора можно наблюдать увеличение коллекторного тока.

Для измерения ВАХ биполярного *p–n–p*-транзистора BC557 необходимо собрать схему, представленную на рис. 2.53.

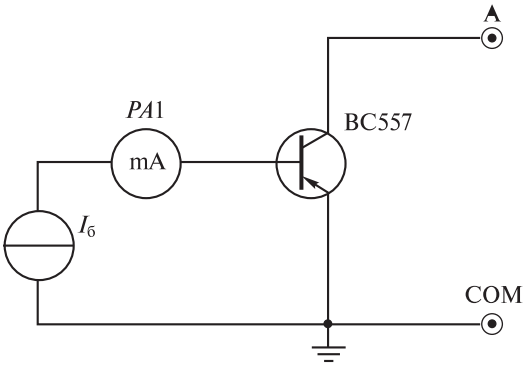


Рис. 2.53. Схема исследования ВАХ биполярного транзистора BC557 в схеме с общим эмиттером методом сигнатурного анализа

В данной схеме необходимо соединить коллектор с каналом A локализатора неисправностей, эмиттер с каналом COM, а на базу подавать отрицательный ток от внешнего источника питания.

Результаты измерения ВАХ *n*–*p*–*n*-транзистора BC548 на сигнатурном анализаторе представлены на рис. 2.54.

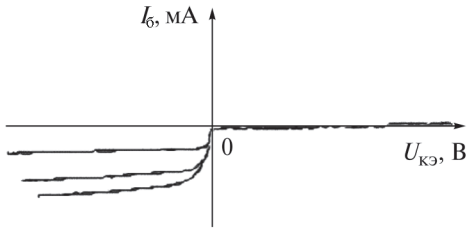


Рис. 2.54. Сигнатуры транзистора BC548 при различном токе базы $I_б$

При последовательном увеличении подаваемого тока на базу транзистора ($I_б$ = 100, 200, 250 мкА) можно наблюдать увеличение коллекторного тока.

Выводы

Согласно результатам измерений ВАХ полупроводниковых приборов, полученных ручным методом и методом аналогового сигнатурного анализа, можно сделать следующие выводы.

1. Время протекания больших токов на пике синусоиды при измерении ВАХ с помощью сигнатурного анализа в отличие от ручного метода измерения ВАХ мало́. Нагревания полупроводникового прибора не происходит, за счет этого можно проводить измерения на сравнительно высоких токах без искажения характеристик вследствие нагрева, а также без риска вывести исследуемый элемент из строя.

2. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых компонентов, измеренные методом сигнатурного анализа и ручным методом, совпадают по форме и соответствуют заявленным в документации полупроводниковых приборов параметрам. Моделированием в программе PSpice были получены характеристики, несколько отличающиеся по форме, однако в целом соответствующие параметрам исследованных приборов. Различия можно объяснить «идеальностью» виртуальных моделей, использованных при моделировании.

3. Программа нормирует центр сигнатуры на центр оси, что не позволяет определить абсолютные значения тока и напряжения, однако сохраняется форма характеристики.

Подробное описание стенда см. в лекции 1.16 «Электрический контроль коммутационнных структур».

Подготовка к лабораторной работе

1. Перед началом работы необходимо проанализировать электрическую схему устройства по варианту задания и сделать необходимые теоретические расчеты согласно рабочей тетради к лабораторной работе.

2. Сформировать комплект элементов из набора модульного электронного конструктора.

3. Электронный модульный конструктор обеспечивает сборку схемы без применения пайки за счет механических креплений. Перед началом сборки схемы согласно варианту задания разместить на рабочем столе антистатический коврик, на нем разместить центральную коммутационную ПП.

4. Изучить особенности коммутационной ПП модульного конструктора, принципы монтажа на ней ЭРЭ, продумать компоновку элементов на коммутационной ПП. Размещение элементов рекомендуется проводить от центра коммутационной ПП к ее периферии, наиболее связанные элементы располагать в центре, менее связанные — по периферии. При компоновке необходимо следить, чтобы масса монтируемых элементов была распределена равномерно по всей коммутационной ПП.

5. Разместить ЭРЭ на коммутационной ПП.

6. Провести коммутацию ЭРЭ соединительными проводниками (перемычками), число которых в наборе ограничено, необходимо заранее продумать компоновку схемы с позиции минимизации внутренних связей.

7. Собрать схемы, приведенные в журнале лабораторных работ.

8. Провести необходимые измерения, указанные в рабочей тетради к лабораторной работе, записать результаты экспериментов, сравнить расчетные и экспериментальные данные и сделать выводы.

Порядок оформления отчета по лабораторной работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующую информацию.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.

2. Электромонтажная схема стенда и ее описание.

3. Краткий конспект теоретической части и расчеты.

4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.
8. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение АСА.
2. Назовите основные сигнатуры.
3. Чем отличается схема включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь?
4. Что такое короткое замыкание?
5. Чем можно объяснить различия в теоретических расчетах и показаниях прибора?
6. Объясните принцип работы анализатора SFL1500.
7. Опишите составляющие стенда.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

3.1. СЕМИНАР № 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ

Цель практической работы: ознакомление с пакетом Altium Designer, изучение базовых настроек для начала работы в программе и дальнейшего комфортного проектирования ПП.

Задачи практической работы:
– анализ функциональных возможностей пакета Altium Designer;
– основные этапы при работе с пакетом Altium Designer;
– управление панелями и настройка среды Altium Designer;
– оформление отчета.

Теоретическая часть

В настоящее время существует множество САПР для проектирования ПП, таких как Altium Designer, gEDA, Kicad, Sprint Layout, DipTrace и др. Altium Designer — комплексная САПР радиоэлектронных средств, разработанная австралийской компанией Altium. В рамках данной работы рассмотрены базовые особенности использования пакета Altium Designer при проектировании ПП.

Концепция совместного проектирования сенсорных систем в ECAD/MCAD-системах отражена на рис. 3.1. Взаимосвязь модулей проектирования является двунаправленной. Это обеспечивает возможность поддержки синхронных технологий проектирования последовательно реализовывать несколько итераций обмена данными, согласуя электронные, механические и другие требования к конструкции.

Основной порядок процесса проектирования в ECAD/MCAD-системах отмечен крупными стрелками. После анализа и формализации исходных данных переходят к формированию проекта проектирования коммутационной структуры, например в пакете Altium Designer.

Объектом исследования является процесс проектирования ПП в САПР Altium Designer. Altium Designer представляет собой пакет сквозного автоматизированного проектирования и разработки ПП, позволяющий создавать проекты электронных ячеек начиная с электрических принципиальных схем

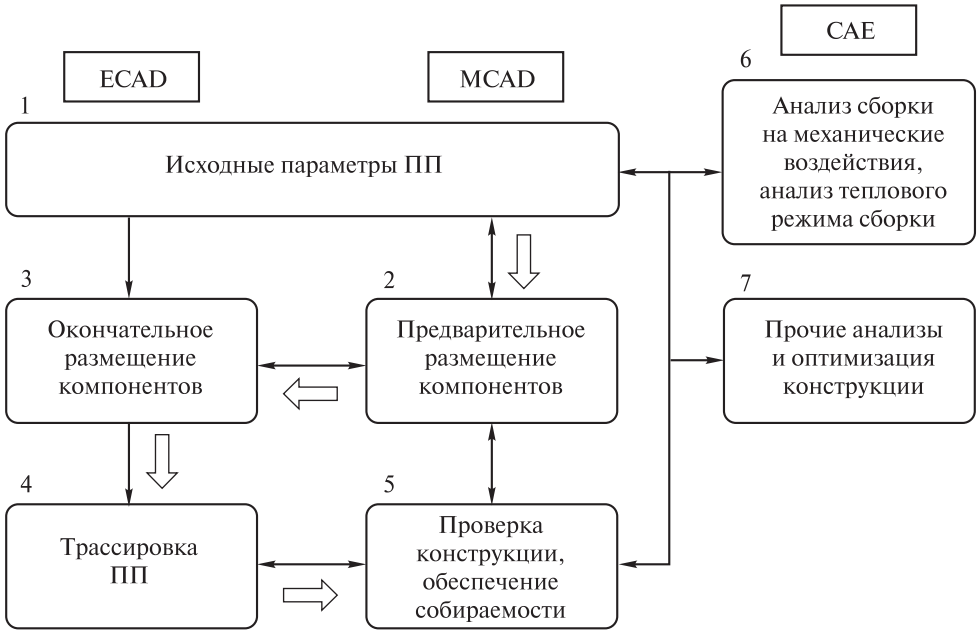


Рис. 3.1. Типовой алгоритм совместного проектирования электронной и механической составляющих изделия в ECAD/MCAD-системах

и заканчивая моделями ПП в трехмерном виде с последующей передачей информации в механические САПР.

Несмотря на наличие отработанных методик по применению пакета Altium Designer, в ряде случаев при проектировании ПП необходимо учитывать отдельные особенности.

Анализ функциональных возможностей пакета Altium Designer

В состав программного пакета AltiumDesigner входят инструменты разработки и редактирования электронных схем, ПП и конструкторских документов.

Altium Designer имеет шесть основных модулей:

– редактор библиотек УГО (Schematic Library);
– редактор библиотек посадочных мест (PCBLibrary);
– редактор электрических принципиальных схем (Schematic);
– редактор ПП (PCB);
– редактор графических документов (Draftsman);
– генератор отчетов (OutputJobFile).

Редактор схем позволяет создавать схемы любой сложности и проводить цифроаналоговое моделирование. В готовых библиотеках Altium Designer содержится множество компонентов, имеющих готовые модели посадочных мест, электрические параметры моделей для моделирования и 3D-модели радиоэлементов. С помощью редактора схем можно создавать отдельную библиотеку УГО, которая используется как в текущем проекте, так и в последующих. Применение шаблонов позволяет выбирать форматы документов,

а возможность редактировать и создавать свои шаблоны обеспечивает выполнение документации согласно ЕСКД.

Редактор ПП содержит средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников. Совместно с настраиваемыми правилами проектирования ПП это позволяет упростить процесс проектирования. Система мониторинга правил проектирования в реальном времени сообщает о нарушениях и ошибках при трассировке на ранних этапах разработки, что позволяет избежать расходов на устранение ошибок. В состав редактора ПП входит библиотека посадочных мест. Посадочные места легко привязываются к элементам из библиотеки УГО. При необходимости можно добавить 3D-модели элементов или создать упрощенную модель внутри программы, определяющую габаритные размеры элемента.

С помощью редактора графических документов можно создавать чертежи ПП, сборочные чертежи, структурные и функциональные схемы с оформлением по ЕСКД. Вся необходимая информация автоматически поступает из ранее разработанных принципиальной схемы и ПП, что упрощает и ускоряет процесс выпуска конструкторской документации (КД).

Генератор отчетов выполняет множество полезных операций: печать КД, генерация Gerber-файлов для производства ПП, экспорт модели ПП в механические САПР, формирование отчетов о моделировании и др.

Основные этапы при работе с пакетом Altium Designer

После успешной установки и запуска Altium Designer открывается основное окно программы (рис. 3.2).

Базовый интерфейс программы состоит из нескольких частей.

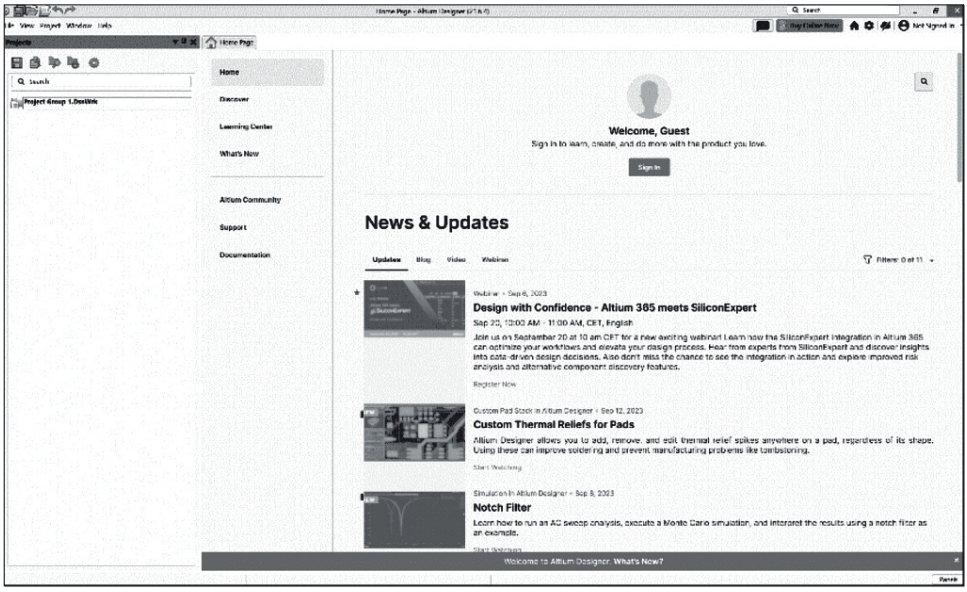
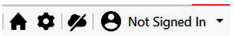


Рис. 3.2. Основное окно программы Altium Designer

В левом верхнем углу располагается логотип компании Altium. Правее логотипа располагается панель быстрого доступа , которая содержит следующие иконки слева направо: «сохранить все», «выбрать файл и открыть», «открыть недавний проект», «отменить», «вернуть».

В центре окна программы располагается рабочее поространство, в котором отображаются открытые документы и ведется вся работа (на рис. 3.2 открыта домашняя страница).

В правом верхнем углу располагается панель 

быстрого доступа к настройкам, серверу и лицензированию.

Слева и справа от рабочего пространства можно открыть панели инструментов с помощью кнопки доступа к панелям Panels, расположенной в правом нижнем углу окна. При нажатии на нее появляется окно выбора панелей, при этом активные панели отмечены «галочкой», как показано на рис. 3.3.

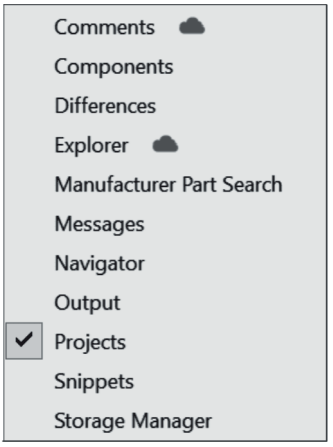


Рис. 3.3. Окно выбора панелей

Управление панелями

Для выбора панели необходимо курсором мыши кликнуть по ней (рис. 3.3).

Все панели в Altium Designer открыты в трех состояниях:

– закрепленная и постоянно видимая на экране — в этом случае панель занимает часть рабочей зоны;

– закрепленная плавающая — открывается при нажатии курсора мышки и закрывается при его отводе. Не занимает рабочую зону, при вызове отображается поверх открытых документов;

– открытая в отдельном окне, не занимает рабочую зону, всегда видна поверх открытых документов.

На основном окне программы (см. рис. 3.2) слева от рабочего пространства закреплены и постоянно видимы панели Projects и Messages, справа закреплена плавающая панель Components.

На закрепленной панели справа от названия расположены три кнопки :

– в виде треугольника — посмотреть все панели, расположенные в данной области окна;

– в виде кнопки — сделать панель постоянно видимой (кнопка в вертикальном положении) или плавающей (кнопка в горизонтальном положении);

– в виде крестика — закрыть все панели, расположенные в данной области окна.

На панелях в отдельных окнах отображаются две кнопки: в виде треугольника и крестика, выполняющие те же функции.

Открытые по одну сторону от рабочего пространства панели также отображаются как вкладки в нижней части панели, что упрощает переключение.

Для открепления ее панели Projects следует левой кнопкой мышки нажать на заголовок панели и переместить курсор. Теперь панель в состоянии отдельного окна. При передвижении панели по экрану в центре экрана появятся стрелки. Если навести курсор на стрелку, панель закрепится в соответствующей части окна программы.

Анализ особенностей настройки среды окружения

Базовые настройки среды Altium Designer представлены на рис. 3.4 в диалоговом меню настроек.

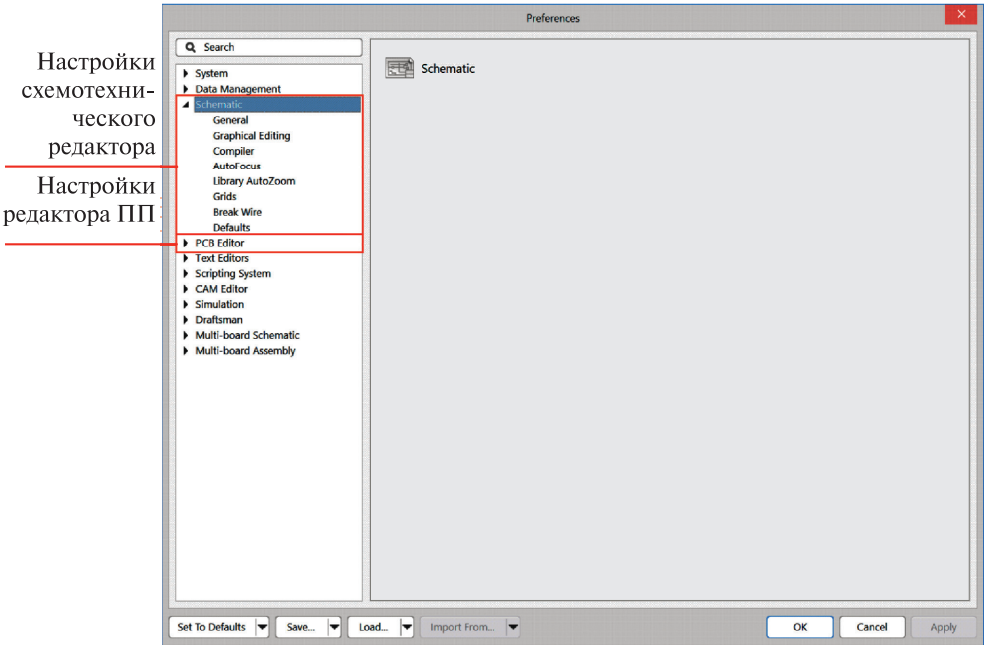


Рис. 3.4. Диалоговое меню настроек

В рассматриваемом примере (проектирование коммутационной структуры для датчика давления) используются настройки двух типов:

– схемотехнического редактора (Schematic);
– редактора ПП (PCB Editor).

В разделе настроек схемотехнического редактора представлены следующие подпункты:

– общие (General);
– графический редактор (Graphical Editing);
– настройка мыши (Mouse Wheel Configuration);
– компилятор (Compiler);
– автофокусировка (Auto Focus);
– масштабирование в библиотеке (Library AutoZoom);
– сетка (Grids);

– разрыв сигнальной линии (Break Wire);
– модули по умолчанию (Default Units);
– примитивы по умолчанию (Default Primitives);
– настройки импорта файлов Orcad (Orcad (tm)).

Наиболее важными для схемотехнического редактора являются подпункты Grids и Default Units. Подпункт Grids настраивает параметры координатной сетки редактора. Подпункт Default Units определяет систему измерения (рис. 3.5) сетки (метрическая или эмпирическая).

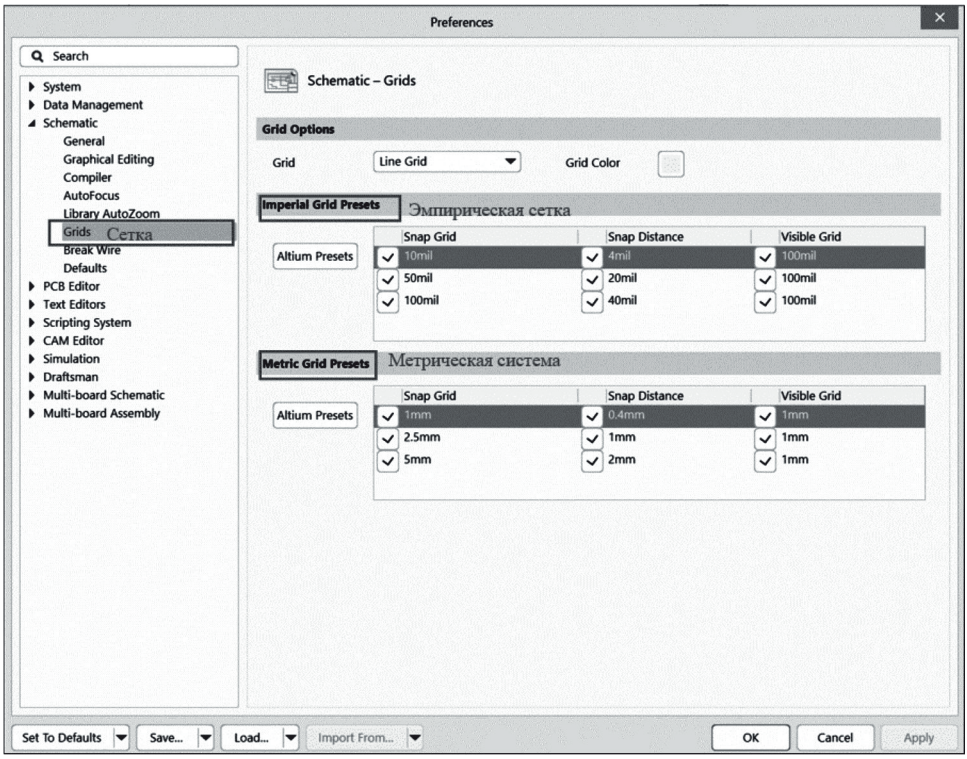


Рис. 3.5. Система измерения сетки

В графическом окне в разделе настроек редактора ПП представлены следующие подпункты (рис. 3.6):

– общие (General);
– экран (Display);
– Board Insight Display;
– Board Insight Color Overrides;
– нарушения экрана (DRC Violations Display);
– интерактивная трассировка (Interactive Routing);
– шрифт (True Type Fonts);
– настройки по умолчанию (Defaults);

– ошибки (Reports);
– цвет слоев (Layer Colors);
– модели (Models).

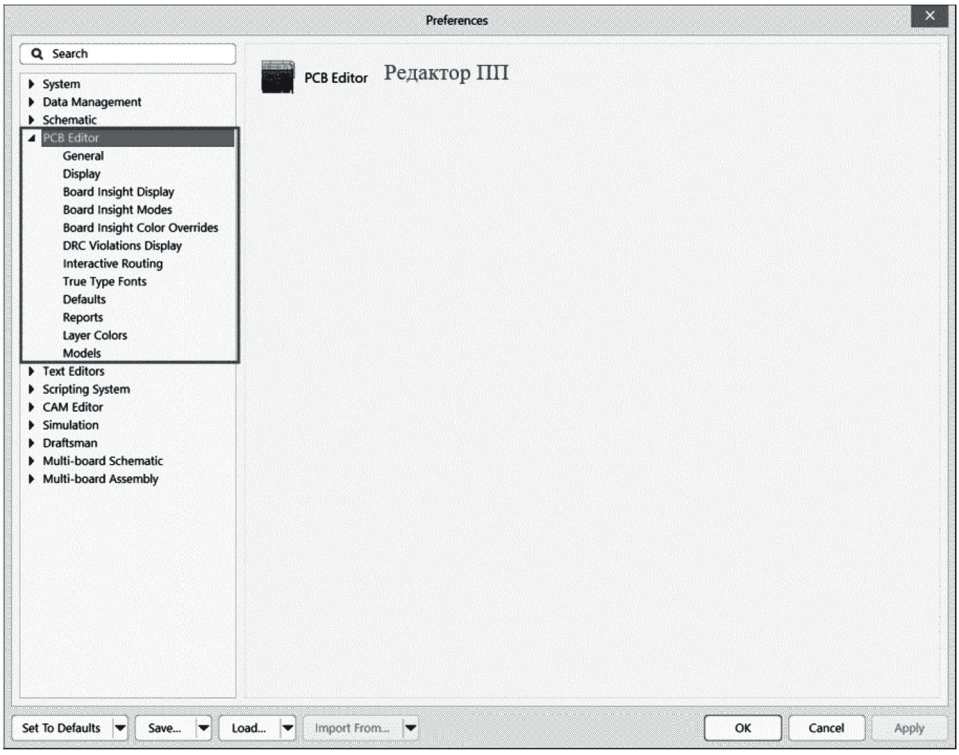


Рис. 3.6. Редактор ПП

Настройки встроенного редактора ПП, представлены в окне настроек среды окружения Altium Designer. Каждая из этих настроек влияет на процесс создания ПП и ее топологии в целом (также устройства в 3D-режиме).

Таким образом среда проектирования обеспечивает реализацию синхронных технологий проектирования и сквозное управление проектом в рамках типового маршрута проектирования.

Одной из важных является взаимная передача данных между электронными и механическими средствами САПР. Так, при использовании САПР Solid Works возможен обмен данными посредством вспомогательного формата IDF (Intermediate Data Format) с использованием модуля Circuit Works (рис. 3.7). В этом случае сначала разрабатывается электрическая принципиальная схема устройства в Altium Designer с оформлением документации по требованиям ЕСКД, включая перечень элементов. После создания электрической принципиальной схемы к схемным элементам привязывают библиотеки посадочных мест с 3D-моделями этих элементов из САПР Solid Works.

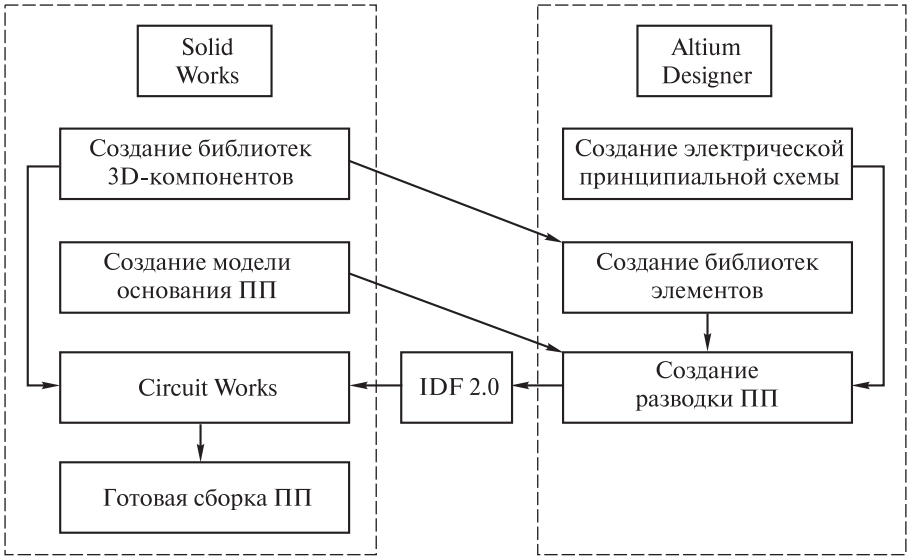


Рис. 3.7. Типовой маршрут проектирования с применением формата IDF

Возможен альтернативный подход, который реализован в специальном модуле расширения для Altium Designer компании Desktop EDA — Altium Modeler for Solid Works (рис. 3.8). На начальном этапе маршрут проектирования совпадает с описанным выше подходом, но уже на стадии создания базы 3D-моделей имеются существенные отличия: не требуется создавать две базы, достаточно созданной для Altium Designer, так как за счет

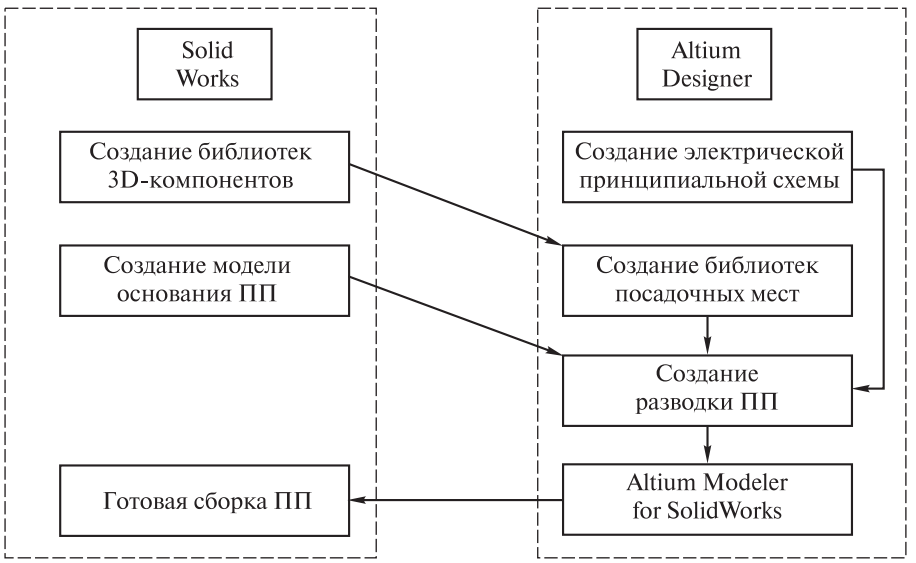


Рис. 3.8. Маршрут проектирования с прямой трансляцией модели в Solid Works

возможностей модуля Altium Modeler эта база становится универсальной. Altium Modeler не использует форматы-посредники, такие как IDF. Модуль транслирует модель ПП напрямую в Solid Works, генерируя ее сборку.

Также Altium Modeler позволяет обновлять созданную им сборку ПП в модуле Solid Works, что удобно при модификации элементов и самой коммутационной структуры. При этом обеспечивается иерархическая параметризация модели и изменения будут транслированы в родительскую сборку. Данный подход полностью отвечает требованиям сквозного проектирования в части ускорения, повышения удобства параллельной работы в различных САПР, а также с точки зрения сокращения ошибок, связанных с необходимостью поддержания двух библиотек САПР с одинаковой функциональностью.

Порядок выполнения практической работы

Настройка среды Altium Designer.

Для входа в настройки программы Altium Designer необходимо нажать на кнопку Setup System Preferences в виде шестеренки в правом верхнем окне. Рассмотрим некоторые типовые настройки.

1. System General Startup:

– Reopen Last Work Space — открывает и размещает все элементы интерфейса на те места, где они располагались перед закрытием программы;

– Open Home Page on Start — автоматически открывает Homepage при запуске программы;

– Show Startup Screen — показывает экран загрузки при запуске программы.

2. System General General:

– Monitor clip board content with in this application only — несовместимые данные, скопированные в буфер обмена, не будут вставлены в программное обеспечение;

– Use Left/Right Selection — при выделении области слева направо выделяются только объекты, полностью попавшие в область выделения, и справа налево — все объекты, которых коснулась область выделения.

3. System General Localization:

– Use localizedresource — локализованные ресурсы для программного обеспечения. Элементы будут переведены в соответствии с языком, на котором установлено программное обеспечение компьютера.

4. System View Desktop:

– Restore open documents — позволяет открывать документы в рабочей области, когда программное обеспечение запускается в соответствии с их состоянием в предыдущем сеансе. Если эта настройка отключена, то запускается пустая рабочая область.

5. System View UITheme:

– Current — выбор темы пользовательского интерфейса: Altium Dark Grey (темная) и Altium Light Grey (светлая).

6. Data Management File based Libraries:

– File based Libraries — позволяет установить дополнительные библиотеки и управлять установленными.

7. Schematic General Units:

– Units — выбор величин по умолчанию в редакторе схем.

8. Schematic Compiler Auto Junctions:

– Display On Wires — при разветвлении проводника на два и более автоматически устанавливает точку на месте соединения (рекомендуемый размер: medium).

9. Schematic Grid:

– Grid Options — определяет, как представлять сетку (в виде линий или точек) и цвет отображения;

– Metric Grid Presets — значения шага сетки (по умолчанию 1; 2,5 и 5 мм). Можно добавить другие значения, например удобно добавить 0,5 мм.

10. Schematic Defaults:

– Defaults Primitives — задает параметры элементов по умолчанию.

11. PCB Editor General Editing Options:

– Online DRC — проверка правил разводки в режиме реального времени.

Для того чтобы не настраивать Altium после смены ПК, настройки можно экспортировать. Для этого в окне настроек в нижнем левом углу следует нажать на кнопку Save, далее выбрать место сохранения и имя файла настроек. Для импорта настроек необходимо нажать на кнопку Load и выбрать файл настроек.

Файлы программы Altium Designer

Файлы имеют несколько различных расширений (рис. 3.9), по которым можно определить содержание файла.

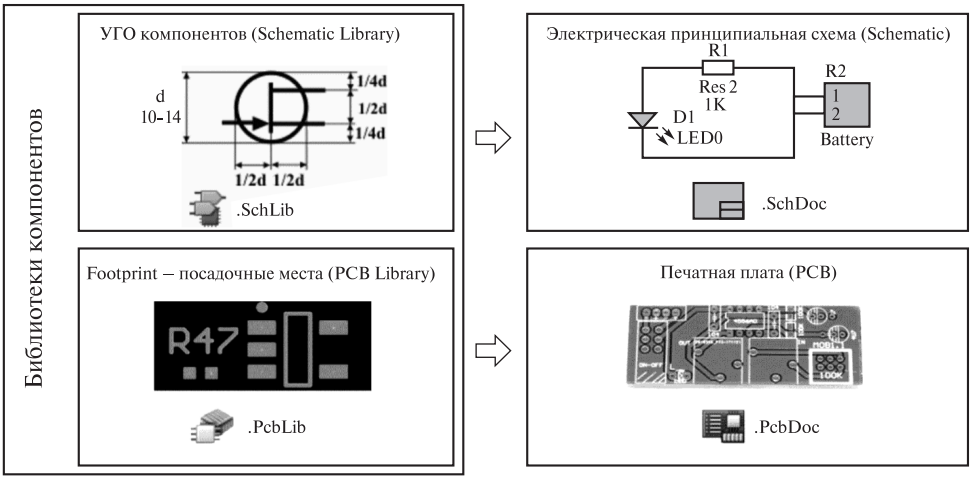


Рис. 3.9. Расширения основных типов файлов в среде Altium Designer

Файлы библиотек компонентов:

– условно графических обозначений компонентов с расширением SchLib;

– посадочных мест (footprint) PcbLib;

– проектов интегрированных библиотек IntLib. Если открыть такой файл, он будет содержать в своей структуре два файла: один файл УГО-компонентов, второй — файл посадочных мест. Для работы с проектом ПП используются интегрированные библиотеки.

Файлы проекта ПП:

– электрической принципиальной схемы (schematic) SchDoc;

– ПП (PCB — printed circuit board) PcbDoc;

– чертежей PCBDwf и др.

Все эти файлы объединены в один проект ПП с расширением PrjPcb. Каждый проект необходимо сохранять в отдельную папку. Открывать следует файл проекта, а при передаче проекта другим пользователям — архивировать папку проекта и отправлять ее полностью.

Создание проекта в среде Altium Designer

Предварительно следует создать файл проекта, используя команду File New Project, как показано на рис. 3.10. Открывается окно создания проекта, в котором необходимо задать расположение и имя проекта (рис. 3.11). Назовем проект Project 1.

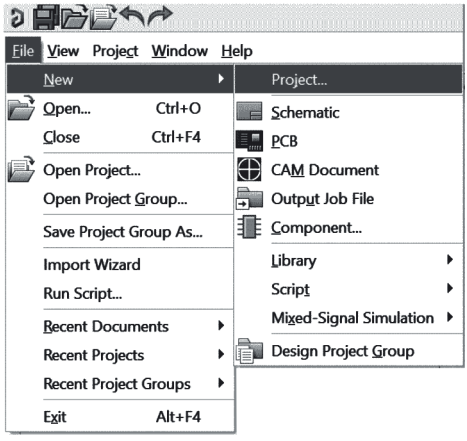


Рис. 3.10. Создание нового проекта

В панели Projects можно увидеть название и структуру проекта: схему и ПП. Напротив каждого документа имеется иконка листа. Если она белая, значит файл открыт и сохранен, если красная — файл имеет несохраненные изменения. Сохранить файлы можно нажатием сочетания клавиш Shift+S или иконки двойной дискеты. Для новых созданных файлов при сохранении необходимо задать название, храниться они будут в папке проекта.

Для добавления файлов в проект кликнуть по файлу проекта правой кнопкой мыши и воспользоваться командами Add Newto Project.

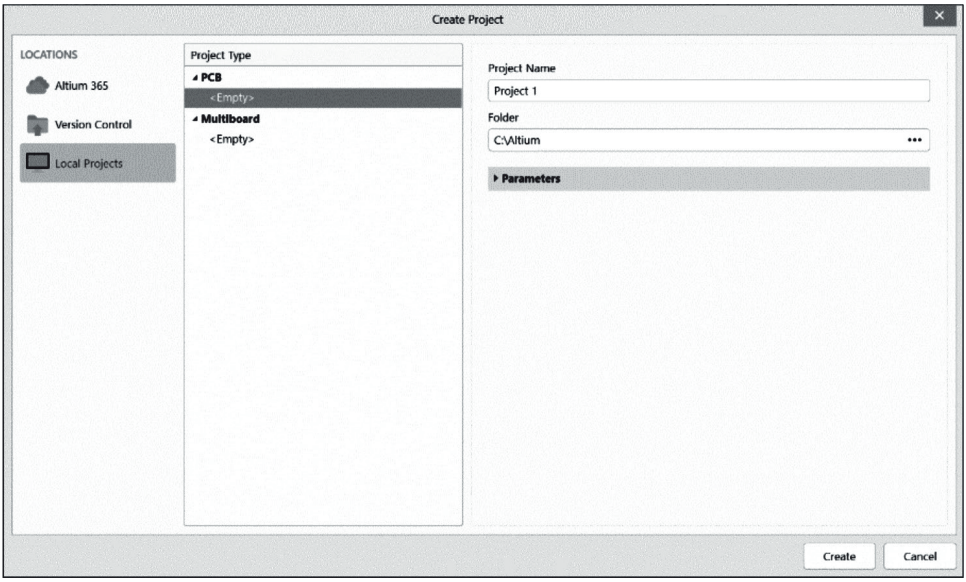


Рис. 3.11. Окно создания проекта

Завершение практической работы

На основании пройденного материала следует выполнить настройки среды Altium Designer для комфортной работы. Необходимо сохранять настройки так, чтобы в дальнейшем при переустановке программы или смене ПК их можно было быстро восстановить.

Порядок оформления отчета по семинару

1. Создайте проект в соответствии с материалом семинара.
2. Назовите проект в формате «Фамилия_Группа».
3. В свободной форме предоставить скриншоты этапов, соответствующих порядку выполнения работы.

Контрольные вопросы и задания

1. Что входит в предварительную настройку среды Altium Designer?
2. Перечислите виды файлов программы Altium Designer. Какие у них расширения? Возможно ли интегрировать в среду Altium Designer файлы, созданные в других САПР?
3. Что такое интегрированная библиотека?
4. Какие файлы генерируют для отправки проекта ПП на производство?

3.2. СЕМИНАР № 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОМПОНЕНТОВ

Цель практической работы: ознакомление с пакетом Altium Designer, изучение базовых настроек для начала работы в программе и дальнейшего комфортного проектирования ПП.

Задачи практической работы:

– разработка библиотеки Schematic Library;

– разработка библиотеки Integrated Library с привязанными PCB Library и Schematic Library.

Теоретическая часть

Создание библиотеки компонентов является ответственным этапом проектирования. Актуальность данного этапа повышается в условиях импортозамещения и создания допустимых отраслевых и корпоративных баз данных допущенной к использованию элементной базы. В большинстве сложных устройств насчитывается от 1000 до 1 000 000 элементов. Причем каждые из них имеют собственные параметры, форму, конструкции и обозначения. Учет и обработка информации по элементной базе в едином формате значительно сокращают общие сроки проектирования. Правильное представление компонента в проекте во многом определяет характер автоматизации технологического процесса сборки узлов.

Для упрощения процесса проектирования вводится понятие единой базы компонентов (библиотеки компонентов), которая представлена в среде проектирования ПП Altium Designer в виде самостоятельного модуля. Данный подход сокращает время проектирования сложных коммутационных структур. Причем библиотека компонентов может добавляться в базу данных продукта Altium Designer через специальные модули, предназначенные для интегрирования большого числа библиотек компонентов, тем самым объединяя отдельные проекты в единую информационную систему.

В большинстве сред проектирования коммутационных структур данная технология отсутствует, что значительно увеличивает трудоемкость проектирования и комплексное сопровождение проектов.

Библиотека компонентов в среде Altium Designer играет важную роль в процессе проектирования. Как средство разработки принципиальных схем и ПП, она позволяет создавать схемы от начальной до конечной стадии с помощью компонентов, находящихся непосредственно в библиотеке. При этом

библиотека заранее создается для используемого технологического процесса. Основная задача формирования библиотеки в рамках единого корпоративного маршрута проектирования — создание однотипных (по номеклатуре), взаимозаменяемых решений в рамках корпорации (отрасли), создание единого стиля (культуры) проектирования.

После создания библиотеки посадочных мест и компонентов они соединяются в единую интегрированную библиотеку, которая обеспечивает синхронизацию выводов УГО компонента с КП посадочного места с помощью опции Designator.

Данный прием удобен, так как не требуется постоянного прорисовывания схемы с помощью стандартных графических инструментов и проектирования посадочных мест на ПП устройств.

Маршрут создания библиотеки компонентов

Создание библиотеки компонентов предшествует непосредственной разработки устройства. Для этого выполняется анализ доступных (или допустимых) компонентов, формируются отраслевые и корпоративные регламенты и перечни элементной базы, проводится обоснование выбора элементной базы (рис. 3.12).

Окно создания файла библиотеки компонентов, а также ее связь с библиотекой посадочных мест, которые объединяются в единую интегрированную библиотеку, приведена на рис. 3.12.

Основные стадии маршрута создания библиотеки компонентов (Schematic Library):

1) провести анализ и обоснование выбора элементной базы;

2) выполнить группировку однотипных компонентов;

3) создать новый файл библиотеки компонентов (File New Library Shematic Library) (рис. 3.13);

4) добавить новый компонент (Add);

5) создать компонент (УГО, параметры (не обязательно), наименование и т. д.);

6) синхронизировать компонент с посадочным местом;

7) сохранить библиотеку;

8) повторить пункты 2–4 для нового компонента;

9) сохранить файл библиотеки (Save As).

Рассмотрим особенности создания библиотеки компонентов на простом примере. Одним из широко используемых элементов в контуре обработки данных с датчиков являются усилители различных классов. В качестве примера рассмотрим схему усилителя с выходом на три спектра (высокие, средние и низкие частоты), представленного на рис. 3.14. Следует отметить, что проектирование принципиальной схемы следует осуществлять после анализа доступной элементной базы и при наличии в библиотеки компонентов, а не наоборот, постоянно вносить в библиотеке новые элементы. Добавление новых элементов в библиотеку возможно только в случае крайней необходимости, когда использование имеющихся невозможно.

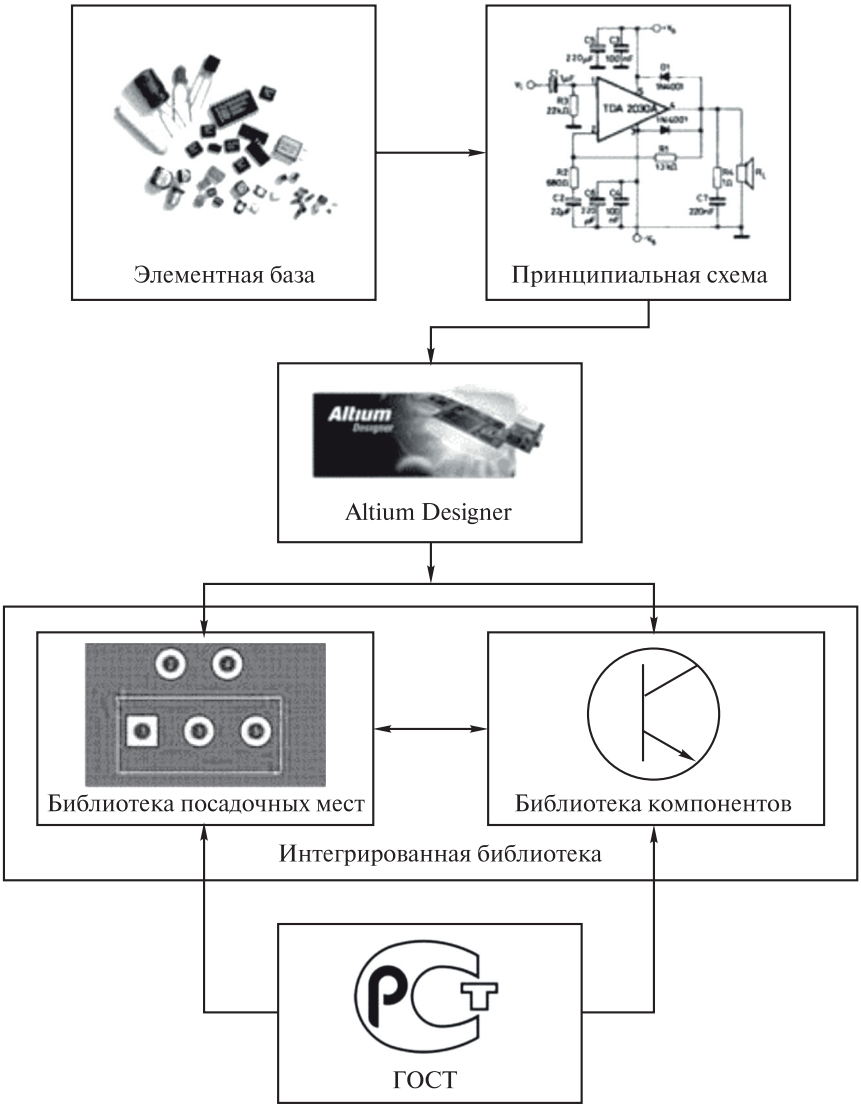


Рис. 3.12. Маршрут создания библиотеки компонентов

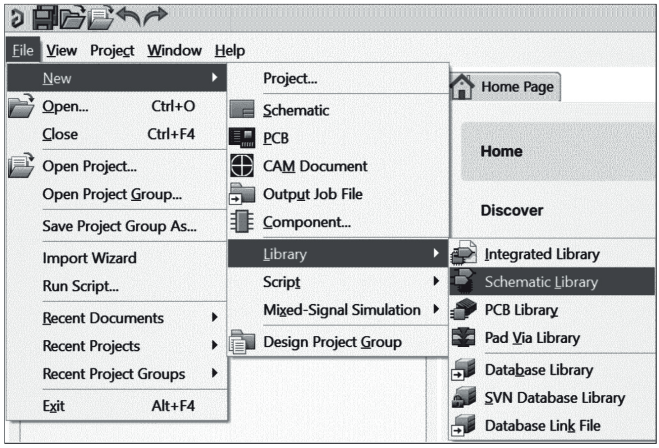


Рис. 3.13. Окно создания файла библиотеки компонентов

В схеме содержится 60 компонентов, из которых можно выделить семь групп. Составим для них библиотеки.

Группы однотипных компонентов:

– резисторы;
– биполярные конденсаторы;
– однополярные конденсаторы;
– диоды;
– усилители;
– транзисторы;
– разъемы.

В качестве примера рассмотрим добавление в состав библиотеки транзистора. Перед созданием УГО элемента необходимо проанализировать соответствующий ГОСТ, в данном случае ГОСТ 2.730–73. В нем представлен УГО полупроводникового прибора — транзистора, описано правило построения обозначения: размеры УГО и формат изображения (рис. 3.15).

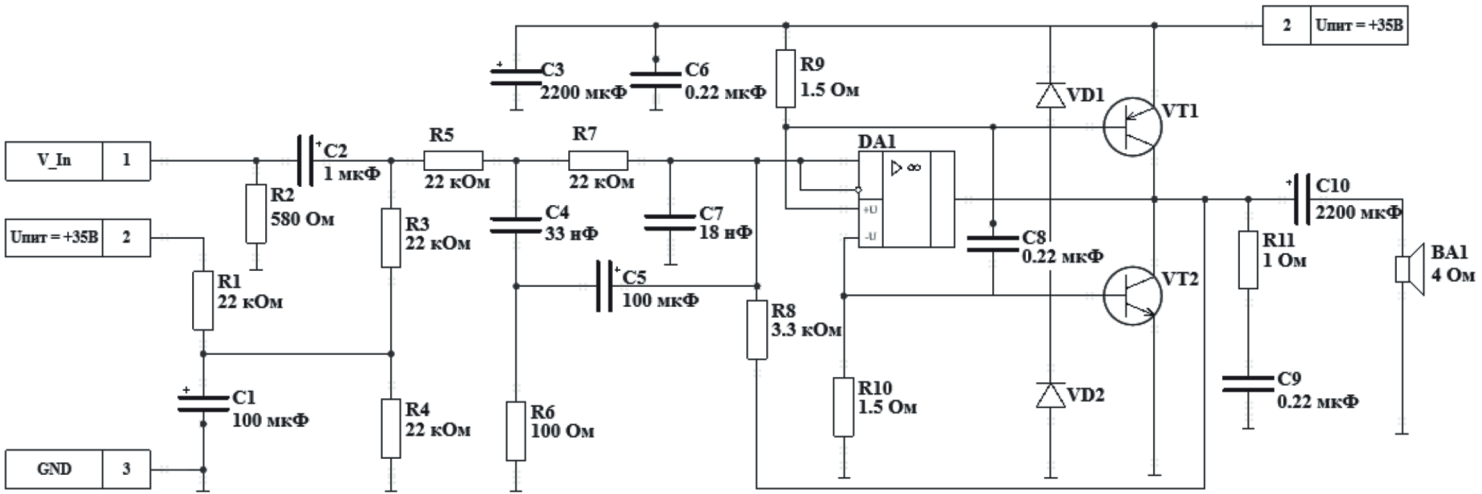


Рис. 3.14. Принципиальная электрическая схема усилителя

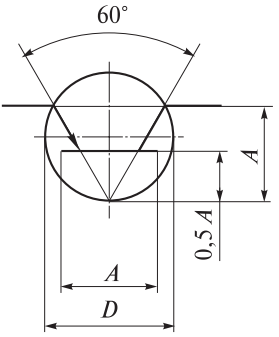
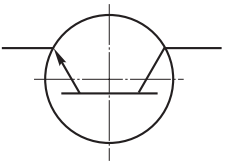
Наименование	Обозначение	Размеры, мм
9. Транзистор: а) *p–n–p*-типа		D 12 14 A^* 9 11 a 2,5 3,5 b 3 4 $^*A = \frac{3}{4}D$
б) *n–p–n*-типа		

Рис. 3.15. Обозначение и размеры транзистора (в соответствии с ГОСТ 2.730–73)

После анализа ГОСТа переходим к рассмотрению процесса создания библиотеки компонентов в среде Altium Designer.

Сначала выберем шаг координатной сетки схемотехнического редактора. Зададим его равным 0,5 мм. Для этого вызовем через панель быстрого доступа опцию настройки сетки (Snap Grid) (рис. 3.16, 3.17).

После настройки шага сетки создается УГО элемента, соответствующего ГОСТу. Для этого правой кнопкой мыши или с помощью горячей клавиши выбираем необходимый элемент (в данном случае это линия). Затем необходимо установить выводы для графического изображения компонента, которые далее будут играть важную роль. Для этого с помощью правой кнопки мыши (или с помощью горячих клавиш P + L) выбрать элемент — вывод (Pin). Процесс создания вывода представлен на рис. 3.18.

Перед тем как поставить выводы на соответствующие места, необходимо задать их параметры. Окно для задания параметров выводов представлено на рис. 3.19.

Основные параметры вывода представлены ниже.

Объединение параметров Location — графическая настройка:

– Location — координаты расположения;

– Rotation — угол поворота.

Объединение параметров Properties:

– Designator — уникальный указатель;

– Name— имя;

– ElectricalType — электрический тип;

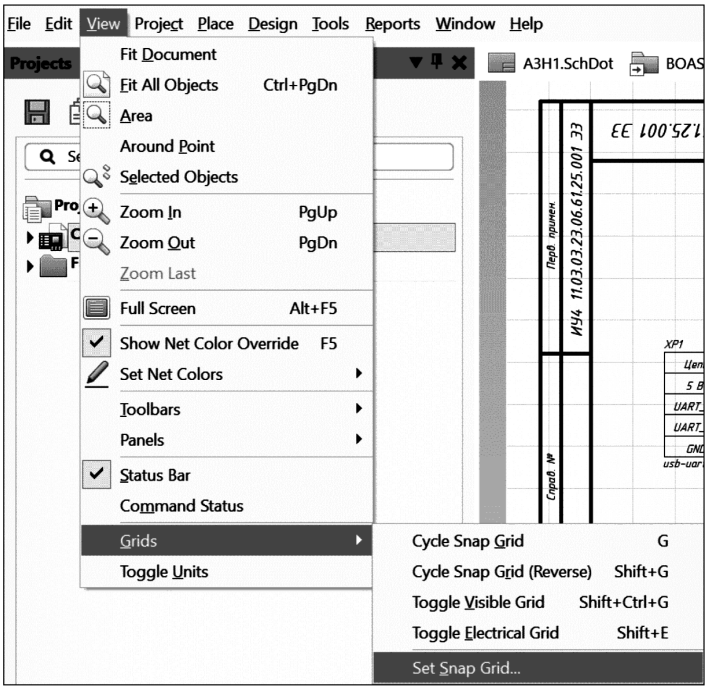


Рис. 3.16. Окно вызова опции настройки сетки

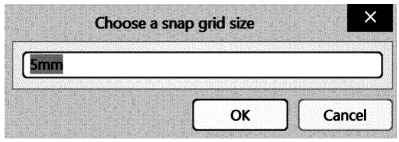


Рис. 3.17. Панель настройки шага сетки

– Description — описание;

– Pin Package Length — расстояние от места монтажа вывода до корпуса компонента;

– Propagation Delay — задержка распространения сигнала вдоль тела контакта;

– предварительный вид;

– Pin Length — длина пина.

Объединение параметров Symbols — параметры символьного обозначения вывода.

Разместив все выводы на соответствующие позиции в соответствии с ГОСТом, получим готовое УГО компонента. Следующим шагом является задание наименования компонента в библиотеке и задание параметров

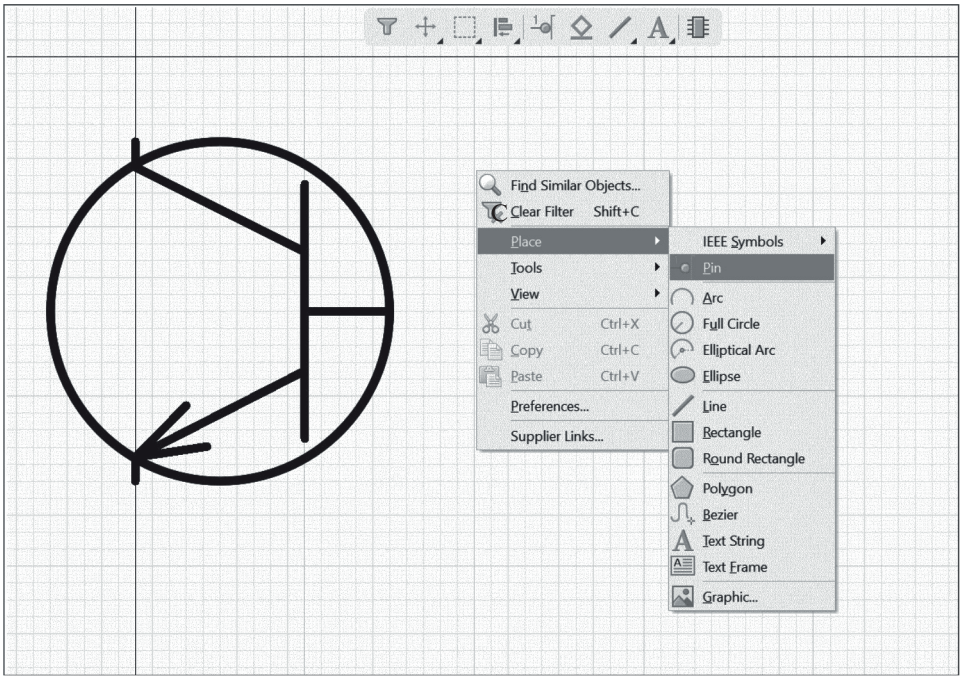


Рис. 3.18. Окно создания вывода:
УГО без выводов, выбор элемента «Вывод» (Pin) из инструментария

(не обязательно). Для этого нажмем левой кнопкой мышки два раза на компонент, который отображается в списке библиотеки (рис. 3.19).

После вызова свойств компонента необходимо переименовать его и задать параметры (рис. 3.20).

В поле обозначения (Default Designator) написано «VT?» (рис. 3.21). Это означает, что компонент в схемотехническом редакторе будет обозначен как «VT?», где знак вопроса «?» при автоматической нумерации будет заменен на цифру, соответствующую порядку нумерации согласно установленным правилам. В панели синхронизации (связи) библиотек посадочных мест и компонентов необходимо добавить посадочное место для данного компонента, чтобы при генерации файла PCB получить посадочные места, маркировку и другие элементы, соответствующие элементам схемы.

После этого необходимо сохранить компонент библиотеки.

Выполнив те же самые действия с другими компонентам схемы, получим готовую библиотеку для данного проекта. Данную библиотеку можно будет в дальнейшем использовать и в других проектах, также можно перемещать элементы между библиотеками.

После того как созданы все необходимые компоненты, их требуется сопоставить с посадочными местами, хранящимися в библиотеке посадочных мест (см. рис. 3.21).

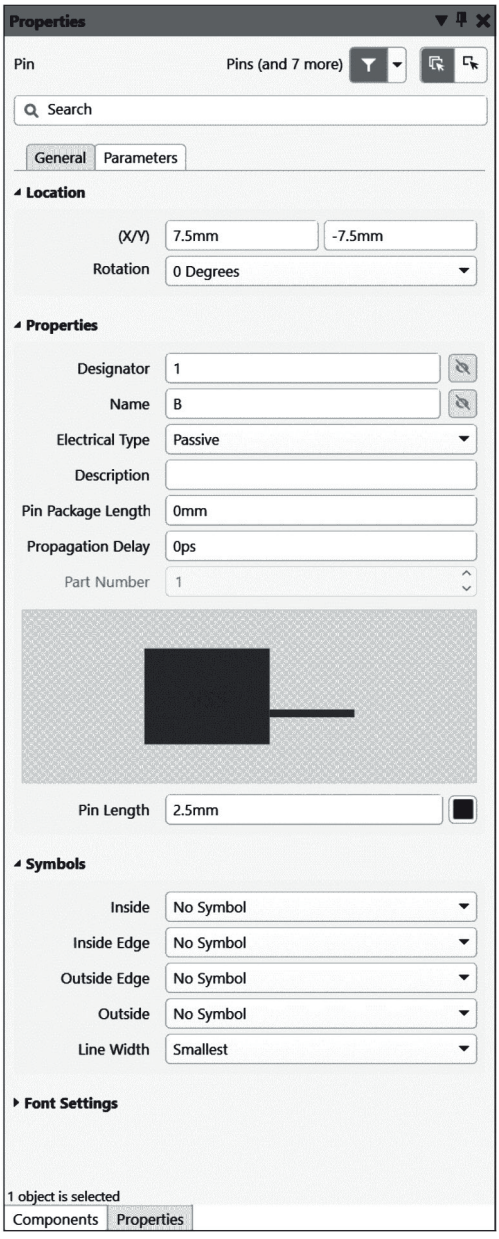


Рис. 3.19. Окно для задания параметров вывода

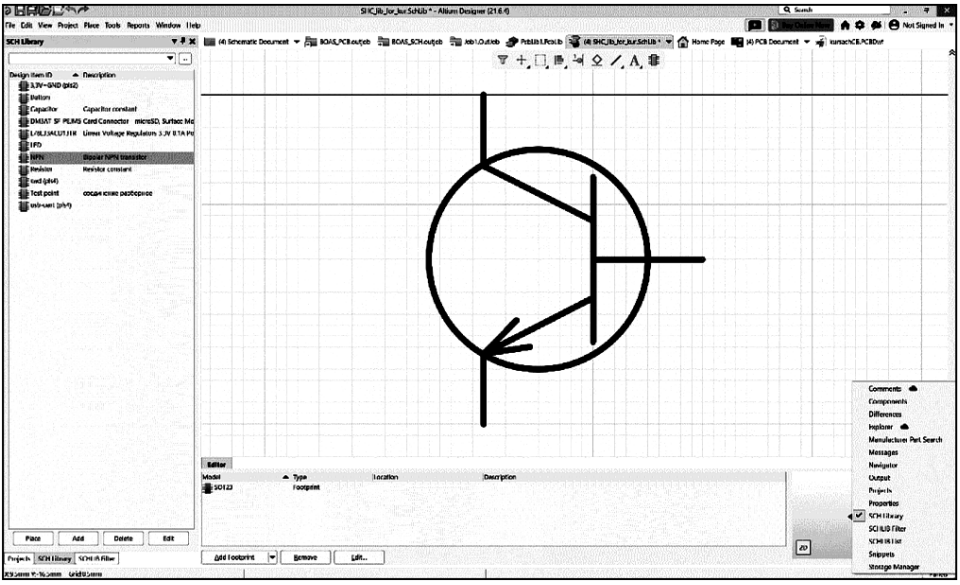


Рис. 3.20. Список компонентов библиотеки

Для этого следует выполнить ряд действий.

1. В меню настроек компонентов, в разделе параметров (Parameters) нажать клавишу Add... с выпадающим списком и выбрать в нем тип модели Footprint (посадочное место) (рис. 3.22).

2. Далее в окне PCB Model (рис. 3.23) с помощью клавиши Browse... вызвать окно Browse Libraries (рис. 3.24).

3. В окне Browse Libraries выбрать необходимую библиотеку (она должна быть открыта в менеджере проектов Projects) и найти посадочное место, которое следует привязать (рис. 3.25).

4. Нажать клавишу «OK», чтобы установить выбранное посадочное место (рис. 3.26).

Выделенный вывод в редакторе соответствует выводу, отмеченному в окне предварительного просмотра посадочного места (рис. 3.27). Также этот вывод необходимо выделить в панели выводов (рис. 3.28).

Далее следует сохранить файл библиотеки (File — SaveAs — «Имя библиотеки»).

После того как связаны посадочные места и компоненты, необходимо создать файл интегрированной библиотеки (Integrated Library), которая должна включать два файла (рис. 3.29):

– файл библиотеки компонентов (Schematic Library);

– файл библиотеки посадочных мест (PCB Library).

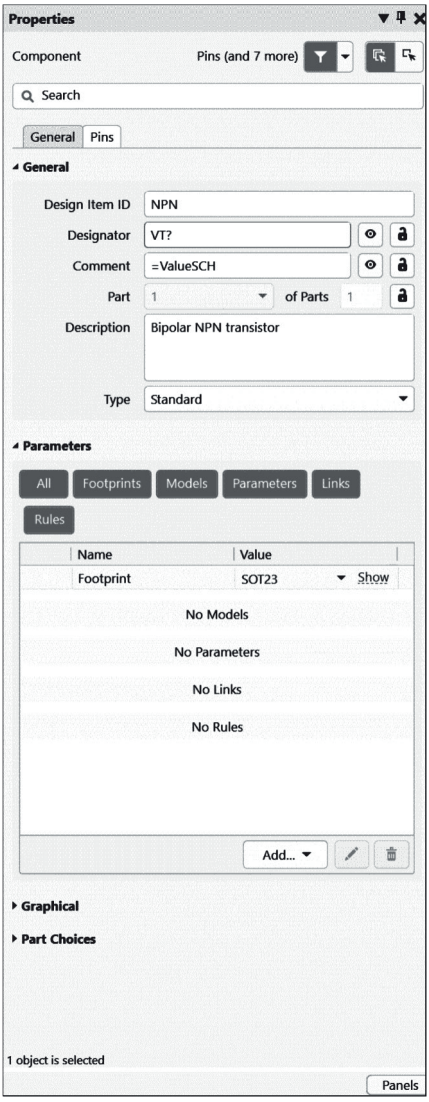


Рис. 3.21. Панель настройки компонента библиотеки

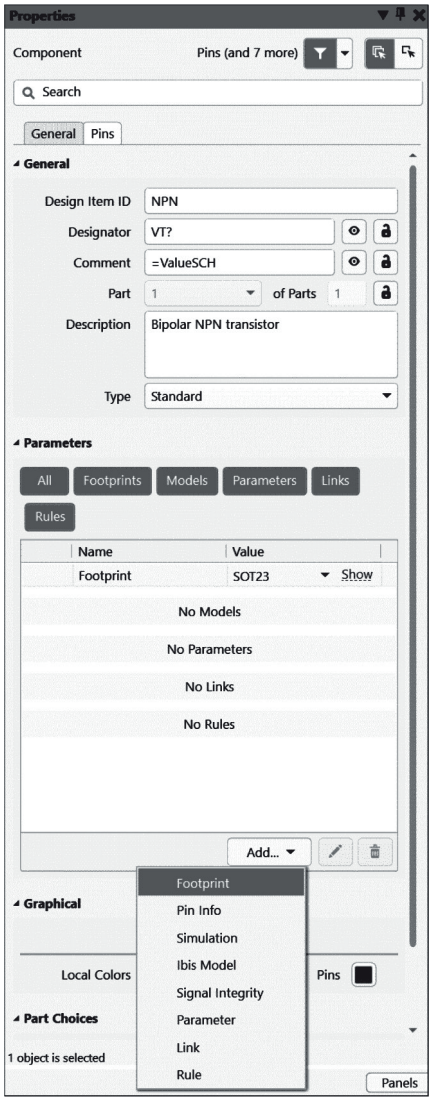


Рис. 3.22. Панель настройки компонента с вызовом окна PCB Model

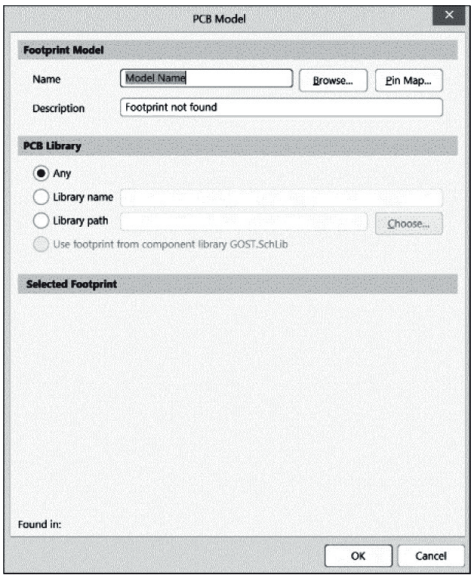


Рис. 3.23. Окно PCB Model без введенной информации о посадочном месте

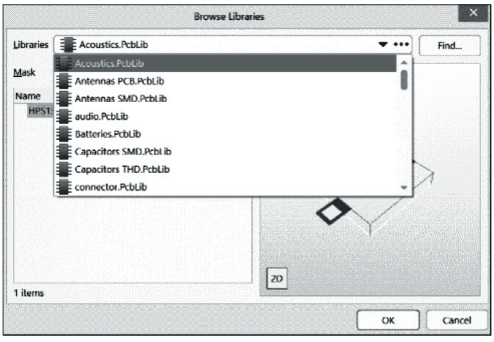


Рис. 3.24. Окно Browse Libraries

Два файла библиотеки импортируются в интегрированную библиотеку менеджера проектов. После создания библиотеки Integrated Library появится поле библиотеки в менеджере проектов (Projects) (рис. 3.30). Далее, перетаскивая с помощью мыши файлы других библиотек (Schematic и PCB Library), вставляют их в поле ранее созданной интегрированной библиотеки (рис. 3.31).

После этого правой кнопкой мыши нажимаем на вкладку интегрированной библиотеки и выбираем функцию — Compile Integrated Library «Название библиотеки».pkg. (рис. 3.32). Эта процедура позволяет сохранить обе библиотеки в одном файле и сохраняет привязку посадочных мест и компонентов для дальнейшего использования.

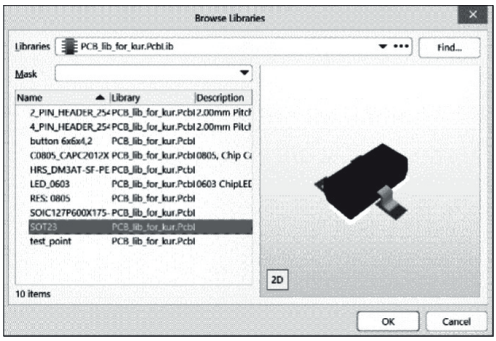


Рис. 3.25. Окно Browse Libraries с прикрепленным посадочным местом

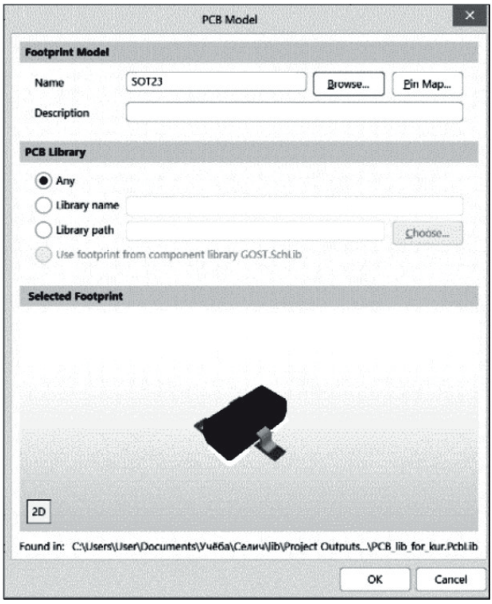


Рис. 3.26. Окно PCB Model с прикрепленным посадочным местом

Завершение практической работы

На основании пройденного материала создайте библиотеки компонентов и представьте отчет о выполненной работе.

Порядок оформления отчета по семинару

1. Создать библиотеки компонентов, согласно выданной схеме.
2. Сохранить файл Integrated Library с привязанными библиотеками Schematic Library и PCB Library.
3. Представить преподавателю выполнение пунктов 1 и 2 на компьютере.

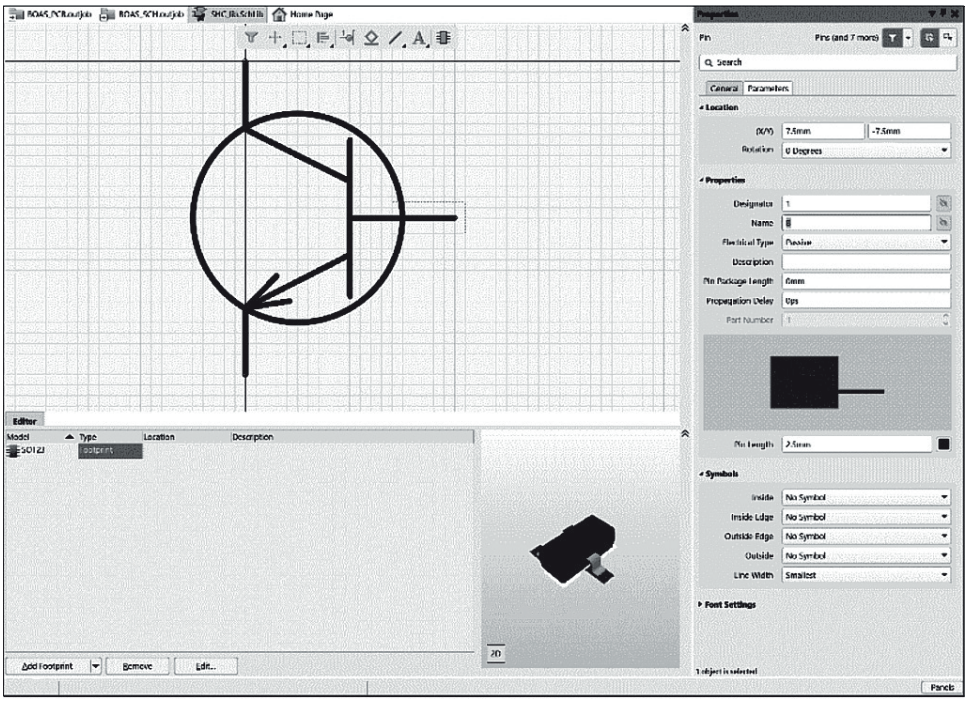


Рис. 3.27. Компонент с посадочным местом и свойства выделенного пина

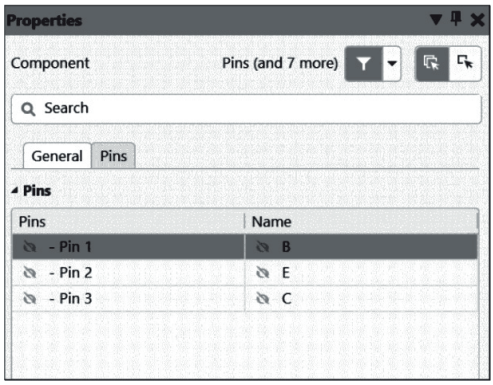


Рис. 3.28. Панель с отображением связи Pin с посадочным местом

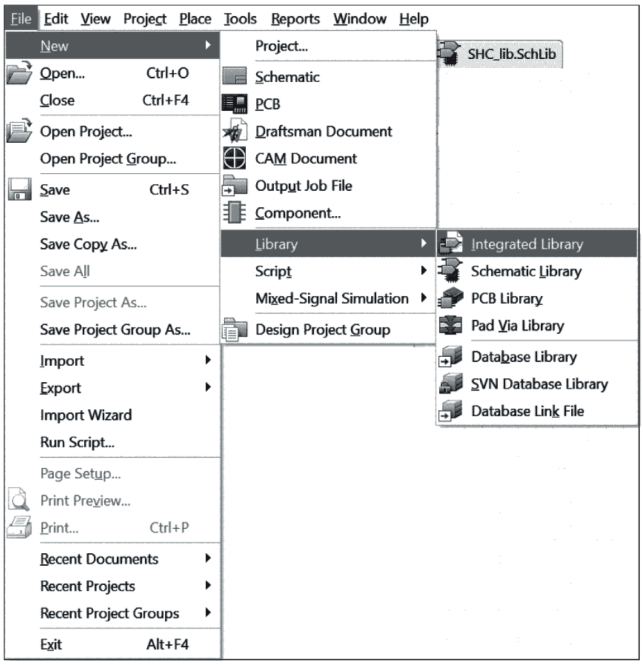


Рис. 3.29. Окно для создания файла интегрированной библиотеки

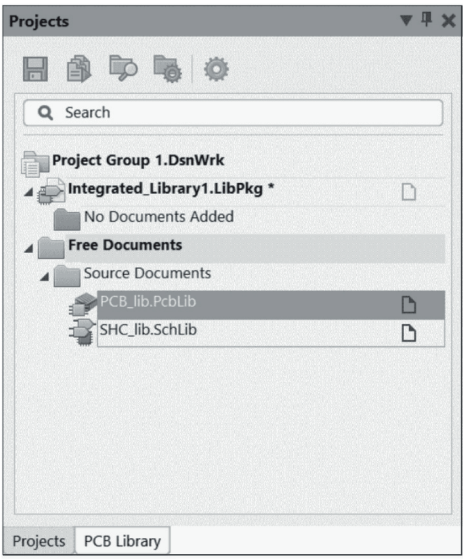


Рис. 3.30. Schematic Library и PCB Library до привязкик Integrated Library

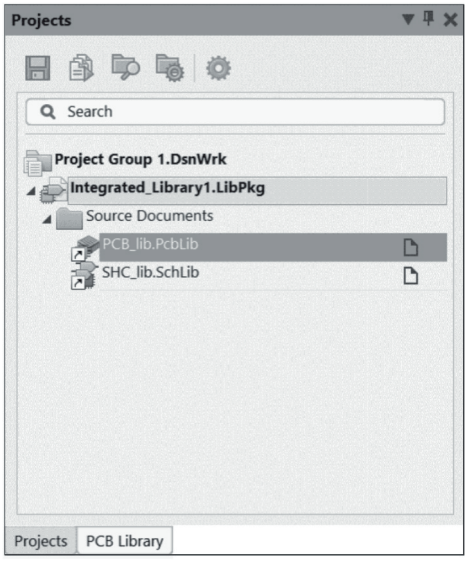


Рис. 3.31. Schematic Library и PCB Library привязаны к Integrated Library

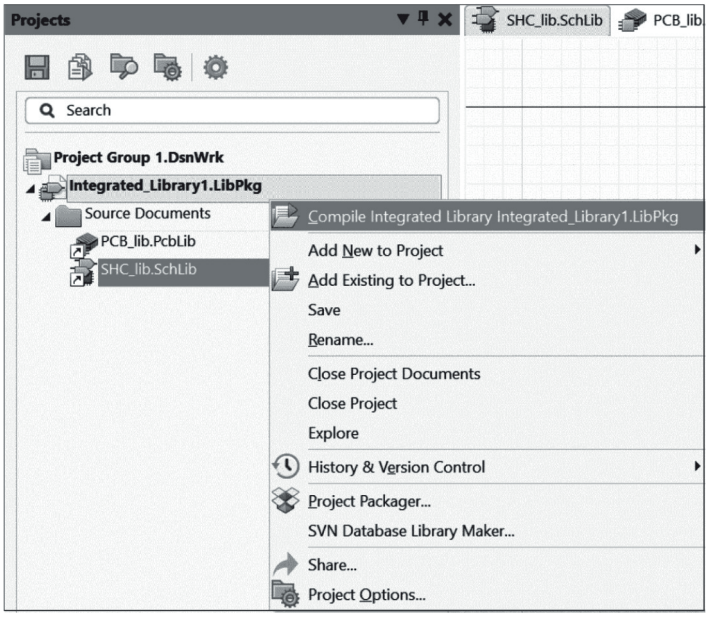


Рис. 3.32. Compile Integrated Library

Контрольные вопросы и задания

1. Как представлена библиотека компонентов в среде Altium Designer?
2. Что является объектом исследования в САПР Altium Designer?
3. Опишите маршрут создания библиотеки компонентов.
4. Перечислите группы однотипных компонентов, на которые они были разделены при работе с выданным заданием.
5. Что означает «VT?» в строке Default Designator? Для чего нужен знак вопроса?
6. Какой шаг следует сделать после того, как созданы все необходимые компоненты?

3.3. СЕМИНАР № 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ

Цель практической работы: ознакомление с этапом проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer — разработка библиотеки посадочных мест.

Задачи практической работы:
– разработка библиотеки pcb library;
– изучение основных компонентов интерфейса;
– применение способа создания посадочных мест компонентов.

Теоретическая часть

Следующим этапом автоматизированного проектирования электронных КС в среде Altium Designer является разработка библиотеки посадочных мест. От данной стадии будут зависеть качество и надежность устройства в целом и время, затрачиваемое на проектирование. Вариативность создания КС, их перспективные возможности во многом определяются видом и характером реализуемых посадочных мест. При этом следует учитывать тенденцию постоянной микроминиатюризации и перехода КС в общем цикле проектирования на начальные уровни модульности.

Конструкция гибридного датчика давления представлена на рис. 3.33.

Качество выполнения данной стадии проектирования непосредственно влияет на итог разработки топологии коммутационной структуры. Невысокое качество может привести к браку партии изделий, спроектированных с помощью выбранной библиотеки посадочных мест. В условиях многономеклатурного производства от широты охвата технологических возможностей по монтажу электронных компонентов и правильного их отражения в библиотеке посадочных мест зависят показатели эффективности всего производственного цикла.

В среде Altium Designer интегрирован высокофункциональный инструментарий, оперирующий информацией о компоненте, ориентированный на создание сложных посадочных мест за короткий промежуток времени. Самое большое время занимает анализ технической документации компонентов, для которых создаются посадочные места. Процесс создания посадочных мест является одним из трудоемких этапов проектирования коммутационных структур. Создание базы посадочных мест (библиотеки), которая будет неоднократно использоваться при проектировании различных устройств (ПП), — достаточно длительный процесс.

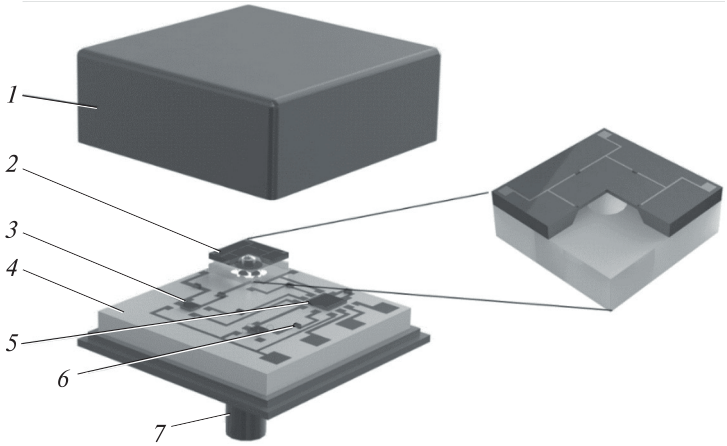
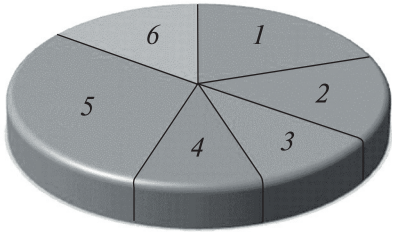


Рис. 3.33. Конструкция гибридного датчика давления:
1 — крышка; *2* — мембранный ЧЭ; *3* — усилители; *4* — керамическая подложка; *5* — микроконтроллер; *6* — пассивные элементы; *7* — трубка для подачи давления

Анализ статистики по созданию гибридных сенсорных систем показал, что большинство дефектов возникает из-за несоблюдения соответствия между размерами компонентов (выводов, КП), приведенными в технической документации, и размерами посадочных мест. Статистка брака, возникающего на различных этапах проектирования, представлена на рис. 3.34.

Рис. 3.34. Статистика брака (в долях) при создании гибридных сенсорных систем:
1 — проектирование библиотеки посадочных мест; *2* — анализ исходных данных; *3* — проектирование библиотеки компонентов; *4* — создание принципиальной схемы устройства; *5* — проектирование топологии печатной платы; *6* — соблюдение норм и правил проектирования



Следует отметить, что у большинства CAD-систем, применяемых при проектировании, отсутствуют инструменты создания библиотеки посадочных мест. Это прямым образом влияет на трудоемкость работы по созданию коммутационной структуры. При использовании готовых библиотек посадочных мест в виде IP-блоков ПО время проектирования значительно сокращается.

Создание библиотеки посадочных мест является наиважнейшим этапом проектирования коммутационных структур.

Библиотека содержит посадочные места, реализованные в виде переходных, сквозных отверстий, поверхностных контактов и т. д.

Прежде чем создавать посадочное место, необходимо проанализировать габаритные размеры компонента и его выводов. После того как систематизированы и обобщены все размеры, можно приступать к созданию посадочного места в библиотеке.

Алгоритм создания библиотеки посадочных мест:

1) создать новый файл библиотеки посадочных мест (File — New — Library — PCBLibrary) (рис. 3.35);

2) добавить новое посадочное место (Add);

3) создать посадочное место с помощью PCB-инструментария;

4) сохранить библиотеку;

5) повторить пункты 2–4 для нового посадочного места;

6) сохранить файл библиотеки.

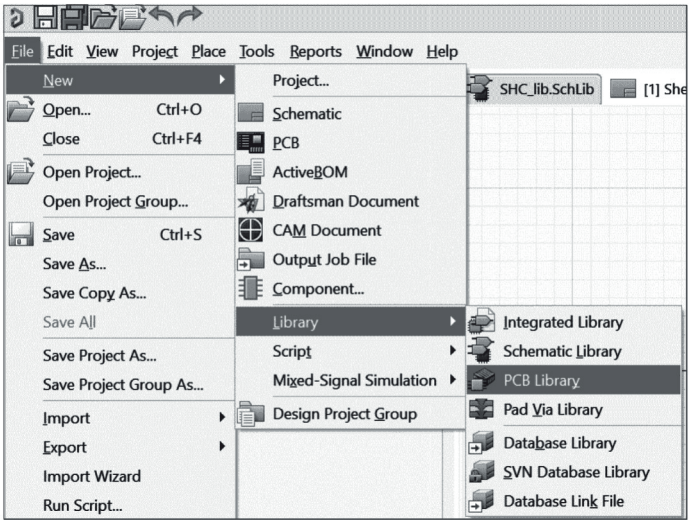


Рис. 3.35. Окно для создания файла библиотеки посадочных мест в функциональном меню среды Altium Designer

После того как создан файл библиотеки, необходимо выяснить, какие компоненты будут входить в состав устройства в рамках данного проекта. От этого зависят тип и размер посадочных мест, необходимых для проектирования коммутационной структуры.

Далее, просмотрев информацию об устройстве (перечень элементов), необходимо систематизировать информацию о компонентах.

Получив конструкторско-технологическую информацию для каждого компонента, можно приступать к созданию посадочных мест.

Создание посадочного места состоит из следующих этапов:

– создание контактного места (отверстие или поверхностный контакт);

– обозначение контактных мест (Designator);

– создание рисунка шелкографии.

Особенности создания элементов библиотеки посадочных мест рассмотрим на примере компонента усилителя низкой частоты TDA2030.

Проведем краткий конструкторско-технологический анализ компонента. Интегральная микросхема компонента TDA2030 представляет собой усилитель мощности низкой частоты, используемого в аппаратуре среднего класса с двуполярным источником питания. Микросхема работает в широком диапазоне питающих напряжений от ±4,5 В до ±22 В. Возможно также подключение микросхемы в схему с однополярным источником питания. Максимальная мощность составляет 18 Вт при максимальном напряжении питания. Внутренняя структура ИС содержит схему защиты выхода от короткого замыкания в нагрузке и термозащиту. Внешние диоды защищают выходные транзисторы микросхемы от бросков обратного напряжения. Для увеличения выходной мощности усилителя микросхемы можно включать по мостовой схеме, при этом при том же напряжении питания мощность увеличивается в 2 раза. Самостоятельная сборка усилителя по типовой схеме не требует больших затрат, учитывая их невысокую стоимость. Все компоненты компактно располагаются на небольшом отрезке ПП, микросхема обязательно устанавливается на соответствующий теплоотвод. Для работы усилителя необходим стабилизированный двуполярный источник питания ±15...22 В.

Изометрический вид усилителя TDA2030 в виде Step-модели, созданной с помощью CAD 3D-моделирования (например, Solid Works) и интегрированной в среду Altium Designer с помощью средств импорта 3D-Step-моделей, представлен на рис. 3.36.

Для того чтобы приступить к созданию библиотеки посадочных мест усилителя, необходимо проанализировать техническую документацию

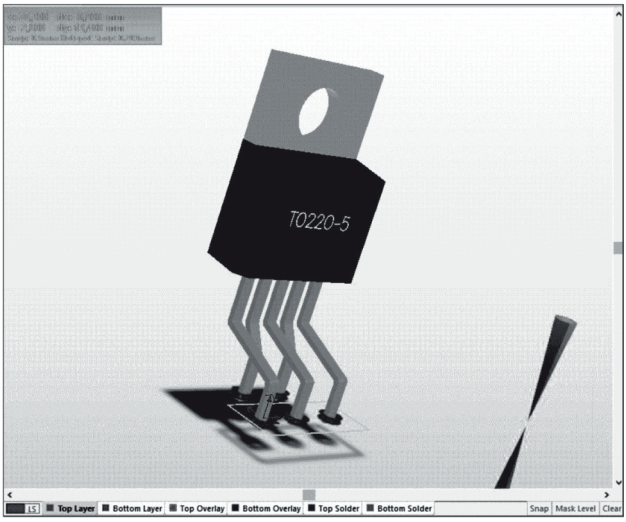


Рис. 3.36. 3D-вид Step-модели усилителя TDA2030

компонента и учесть особенности, непосредственно относящиеся к процессу проектирования посадочных мест.

Пример формализации технических параметров усилителя TDA2030 приведен на рис. 3.37.

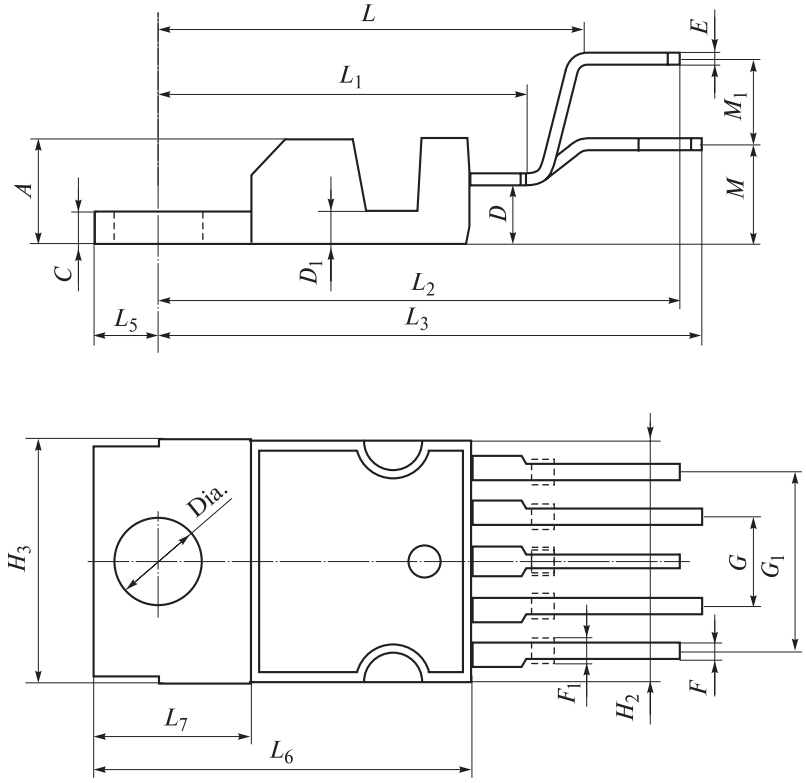


Рис. 3.37. Окно с габаритными размерами усилителя TDA2030

Размеры компонента, необходимые для проектирования посадочного места, представлены на рис. 3.38. Для правильного расположения и нумерации КП необходимо проанализировать нумерацию выводов по технической документации (рис. 3.39).

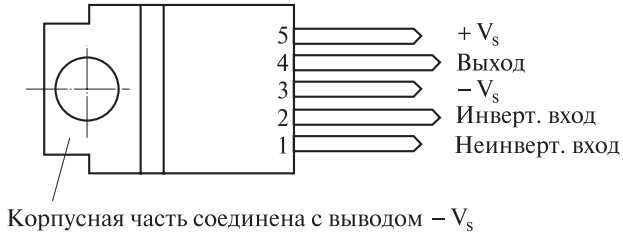


Рис. 3.38. Нумерация выводов (1–5) согласно расположению ключа

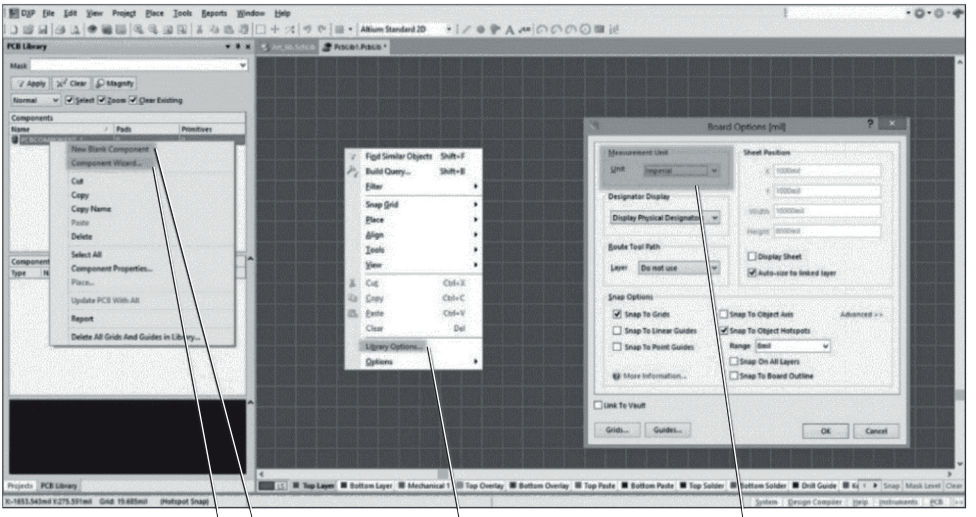


Рис. 3.39. Окно для создание посадочного места

Усилитель имеет корпус типа TO220-5 (пять выводов). На нем расположен ключ, указывающий положение первого по номеру вывода, соответствующего информации, приведенной в технической документации к усилителю (data sheet). Приступим непосредственно к проектированию посадочного места усилителя.

Добавим посадочное место посредством опции New Blank Component в панели библиотеки PCB (рис. 3.40). После этого следует задать наименование посадочного места.

Перед началом проектирования посадочного места необходимо выбрать метрическую систему измерения в настройках библиотеки (Board Options), как показано на рис. 3.39. Далее для размещения и создания контактного места (поля) необходимо выбрать шаг координатной сетки равный 0,5 мм (в связи с компонентами, имеющими дискретный шаг измерений равный 1 мм).

Интерфейс PCB-редактора библиотеки (см. рис. 3.40):

– список посадочных мест;
– панель контактов;
– панель вспомогательного просмотра;
– координаты и шаг сетки;
– текущий слой;
– панель слоев;
– рабочее поле;
– начало координат;
– настройки сетки (Grid), вызываются с помощью горячей клавиши G;
– панель инструментов;

– переключение между 2D- и 3D-проектированием;
– опции сетки (Grid);
– дополнительный инструментарий.

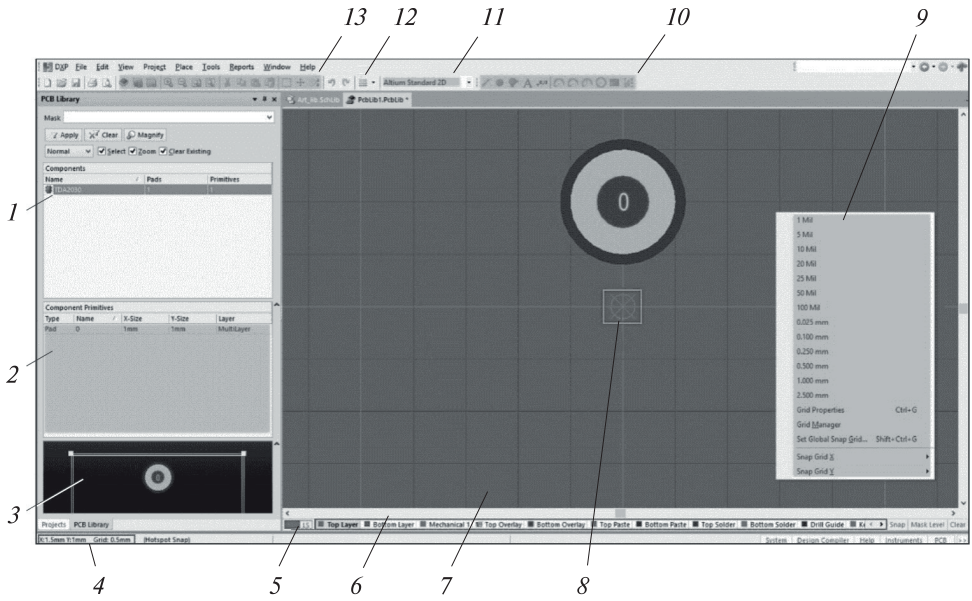


Рис. 3.40. Интерфейс PCB-редактора библиотеки посадочных мест

Прежде чем проектировать посадочное место, необходимо определить тип соединения. В случае поверхностного монтажа, создается контактная площадка, а при монтаже в отверстие создается металлизированное отверстие. Параметры отверстий и КП задают проведенными предварительными расчетами и нормами проектирования. Усилитель низкой частоты TDA2030 имеет пять выводов, т. е. монтаж проводится в отверстие. Следовательно, необходимо спроектировать пять металлизированных отверстий.

Для создания металлизированного отверстия (Pad) необходимо с помощью панели инструментов (см. рис. 3.40) или нажатием правой кнопки мыши выбрать элемент Pad (КП). Можно также использовать горячие клавиши, нажав два раза «P» (P + P) на клавиатуре. Окно со свойствами КП (Pad) приведено на рис. 3.41.

Задав размер и форму КП и отверстия, можно приступать к расположению отверстия в рабочем пространстве. Первое металлизированное отверстие предпочтительнее поставить в начале координатной сетки, так как остальные удобнее располагать относительно первого в связи с равенством приращения координат (*dx*, *dy*) первого контакта относительно координат расположения другого контакта. Для определения первого контакта (технологический подход) его обозначают в виде ключа. На рис 3.42 он изображен в виде прямоугольной КП.

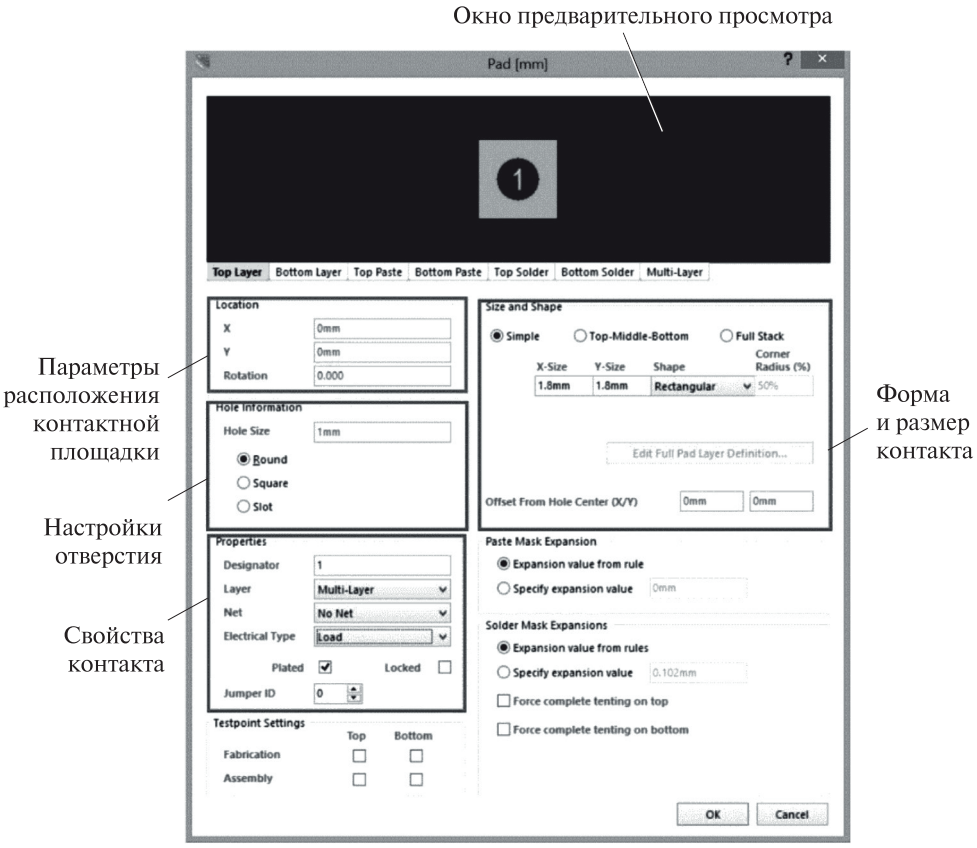


Рис. 3.41. Окно со свойствами контактной площадки

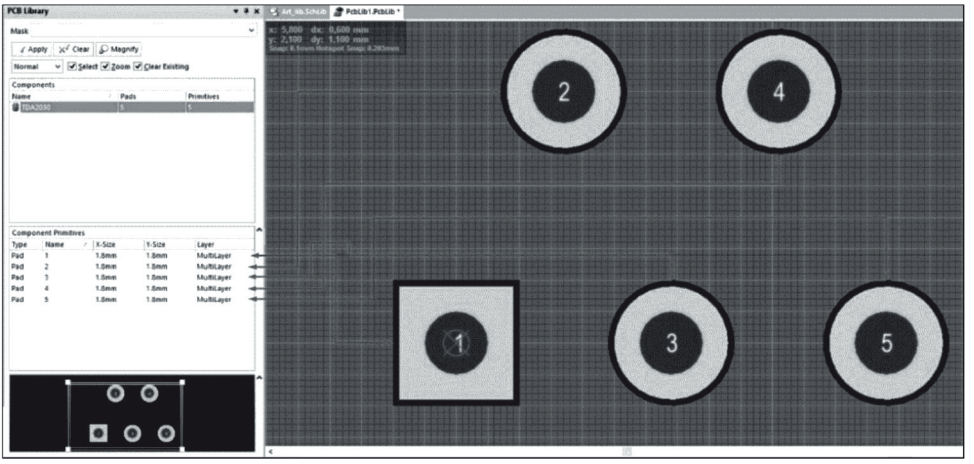


Рис. 3.42. Контактные площадки для усилителя TDA2030:
1–5 — номера контактных площадок

Видно, что каждая КП имеет свой идентификационный номер (Designator), который будет связывать контакт в посадочном месте с контактом компонента в библиотеке Schematic Library. Также видно, что каждый контакт отражается в панели контактов, где приводятся размеры контактных полей.

После расстановки контактов необходимо нанести рисунок шелкографии.

Для этого, нажав кнопку «P» на клавиатуре, вызовем инструментарий, в котором будет находиться элемент «линия». Рисунок шелкографии должен быть выполнен в одном из слоев (Top Overlay или Bottom Overlay). Эти слои специально адаптированы под шелкографию. В процессе рисования линии (Place–Line) необходимо нажать на клавишу Tab (табуляции) на клавиатуре, где будут располагаться опции линии (рис. 3.43).

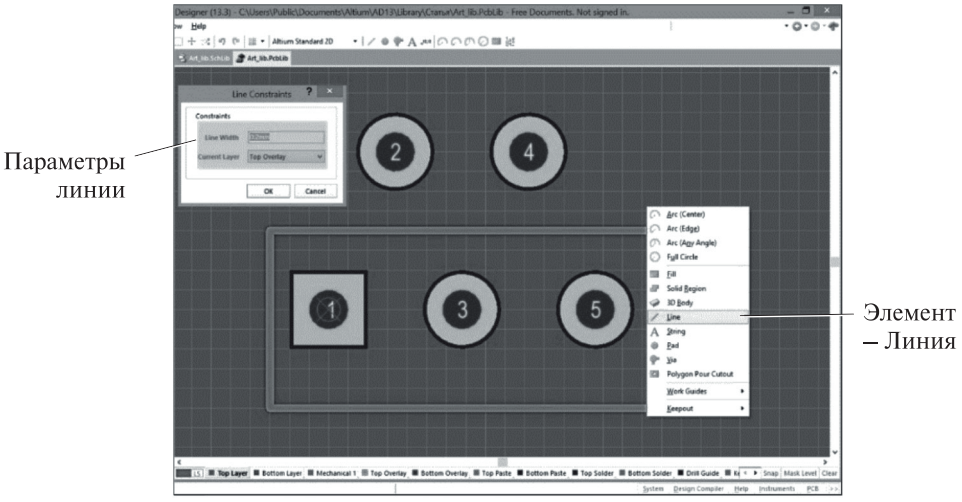


Рис. 3.43. Настройка параметров линии

Процесс создания посадочного места заканчивается после нанесения рисунка шелкографии. Далее необходимо сохранить библиотеку и приступить к созданию другого посадочного места.

Готовое посадочное место усилителя низкой частоты TDA2030 представлено на рис. 3.44.

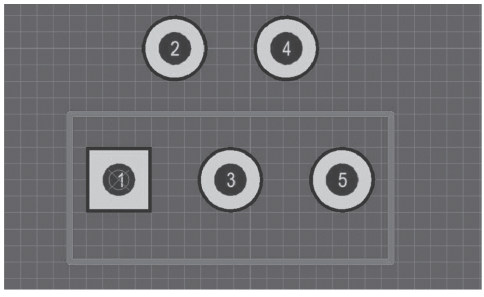


Рис. 3.44. Готовое посадочное место для усилителя низкой частоты TDA2030

После того как все посадочные места созданы под соответствующие компоненты, файл библиотеки сохраняется в директорию, заданную пользователем.

Завершение практической работы

Как только все посадочные места созданы под соответствующие компоненты, файл библиотеки следует сохранить в директорию, заданную пользователем.

Порядок оформления отчета по семинару

1. Разработка библиотеки посадочных мест.
2. Создание посадочного места в соответствии с примером семинара.
3. Предоставление преподавателю отчета о создании посадочного места по выданной схеме.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему проектировщики отводят значительное время процессу разработки библиотеки посадочных мест?
2. Чем определяется вариативность создания коммутационных структур?
3. Перечислите посадочные места одного элемента разных уровней модульности.
4. О чем говорит анализ статистики по созданию гибридных сенсорных систем?
5. Опишите маршрут создания библиотеки посадочных мест.
6. Перечислите последовательность действий создания посадочного места.
7. В какой момент процесс создания посадочного места можно считать законченным?

3.4. СЕМИНАР № 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: РАЗРАБОТКА СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Цель практической работы: ознакомление с более широким функционалом САПР Altium Designer, изучить окно настроек для более комфортного проектирования ПП.

Задачи практической работы:

– ознакомление с редактором Schematic;
– создание электрической принципиальной схемы в редакторе Schematic;
– нумерация элементов схемы согласно методу, приведенному в семинаре.

Теоретическая часть

Основная особенность автоматизации схемотехнического проектирования заключается в том, чтобы пользователь смог безошибочно создать электрическую принципиальную схему с учетом технологических и конструкторских ограничений документации и сгенерировать файл описания устройства на внутреннем языке САПР, который впоследствии будет перенесен на следующие шаги проектирования. Для этого в большинство сред проектирования коммутационных структур встроен удобный пользовательский интерфейс с шаблонными элементами проектирования, позволяющий с их помощью ускорить процесс создания схемы. Единственным недостатком такого подхода является то, что для освоения интерфейса потребуется достаточно большое время. Освоив все тонкости и элементы интерфейса, пользователь может быстрее проектировать сложные иерархические проекты.

Пакет Altium Designer предоставляет пользователю мощный функционал схемотехнического редактора, позволяющий создавать крупные проекты, представленные в виде модулей, связанных между собой через файловую систему связей. Также в среде проектирования имеется опция формирования документации по имеющимся шаблонам, которые пользователь может либо создать сам, либо скачать из различных источников, что значительно упрощает процесс формирования готовой документации устройства.

Пакет Altium Designer имеет систему библиотек, которые значительно упрощают дальнейший процесс создания схемы и формализации готовой

документации устройства. В библиотеках Altium Designer уже созданы основные элементы схемы: УГО-компоненты схемы, посадочные места и шелкография в соответствии с ГОСТом. При создании таких элементов, как линии связи, ориентация компонентов относительно листа, обозначение номиналов и названий и др., следует руководствоваться ГОСТ 2.701–84.

Проектирование принципиальной электрической схемы является важнейшим этапом проектирования сенсорных систем. От структурной и функциональной сложности схемы непосредственно зависит и этап разработки проводящего рисунка и метода изготовления коммутационной структуры и др. Ошибки и недочеты, которые могут появиться в процессе проектирования схемы, значительно влияют на качество и годность готового изделия. Вопросам схемотехнического проектирования сенсорных систем уделяется одно из первостепенных значений. Именно их решение определяет функциональный облик будущего устройства.

В состав пакета Altium Designer входит специализированный схемотехнический редактор Schematic. Данный редактор реализует удобный и мощный по функционалу интерфейс, способный обеспечить всем необходимым проектировщика для достижения его целей в разработке принципиальной электрической схемы. Основные элементы схемотехнического редактора представлены на рис. 3.45.

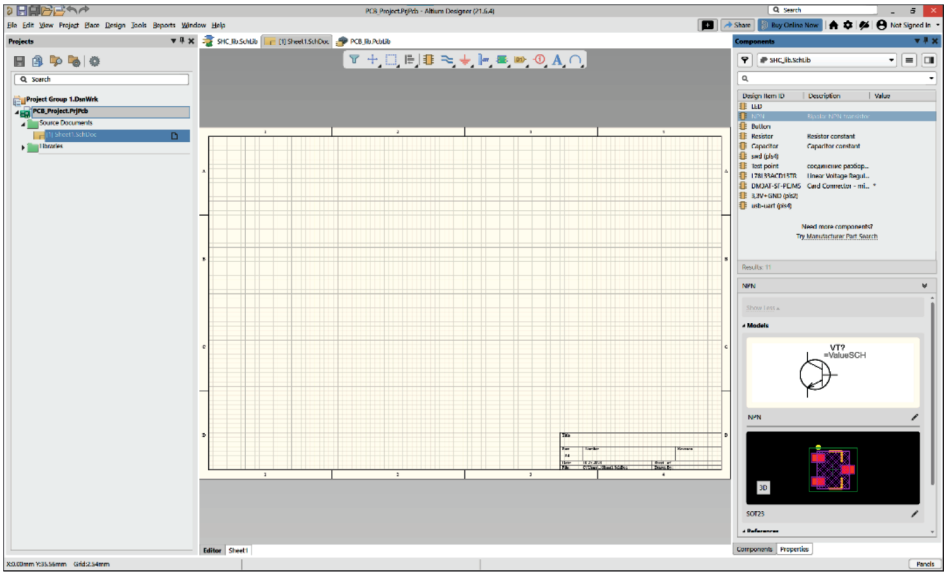


Рис. 3.45. Окно основных элементов схемотехнического редактора Schematic

Прежде чем приступить к созданию элемента сенсорной системы на примере усилителя низкой частоты (УНЧ), рассмотрим его функциональное описание и принципиальную электрическую схему (рис. 3.46).

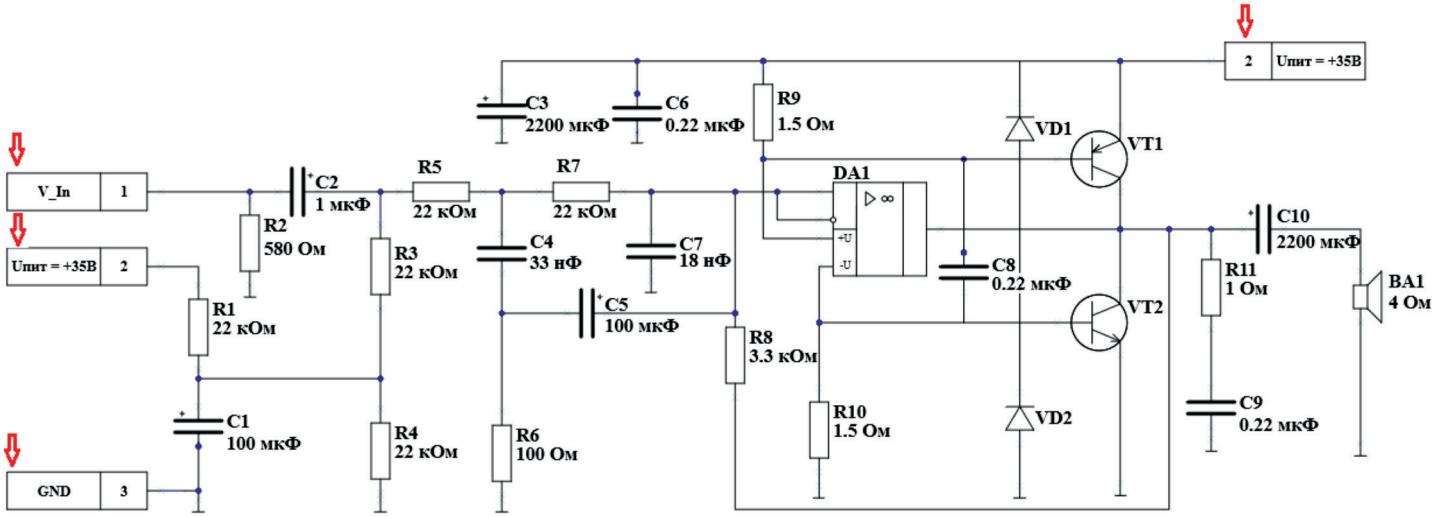


Рис. 3.46. Принципиальная электрическая схема УНЧ с выходом на три составляющие спектра

Принципиальная электрическая схема представляет собой три микросхемы УНЧ, которые подведены к трем разъемам, необходимым для коммутации акустической системы. Схема имеет один вход, шину питания и шину земли. Данное устройство усиливает входной сигнал, разделенный на три микросхемы, и посылает его на три выхода, идущие от каждой микросхемы. В состав данной схемы входит 61 элемент, которые в следующем шаге проектировании ПП будут учитываться в PCB-редакторе. Такое устройство может использоваться для построения модуля оповещения сенсорной системы.

Приступим к созданию принципиальной электрической схемы на примере УНЧ с выходом на три составляющие спектра.

Окно для создания файла Schematic: File—New—Schematic приведено на рис. 3.47.

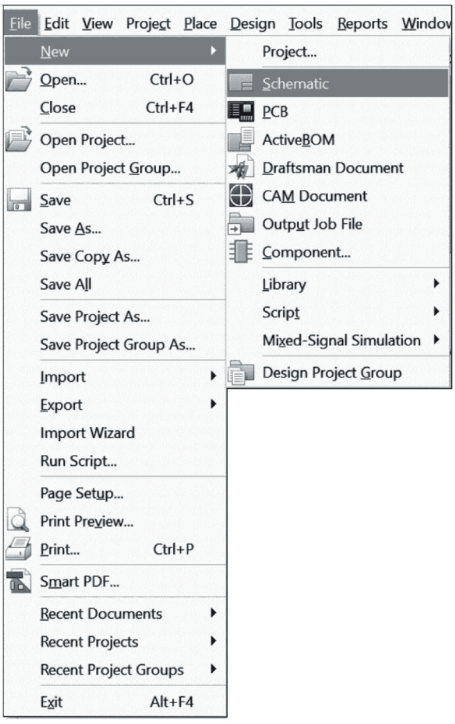


Рис. 3.47. Окно для создания файла Schematic

В условиях цифрового инструментального производства процесс создания электрической схемы начинаем с выбора системы измерения (в данном случае метрической). После этого задаем шаг координатный сетки, удобный для проектирования схемы. Далее начинается процесс расстановки компонентов в рабочем поле для дальнейшего соединения выводов

проводниками (wire, bus, netname и т. д.). После этого приступаем к нумерации компонентов (вручную или с помощью автоматической нумерации). После нумерации идет заключительный этап разработки схемы — проверка. Исходя из ее результата (положительному) получаем право на переход на следующий уровень разработки коммутационной структуры — проектирование проводящего рисунка, в противном случае указываются характер и места ошибок.

Ниже приведен план разработки электрической схемы:

1) выбор системы измерения;

2) выбор шага координатной сетки редактора;

3) расстановка компонентов в рабочем поле, взятых из библиотеки компонентов (Schematic Library);

4) соединение проводниками элементов схемы;

5) нумерация компонентов схемы;

6) проверка схемы.

Следует отметить, что в схемотехническом редакторе Schematic при проектировании схемы, приведенной на рис. 3.46, использованы соединения с помощью инструмента Wire (рис. 3.48).

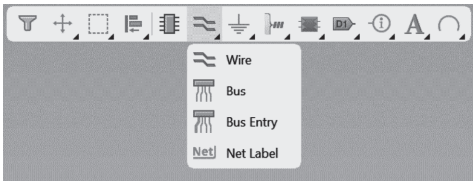


Рис. 3.48. Инструмент «Net»

Вид полной электрической схемы УНЧ представлен на рис. 3.49.

Приведенный вид электрической принципиальной схемы УНЧ в схемотехническом редакторе, имеет шаблон рамки, выполненный по ГОСТу. При установке среды российский стандарт рамок не включается в библиотеку готовых шаблоном, поэтому ГОСТ-шаблон можно скачать из других источников или собственноручно создать с помощью графических инструментов, представленных в пакете Altium Designer (что является наиболее предпочтительным).

После того как компоненты расставлены в рабочем поле и соединены с помощью проводников, необходимо пронумеровать каждый элемент схемы. Как отмечалось ранее, нумерацию можно проводить вручную или с помощью инструмента автоматической нумерации компонентов, которая задается по определенным правилам (рис. 3.50).

Настройка автонумерации с указанием основных параметров представлена на рис. 3.51. Пользователь может собственноручно задать правила нумерации.

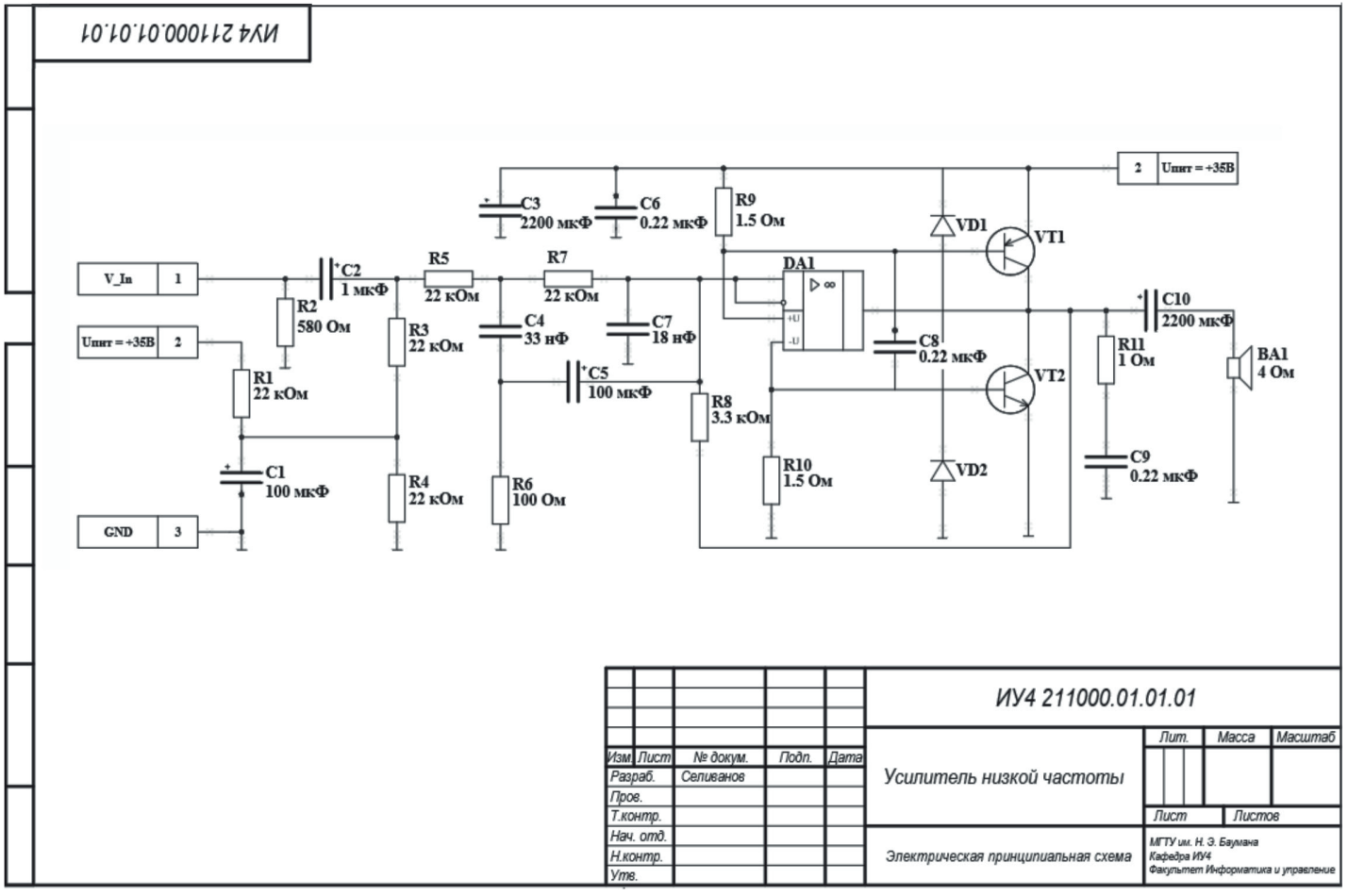


Рис. 3.49. Вид электрической принципиальной схемы блока питания УНЧ в редакторе Schematic

Готовая принципиальная электрическая схема, в которой все элементы пронумерованы согласно правилу, представлена на рис. 3.52, после нумерации каждого элемента проекта схемы можно приступать к проверке проекта. Для этого с помощью менеджера проектов правой кнопкой мыши нажать на файл схемы и выбрать функцию Compile Document Scheme_art.SchDoc (рис. 3.53).

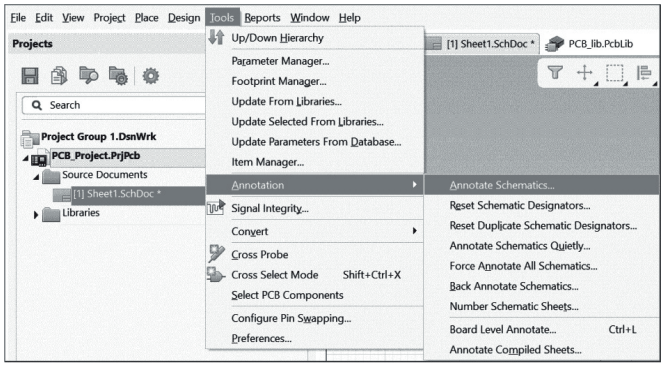


Рис. 3.50. Окно вызова правил нумерации (Annotate Schematics)

Рис. 3.51. Окно настройки правил нумерации компонентов схемы

Если после вызванной функции ошибки не появились, значит, все компоненты пронумерованы, соединены между собой и отсутствуют разрывы цепи. Основные этапы схемотехнического проектирования завершены.

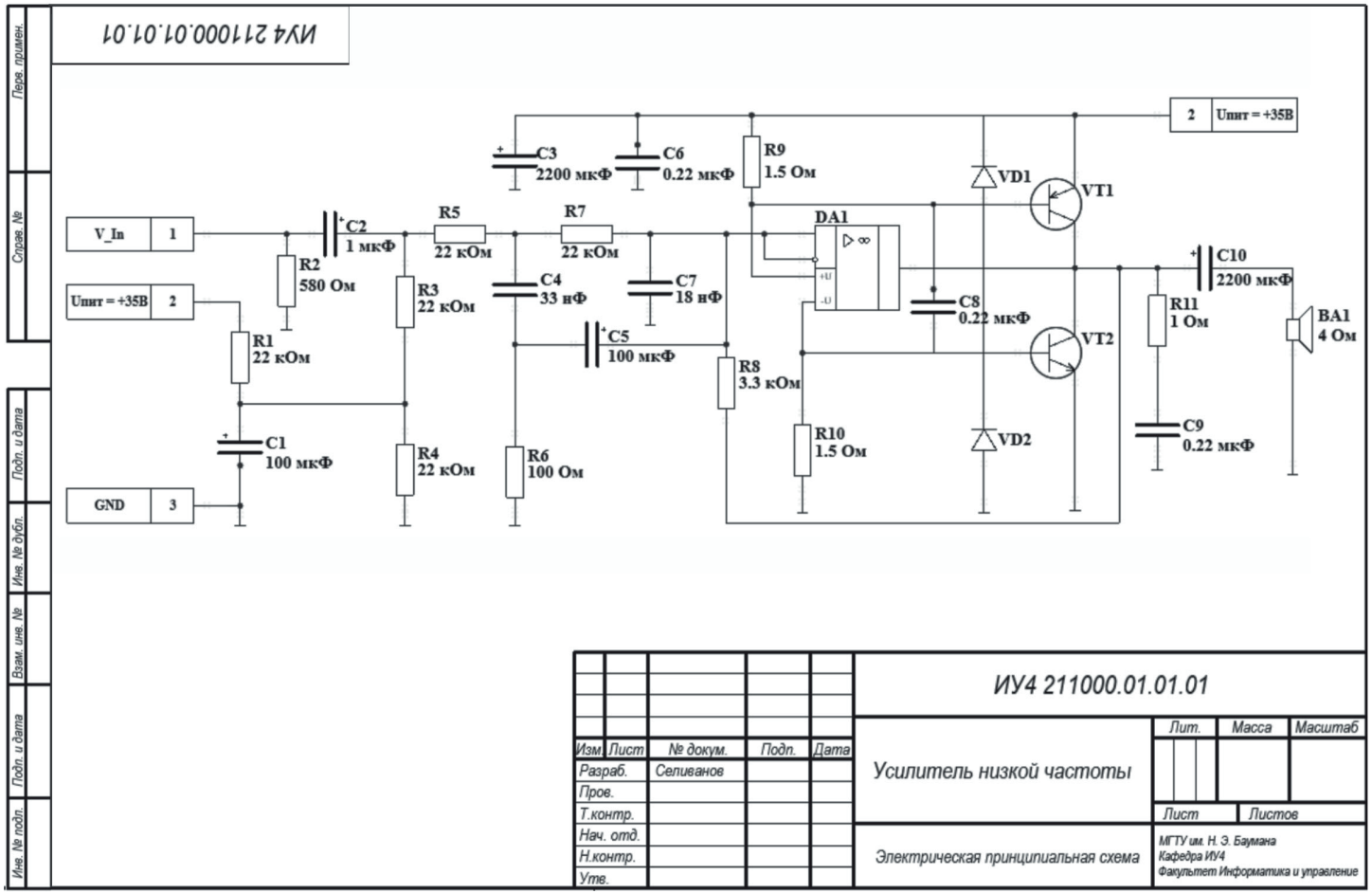


Рис. 3.52. Готовая принципиальная электрическая схема проекта

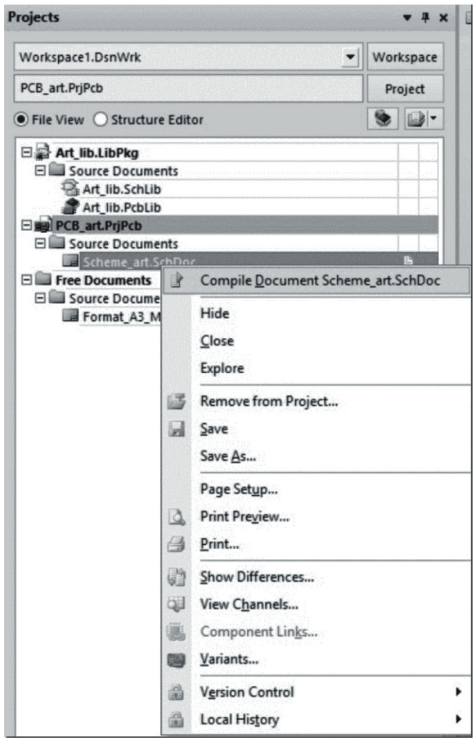


Рис. 3.53. Окно вызова функции проверки схемы

Завершение практической работы

Сохраните проект с выполненным заданием и представьте отчет о выполненной работе преподавателю.

Порядок оформления отчета по семинару

1. Создать принципиальную электрическую схему в редакторе Schematic в соответствии с выданной преподавателем схемой.
2. Провести настройку нумерации согласно описанию в семинаре.
3. Представить готовую принципиальную электрическую схему на проверку преподавателю.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие элементы уже созданы в библиотеках Altium Designer?
2. Как ошибки и недочеты при проектировании могут повлиять на итоговое устройство?
3. Опишите маршрут схемотехнического проектирования на примере созданной электрической принципиальной схемы.
4. Назовите этапы разработки электрической схемы при проектировании.
5. Назовите правила нумерации, использованные в работе.

3.5. СЕМИНАР № 5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Цель практической работы: ознакомление с одним из этапов проектирования КС в среде Altium Designer — топологическим проектированием.

Задачи практической работы:

– изучить теоретические материалы;

– ознакомиться с процессом создания проводящего рисунка и структуры ПП;

– изучить основные нормы и правила проектирования проводящего рисунка и ПП.

Теоретическая часть

Проектирование топологического рисунка является наиболее важным и ответственным этапом во всем технологическом цикле проектирования коммутационных структур. Последующие технологические операции, связанные с изготовлением коммутационной структуры и монтажом компонентов навесного монтажа и монтажа в отверстие, значительно зависят от качества исполнения проводящего рисунка. Существует множество факторов, которые могут привести к браку коммутационной структуры и всего устройства в целом. Следует отметить, что в большинстве случаев брак является неремонтопригодным.

Среда проектирования Altium Designer содержит математическую модель, позволяющую рассчитать основные параметры коммутационных элементов и оптимизировать их относительно тех правил, которые пользователь задает в настойках программы.

Пакет Altium Designer имеет удобный интуитивно понятный интерфейс редактора коммутационных структур. Проект, реализованный на предыдущих этапах проектирования, экспортируется в данный редактор (в область рабочего пространства) в виде комнаты (Room) посадочных мест компонентов, связанных с помощью логических соединений, которые ранее в схемотехническом редакторе были созданы при проектировании принципиальной электрической схемы.

Данный метод проектирования проводящего рисунка удобен с точки зрения простоты реализации посадочных мест проводящего рисунка благодаря встроенной системе шаблонного проектирования.

Всего выделяют два вида синтеза топологии:

1) неавтоматизированный (с помощью инструментов интерфейса редактора);

2) автоматизированный (автотрассировка).

Далее будет рассмотрен один из методов проектирования проводящего рисунка (автоматическая трассировка).

Неавтоматизированный метод является наиболее надежным и адекватным с точки зрения производственных требований. Большинство организаций и предприятий модифицируют свою продукцию, добавляя элементы проводящего рисунка или, наоборот, удаляя, тем самым изменяя структуру проводящего рисунка, что требует вмешательства инженера в уже спроектированную раннее структуру.

Если устройство не сложное, то можно использовать метод автоматизированной трассировки, где небольшая неточность не вызовет значительных погрешностей в проводящем рисунке. При этом большое внимание уделяется классу точности коммутационных структур (КС), которая определяет ее сложность.

Проектирование проводящего рисунка является заключительной стадией процесса проектирования КС. Основное внимание уделяют приемам разработки проводящего рисунка и методам трассировки КС. В заключительной стадии проектирования КС учитывают такие характеристики КС, как наличие паяльной маски, число слоев, наличие сквозных, переходных, конструкционных отверстий и суммарная толщина структуры.

Ниже представлен состав основных понятий и характеристик, принятых для обобщенной КС на основе классической многослойной ПП:

– слои ПП;
– паяльная маска;
– конструкционные отверстия;
– технологическое поле;
– переходные, сквозные металлизированные отверстия;
– маркировка ПП;
– проводящий рисунок;
– шелкография.

Все перечисленные понятия играют важную роль в проектировании ПП. Каждая из этих характеристик задается в настройках PCB-редактора Altium Designer.

Интерфейс PCB-редактора и его основные элементы (инструменты) представлены на рис. 3.54.

Видно, что интерфейс в PCB-редакторе имеет большой набор инструментов для профессионального проектирования ПП.

Элементы интерфейса PCB-редактора:

- координаты и шаг сетки;
- панель выбора слоев;

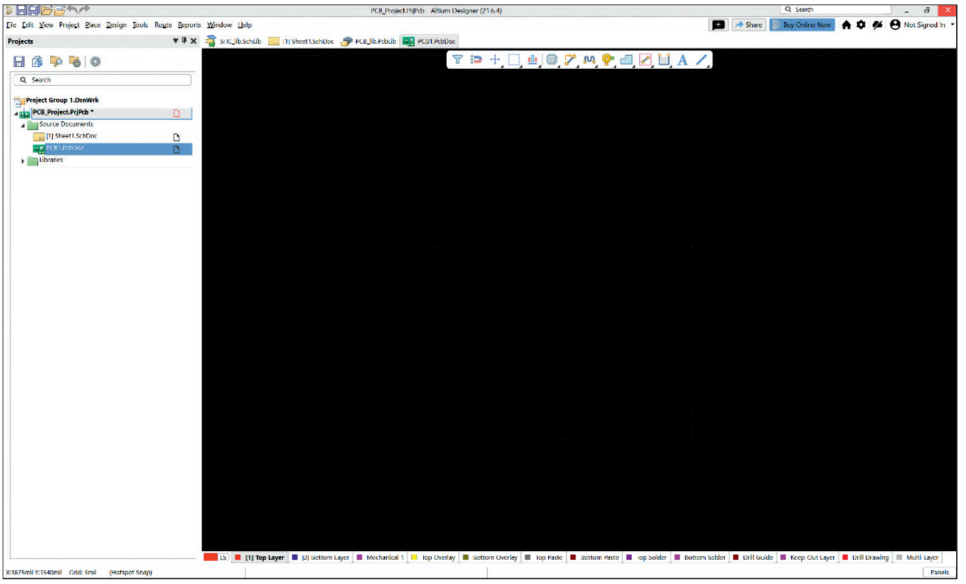


Рис. 3.54. Интерфейс PCB-редактора и его инструменты

- рабочее поле;
- PCB-инструментарий:

- основное меню PCB-редактора:

– Project (менеджер проектов);
– Place (размещение PCB-элементов);
– Design (настройка основных элементов ПП);
– Tools (инструменты PCB-проектирования);
– Reports (генерация файлов, отчетов).

Следующий этап проектирования — задание формы и размеров ПП, также указывается число слоев. В PCB-редакторе имеются опция добавления паяльной маски, автогенератор создания ПП (PCB Board Wizard) и помощник задания правил и норм проектирования. Данные автогенераторы (помощники) удобны в условиях сквозных технологий подготовки производства, так как весь процесс разработки КС представлен в виде последовательных этапов с подробным описанием и инструкциями.

Последовательность этапов создания ПП с помощью PCB-редактора:

1) импортирование принципиальной схемы, созданной в Schematic-редакторе;

2) настройка формы, габаритных размеров, числа слоев ПП, наличия паяльной маски с помощью PCB Board Wizard или вручную;

3) настройка правил проектирования топологии с помощью Rule Wizard или вручную;

4) задание позиций компонентов на ПП согласно проведенным расчетам;

5) трассировка печатного проводящего рисунка (топологии) устройства с помощью автотрассировщика (Auto Route) или вручную;

6) проверка результатов трассировки;

7) маркировка ПП;

8) сохранение проекта ПП.

Прежде чем приступить к проектированию топологии, необходимо импортировать файл принципиальной схемы, разработанной в Schematic-редакторе. Для этого в основном меню (рис. 3.55) выберем вкладку Design и в раскрывшемся окне — Import Changes From (Имя проекта платы) PrjPcb. После этого в рабочее поле редактора КС будут размещены все элементы схемы, которая была импортирована в редактор, со всеми сопутствующими элементами, т. е. с шелкографией и маркировкой.

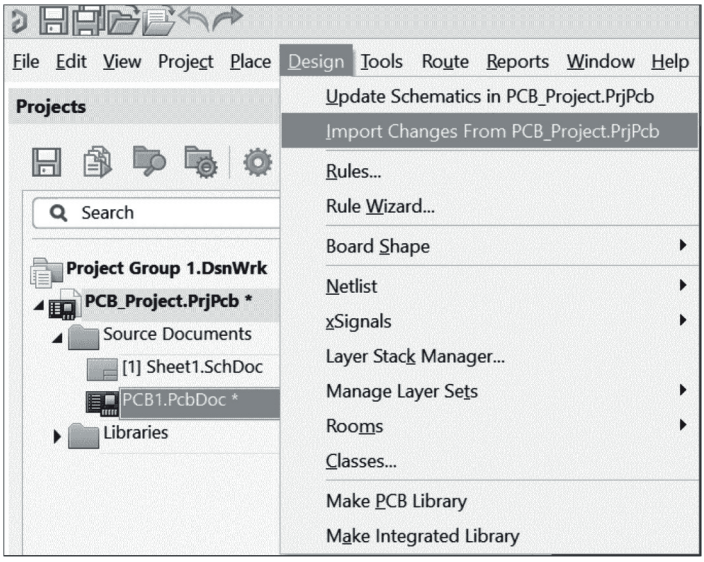


Рис. 3.55. Вкладка Design PCB-редактора

После вызова функции Import Changes на экран выводится окно подтверждения импортирования схемы. Для передачи содержимого схемы в PCB-редактор необходим нажать кнопку Execute Changes (рис. 3.56). После этого в рабочее поле будут помещены компоненты схемы.

На рис. 3.56 видно, что перед тем, как добавить компонент в редактор ПП, элемент схемы проходит проверку на отсутствие разрывов в схеме устройства и других ошибок, связанных с данным компонентом.

Все компоненты, перемещенные с помощью функции Import Changes, представлены на рис. 3.57.

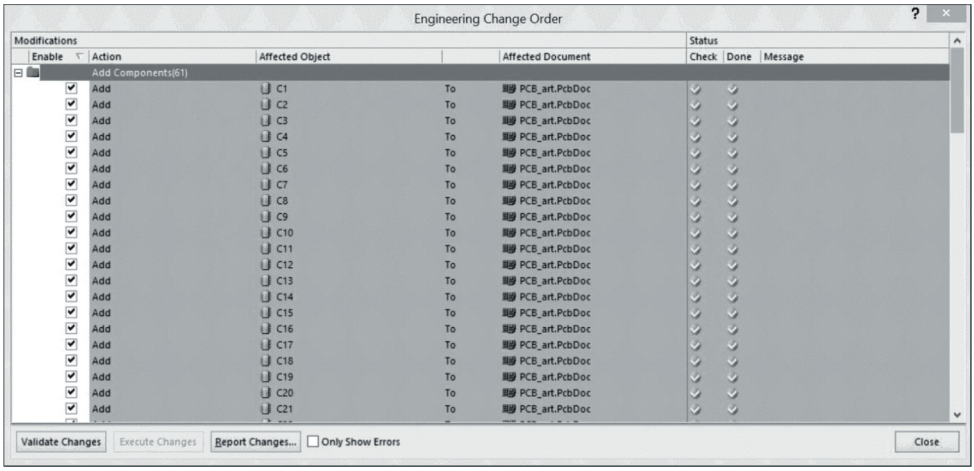
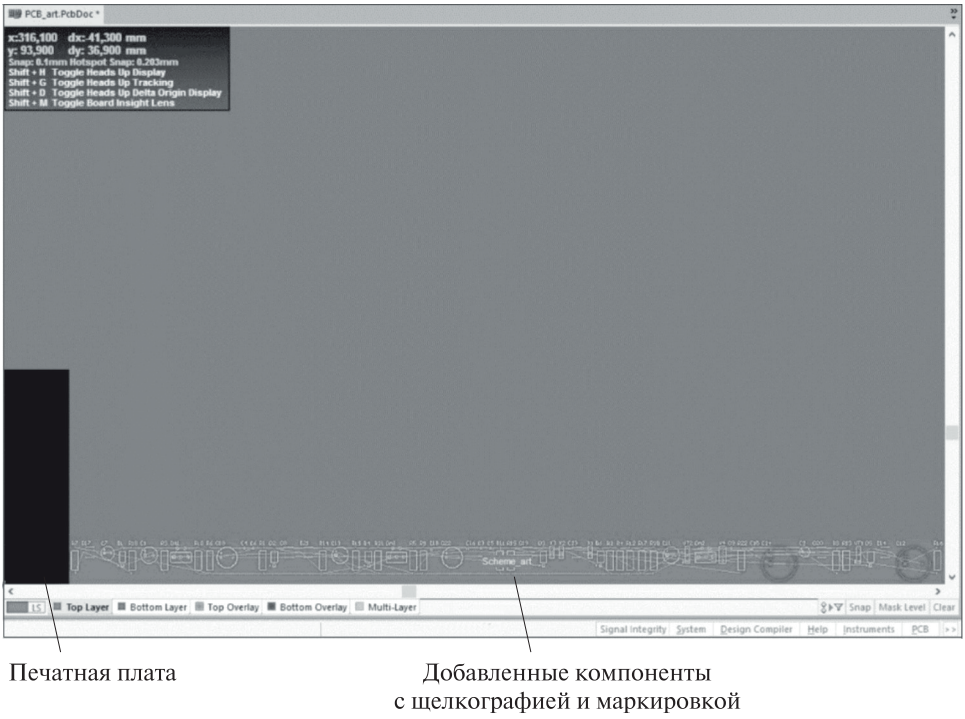


Рис. 3.56. Окно подтверждения импортирования схемы



Печатная плата

Добавленные компоненты
с щелкографией и маркировкой

Рис. 3.57. Окно с добавленными компонентами

После этого необходимо задать параметры ПП:

– число слоев;

– наличие/отсутствие паяльной маски;

– толщина препрега, стеклотекстолита;

– габаритные размеры и форму ПП.

В рассматриваемом примере основные параметры ПП зададим в ручном режиме с помощью основного меню. В пакете имеется встроенный генератор типовых параметров, однако он ориентирован на решение типовых вариантов проектирования ПП, а это недопустимо в случаях, когда задача выходит за пределы общих правил задания ПП. Используем пункт меню Board Layers & Color (вызов горячей клавиши L). В нем хранится информация о слоях ПП, цветовой раскраске и назначении. Это не слои реальной ПП, так как большинство этих слоев имеют производственный и технологический характер, например в нашем случает присутствует слой Top Overlay.

Менеджер слоев (рис. 3.58):

1) Layers (слои):

– Signal and Plane Layers (S) — сигнальные слои;

– Component Layer Pairs (C) — пары слоев компонентов;

– Mechanical ayers (M) — механические слои;

– Other Layers (O) — другие слои.

2) System Colors (системные цвета).

Задав настройки слоев, приступим к описанию ПП. Для этого вызовем с помощью основного меню менеджер КС (Design — Layer Stack Manager) (рис. 3.59). После этого появится окно настройки параметров КС (рис. 3.60).

После настройки параметров КС приступаем к заданию габаритных размеров и формы ПП. Для этого с помощью графического инструментария в слое PCB начертим прямоугольник, размеры которого будут соответствовать размерам ПП, приведенным в ТЗ устройства. При задании формы также будем руководствоваться ТЗ. Выберем инструмент «линия (Line)» и начертим прямоугольник размерами 160×100 мм. Для удобства задания габаритных размеров переместим начало координат в нижний левый угол КС с помощью основного меню (Edit — Origin — Set).

Подготовленный вид КС в слое PCB представлен на рис. 3.61.

После того как подготовили КС к получению заданной формы и размеров, вызовем функцию Define From Selected Objects (Design — Board Shape — Define From Selected Objects), предварительно выделив прямоугольник, созданный ранее. В результате получим требуемую КС (рис. 3.62).

После задания формы и размеров ПП установим маршрут фрезерования (скрайбирования) заготовки КС в слое Board. Для этого вызовем функцию Create Primitives From Board Shape (Design — Board Shape — Create Primitives From Board Shape). После этого необходимо выбрать слой и опции задания контура (рис. 3.63).

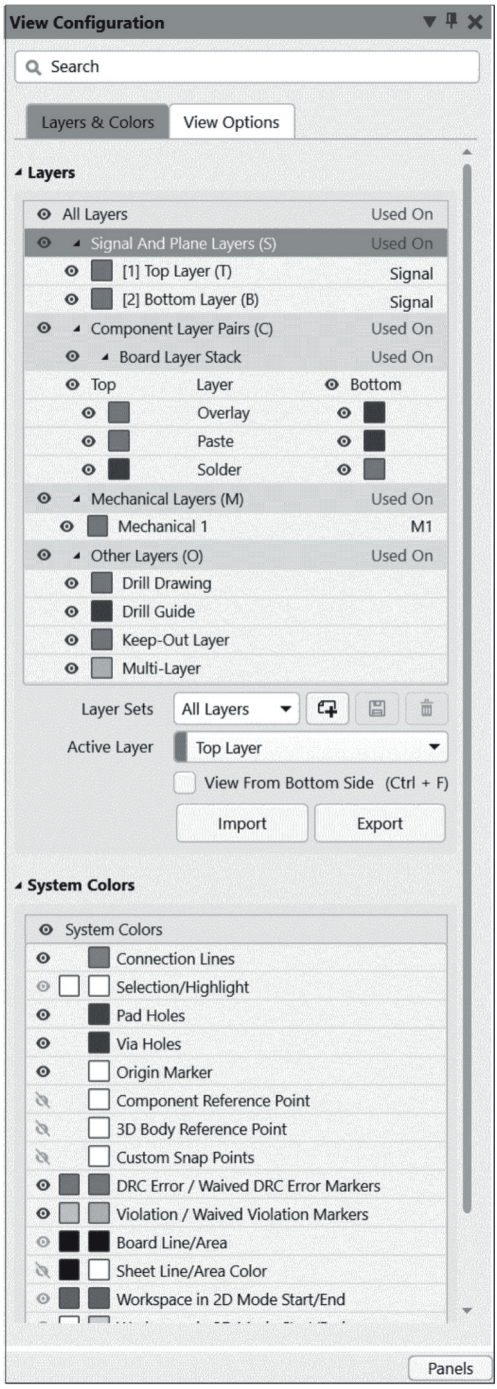


Рис. 3.58. Менеджер слоев

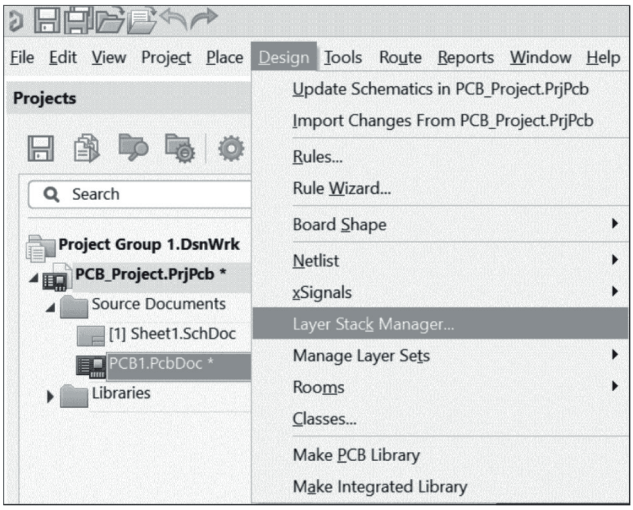


Рис. 3.59. Окно вызова Layer Stack Manager

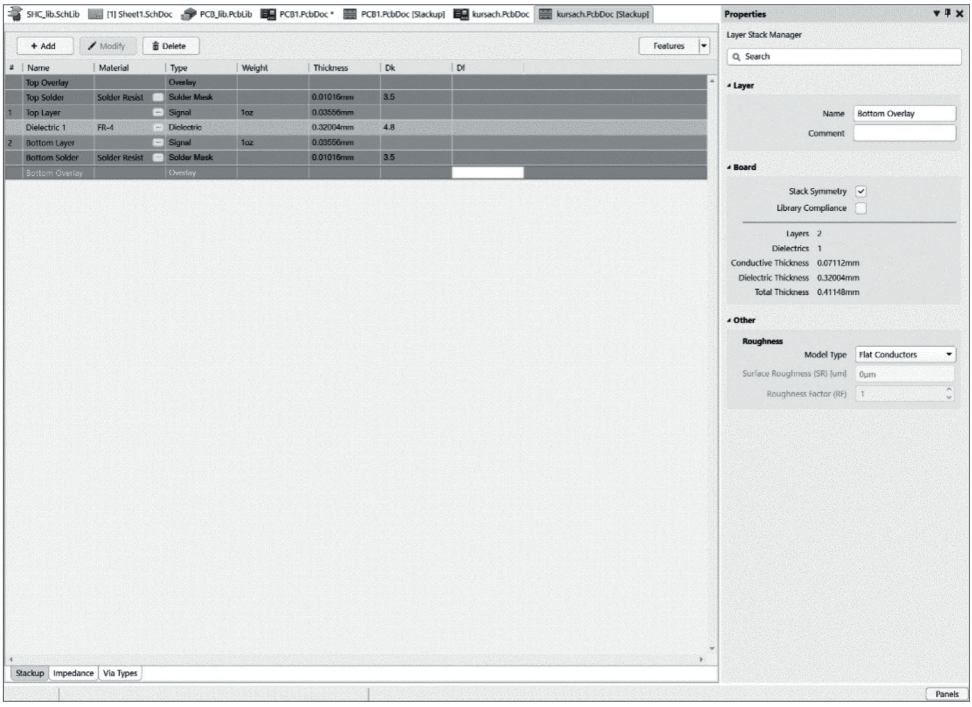


Рис. 3.60. Окно настройки параметров КС (менеджер ПП)

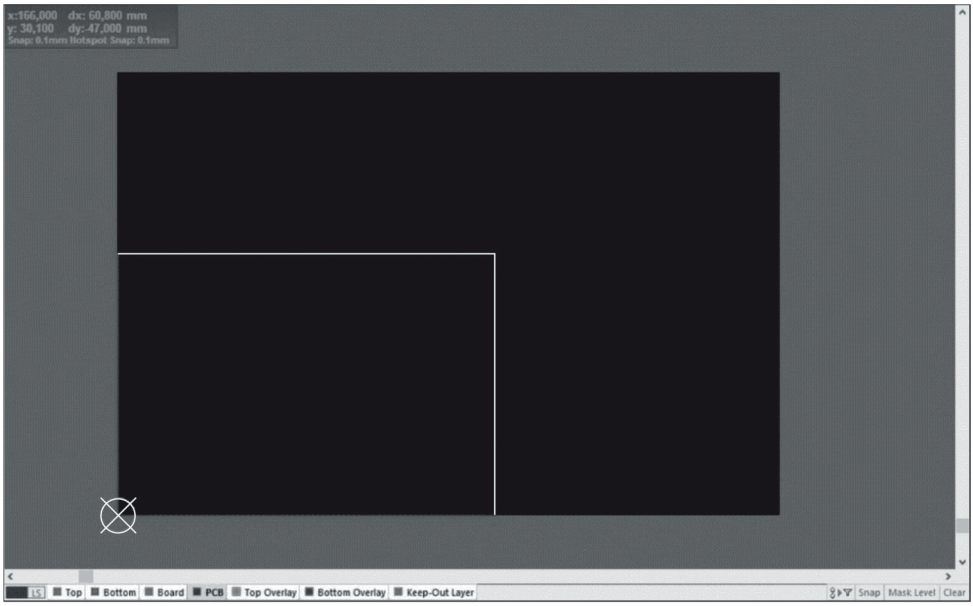


Рис. 3.61. Окно для подготовки ПП

Рис. 3.62. Окно с полученной ПП

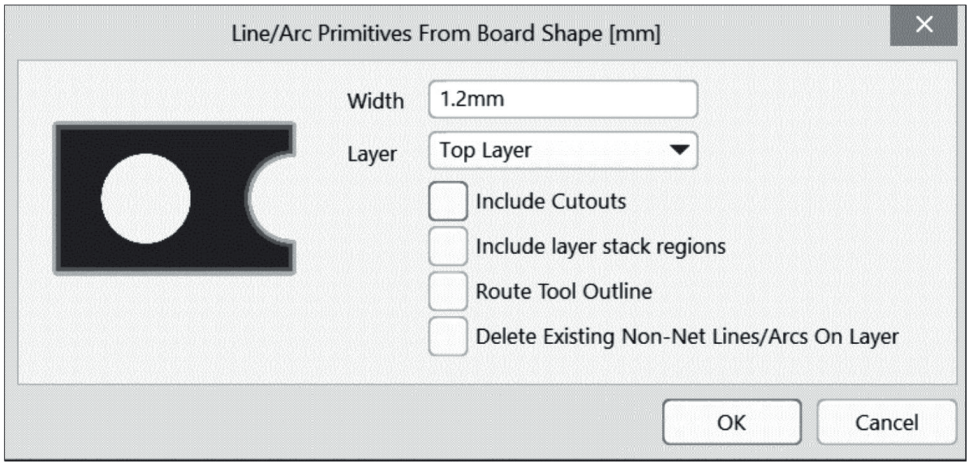


Рис. 3.63. Настройки контура фрезерования ПП

В графическом окне представлены настройки контура:
– вид (изображение слева);
– толщина (Width);
– слой (Layer);
– опции контура (требуемые отметить галочками).
В результате получили контур ПП в слое Board (рис. 3.64).

Рис. 3.64. Окно с контуром фрезерования (фиолетовый)

После задания ПП приступим к заданию правил и норм проектирования ПП. Для этого воспользуемся опцией настройки правил (Design — Rules). В графическом окне представлены основные параметры и нормы проектирования КС (рис. 3.65).

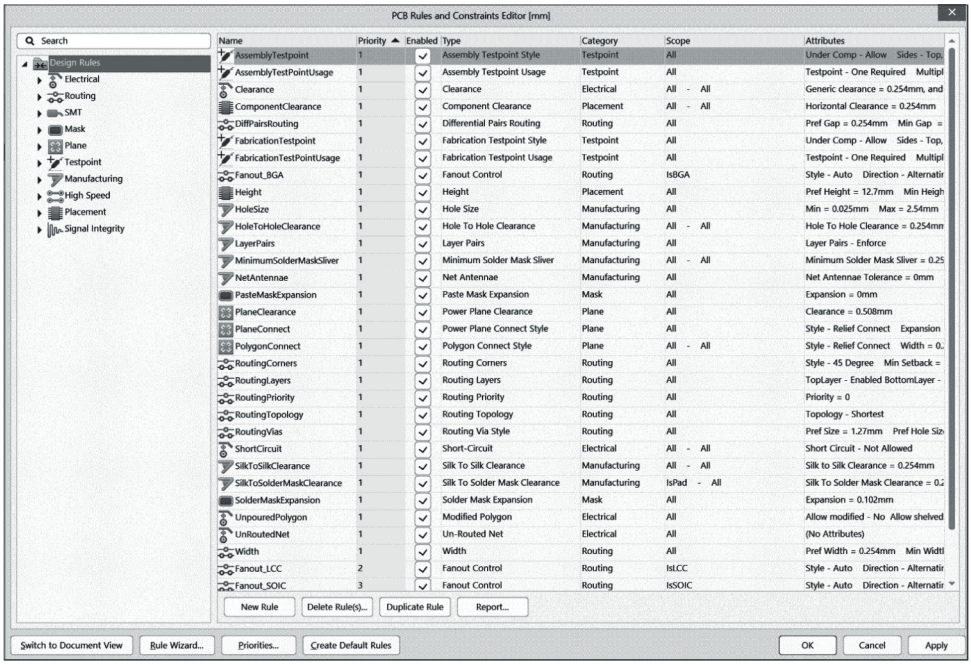


Рис. 3.65. Окно с параметром и нормами проектирования ПП

Основные параметры и нормы проектирования.

1) Electrical (правила, учитывающие электрические соединения);
2) Routing (правила, учитываемые при трассировке);
3) SMT (правила КП под поверхностный монтаж);
4) Mask (правила для нанесения паяльной пасты и защитной маски);
5) Plane (правила для подсоединения полигонов и экранных слоев);
6) Testpoint (правила, учитывающие контрольные точки);
7) Manufacturing (правила, учитываемые при производстве);
8) HighSpeed (правила, задаваемые для высокоскоростных схем);
9) Placement (правила размещения компонентов);
10) SignalIntegrity (правила моделирования);
11) окно, представляющее все параметры и нормы проектирования.

Задав необходимые правила, приступим к стадии размещения компонентов на ПП. Для этого можно использовать инспектор (рис. 3.66), задав координаты каждого компонента или ручным методом с помощью мыши разместив каждый компонент на ПП. Первый способ предпочтительнее, так как он является более технологичным и точным.

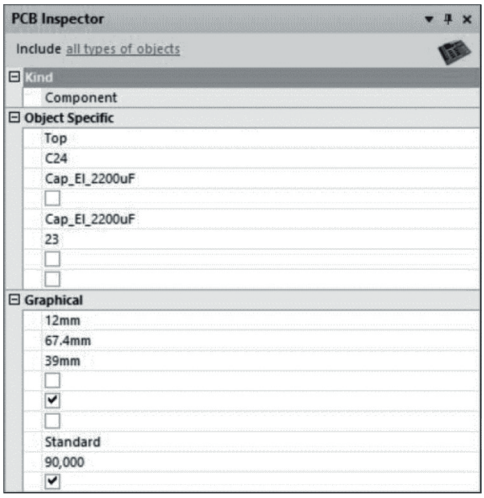


Рис. 3.66. Инспектор PCB-редактора

Расставив все компоненты, получим ПП с размещенными компонентами (рис. 3.67).

После размещения всех компонентов приступим к стадии трассировки печатного рисунка. Для этого воспользуемся автотрассировщиком, в котором заранее было использовано правило трассировки, учитывающее кратчайшее соединение между компонентами схемы (Shortest).

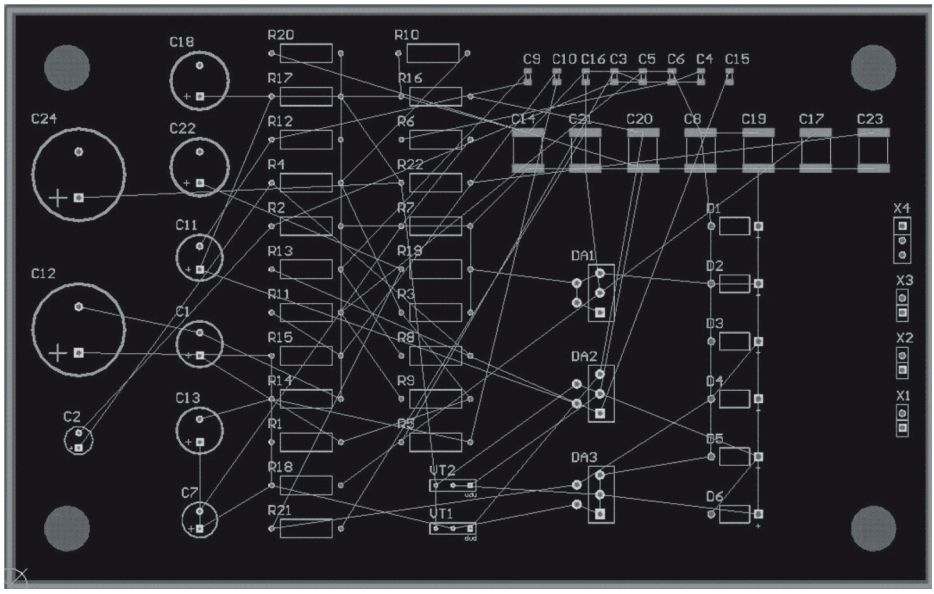


Рис. 3.67. Вид ПП с размещенными компонентами

Автотрассировщик представляет собой математический аппарат, который рассчитывает и моделирует проводящий рисунок в зависимости от нескольких показателей, которые задаются в правилах проектирования. Данная система удобна для начальных проектов. В случае профессиональных проектов и разработок оператор собственноручно проектирует трассировку, что является трудоемким и сложным процессом. Алгоритм выполнения автотрассировки представлен на рис. 3.68.

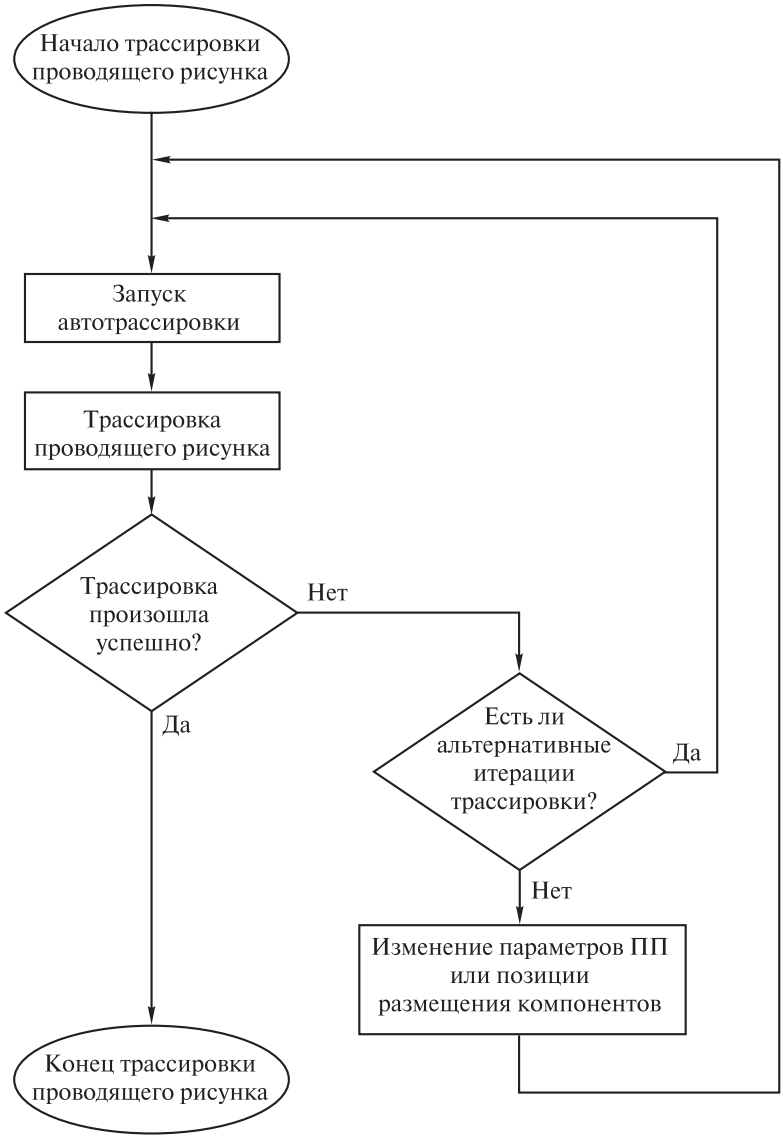


Рис. 3.68. Алгоритм автотрассировки

Автотрассировка имеет многоцикличную структуру, благодаря которой реализуются сложные топологические структуры ПП.

Вид ПП с готовым проводящим рисунком представлен на рис. 3.69.

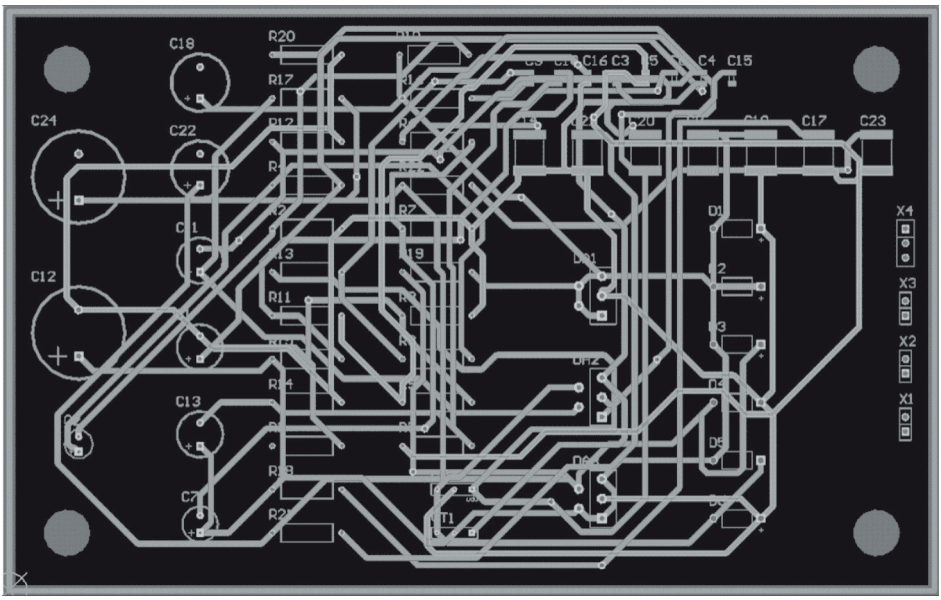


Рис. 3.69. Вид ПП с проводящим рисунком

Для повышения помехоустойчивости схемы необходимо размещать большой участок земли (Ground). Для этого с помощью инструмента Place Polygon Plane, расположенного в PCB-инструментарии, вызовем окно настройки размещения полигона (рис. 3.70).

Вид ПП с размещенным участком земли представлен на рис. 3.71.

Заключительной стадией будет маркировка ПП. Она выполняется в слое PCB. Для этого используют инструмент String (Place — String) в основном меню. Расположим надпись Spectral Amplifier в правой верхней части верхней стороны КС — ПП (рис. 3.72).

Этап топологического проектирования сложных КС УНЧ завершен.

Завершение практической работы

Сохраните проект с выполненным заданием и представьте отчет о выполненной работе преподавателю.

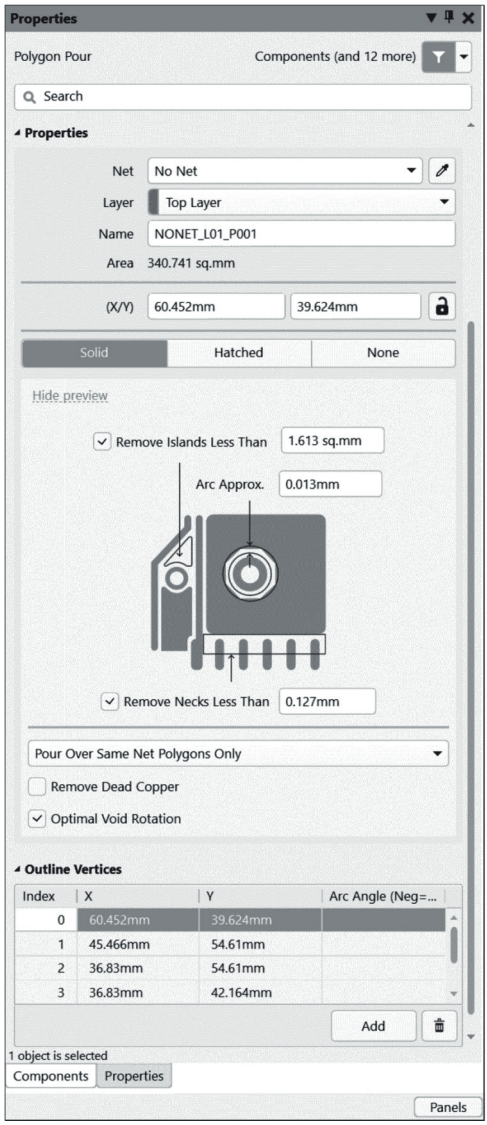


Рис. 3.70. Окно настройки размещения полигона

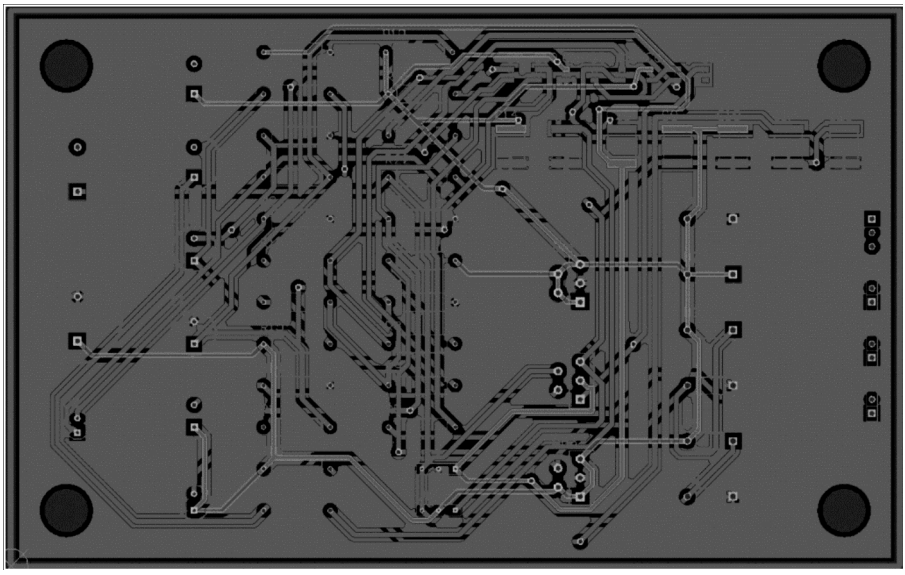


Рис. 3.71. Печатная плата с участком земли

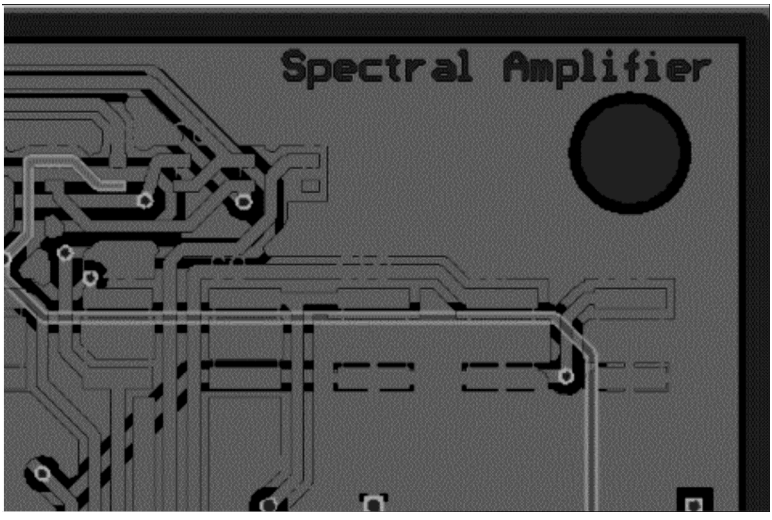


Рис. 3.72. Маркировка ПП

Порядок оформления отчета по семинару

1. Выбрать более удобный вариант — автотрассировку или неавтоматизированный метод.
2. Следуя алгоритму, приведенному в семинаре, выполнить трассировку ПП.
3. Представить готовую трассировку ПП на проверку преподавателю.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите виды синтеза топологии.
2. В каких случаях используется автротрассировка, а в каких — неавтоматизированный метод?
3. Перечислите состав основных понятий и характеристик для обобщенной КС на основе классической МПП.
4. Опишите маршрут проектирования проводящего рисунка в PCB-редакторе.
5. Перечислите основные параметры и нормы проектирования ПП.

3.6. СЕМИНАР № 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ALTIUM DESIGNER: РАЗРАБОТКА СИНТЕЗ-ПРОЕКТА КОММУТАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ

Цель практической работы: анализ видов выходных форматов файлов готового проекта, созданного с помощью среды Altium Designer, которые применяются в автоматизированном оборудовании со встроенным программным обеспечением.

Задачи практической работы:

– создание файла Output Job File;

– ознакомление с возможностью 3D-моделирования КС в среде Altium Designer;

– изучение способов импорта Step-модели из других САПР;

– изучение создания файлов Gerber и NC Drills.

Теоретическая часть

Среда Altium Designer позволяет синтезировать проект ПП в отдельном проекте (Output Job File), в котором присутствуют документы, содержащие определенный тип выходной информации.

Возможность генерировать проект в формализованном электронном виде привела к автоматизации технологического цикла производства электронной аппаратуры. Например, некоторые CAD (Computer Aided Design) позволяют генерировать матрицу координат компонентов с указанием их идентификационных номеров. В дальнейшем матрица, представленная в виде формализованного файла, импортируется в ПО сборочного оборудования, которое осуществляет монтаж навесных компонентов или компонентов в отверстие по матрице координат элементов. Со временем CAD-системы стали синтезировать проекты ПП для полностью автоматизированного процесса сборки ПП с устройством, что значительно снизило трудоемкость процесса сборки и изготовления благодаря постепенному переходу от ручной сборки изделий к автоматизированной.

В последнее время большое внимание уделяется возможностям пространственного моделирования, которое позволяет представить объемную модель ПП с компонентами и изначально заданными габаритными размерами, относительно которых конструкторы начинают проектировать конечный вид устройства. С помощью встроенной системы интеграции проектов в пакете Altium Designer можно экспортировать 3D-модель ПП в другие специализированные САПР, связанные с проектированием конструкции устройства.

Большую роль в средах проектирования КС играет инструмент генерации выходного отчета (файлов проекта), так как от качества и емкости номенклатуры зависят качество и скорость производства устройства. Большинство сред имеет слабый по функциональным возможностям генератор отчетов и проектных файлов, среда Altium Designer напротив, оснащена мощнейшим средством формирования файлов проекта.

Для того чтобы сформировать отчет проекта необходимо в главном меню создать проект выходных файлов (File — New — Output Job File) (рис. 3.73).

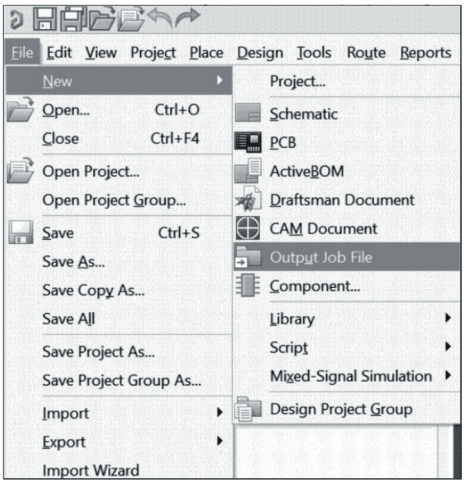


Рис. 3.73. Опция создания проекта отчета

В появившемся окно проекта выбирают необходимые файлы и вид формализации, в котором следует представить данные файлы (рис. 3.74).

Среда Altium Designer оснащена эффективным модулем, синтезирующим конечный проект в виде отдельных файлов, сгруппированных в проект Output Job File. Если более конкретно проанализировать систему формализации выходной информации, то она поддерживает большое число форматов генерации файлов проекта, начиная от фалов ПП и заканчивая принципиальными схемами и библиотеками среды проектирования.

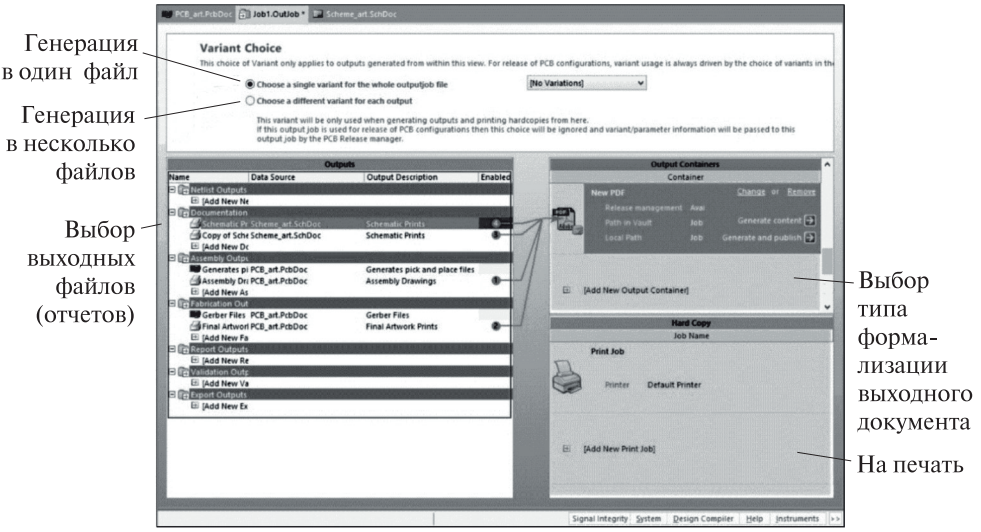
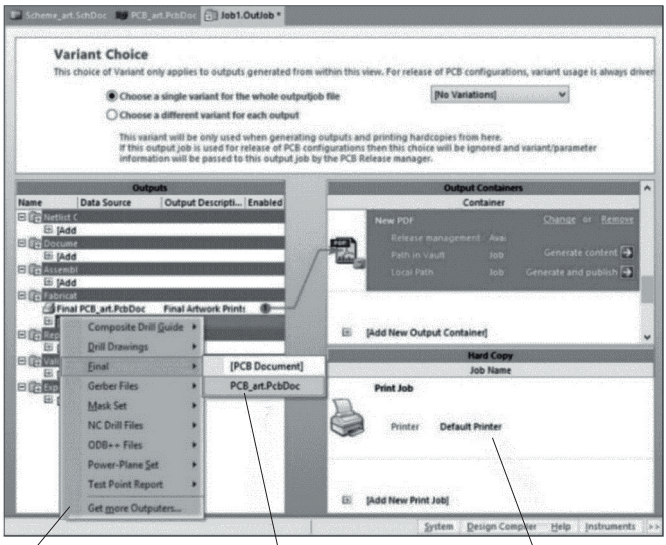


Рис. 3.74. Окно проекта генерации отчетов

Все это обеспечивает высокие показатели комплексной технологичности изделий электронной техники.

Рассмотрим (рис. 3.75) процесс формирования файла ПП УНЧ с выходом на три составляющие спектра в формате PDF и укажем этапы настройки документа.



Меню выбора синтезируемых документов

Выбор ранее созданного проекта

Выбор устройства вывода информации на печатный носитель

Рис. 3.75. Окно выбора документации и файла проекта

Как следует из рис. 3.75, для того чтобы сгенерировать выходной файл ранее созданного проекта ПП, необходимо в меню выбора синтезируемой документации (отчетов, см. рис. 3.74) добавить требуемую информацию о ПП. В данном случае выбран файл Final PCB_art.Pcb Doc, который содержит в себе топологию ПП, шелкографию и другую информацию, связанную с созданным проектом.

Для получения информации в печатном варианте необходимо в поле справа от окна выбора документации выбрать тип имеющегося принтера.

После выбора типа документации, которую необходимо синтезировать в выходном файле для дальнейшего использования в технологическом цикле производства, следует указать галочкой справа от наименования типа документа, в каком виде синтезировать (печатный, в виде файла PDF и т. д.). Завершается весь процесс генерации выходной документации нажатием кнопок Generatecontent и Print в зависимости от того, какой тип выходного формата выбран.

После того как выбран режим Generatecontent, внутренний модуль генерации выходной информации, встроенный в среду Altium Designer,

синтезирует документацию, ранее выбранную в поле отчетов, и через определенное время выдает на экран вычислительного устройства (рис. 3.76) в указанном формате (в данном случае PDF).

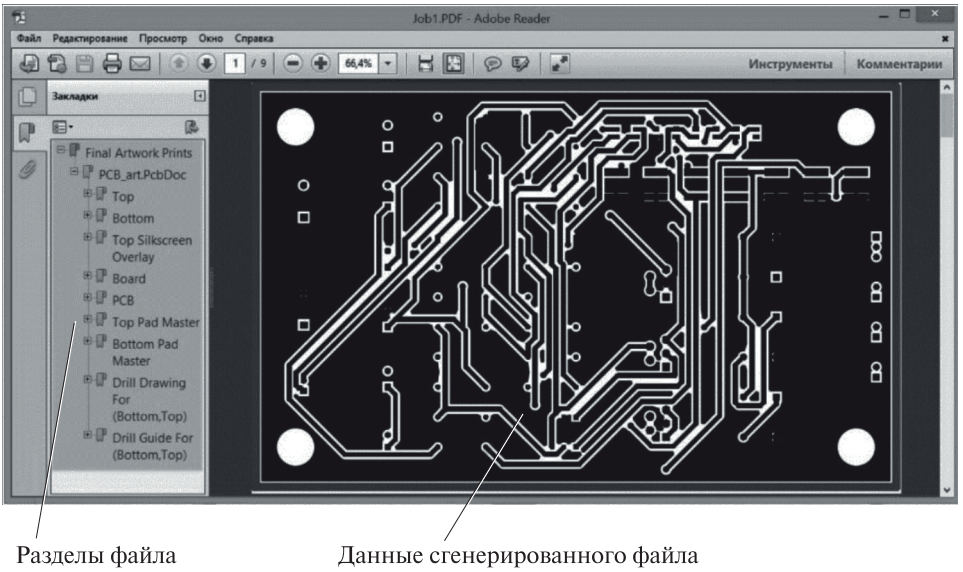


Рис. 3.76. Документация проекта Job1.PDF

В большинстве проектов требуется формирование, моделирование устройств (в том числе и ПП) в изометрической системе (3D) кроме привычной плоской версии. Пространственная модель отображает вид готового устройства и позволяет технологу легко ориентироваться в его конструкции. Проведение предварительного пространственного прототипирования еще недостаточно широко применяется, хотя и является эффективным с технологической точки зрения (и не только — в маркетинге также используется данный прием). 2D- и 3D-модели устройства «ИК-пульт фотокамеры» соответственно представлены на рис. 3.77, 3.78.

2D-вид устройства, в котором хорошо видны проводники и компоненты, представлен на рис. 3.77. Также указаны области, отведенные под 3D-модели, обозначенные штриховой линией в слое Mechanical 13. Данные области выявляют габариты моделей для удобного их размещения на ПП. Для переключения между 2D- и 3D-режимами существует меню выбора режима, находящееся в главной панели инструментов; также переключаться можно с помощью клавиш «2» и «3».

3D-модель, реализованная с помощью библиотеки Step-моделей (объемных компонентов), представлена на рис. 3.78. Используя библиотеку 3D Step-моделей, в режиме Altium 3D можно моделировать пространственные компоновки, в дальнейшем презентовать их предприятию для понимания конечной конструкции устройства.

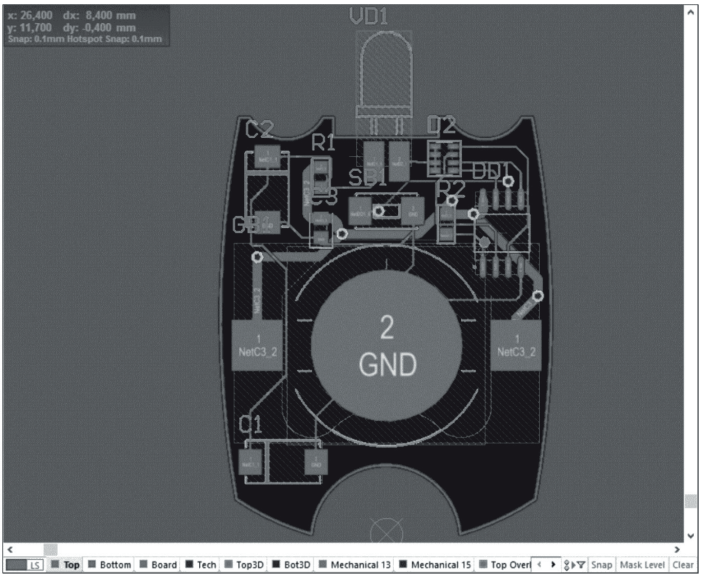


Рис. 3.77. 2D-вид устройства

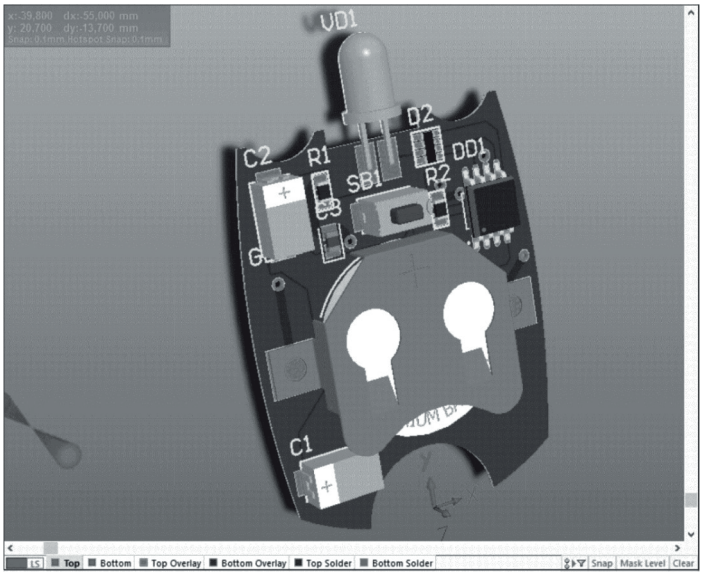


Рис. 3.78. 3D-вид устройства

С помощью синхронных технологий, встроенных в пакет Altum Designer, возможно создавать различные объемные элементы (резисторы, микросхемы, конденсаторы и т. д.). Однако в большинстве случаев компоненты создаются в других специализированных САПР, например Solid Works, Pro Engineer, Creo и т. д. Именно в этих средах можно создать реалистичную модель как ПП, так и монтируемых на ней компонентов. Среда Altum Designer

снабжена инструментом интеграции, который позволяет импортировать 3D-модели, созданные в приведенных выше САПР, в формате Step.

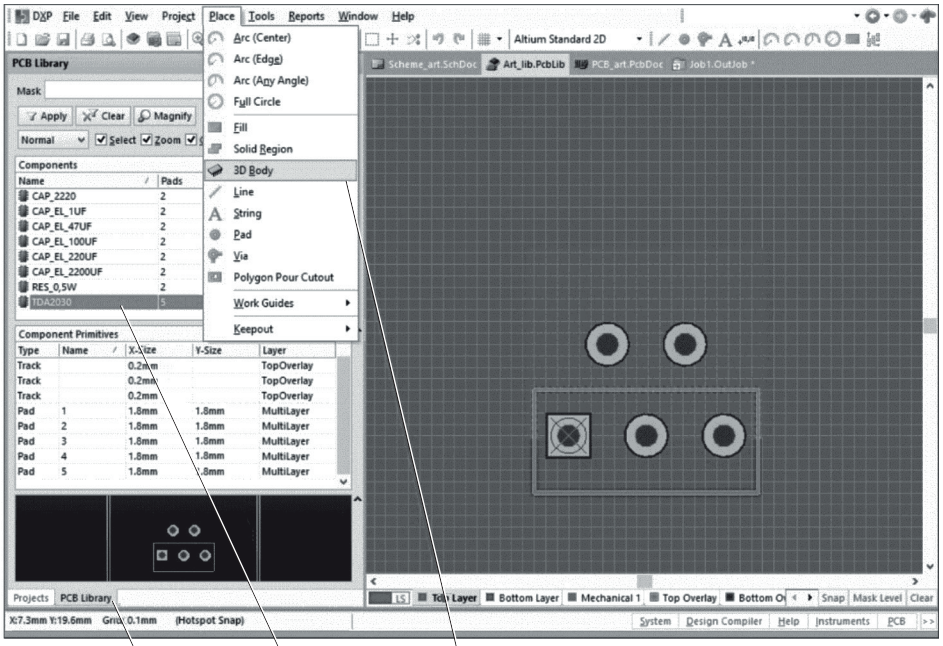
Например, последовательность этапов добавления Step-модели следующая:

– запустить библиотеку посадочных мест;

– выбрать посадочное место в библиотеке PCB Library (рис. 3.79);

– выбрать опцию (Place—3D Body) в инструментах главной панели (см. рис. 3.79);

– найти заранее загруженную в память устройства или имеющуюся в других САПР Step-модель.



Библиотека посадочных мест (PCB Library) | Список посадочных мест | Опция помещения 3D-модели

Рис. 3.79. Окно для импортирования Step-модели

В результате редактор поместит в рабочее поле изометрическую модель компонента, который ориентирован относительно оси *Z* под углом 90° (стандартная ориентация импортированной модели). Для согласования посадочного места с 3D-моделью необходимо выполнить следующие шаги:

– нажать два раза левой кнопкой мыши на Step-модель и в свойствах модели указать угол поворота (RotationX°, Y°, Z°);

– выбрать панель Tools в главном меню;

– выбрать опцию 3D Body Placement (рис. 3.80);

– нажать на опцию Position 3D Body;

– выбрать объект, который необходимо переместить (в данном случае УНЧ);

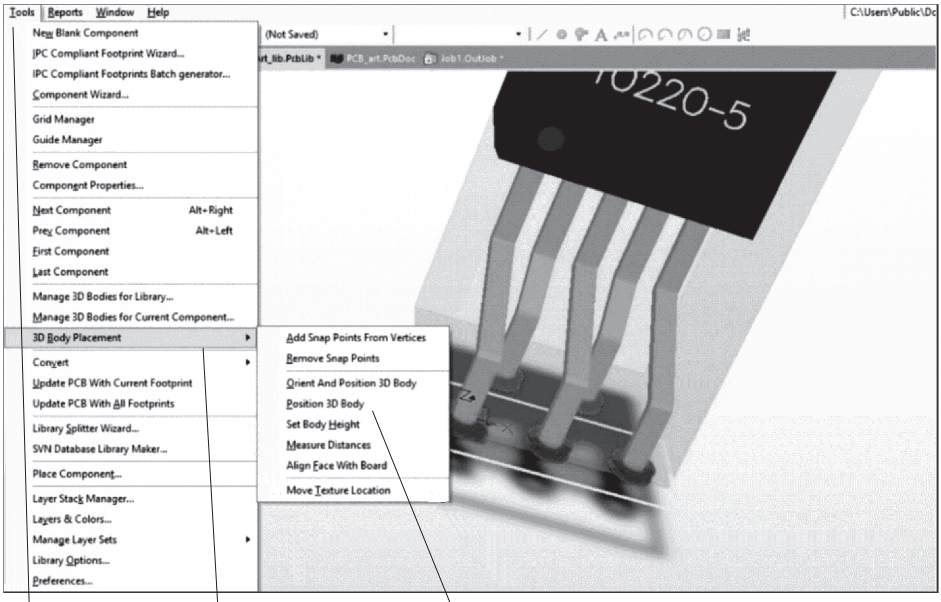


Рис. 3.80. Меню размещения Step-модели

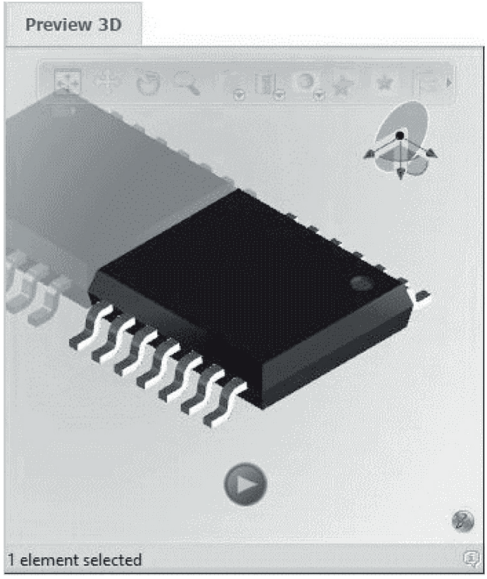


Рис. 3.81. 3D-модель ИМС (IP-блок), представленная компанией 3D Continental Center

– указать точку привязки, которую следует совместить с местом, указанным в следующем шаге;

– указать координату на посадочном месте, тем самым совместив компонент с посадочным местом.

Редактор 3D-моделей содержит большое разнообразие опций перемещения объектов (см. рис. 3.80). Анализ процесса импортирования 3D-модели формата Step — только часть того, что возможно использовать при проектировании реалистичной модели устройства. В последнее время благодаря большому спросу на пространственные модели их стали представлять на рынке в виде законченных IP-блоков (рис. 3.81), готовых к дальнейшему использованию в комплексных проектах.

Многие библиотеки созданных 3D-компонентов можно скачать из различных источников. Использование готовых библиотек значительно ускоряет и упрощает процесс проектирования устройства. 3D-модель микросхемы с корпусом TSSOP-14 представлена на рис. 3.81. Данная модель получена с сайта организации 3D Continental Center (http://www.3dcontentcentral.com/), в котором содержится база данных изометрических корпусов устройств, электрических компонентов, разъемов и прочих деталей, созданных пользователями со всего мира. Данные модели можно скачать в интересующем пользователя формате. Среда Altium Designer поддерживает Step-формат объемных деталей.

Немаловажный вопрос — в каком формате передавать заказ поставщику КС. Нередко заказчики, особенно работающие впервые, предпочитают присылать проект в формате PCB той системы, в которой разрабатывают ПП. В некоторых случаях это создает серьезные проблемы для производства. Каждая система проектирования ПП обладает своими особенностями, положительными и отрицательными сторонами. Кроме того, у каждой системы существует несколько версий, зачастую плохо совместимых по формату файлов. Невозможно поддерживать одновременно все версии всех форматов САПР, используемых заказчиками.

Поэтому заказчикам рекомендуется синтезировать файлы ПП в универсальном формате GerberRS274-X со встроенным описанием апертур. Функция вывода файлов в этом формате есть в любой системе проектирования. Многие фирмы требуют также наличия файла сверловки переходных отверстий, причем отдельный файл для каждого нового слоя.

В большинстве случаев организации, занимающиеся производством электронной аппаратуры, заказывают ПП у контрактных производителей, которые имеют специализированное оборудование, способное считывать файлы любого формата. Следовательно, пользователь автоматизированной среды проектирования не будет акцентировать внимание на возможности среды, связанные с генерацией выходной документации, так как посредники, специализирующиеся на производстве ПП, имеют значительное число универсального автоматизированного технологического оборудования и ПО, которые обрабатывают либо видоизменяют выходные форматы файлов на другие, воспринимаемые автоматизированным оборудованием. Однако существуют организации, которые с помощью собственного оборудования производят электронные устройства с начального этапа технологического цикла до конечного, проходя весь жизненный цикл изделия.

Среда Altum Designer поддерживает все необходимые форматы выходных файлов КС, которые могут потребоваться при формировании заказа у поставщика.

Прежде всего перед тем как синтезировать файл ПП, необходимо ознакомиться с рекомендациями и требованиями фирмы-изготовителя. Он должен указать форматы файлов, их число и компоненты, которые должны

входить в них. Например, можно рассмотреть рекомендации фирмы «Резонит» (http://rezonit.ru/).

Требования:

экспорт GerberRS274-X и программ сверления в формате Excellon:

– из PCAD 2000;
– Altium Designer;
– Sprint-Layout;
– Diptrace;
– Orcad.

Приведенные требования фирмы «Резонит» могут подойти и ряду других организаций, ориентированных на производство КС.

Приведем пример синтезирования Gerber-файлов ПП и файла программы сверловки NC Drills.

1. Для входа в меню экспорта Gerber-файлов выбираем File-Fabrication Outputs-Gerber Files (рис. 3.82).

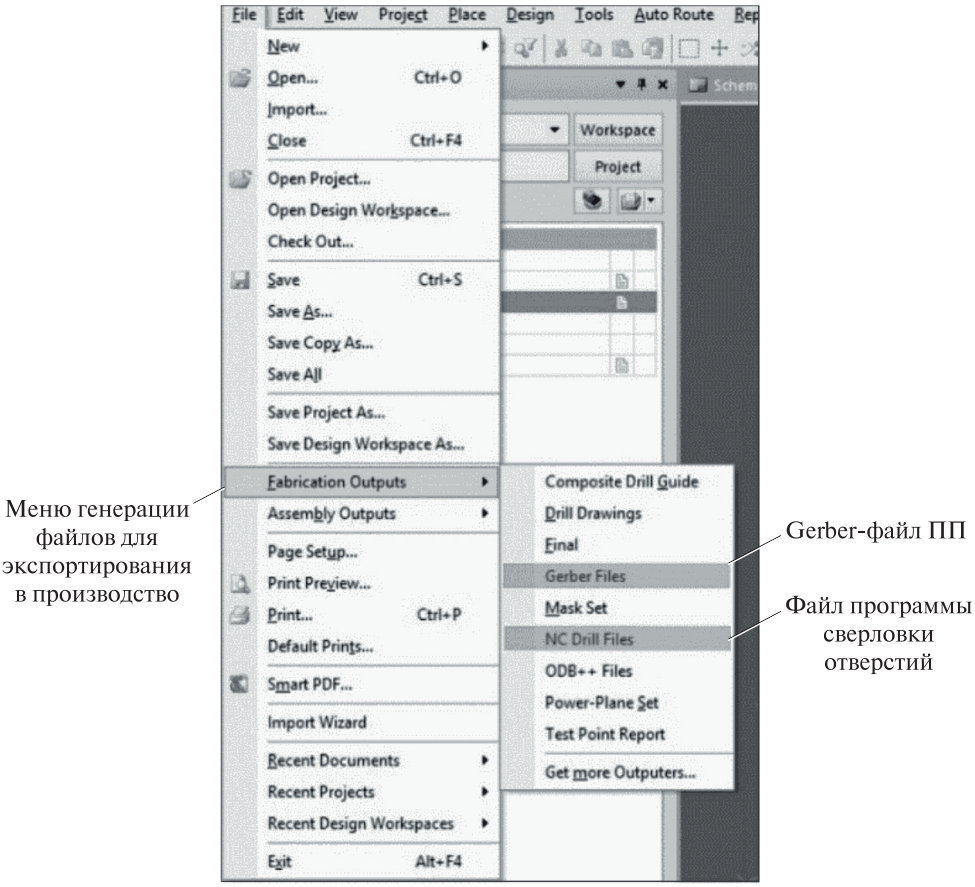


Рис. 3.82. Меню подготовки продукции к производству

2. В открывшемся окне необходимо задать конфигурацию Gerber-файлов (рис. 3.83).

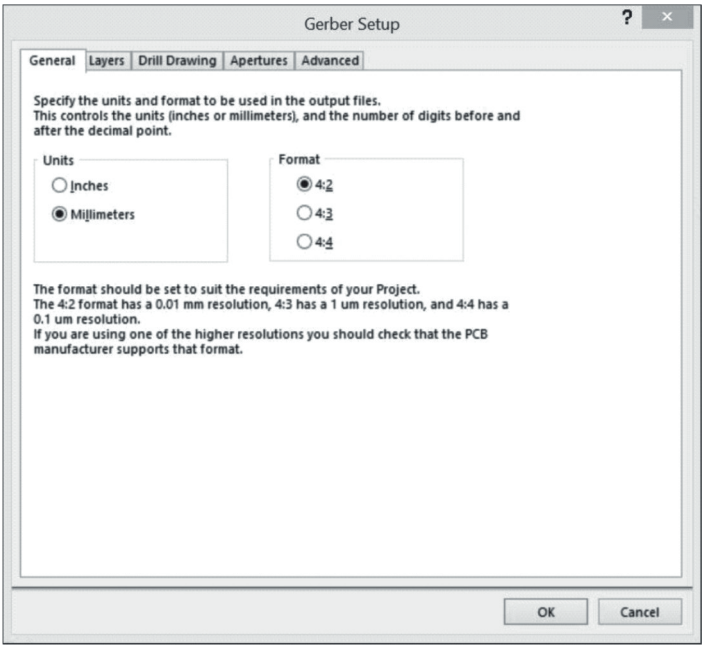


Рис. 3.83. Вкладка «Общие настройки»

3. Задать конфигурацию слоев во вкладке Layers (рис. 3.84).

4. Закладка Drill Drawing необходима для установления соответствия диаметрам отверстия соответствующих символов для формирования графических карт сверления. Этот шаг можно пропустить, так как на современных производствах сверление выполняется на станках с ЧПУ и в картах нет необходимости.

5. В закладке Apertures необходимо поставить галочку в поле Embedded apertures (RS274X) (рис. 3.85).

6. Для формирования файла с программой сверления выбрать File-Fabrication Outputs-NC Drill Files.

7. В открывшемся меню конфигурации программы сверления необходимо задать (рис. 3.86):

– единицы измерения — дюймы или миллиметры. Одновременное присутствие в проекте компонентов с миллиметровым и дюймовым шагом сводит выбор единиц измерения к чисто эстетическому восприятию;

– формат вывода — число цифр в координатах отверстий до и после десятичной запятой.

Представленный процесс создания наиболее встречающихся форматов файлов ПП и программы сверловки показывает, что любая среда проектирования имеет стандартный формат выходного файла ПП GerberRS274-X.

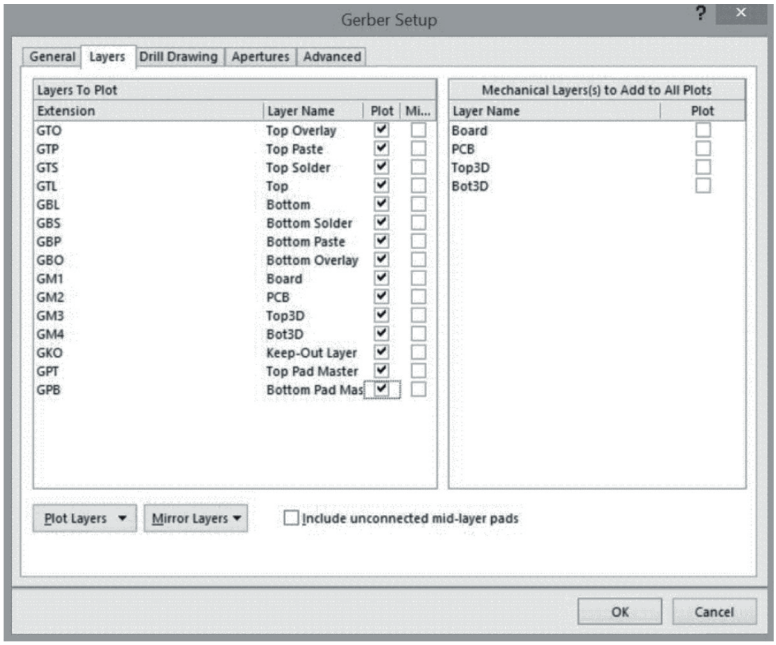


Рис. 3.84. Вкладка «Конфигурация слоев»

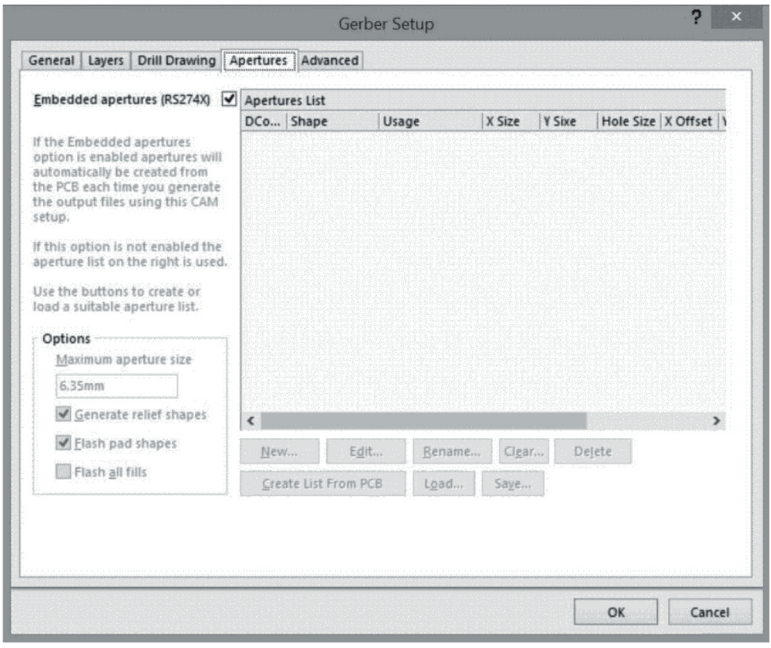


Рис. 3.85. Вкладка «Апертуры»

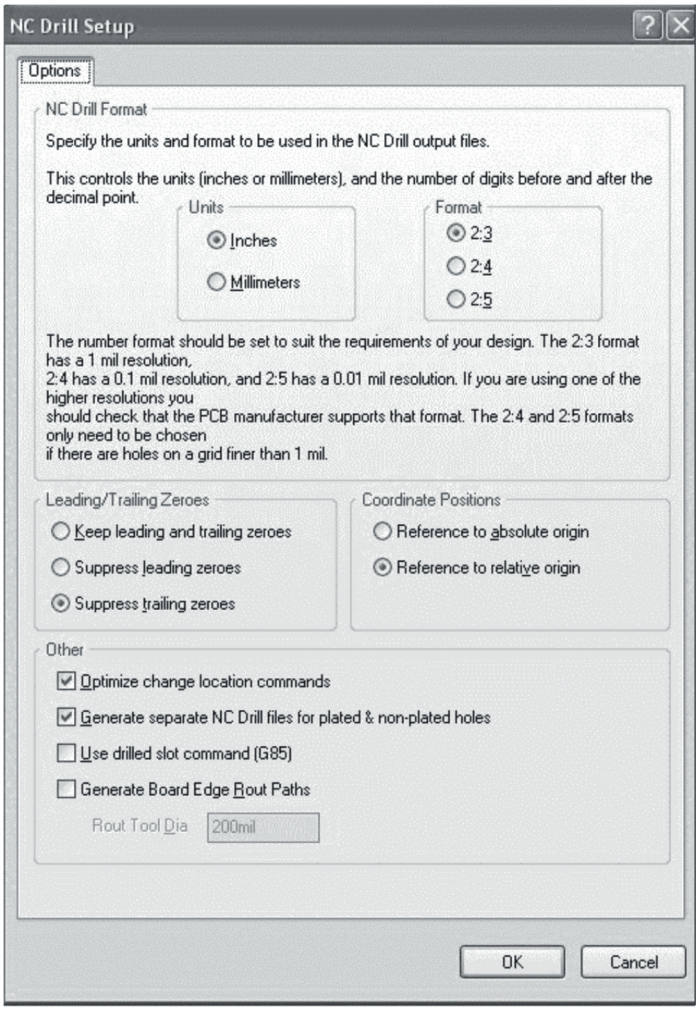


Рис. 3.86. Окно конфигурации программы сверления

Завершение практической работы

Сохраните проект с выполненным заданием и представьте отчет о выполненной работе преподавателю.

Порядок оформления отчета по семинару

1. Используя проект с предыдущего семинара, расставьте 3D-модели на посадочные места каждого из компонентов.
2. Создайте Output Job File.
3. По примеру создания Gerber- и NC Drills-файлов, создайте их для своего проекта.
4. Представить отчет преподавателю.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего используется файл Output Job File в среде Altium Designer?
2. Опишите возможности 3D-моделирования КС в пакете Altium Designer.
3. Перечислите шаги для добавления Step-модели.
4. Что необходимо сделать для согласования посадочного места с 3D-моделью?
5. Что необходимо выполнить перед тем, как синтезировать файл ПП?

3.7. СЕМИНАР № 7.
АНАЛИЗ СБОРОЧНОГО СОСТАВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Цели практической работы: определение класса точности изделия электронной техники.

Задачи практической работы:

– оценка параметров класса точности ПП;

– анализ элементной базы.

При проектировании ПП выбор класса точности зависит от анализа элементной базы, конструкторской сложности поставленной задачи, условий эксплуатации проектируемого изделия, требуемой плотности монтажа, стоимости устройства и т. д. Чем сложнее и меньше ПП, тем выше должен быть класс точности.

Класс точности конкретной ПП или печатного кабеля определяется наличием хотя бы одного элемента конструкции, соответствующего значениям класса точности, установленного ГОСТ Р 53429–2009. Это значит, что при наличии одного элемента конструкции класса точности 4 и всех остальных элементов класса точности 5 вся ПП будет иметь класс точности 4.

При проектировании ПП необходимо заранее учитывать класс точности, так как он влияет на выбор завода-производителя в зависимости от его технологического оснащения и стоимости производства. Чем выше класс точности ПП, тем более высоким требованиям должно соответствовать производство и тем выше будет стоимость ПП.

Классы точности ПП определяют минимальные предельные отклонения на размеры и расположение печатных проводников и КП.

Теоретическая часть

Необходимо изучить материалы лекции 1.3 «Классы точности и плотности печатного монтажа».

Индивидуальное задание

Краткий конспект теоретической части:

Класс точности — _____

_____

Параметры классов точности:

t — _____

_____

S — _____

_____

b — _____

_____

Δt — _____

_____

γ — _____

_____

Координатная сетка — _____

_____

Шаг координатной сетки — _____

_____

В индивидуальном задании необходимо выполнить анализ сборочного состава устройства (табл. 3.1).

Название устройства _____

Класс точности ПП _____

Таблица 3.1

Устанавливаемые компоненты

Наименование компонента	Число компонентов

Таблица 3.2

Параметры для заданного класса точности (по ГОСТ Р 53429–2009)

t,	S,	b,	γ,	Δt,

Все полученные данные параметры сборочного состава устройства необходимо внести в табл. 3.1 и 3.2.

Образец таблицы для анализа сборочного состава устройства приведен ниже (табл. 3.3).

Проведите самостоятельный анализ сборочного состава индивидуального задания (табл. 3.4).

Выводы

Таблица 3.3

Анализ сборочного состава устройства (образец)

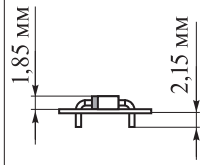
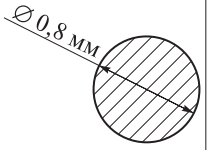
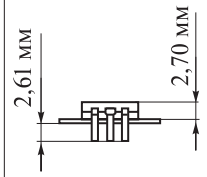
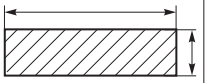
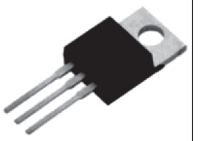
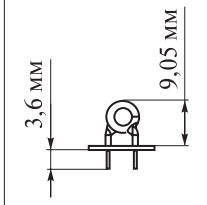
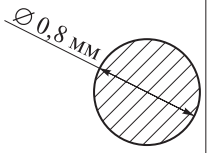
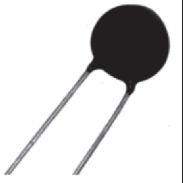
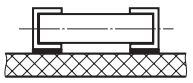
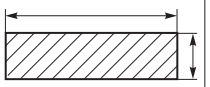
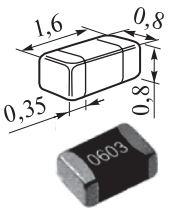
Наименование компонента	Тип выводов	Эскиз установки на ПП	Число выводов	Сечение выводов	Диаметр вывода, мм	Шаг выводов, мм	Форма КП	Эскиз корпуса	Установочная площадь, мм^2
Диод *VD*1	ТНТ, осевые		2		0,8	8,7	Круглая		27
Транзисторы *VT*1, *VT*2	ТНТ, радиальные		3		0,85	2,4	Круглая		162
Конденсатор *C*1	ТНТ, радиальные		2		0,8	5	Круглая		40
Конденсатор *C*2 0603-0.25	SMD		2		0,35×0,8	1	Прямоугольная		1,6×0,85

Таблица 3.4

Анализ сборочного состава устройства (для заполнения)

Наименование компонента	Тип выводов	Эскиз установки на ПП	Число выводов	Сечение выводов	Диаметр вывода, мм	Шаг выводов, мм	Форма КП	Эскиз корпуса	Установочная площадь, $мм^2$

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое класс точности ПП? От чего он зависит?
2. Назовите параметры точности, дайте их определения и единицы измерения.
3. Какой класс точности реализуем методом ЛУТ? Фоторезистивным методом? Точность какого метода выше и почему?
4. Что такое координатная сетка?
5. Зачем нужна координатная сетка?

3.8. СЕМИНАР № 8. ЭСКИЗИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Цель практической работы: разработка эскиза КС.

Задачи практической работы:
– расчет параметров КС и разработка эскиза слоев КС;
– разработка модели КС по эскизу в САПР Altium Designer;
– ознакомление с основами проектирования в пакете Altium Designer.

Теоретическая часть

Для выполнения данной работы следует подготовиться к трассировке ПП индивидуального задания в САПР Altium Designer: создать библиотеки УГО и посадочных мест всех элементов схемы; создать принципиальную схему устройства и перенести элементы в окно редактора ПП. Перед началом трассировки необходимо задать ориентировочные размеры ПП. Для этого установочную площадь следует определить по формуле

$$S = K_S \sum_i^n S_i,$$

где K_S — коэффициент, зависящий от назначений и условий эксплуатации аппаратуры, $K_S = 1...3$; n — число ЭРЭ; S_i — установочная площадь i-го ЭРЭ.

Полученное значение можно представить как произведение двух чисел, и определить таким образом габаритные размеры платы L_x и L_y. Соотношение габаритных размеров сторон ПП должно быть не более 3:1.

Расстояние между корпусами двух соседних ЭРЭ на ПП должно быть не менее 1 мм. Расстояние от края платы до корпуса — не менее 1,5 мм.

Определение длины электрических связей проводят по формуле

$$L_{\text{св}} = \beta\left(L_x + L_y\right)\eta_{\text{выв}} N_{\text{м}} = \beta\left(L_x + L_y\right)\Sigma\,\eta_{\text{выв}},$$

где β — коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние ширины и шага проводников, эффективности трассировки, формы корпуса ИМС и т. д., $\beta = 0{,}005...0{,}070$; $\eta_{\text{выв}}$ — число выводов ИМС; $N_{\text{м}}$ — число ЭРЭ, устанавливаемых на ПП.

Зададим значение шага трассировки проводников l_n. Это значение получается как частное от деления шага координатной сетки или основного шага размещения ЭРЭ на любое целое число. Сумма минимальной ширины проводника и зазора должна быть меньше шага трассировки.

Число логических слоев ПП

$$n_{\text{лог}} = \frac{\beta\left(L_x + L_y\right)\sum \eta_{\text{выв}} l_n}{L_x L_y \eta_{\text{тр}}} = \frac{L_{\text{св}}\, l_n}{L_x L_y \eta_{\text{тр}}},$$

где $\eta_{\text{выв}}$ — коэффициент эффективности трассировки.

В МПП наружные слои используют как монтажные (их число $n_{\text{м}}$ не может быть больше двух: $n_{\text{м}} \le 2$), а экранные слои (слои, выступающие в качестве слоев «земли» и «питания»), обычно выполняются либо сплошной металлизацией, либо в форме сетки.

Печатные платы располагаются между логическими слоями, т. е. число экранных слоев $n_{\text{э}} = n_{\text{лог}} - 1$, тогда общее число слоев ПП:

$$n_{\text{сл}} = n_{\text{лог}} + \left(n_{\text{лог}} - 1\right) + n_{\text{м}} = 2n_{\text{лог}} - 1 + 2 = 2n_{\text{лог}} + 1.$$

Толщину печатной платы $H_{\text{п}}$ рассчитывают исходя из общего числа ее слоев $n_{\text{сл}}$, номинального значения толщины слоя $H_{\text{с}}$ (мм), которое выбирают из ряда стандартных толщин для конкретного материала:

$$H_{\text{п}} = \sum_{n=1}^{n} H_{\text{с}} + \left(0{,}9\ldots1{,}2\right)\sum_{m=1}^{m} H_{\text{пр}} + n_{\text{э}} H_{\text{э}},$$

где $H_{\text{с}}$ — номинальное значение толщины слоя изолятора (например, стеклотекстолита); m — число прокладок; $H_{\text{пр}}$ — толщина прокладки стеклоткани; $n_{\text{э}}$ — число экранных слоев; $H_{\text{э}}$ — номинальное значение толщины экранного слоя.

Предельные отклонения толщины для МПП приведены ниже.

Толщина МПП, мм	Предельные отклонения на суммарную толщину МПП, мм
До 1,5 включительно	±0,2
От 1,5 до 3 включительно	±0,3
От 3 до 4,5 включительно	±0,5
Свыше 4,5	±0,65

Номинальный диаметр монтажных металлизированных и неметаллизированных отверстий рассчитывают из следующего соотношения:

$$d - \left(\left|\Delta d\right|\right)_{\text{н.о}} \ge d_{\text{э}} + r,$$

где $d_{\text{н.о}}$ — нижнее предельное отклонение диаметра вывода ЭРЭ; $d_{\text{э}}$ — максимальное значение диаметра вывода ЭРЭ, устанавливаемого на ПП (для прямоугольного вывода за диаметр принимают диагональ сечения вывода); r — разность между минимальным значением диаметра отверстия и максимальным $d_{\text{э}}$, выбирают в пределах 0,1...0,4 мм при ручной установке.

Минимальный диаметр металлизированного монтажного отверстия d_0 рассчитывается по формуле $d_0 \ge H_{\text{п}}\gamma$, где γ — отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине ПП.

Расчет диаметров КП проводят по формуле

$$D = d + \Delta d_{\text{в.о}} + 2b + \Delta t_{\text{в.о}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + \left[T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2\right]^{0,5},$$

$\Delta d_{\text{в.о}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра отверстия; b — толщина гарантийного пояска; $\Delta t_{\text{в.о}}$ — верхнее предельное отклонение ширины проводника; $\Delta t_{\text{н.о}}$ — нижнее предельное отклонение ширины проводника; $\Delta d_{\text{тр}}$ — величина подтравливания диэлектрика в отверстии (0,3 мм для МПП и 0 — для ОПП, ДПП и ГПК); T_d — позиционный допуск расположения осей отверстий; T_D — позиционный допуск расположения центров КП.

Диаметр КП округляют в бóльшую сторону до десятых долей миллиметра. Для некруглых (квадратных, прямоугольных, овальных) КП минимальный диаметр равен диаметру вписанной окружности с центром в узле координатной сетки.

Индивидуальное задание

Дополнительные параметры классов точности:

Δd — _____

q — _____

T_d — _____

T_D — _____

K_S — _____

Определение установочной площади ПП:

$S =$

Габаритные размеры ПП: $L_x =$ _____ мм, $L_y =$ _____ мм

Соотношение сторон: _____

$S =$

Определение длины электрических связей:

$L_{\text{св}} =$

β — _____

(β принять равным 0,06).

$L_{\text{св}} =$

Определение числа логических слоев ПП $n_{\text{лог}}$:

$n_{\text{лог}} =$

l_n — _____

$\eta_{\text{тр}}$ — _____

$n_{\text{лог}} =$

Эскиз слоев ПП (укажите толщину слоев, подпишите материал и назначение каждого слоя):

Определение толщины ПП:

$H_{ПП}$ =

Материал слоев: _____ $H_с$ = _____мм;

$H_э$ — _____ $H_э$ = _____мм;

$H_{пр}$ — _____

$H_{ПП}$ =

Допуск на толщину МПП _____

Определение диаметров отверстий:

Переходные отверстия: d_0 =

Монтажные отверстия: d = r = _____

r — _____

Определение диаметров КП:

D =

Эскиз ПП

Выводы

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое установочная площадь?
2. Как определить длину электрических связей?
3. Назовите методы оценки допусков.

3.9. СЕМИНАР № 9.
РАСЧЕТ УЗКИХ МЕСТ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА

Цель практической работы: расчет узких мест ПП в разработанном ранее эскизе.

Задачи практической работы:

– расчет расстояния от края ПП до элементов проводящего рисунка;

– расчет расстояния от края неметаллизированного отверстия, паза, выреза до элементов проводящего рисунка.

Теоретическая часть

Расчет узких мест на ПП. Расстояние от края ПП до элементов проводящего рисунка Q_1 берут не менее толщины ПП с учетом допусков на размеры сторон.

Расстояние от края неметаллизированного отверстия, паза, выреза до элементов проводящего рисунка рассчитывают по формуле

$$Q_2 = q + k + 0{,}5\left(T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{в.о}}^2\right)^{1/2},$$

где q — ширина ореола, скола (зависит от толщины материала основания ПП и класса точности ПП); k — наименьшее расстояние от ореола, скола до соседнего элемента проводящего рисунка; T_d — позиционный допуск расположения осей отверстий; T_D — позиционный допуск расположения центров КП; $t_{\text{в.о}}$ — верхнее предельное отклонение размеров ширины проводника.

Индивидуальное задание

Расчет узких мест ПП. Расстояние от края ПП до элементов проводящего рисунка:

$Q_1 =$

Расстояние от края неметаллизированного отверстия, паза, выреза до элементов проводящего рисунка:

$Q_2 =$

Приведите пример узких мест на ПП в топологии индивидуального задания.

Для наглядности расстояний воспользуйтесь инструментом измерения расстояния, расположенным в редакторе схем в меню Reports (Reports — Measure Distance или сочетанием клавиш Ctrl + M).

Выводы

Контрольные вопросы и задания

1. Что считается узкими местами на ПП?
2. Зачем нужно расчитывать узкие места на ПП?
3. Как соотносятся минимальные размеры узких мест на ПП и класс точности ПП?
4. Назовите проблемы, которые могут возникнуть при неверном расчете узких мест на ПП.

3.10. СЕМИНАР № 10. МЕТОД РАСЧЕТА ШИРИНЫ ПЕЧАТНОГО ПРОВОДНИКА

Цель практической работы: изучение метода расчета ширины печатного проводника.

Задачи практической работы:

– проанализировать способ изготовления ПП индивидуального задания;

– рассчитать минимальную ширину печатного проводника в зависимости от максимального тока в нем.

Теоретическая часть

Ширина печатного проводника зависит от электрических, конструктивных и технологических требований.

Наименьшая номинальная ширина проводника, мм, рассчитывается по формуле

$$t = t_{\min D} + \left|\Delta t_{\text{н.о}}\right|.$$

Здесь $t_{\min D}$ — минимальная ширина проводника, рассчитываемая в зависимости от токовой нагрузки по формуле

$$t_{\min D} = \frac{I_{\max} l \sum_{i=1}^{k} \frac{\rho_i}{h_i}}{U_{\text{доп}}},$$

где $\left|\Delta t_{\text{н.о}}\right|$ — нижнее предельное отклонение размеров ширины печатного проводника, зависящее от класса точности ПП (см. ГОСТ Р 53429–2009).

Индивидуальное задание

Выбранная технология изготовления ПП и обоснование выбора:

_____

_____

_____

_____

Материал основания ПП

_____

Таблица 3.5

Эскизы основных этапов производства ПП

Сверление	
Предварительная металлизация	
Полная металлизация	
Нанесение припоя	

Расчет ширины печатного проводника

Заданные параметры работы ячейки:

$I_{max} =$

$U_{доп} =$

$l =$

Класс точности ПП _____

I_{max} — _____

$U_{доп}$ — _____

l — _____

ρ — _____

$t_{min\,D}$ — _____

$$t_{min\,D} = \frac{I_{max} l \sum_{i=1}^{k} \frac{\rho_i}{h_i}}{U_{доп}},$$

$t_{min\,D} =$

$t = t_{min\,D} + |\Delta t_{н.о}| =$

Выводы

Контрольные вопросы и задания

1. От чего зависит значение допустимой токовой нагрузки? В каких случаях и насколько допустимо уменьшать токовую нагрузку для печатных проводников?
2. Назовите способы изготовления ДПП.
3. Назовите материалы основания ПП. Приведите конкретные примеры.

4. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

4.1. ПРИМЕРНАЯ БАЗОВАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Утверждаю
Первый проректор —
проректор по учебной работе
МГТУ им. Н.Э. Баумана
_____ Б.В. Падалкин
«___» _____ 20__ г.

Факультет «Информатика и системы управления»
Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

Факультет «Информатика и управление»
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кафедра ИУК1 «Проектирование и технология производства электронных приборов»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Технология коммутационных структур ЭС»

для направления подготовки (уровень бакалавриата)
12.03.01 «Приборостроение»

Авторы программы:
К.В. Селиванов, доцент, канд. техн. наук
В.П. Жалнин, доцент, канд. техн. наук
Н.В. Макушина, ст. преп.

Москва

Настоящая рабочая программа дисциплины устанавливает требования к знаниям и умениям студента, а также определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа разработана в соответствии со следующими документами:

– самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартом (СУОС 3++) по направлению подготовки (уровень бакалавриата) 12.03.01 «Приборостроение»;

– основной профессиональной образовательной программой по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение»;

– учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных ОПОП на основе СУОС 3++ по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

РАЗДЕЛ 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины: формирование у обучаемых общих представлений и знаний в области изучения технологий изготовлений КС; развитие умений разрабатывать КС и выбирать технологию ее производства; освоение современных интерактивных методов проектирования КС на ПК в пакетах прикладных программ; выработка навыков чтения топологии КС и ее диагностирование на наличие ошибок; умение подготавливать ТЗ, пакет документации на разрабатываемые КС для электронных средств и электронной аппаратуры.

Задачами дисциплины является изучение:

– фундаментальных положений теории построения КС;

– методов моделирования проходящих процессов в КС;

– моделей физико-механических компонентов ЭА и алгоритмов расчета процессов в ЭА;

– расчетов механической прочности и устойчивости несущих показателей ПП;

– расчета и технологии производства КС ПП;

– методов проектирования и производства многослойных и других видов КС;

– организации и подготовки производства различных видов КС.

Примечание. Дисциплина входит в блок Б1 «Дисциплины (модули)» образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

Изучение дисциплины предполагает предварительное освоение следующих дисциплин учебного плана:

– Неорганическая химия;

– Физика;

– Физико-химические основы электронных средств;

– Материаловедение и материалы электронных средств.

Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее для следующих дисциплин образовательной программы:

– Технология сборки электронных средств;

– Современные технологии в производстве электронных средств;

– Подготовка и защита ВКР.

Освоение учебной дисциплины связано с формированием компетенций с учетом матрицы компетенций ОПОП для направления подготовки (уровень бакалавриата) 12.03.01 «Приборостроение».

РАЗДЕЛ 2. ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПОСЛЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Студент должен знать:

– стандарты ЕСКД;

– стандарты ЕСТД;

– общие принципы построения конструкций электронно-вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры;

– структуру современных предприятий, функции технических подразделений, задачи отдела главного технолога в технологической подготовке производства.

2.2. Студент должен уметь:

– читать технологическую документацию в специализированных системах электронного проектирования;

– использовать справочные материалы для корректного оформления и составления конструкторской, отчетной и сопроводительной документации;

– читать конструкторскую документацию в специализированных системах электронного проектирования;

– осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования деталей, узлов и модулей электронных средств.

2.3. Студент должен владеть:

– комплексным рассмотрением вопросов схемотехнического и конструкторского проектирования ПП;

– навыками составления и чтения чертежей деталей и сборочных единиц с использованием современных информационных технологий;

– навыками работы в типовых САПР схем электронной аппаратуры;

– навыками создания проектной и технической документации.

РАЗДЕЛ 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВИДАМ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ

Виды учебной работы	Объем по семестрам, ч	
	Всего	1 семестр
Объем дисциплины	144	144
1. Аудиторная работа:	85	85
лекции (Л)	34	34
семинары (С)	34	34
2. Самостоятельная работа обучающихся (СР):	59	59
проработка учебного материала лекций	4,25	4,25
подготовка к семинарам	4,25	4,25
подготовка к лабораторным работам (ЛР)	8	8
подготовка к экзамену	30	30
подготовка к рубежному контролю	6	6
другие виды самостоятельной работы	6,5	6,5
Вид промежуточной аттестации обучающегося		Экзамен

РАЗДЕЛ 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Тема модуля	Л	С	ЛР	СР
5-й семестр		ч	ч	ч	ч
1	Типы коммутационных структур и их конструкционные элементы	16	16	8	14
2	Технология и методы изготовления коммутационных структур	18	18	9	15
3	Экзамен	–	–	–	30
	ИТОГО:	34	34	17	59

СОДЕРЖАНИЕ

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
1	Типы коммутационных структур и их конструкционные элементы, типовые операции изготовления	
	Лекции	16
Л1.1	Введение в технологию коммутационных структур (КС). Виды КС, примеры. Геометрические параметры некоторых видов КС. Конструктивные элементы печатных плат (термины и определения). Понятие печатного монтажа. Проводящий рисунок печатной платы (ПП), элементы проводящего рисунка. Контактные площадки и их виды. Металлизированные монтажные и переходные отверстия. Координатная сетка. Виды основных отверстий ПП	2
Л1.2	Методы и средства автоматизации проектирования КС. Развертывание цифрового инструментального производства в рамках единой цифровой среды. CALS-технологии. Концепция бережливого производства. САПР, поддерживающие сквозное проектирование КС. Пакет Altium Designer. Алгоритм проектирования КС	2
Л1.3	Классы точности и плотности печатного монтажа. Виды узких мест проводящего рисунка и их геометрический расчет. Геометрический расчет геометрических параметров и точность печатного монтажа с учетом технологических ограничений метода изготовления. Предельные значения технологических параметров КС	2
Л1.4	Особенности конструирования и технологии производства ПП различных типов. Материалы, области применения ПП различных типов. Конструкторско-технологические особенности односторонних (ОПП) и двусторонних (ДПП) ПП, многослойных ПП (МПП) с металлизацией сквозных отверстий, МПП послойного наращивания, попарного прессования, с открытыми контактными площадками (КП), МПП с технологией достраиваемых слоев с открытыми и глухими микропереходами с высокой плотностью проводящего рисунка. Гибкие печатные платы (ГПП), гибкие печатные кабели (ГПК), гибко-жесткие ПП, рельефные ПП	2
Л1.5	Способы получения проводящего рисунка ПП: фотографический; сеткографический; способ фотоформирования; механический; способ получения рисунка с использованием лазерно-утюжной технологии (ЛУТ). Физические схемы и технология реализации каждого способа; разрешающая способность; геометрическая точность рисунка печатной схемы	2
Л1.6	Способы получения проводящего рисунка ПП: химический — травление медной фольги (проводящего слоя) с пробельных мест; химический — осаждение меди в зонах проводящего рисунка; электрохимический — наращивание меди в зонах проводящего рисунка; термический — вакуумное напыление меди в зонах проводящего рисунка. Прямая металлизация диэлектрика в переходных отверстиях	2

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
Л1.7	Методы изготовления ПП. Физические схемы и технология реализации каждого способа. Геометрическая точность проводящего рисунка. Явления подтравливания и разращивания проводящего рисунка в зависимости от применяемых материалов и длительности операций. Геометрический расчет точности проводящего рисунка. Области применения методов, класс точности получаемого рисунка. Химические методы изготовления ПП с защитой проводящего рисунка фото- или сеткографическим способом или маской Sn–Pb при травлении фольги с пробельных мест. Комбинированный позитивный метод и тентинг-метод с образованием проводящего рисунка на поверхности и в объеме (металлизированные отверстия) фольгированного диэлектрика. Электрохимический и фотоаддитивный методы изготовления ПП на нефольгированном диэлектрике. Целесообразность применения методов для изготовления ПП высоких классов точности. Применение электрохимического метода для изготовления рельефных ПП с проводящим рисунком в объеме диэлектрического основания. Аддитивное производство ПП, 3D-печать. Сравнение субстрактивного и аддитивного производства	2
Л1.8	Типовые операции технологического процесса изготовления ПП. Химическое осаждение меди, гальваническое осаждение меди, травление меди, сверление монтажных отверстий. Используемые материалы и оборудование. Геометрические и технологические ограничения операций. Техника безопасности при работе со сверлильным станком	2
	Семинары	16
С1.1	Семинарские занятия проводятся в компьютерном классе с использованием САПР КС. Ознакомление с САПР КС для проектирования топологии ПП. Создание проектов, управление проектами, запуск приложений, файла программы, настройки среды, закрытие программы САПР КС	2
С1.2	Концепция библиотек, понятие компонента, моделей, виды моделей. Разработка условно графических изображений (УГО) компонентов в САПР КС. Настройка рабочей области редактора для создания УГО. Графические команды создания УГО	2
С1.3	Разработка посадочных мест (FOOTPRINT). Настройки рабочей области редактора посадочных мест: единицы измерения, сетки, слои. Графические команды создания посадочного места. Создание массива КП. Настройки рабочей области редактора посадочных мест: единицы измерения, сетки, слои. Графические команды создания посадочного места. Создание массива КП. Размещение 3D-моделей в посадочном месте. Проверка библиотеки посадочных мест на ошибки	2

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
С1.4	Технология получения глухих и скрытых микропереходных отверстий. Перспектива развития конструкций и технологий ПП. Создание, подключение, открытие сторонних библиотек в САПР КС. Подключение посадочных мест к УГО. Создание интегрированной библиотеки. Подключение библиотек в проекты. Импорт библиотек из других САПР	2
С1.5	Работа с редактором принципиальных схем САПР КС. Настройка редактора схем: единицы измерения, сетки, параметры листа. Создание и подключение стандартных (по ГОСТу) форматок для листов схемы. Перемещение в редакторе принципиальных схем. Просмотр принципиальных схем. Переходы в редакторе принципиальных схем	2
С1.6	Размещение компонентов на листе принципиальной схемы в САПР КС. Редактирование параметров компонентов на схеме. Прорисовка связей на схеме. Построение шины. Именование цепей. Объекты редактора принципиальных схем. Электрические и графические примитивы. Редактирование объектов на принципиальной схеме	2
С1.7	Ручное и автоматическое создание заготовки ПП. Интерактивная трассировка ПП. Режимы интерактивной трассировки. Редактирование проводников на ПП в интерактивном режиме. Инструменты трассировки ПП и их настройки. Переходные отверстия: применение, настройка. Настройка способов подключения к полигонам, экранным слоям. Настройка технологических параметров переходных отверстий. Создание ПП с помощью импорта файлов DXF и STEP. Настройка вывода готовой топологии ПП и конструкторской документации на разработанный образец	2
С1.8	Подготовка файлов ПП к производству в САПР КС. Создание и экспортирование Gerber-файлов. Формирование стоимости производства ПП. Особенности Gerber-файлов для конкретных заводов-изготовителей. Генерация файлов для разработки спецификации и перечня элементов. Формирование текстовой документации	2
	Лабораторные работы	8
ЛР1.1	Исследование способа изготовления ПП способом ЛУТ. Изучение способов подготовки основания печатной платы, способов переноса рисунка топологии на основание и способов травления металлизации с пробельных мест в лабораторных условиях. Изучение техники безопасности при работе в лаборатории	4
ЛР1.2	Исследование способа изготовления ПП с использованием фотолитографии. Изучение способов подготовки основания ПП, нанесения фоторезиста, экспонирования, проявления, травления в лабораторных условиях. Ознакомление с лабораторным оборудованием. Изучение техники безопасности при работе в лаборатории	4

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
	Самостоятельная работа	14
СР1.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР1.2	Подготовка к семинарам	2
СР1.3	Подготовка к лабораторным работам	4
СР1.4	Подготовка к рубежному контролю	3
СР1.5	Другие виды самостоятельной работы	3
2	Технология, методы изготовления и контроль качества коммутационных структур	
Л2.1	*Лекции* Анализ технологии изготовления односторонних печатных плат (ОПП) с неметаллизированными отверстиями, ОПП без монтажных отверстий, двусторонних печатных плат (ДПП) на диэлектрическом основании, ДПП на металлическом основании, ДПП без монтажных отверстий. Способ изготовления, применение, материалы. Рассмотрение типовых операций для производства ДПП и типового оборудования. Гибкие печатные платы, гибкие печатные кабели, рельефные платы — способ изготовления, материалы, применение, геометрические параметры проводящего слоя. Гибко-жесткие печатные платы. Конструкция, применение, особенности изготовления	18 2
Л2.2	Анализ технологии изготовления многослойных печатных плат (МПП) попарного прессования, МПП с металлизацией сквозных отверстий, МПП послойного наращивания. Способ изготовления, применение, материалы. Рассмотрение комплекта типововых операций и типового оборудования для производства МПП	2
Л2.3	Оборудование для макетирования и прототипирования ПП. Рассмотрение способов макетирования с помощью использования различных макетных ПП. Рассмотрение способов, подразумевающих удаление проводящего слоя с пробельных мест проводящего рисунка. Обзор возможностей фрезерного станка, установки конвекционной печи, установки экспонирования, установки трафаретной печати и установки монтажа КПМ	2
Л2.4	Обзор оборудования для серийного производства ПП комбинированным позитивным методом. Оборудование для резки листов текстолита, сверления переходных и монтажных отверстий, предварительная металлизация отверстий. Рассмотрение используемых материалов. Оборудование для получения рисунка схемы: ламинатор для нанесения фоторезиста; установка экспонирования; линия химической обработки (проявление рисунка топологии). Режимы работы установок. Рассмотрение конвейерной линии травления. Сеткографическая установка для нанесения жидкой паяльной маски. Установки нанесения флюса и горячего лужения. Установки оптического и электрического контроля	2

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
Л2.5	Конструкционные особенности КС жидкокристаллических и плазменных панелей. Понятие жидких кристаллов, пикселей. Технология изготовления прозрачных электродов адресной матрицы и коммутации тонкопленочных транзисторов, сравнение низкотемпературной кремниевой технологии и поликремниевой технологии изготовления тонкопленочных транзисторов, рассмотрение методов формирования пленки на стеклянной или пластиковой подложке. Рассмотрение конструкции плазменных панелей (газоразрядных экранов), принципа их работы. Достоинства и недостатки, особенности конструкции	2
Л2.6	Оптоволоконные коммутационные структуры, коммуникации и проводящие среды. Основные понятия волоконной оптики. Оптическое волокно. Классификация оптических волокон. Печатные платы с оптоволоконными проводниками. Основные параметры оптоволокна. Конструкция волоконно-оптического кабеля. Влияние основных параметров на качественные характеристики. Дисперсия. Затухание. Численная апертура. Прочность волокна. Радиус изгиба. Многомодовое волокно. Одномодовое волокно. Технология изготовления световодов. Оценка эффективности использования оптоволоконных проводников в ПП. Варианты систем на основе оптических соединений	2
Л2.7	Контроль КС. Основные методы контроля КС (электрический, оптический, рентгеновский). Электрические методы локализации неисправностей. Принцип работы локализатора неисправностей. Аналоговые сигнатуры базовых элементов (резистора, конденсатора, индуктивности, диода, светодиода, стабилитрона)	2
Л2.8	Основные методы дефектоскопии КС (визуальный осмотр, микрошлифы, оптический контроль, рентгеновский контроль). Описание каждого метода, применение. Разрушающий и неразрушающий контроль. Оптические методы анализа паяных соединений. Основные дефекты паяных соединений. Описание и причины возникновения каждого дефекта. Способы предотвращения появления дефектов. Анализ дефектов ПП по микрошлифам. Дефекты монтажных и переходных отверстий. Описание и причины возникновения каждого дефекта. Способы предотвращения появления дефектов. Методика изготовления микрошлифов. Автоматическая обработка изображений микрошлифов	2
Л2.9	Разработка пакета документации на КС: правила оформления электрической принципиальной схемы; чертежа ПП; сборочного чертежа электронной ячейки и спецификации; электромонтажного чертежа и спецификации. Основные понятия и определения. Правила изображения электрических компонентов и их соединений, а также жгутов и кабелей. Оформление технических требований к чертежу	2

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
	Семинары	16
С2.1	Семинарские занятия проводятся в компьютерном классе с использованием САПР КС. Каждый студент получает промышленно изготовленный образец ПП и проводит его конструктивно-технологический анализ. После анализа студент должен ввести в САПР КС конструктивно-технологические характеристики: тип ПП; класс точности; слои и т. д.	2
С2.2	Создание эскиза ПП индивидуального задания. Анализ особенностей проводящего рисунка, наличие всех видов отверстий и их диаметры, создание правил топологии в САПР КС. Определение отношения $d_{м.о}/H_{ПП}$, наличие и величина гарантированных поясков b в зоне круглых КП, особенности наружного контура ПП. По конфигурации и расположению посадочных мест прогнозировать типы устанавливаемых ИЭТ и определять наличие их цифровых двойников в САПР КС, в случае отсутствия некоторых из них их создает студент	2
С2.3		2
С2.4	Студентами изучается методика расчета узких мест коммутационных структур, в соответствии с полученными значениями вносятся коррективы в разрабатываемый проект в САПР КС. Рассматриваются узкие места проводящего рисунка ПП. Приводятся формулы геометрического расчета узких мест. После расчета полученные значения заносятся в САПР КС. Создание топологии ПП. Излагаются способы компенсации узких мест и способы их корректировки в САПР КС. На выданном образце ПП студенты находят, выполняют эскизы и вносят в САПР КС узкие места проводящего рисунка ПП	2
С2.5		2
С2.6	Расчет частоты собственных колебаний ПП. Анализ способа закрепления образца ПП. Оценка работоспособности ПП при заданном диапазоне частот. Оценка собственной частоты нагруженной ПП. Анализ способов уменьшения частоты колебаний ПП	2
С2.7		2
С2.8	Расчет минимальной ширины печатного проводника. Исследование геометрии проводящего рисунка. Анализ возможного способа изготовления ПП индивидуального задания. Анализ материалов, используемых для производства ПП. Анализ допустимой токовой нагрузки ПП	2
	Лабораторные работы	9
ЛР2.1	Исследование геометрических параметров проводящего рисунка КС	3
ЛР2.2	Исследование качества переходных отверстий ПП	2
ЛР2.3	Локализация неисправностей компонетов на смонтированных КС. Контроль с помощью аналогового сигнатурного анализа. Контроль пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) и полупроводниковых компонентов (диодов, светодиодов, стабилитронов, транзисторов)	4

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
	Самостоятельная работа	15
СР2.1	Проработка учебного материала лекций	2,25
СР2.2	Подготовка к семинарам	2,25
СР2.3	Подготовка к лабораторным работам	4
СР2.4	Подготовка к рубежному контролю	3
СР2.5	Другие виды самостоятельной работы	3,5
3	Экзамен	30
СР3.1	Подготовка к экзамену	30

РАЗДЕЛ 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

№ п/п	Тема самостоятельной работы	Объем, ч	Литература
	5-й семестр		
1	Проработка учебного материала лекций	4,25	[1–51]
2	Подготовка к семинарам	4,25	[1–51]
3	Подготовка к лабораторным работам	8	[1–51]
4	Подготовка к экзамену	30	[1–51]
5	Подготовка к рубежному контролю	6	[1–51]
6	Другие виды самостоятельной работы	6,5	[1–51]

СОДЕРЖАНИЕ

Самостоятельная работа студентов по дисциплине обеспечивается следующими учебно-методическими материалами.

1. Рабочая программа дисциплины.
2. Учебная литература и дополнительные материалы.
3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».
4. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины, обеспечивающие самостоятельную работу студента при подготовке к учебным занятиям, выполнении домашних работ, подготовке к контрольным мероприятиям и аттестациям.
5. Комплект индивидуальных заданий.

Студенты получают доступ к указанным материалам начиная с первого занятия по дисциплине.

Рубежные контроли

Первый рубежный контроль — 7-я неделя

1. Типы ПП и их конструктивно-технологические особенности.
2. Фотоаддитивный метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, области применения.
3. Технология получения рисунка ПП сеткографическим способом: схема, операции, точность, применение.
4. Технология получения рисунка ПП механическим способом: схема, операции, точность, применение.

Второй рубежный контроль — 15-я неделя

1. Назначение технологического поля в заготовках; элементы заготовки ПП, размещаемые на технологическом поле. Отличия единичных и групповых заготовок.
2. Способы получения заготовок из листового материала в массовом и серийном производстве
3. Механическая подготовка поверхности: цель операции, используемые материалы и оборудование.
4. Электрохимическая подготовка поверхности: цель операции, декапирование и пассивирование — краткое описание процессов.

РАЗДЕЛ 6. КУРСОВОЙ ПРОЕКТ, КУРСОВАЯ РАБОТА

№ п/п	Тема курсового проектирования, курсовой работы	Объем, ч	Литература
5-й семестр		–	

РАЗДЕЛ 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева [и др.]; ред. В.А. Шахнов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 563 с. (Информатика в техническом университете). Библиогр.: с. 561–562. ISBN 5-7038-2716-7.

2. *Гриднев В.Н.*, *Гриднева Г.Н.* Проектирование коммутационных структур электронных средств: учеб. пособие для вузов; ред. Шахнов В.А. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 342 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 7). Библиогр.: с. 336–338. ISBN 978-5-7038-4075-7.

3. *Пирогова Е.В.* Проектирование и технология печатных плат: учебник для вузов. М.: Форум: Инфра-М, 2005. 559 с. (Высшее образование). Библиогр.: с. 557–559. ISBN 5-8199-0138-X. ISBN 5-16-001999-5.

4. Печатные платы: справ.: в 2 кн. / ред. К.Ф. Кумбз; пер. с англ. А.М. Медведев. М.: Техносфера, 2024. (Мир электроники). ISBN 978-5-94836-258-8. Кн. 2. 2024. 1020–2031 с.: Библиогр. в конце гл.

5. Печатные платы: справ.: в 2 кн. / ред. Кумбз К.Ф. ; пер. с англ. А.М. Медведев. М.: Техносфера, 2024. (Мир электроники). ISBN 978-5-94836-258-8. Кн. 1. 2024. 1015 с. Библиогр. в конце гл.

6. *Преснухин Л.Н.*, *Шахнов В.А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем: учебник для втузов. М.: Высш. шк., 1986. 512 с. Библиогр.: с. 507.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. *Медведев А.* Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.

2. *Леухин В.Н.* Основы конструирования и технологии производства РЭС: учебное пособие. Йошкар-Ола: МарГУ, 2006. 344 с.

3. Технологии в производстве электроники. Ч. I. Справочник по производству печатных плат / под ред. П. Семенова. М.: ООО Группа ИТД, 2007. 586 с.

4. Методические материалы компании ООО «Резонит» (https://www.rezonit.ru/).

5. Система открытого инженерного образования:
https://e-learning.bmstu.ru/iu4/

РАЗДЕЛ 8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Приступая к работе, каждый студент должен учитывать следующие положения.

Дисциплина построена по модульному принципу, каждый модуль представляет собой логически завершенный раздел курса. Дисциплина подразделяется на три модуля (включая экзамен).

На первом занятии студент получает информацию для доступа к комплексу учебно-методических материалов по дисциплине.

Лекционные занятия посвящены рассмотрению ключевых, базовых положений курса и разъяснению учебных заданий, предоставляемых для самостоятельной проработки.

Семинарские занятия проводятся для закрепления усвоенной информации, приобретения навыков ее применения для решения практических задач в предметной области дисциплины.

Лабораторные работы предназначены для приобретения опыта практической реализации основной профессиональной образовательной программы. Методические указания к лабораторным работам прорабатываются студентами во время самостоятельной подготовки. Необходимый уровень подготовки контролируется перед проведением лабораторных работ.

Практическая подготовка при реализации учебной дисциплины организуется путем проведения практических занятий, практикумов, лабораторных работ и индивидуальных и (или) групповых консультаций, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка может включать в себя отдельные занятия лекционного типа, которые предусматривают передачу учебной информации обучающимся, необходимой для последующего выполнения работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Самостоятельная работа студентов включает следующие виды: проработка учебного материала лекций; подготовка к семинарам; подготовка к лабораторным работам; подготовка к экзамену; подготовка к рубежному контролю. Результаты всех видов работы студентов формируются в виде их личного рейтинга, который учитывается на промежуточной аттестации. Самостоятельная работа предусматривает не только проработку материалов лекционного курса, но и их расширение в результате поиска, анализа, структурирования и представления в компактном виде современной информации из всех возможных источников.

Текущий контроль проводится в течение каждого модуля, его итоговые результаты складываются из оценок рубежного контроля.

Освоение дисциплины и ее успешное завершение на стадии промежуточной аттестации возможно только при регулярной работе во время семестра и планомерном прохождении текущего контроля. Набрать рейтинг по всем

модулям в каждом семестре, пройти по каждому модулю плановые контрольные мероприятия в течение экзаменационной сессии невозможно.

Для завершения работы в семестре студент должен выполнить все контрольные мероприятия.

Промежуточная аттестация по дисциплине проходит в форме экзамена, контролирующего освоение ключевых, базовых положений дисциплины, составляющих основу остаточных знаний по ней.

Методика оценки по рейтингу. Студент, выполнивший все предусмотренные учебным планом задания и сдавший все контрольные мероприятия, получает итоговую оценку по дисциплине за семестр в соответствии со шкалой:

Рейтинг	Оценка на экзамене
85–100	Отлично
71–84	Хорошо
60–70	Удовлетворительно
0–59	Неудовлетворительно

Оценивание дисциплины ведется в соответствии с Положением о текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

РАЗДЕЛ 9. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ, ВКЛЮЧАЯ ПЕРЕЧЕНЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ

Электронная информационно-образовательная среда МГТУ им. Н.Э. Баумана обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), программам практик, электронным учебным изданиям и электронным образовательным ресурсам, указанным в рабочих программах дисциплин (модулей), программах практик, что способствует формированию электронного портфолио обучающегося, в том числе сохранению его работ и оценок за эти работы. Предусмотрена возможность синхронного и асинхронного взаимодействия студентов и преподавателей посредством технологий и служб по пересылке и получению электронных сообщений между пользователями компьютерной сети «Интернет».

Информационные справочные системы:

1. Каталог национальных стандартов https://www.gostinfo.ru/catalog/gostlist/
2. Электронно-информационный портал по электронике http://www.radioradar.net/
3. Российская государственная библиотека. http://www.rsl.ru
4. Государственная публичная научно-техническая библиотека России. http://www.gpntb.ru
5. Библиотека МГТУ им. Н.Э. Баумана. http://library.bmstu.ru
6. Научная электронная библиотека http://eLIBRARY.RU
7. Электронно-библиотечная система Издательства «Лань» http://e.lanbook.com
8. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» http://biblioclub.ru
9. Электронно-библиотечная система «IPRbooks» http://www.iprbookshop.ru
10. Электронно-библиотечная система (ЭБС) «Юрайт» https://biblio-online.ru
11. Центральная библиотека образовательных ресурсов Минобрнауки РФ. www.edulib.ru
12. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов http://school-collection.edu.ru
13. Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов. http://fcior.edu.ru
14. Научно-образовательный центр «Функциональные микро/наносистемы» http://fmn.bmstu.ru/

4.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой варианты экзаменационных билетов, примерный перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий.

4.2.1. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ РЕЙТИНГОВЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

1. Дать схему конструкции ПП (поперечный разрез), указать особенности конструктивных элементов, материал и области применения ПП:

МПП с металлизацией сквозных отверстий;

МПП с металлизацией сквозных отверстий и межслойными переходами;

МПП с наращиваемыми наружными слоями структур 1–*n*–1, 2–*n*–2;

МПП попарного прессования;

МПП послойного наращивания;

ДПП на фольгированном диэлектрическом основании;

ДПП на нефольгированном диэлектрическом основании;

ДПП на металлическом основании;

гибко-жесткая ПП (ГПП);

ОПП на фольгированном основании;

ОПП с металлизированными монтажными отверстиями;

рельефные ПП.

2. Схема групповой заготовки ПП, размеры и назначение технологических полей.

3. Схемы базирования групповых заготовок ПП на различных технологических операциях.

4. Понятие узкое место проводящего рисунка ПП, схемы узких мест.

5. Виды отверстий в ПП различных конструкций.

6. Понятие о классе точности ПП и основные параметры, определяющие класс точности.

7. Перечислить основные элементы проводящего рисунка ПП.

8. Фотошаблоны и сетчатые трафареты — конструктивные особенности.

9. Привести эскизы последовательных изменений исходного состояния материала ПП, изготовленные по технологии:

химического метода;

комбинированного позитивного метода;

электрохимического метода;

фотоаддитивного метода;
метода металлизации сквозных отверстий (МПП);
метода попарного прессования (МПП);
метода открытых КП (МПП);
метода наращивания наружных слоев (МПП структуры 1–*n*–1, 2–*n*–2);
рельефных ПП;
ДПП на металлическом основании;
тентинг-метода.

10. Схема и технология получения рисунка ПП:
фотографическим способом;
сеткографическим способом;
способом фотоформирования;
механическим способом.

11. Схема и технология получения проводящего рисунка ПП:
химическим способом — травление;
химическим способом — осаждение;
электрохимическим способом — наращивание;
термическим способом — напыление.

12. Указать физический смысл членов формулы, область и условия ее применения:

$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{ф}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{ф}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + h_{\text{х.м}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + h_{\text{х.м}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right)$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right)$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}} + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}} + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{п.м}}\right) + h_{\text{г}}$
$t_{\min} = t_{1\min}$	$D_{\min} = D_{1\min}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{п.м}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + \Delta t_{\text{ш}} + \Delta\text{Э}$	$D_{\min} = D_{1\min} + \Delta D_{\text{ш}} + \Delta\text{Э}$
	$D_{\min} = 2\left(b + d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}} + \delta_{\text{КП}}\right)$
$l_{\min} = \left(D_{\max} + 2\delta_{\text{КП}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\,\text{ш}}\right)n + s\left(n+1\right)$	
$l_{\min} = \left(D_{\max}/2 + \delta_{\text{КП}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\,\text{ш}}\right)n + sn + a$	
$l_{\min} = \left(D_{\max}/2 + \delta_{\text{КП}}\right) + \left(d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\,\text{ш}}\right)n + sn + a$	
$l_{\min} = \left(d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\,\text{ш}}\right)n + s\left(n-1\right) + 2a$	

13. Назвать и расшифровать материал, указать область его применения в производстве ПП:

СФ-1(2)-35(50)	$CuSO_4$
ГФ-1(2)-35(50)	$CuCl_2$
ФТС-1(2)-18(35)	$PdCl_2$
FR4	$FeCl_3$
Сплав Розе (Sn–Bi–Pb)	H_2SO_4 HF
ВК6, ВК8	$Sn(BF_4)_2$
СПФ	$Pb(BF_4)_2$
СПТ	$SnCl_2$
СТЭК, СТПА-5	$(NH_4)_2S_2O_8$
Полиимид	$Cu(BF_4)_2$
	HCl

4.2.2. ПРИМЕРЫ ВАРИАНТОВ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Электрохимический метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, области применения.

2. Технология получения рисунка ПП способом фотоформирования.

3. Расчет t_{min} для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Комбинированный позитивный метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, область применения.

2. Способы обеспечения паяемости проводящего рисунка ПП.

3. Расчет t_{min} для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением сеткографии.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Химический метод изготовления ПП с применением маски из металлорезиста: операции, точность, материалы.

2. Способы базирования заготовок на различных операциях производства ПП.

3. Расчет t_{min} для электрохимического метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Химический метод изготовления ПП: основные операции, точность, материалы заготовок, области применения.

2. Виды механической обработки в технологии ПП: операции, инструменты, оборудование, точность.

3. Расчет t_{min} для фотоаддитивного метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Технология изготовления ДПП на металлическом основании.

2. Получение и обеспечение качества металлизированных отверстий ПП.

3. Расчет t_{min} для фотоаддитивного метода изготовления с маской из СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Технология изготовления ДПП на тонкофольгированном диэлектрике.
2. Анализ способов получения различных видов отверстий ПП: схема, точность.
3. Расчет t_{min} при расчете узких мест проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Технология тентинг-метода получения ДПП.
2. Технология получения рисунка ПП фотоспособом: схема, операции, точность, применение.
3. Роль паяльной маски при оценке геометрии проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Фотоаддитивный метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, области применения.
2. Виды конструкционных материалов для изготовления ПП.
3. Расчет D_{min} для фотоаддитивного метода изготовления ПП с маской из СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий.
2. Термический способ получения рисунка ПП: схема, точность, применение.
3. Расчет D_{min} для фотоаддитивного метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Промышленные способы получения проводящего рисунка ПП: технология, точность, применение.
2. Исходные материалы для изготовления ПП и их рациональное использование.
3. Параметры, определяющие классы точности и плотности проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 11

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Разработка ТП изготовления ДПП класса точности 4 ($t_{min} = 0{,}15$).
2. Изготовление и применение фотошаблонов в производстве ПП.
3. Расчет t_{min} для рельефной ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 12

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Изготовление МПП структуры 2–*n*–2.

2. Электрохимический способ (наращивание) получения проводящего рисунка ПП: схема, точность, применение.

3. Расчет узкого места проводящего рисунка между контактной площадкой и краем ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Изготовление МПП структуры 1–*n*–1.

2. Химический способ (осаждение) получения проводящего рисунка ПП: схема, точность, применение.

3. Рассчитать для известного размера вывода КМП ($d_в$) максимальный диаметр просверленного отверстия (d_{max}).

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 14

по курсу «Технологии коммутационных структур ЭС»

1. Технология изготовления МПП с открытыми контактными площадками.

2. Расчет D_{min} для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением СПФ.

3. Технология получения рисунка ПП сеткографическим способом: схема, операции, точность, применение.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «10» декабря 2024 г.

4.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ, ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

4.3.1. СПЕЦИФИКАЦИЯ СЛАЙДОВ — КОНСПЕКТОВ ЛЕКЦИЙ

Название раздела	Число слайдов
1. Введение в технологию коммутационных структур	12
Виды коммутационных структур и их конструкторско-технологические особенности. Геометрия и электрические параметры структур и их применение в электронных модулях ЭВС. Классификация коммутационных структур по назначению, физико-механическим параметрам, геометрическим параметрам и возможности перехода к наноразмерам	
2. Коммутационные структуры на жестких и гибких носителях — печатные платы	14
Конструктивно-технологические особенности коммутационных структур микроуровня. Элементы проводящего рисунка. Классы точности и плотности проводящего рисунка. Расчет геометрических параметров. Типы коммутационных структур: односторонние, двусторонние и многослойные. Многослойные структуры с наращиваемыми наружными слоями. Материалы: фольгированные и нефольгированные диэлектрики, тонкие диэлектрические пленки, адгезивные материалы, фотопроявляемые диэлектрики; проводящие материалы: фольга, осаждаемые слои, иммерсионные покрытия. Способы получения рисунка коммутационных структур: фотографический, сеткографический, фотоформирование, механический. Физические схемы и технологии реализации способов. Геометрическая точность рисунка. Способы получения проводящего рисунка структур: химический — травление, химический — осаждение, электрохимический — наращивание. Промышленные методы изготовления односторонних (ОКС) и двусторонних коммутационных структур (ДКС): химический метод; комбинированный позитивный метод; тентинг-метод; электрохимический метод; фотоаддитивный метод. Геометрия проводящего рисунка. Области применения. Оборудование. Промышленные методы изготовления многослойных коммутационных структур (МКС): метод металлизации сквозных отверстий; метод попарного прессования; метод послойного наращивания; метод открытых контактных площадок. Технология HDI (High Density Interconnections). Совмещение слоев МКС. Гибко-жесткие коммутационные структуры. Назначение и применение. Технология производства. Особенности	
3. Коммутационные структуры в жидкокристаллических и плазменных панелях	4
Конструкционные особенности жидкокристаллических панелей. Технология изготовления прозрачных электродов адресной матрицы. Коммутация тонкопленочных транзисторов. Конструкционные особенности плазменных панелей. Способы получения проводящих электродов	

Название раздела	Число слайдов
4. Оптоволоконные коммутационные структуры	19
Оптические коммуникации и проводящие среды. Преимущества и недостатки в сравнении с металлическими. Перспективы использования. Оптическое волокно. Классификация. Основные параметры. Конструкционные особенности. Технология изготовления. Печатные платы с оптоволоконными проводниками	
5. Электрический монтаж модулей микро- и наносистем на основе МКС	26
Контактные соединения. Анализ контактных соединений, полученных пайкой, сваркой, склеиванием, с помощью разъемов и др. Виды монтажа: печатный; проводной на МКС; навесной на МКС; монтаж накруткой; жгутовой; монтаж плоским ленточным кабелем. Проводной монтаж на МКС. Технология раскладки проводов. Способы получения контактных соединений. Технологичность и сравнительная оценка. Навесной монтаж на МКС. Основные этапы и операции. Подготовка элементов к монтажу. Способы установки элементов. Пайка выводов: пайка волной, селективная, ручная. Технологичность и сравнительная оценка. Технология поверхностного монтажа компонентов. Конструктивно-технологические особенности КМП. Требования к печатным платам. Нанесение паяльной пасты и клеящих составов. Установка КМП: ручная, автоматическая. Технологичность и сравнительная оценка. Проводной монтаж ЭМ высших уровней. Монтаж ленточными соединителями и жгутами. Способы получения контактных соединений	
6. Технологическая подготовка производства микро- и наносистем	24
Основы проектирования технологического процесса (ТП). Основные этапы разработки ТП. Методика анализа конструкций ЭМ. Технологичность узлов и деталей. Качественная и количественная оценка технологичности. Способы повышения технологичности. Разработка ТП. Методика разработки схем сборки микро- и наносистем с базовой деталью. Составление маршрутных ТП. Выбор оборудования и средств технологического оснащения. Проектирование технологических операций. Разработка структуры операции и последовательности переходов. Основные положения теории базирования. Схемы базирования и установки деталей. Расчет погрешностей базирования при сборке. Точность технологических операций. Расчет допустимых погрешностей. Экономическая и технологическая эффективность операций. Технологическая документация. Операционные эскизы и их оформление. Операционные карты. Проектирование технологической оснастки. Технологические приспособления. Методика расчета сборочно-монтажных приспособлений. Разработка последовательности переходов. Особенности операций с наноразмерными допусками и размерными рядами. Конструирование приспособлений. Контроль и диагностика МКС. Визуальный контроль. Электрический контроль. Рентгеновский контроль	

4.3.2. Пример оформления дидактических материалов по лекциям

В разделе приведен типовой пример оформления дидактического материала по дисциплине «Технологии коммутационных структур ЭС» — конспект материалов лекций, содержащих основные определения, теоретические основы физических принципов, а также примеры. Методологически курс лекций строится на основе оптимального соотношения теоретических и прикладных вопросов с реализацией проектных методов обучения. Структура материала отличается реализацией блочно-вариативной концепции и внедрением проектных методов подготовки специалистов по направлению «Приборостроение».

Типовая структура слайда должна содержать: название лекции (темы), название кафедры, введение (цель изучения лекции, краткая характеристика содержания), заключение, выводы, вопросы и задания для самопроверки, список рекомендуемой литературы.

Введение в технологию коммутационных структур

Печатная плата (ПП) (плата печатного монтажа) — изделие, состоящее из одного или двух проводящих рисунков, расположенных на поверхности основания, или из системы проводящих рисунков, расположенных в объеме и на поверхности основания, соединенных между собой в соответствии с электрической схемой печатного узла, предназначенное для электрического соединения и механического крепления устанавливаемых на нем изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий.

Основание печатной платы — элемент конструкции ПП, на поверхности или в объеме и на поверхности которого расположен проводящий рисунок либо система проводящих рисунков ПП.

Введение в технологию коммутационных структур

• **Основание печатной платы** — элемент конструкции ПП, на поверхности или в объеме и на поверхности которого расположен проводящий рисунок или система проводящих рисунков ПП.

• **Коммутационные структуры** (КС) — специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями ЭВС.

Введение в технологию коммутационных структур

• **Рисунок печатной платы** — конфигурация, образованная проводниковым и (или) диэлектрическим материалом на ПП.

• **Проводящий рисунок печатной платы** — рисунок ПП, образованный проводниковым материалом на ее основании или в ее объеме.

Примечание: проводящий рисунок состоит из печатных проводников, контактных площадок, экранов, металлизированных отверстий, теплоотводящих и других печатных компонентов.

• **Непроводящий рисунок печатной платы** — рисунок ПП, образованный диэлектрическим материалом основания ПП.

Введение в технологию коммутационных структур

Виды печатных плат по расположению проводящего рисунка.

• Односторонняя печатная плата (ОПП) — ПП, на одной стороне основания которой выполнен проводящий рисунок.

• Двусторонняя печатная плата (ДПП) — ПП, на обеих сторонах основания которой выполнены проводящие рисунки.

• Многослойная печатная плата (МПП) — ПП, состоящая из чередующихся проводящих и непроводящих рисунков, соединенных в соответствии с электрической схемой печатного узла.

• Двухуровневая печатная плата (нрк. РИТМ-плата) — ПП, имеющая проводящие рисунки в двух разделенных воздушными зазорами уровнях, электрически соединенных металлическими столбиками, образованными одновременно с проводящими рисунками травлением металлической пластины.

• Рельефная печатная плата — ПП, на которой проводящий рисунок или его часть утоплена в основание ПП.

Понятие печатного монтажа

• **Печатный монтаж** — способ монтажа электронных модулей (ЭМ) аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников.

• Проводники размещены на диэлектрическом основании и образуют проводящий рисунок.

• Основание конечных размеров с проводящим рисунком и необходимыми отверстиями является печатной платой (ПП).

Понятие печатного монтажа

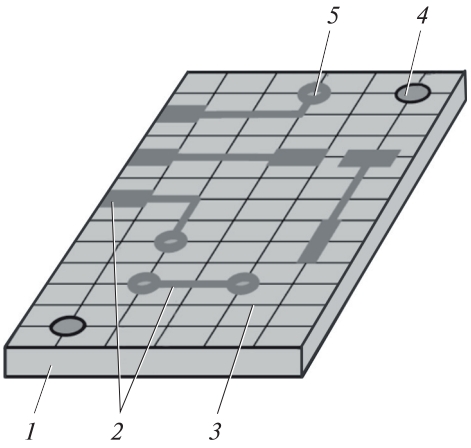


Схема ПП:

1 — основание ПП;
2 — проводящий рисунок;
3 — непроводящий рисунок;
4 — конструкционное отверстие;
5 — металлизированное отверстие

Элементы конструкции печатной платы

• Печатный проводник — одна полоска в проводящем рисунке ПП.

• Печатный контакт — часть проводящего рисунка ПП, представляющая собой часть электрического контакта.

• Печатный компонент (нрк. печатный элемент) — электронный компонент, являющийся частью проводящего и непроводящего рисунков ПП.

Примечание: к печатным компонентам относятся резистор, конденсатор и др.

• Погружной печатный компонент — печатный компонент, расположенный на внутреннем слое ПП.

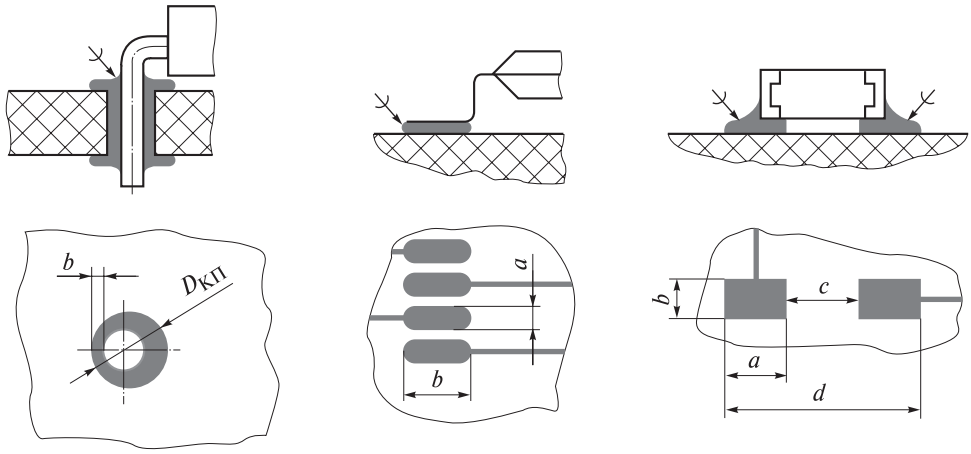
• Проводящий слой ПП — проводящий рисунок ПП, расположенный в одной плоскости.

• Внутренний слой ПП — проводящий рисунок ПП, расположенный внутри многослойной ПП.

• Внешний слой ПП — проводящий рисунок ПП, расположенный на наружной стороне ПП.

Контактные площадки

Контактные площадки (КП) проводящего рисунка ПП предназначены для надежного электрического соединения выводов навесных компонентов, монтируемых на ПП, с печатным монтажом.



а *б* *в*

Типы КП в проводящем рисунке ПП:

а — в зоне монтажных или переходных отверстий; *б* — для соединения планарных выводов ИМС с печатным монтажом; *в* — для соединения компонентов, монтируемых на поверхности основания ПП, с печатным монтажом

Отверстия печатной платы

• Сквозное металлизированное отверстие ПП — металлизированное отверстие ПП, соединяющее между собой проводящие рисунки внутренних и (или) внешних слоев ПП и имеющее выходы на обе стороны ПП.

• Глухое металлизированное отверстие ПП — металлизированное отверстие ПП, имеющее выход только на одну из сторон ПП.

• Неметаллизированное отверстие ПП — отверстие в ПП без проводникового материала на его стенке.

• Монтажное отверстие ПП — отверстие, предназначенное для электрического подсоединения к проводящему рисунку ПП выводов изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий.

Отверстия печатной платы

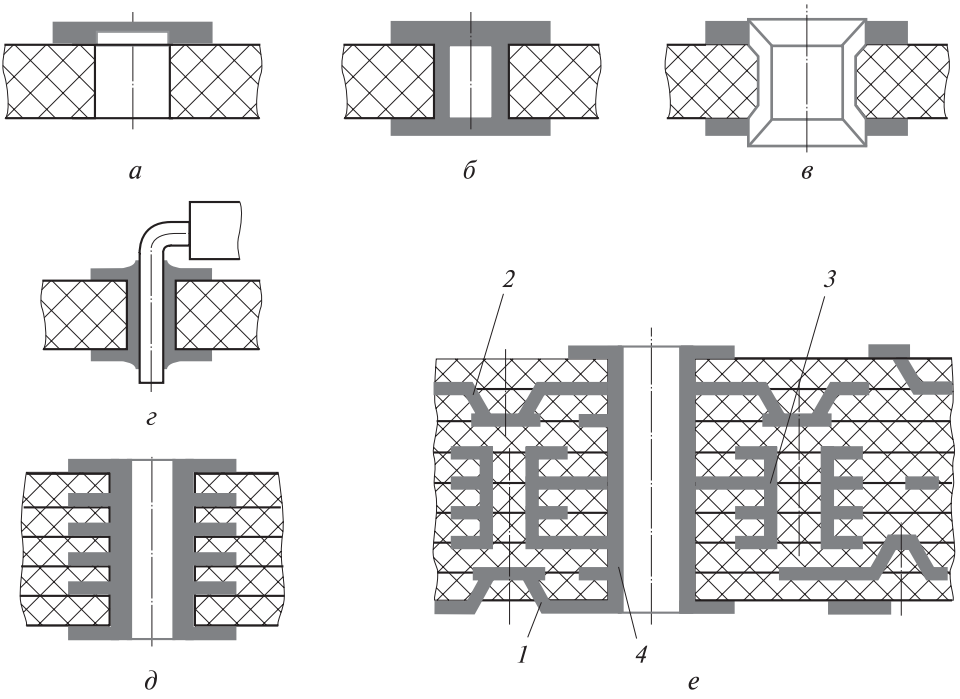
• Переходное отверстие ПП — металлизированное отверстие ПП, предназначенное для электрического соединения проводящих рисунков ПП, находящихся на разных проводящих слоях ПП.

• Внутреннее соединение проводящих рисунков — часть проводящего рисунка ПП, предназначенная для соединения проводящих рисунков на внутренних слоях ПП.

• Крепежное отверстие ПП — неметаллизированное отверстие ПП, предназначенное для механического крепления ПП к базовой несущей конструкции или для механического крепления изделий электронной техники, квантовой электроники и электротехнических изделий на ПП.

Металлизированные монтажные и переходные отверстия

Виды основных отверстий ПП:
а — неметаллизированное монтажное в односторонней ПП (ОПП); *б* — металлизированное переходное в двусторонней ПП (ДПП); *в* — пистонированное переходное в ДПП; *г* — металлизированное монтажное в ДПП; *д* — сквозное, металлизированное в МПП; *е* — отверстия в МПП с высокой плотностью проводящего рисунка; *1* — глухой микропереход; *2* — скрытый глухой микропереход; *3* — внутреннее скрытое переходное отверстие; *4* — сквозное металлизированное отверстие



Координатная сетка

• Координатная сетка чертежа ПП — сетка, определяющая положение элементов рисунка ПП в прямоугольной системе координат.

• Шаг координатной сетки ПП — расстояние между двумя соседними параллельными линиями координатной сетки чертежа ПП.

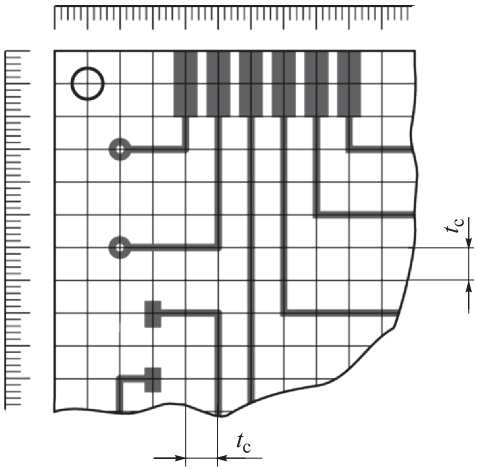
Координатная сетка

Координатная сетка определяет положение всех конструктивных элементов ПП:

• прокладки сигнальных проводников и шин по линиям сетки, параллельно или под определенными углами (90°, 60°, 45°, 30°) к сетке;

• размещения отверстий в узлах сетки;

• размещения КП в узлах сетки.

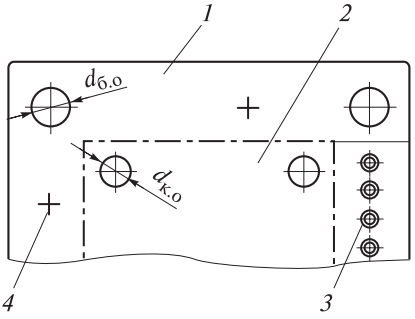


Координатная сетка наносится на рабочем чертеже ПП с указанием шага (t_c = 2,5; 1,25; 0,625; 0,5 мм). Как правило, шаг сетки согласуют с шагом выводов ИМС. На изготовленной ПП шаг сетки не нанесен.

Технологическое поле

Технологическое поле заготовки ПП:

1 — поле по периметру заготовки; *2* — рабочее поле ПП; *3* — тест-купон; *4* — реперный знак; $d_{к.о}$ — диаметр контактных отверстий; $d_{б.о}$ — диаметр базовых отверстий

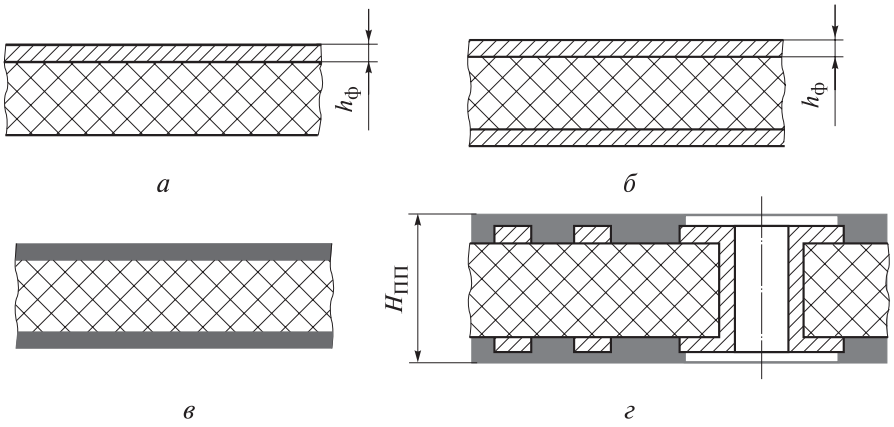


Исходные материалы для изготовления печатных плат

Исходными материалами для изготовления ПП служат фольгированные диэлектрики и нефольгированные диэлектрики.

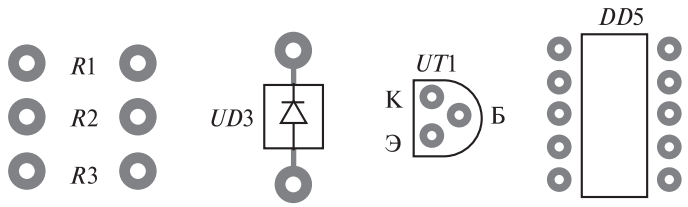
Схемы состояния материалов ПП:

а — односторонне фольгированный диэлектрик; *б* — двусторонне фольгированный диэлектрик; *в* — нефольгированный диэлектрик с адгезионным слоем; *г* — двусторонняя ПП с паяльной маской; $h_ф$ — толщина слоя фольги; $H_{ПП}$ — толщина ПП



Маркировка мест установки навесных компонентов на монтажной стороне печатной платы

• Маркировка ПП — совокупность знаков и символов на ПП.
Примечание: к символам относятся буквы, цифры и т. д.



а *б* *в* *г*

Маркировка мест установки навесных компонентов на монтажной стороне ПП:
а — резисторы; *б* — диоды; *в* — транзисторы; *г* — ИМС

Классы точности и плотности печатного монтажа

• Класс точности ПП — условное цифровое обозначение, характеризующее наименьшие номинальные значения размеров элементов рисунка ПП и определяющее значения допусков на размеры этих элементов.

• Конструктор задает класс точности на рабочем чертеже ПП. Принятый на предприятии технологический процесс изготовления ПП должен обеспечить заданный класс точности.

• В процессе трассировки осуществляется прокладка сигнальных печатных проводников в габаритах рабочего поля ПП при наличии всех элементов проводящего рисунка (КП, шины земли и питания, КПК, экраны) и конструкционных элементов ПП (геометрия наружного контура, конструкционные отверстия, пазы и окна, крепежные отверстия).

Классы точности и плотности печатного монтажа

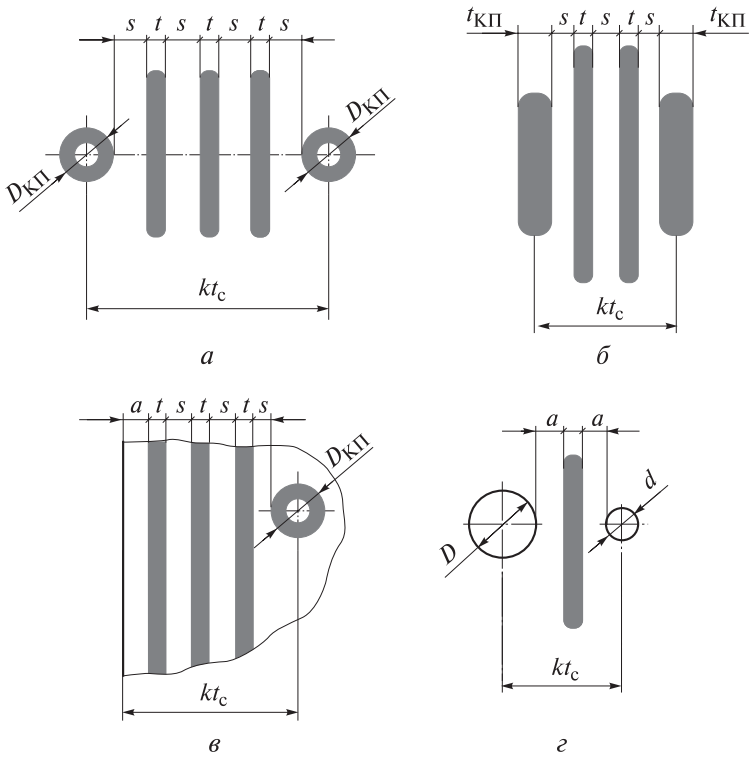
Параметры ПП согласно классам точности

Условное обозначение параметра ПП	Номинальное значение, мм, параметров для классов точности						
	1	2	3	4	5	6	7
t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
b	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015
$\gamma = \frac{d_{м.о}}{H_{ПП}}$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20	0,187	0,150...0,125
δt, мм	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; –0,03	0; –0,02	0; –0,015

t — минимальная ширина сигнального проводника; s — минимальное расстояние между проводниками или любыми элементами проводящего рисунка; b — минимальная ширина круглой КП (гарантированный поясок, определяющий ее целостность); γ — отношение диаметра наименьшего металлизированного отверстия ($d_{м.о}$ к толщине $H_{ПП}$; δt — допуск на ширину проводника, КП или любого другого элемента проводящего рисунка.

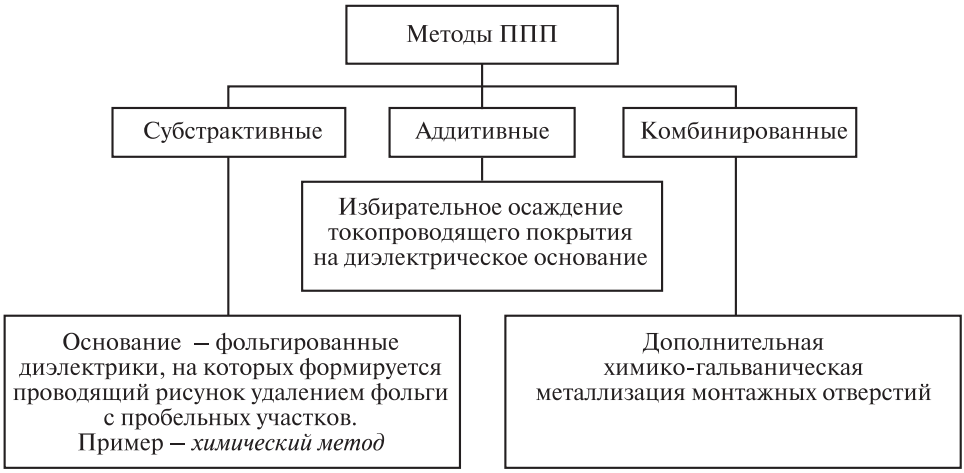
Классы точности и плотности печатного монтажа

При прокладывании проводников между соседними круглыми (*а*) и планарными (*б*) КП, между КП и краем ПП (*в*), между двумя неметаллизированными отверстиями (*г*) возникают так называемые узкие места, требующие минимальных значений *t*/*s*, соответствующих заданному классу точности. Необходим также расчет узких мест с учетом технологических возможностей выбранного метода изготовления проводящего рисунка.



Узкие места проводящего рисунка ПП:
а — между соседними круглыми КП; *б* — между планарными КП; *в* — между КП и краем ПП; *г* — между двумя неметаллизированными отверстиями

Методы производства печатных плат



Заключение

В рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет—2030» в МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководствуясь единой концепцией, созданы методические материалы по дисциплине «Технология коммутационных структур ЭС». Методические материалы содержат нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций и лабораторных работ, перечень слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава по данной дисциплине.

Цель дисциплины — изучение основных принципов и методов проектирования, изготовления и эксплуатации коммутационных структур в электронных устройствах. Материал курса является основой для изучения других технологий, применяемых при создании электронных средств, в том числе в курсах «Конструкторское проектирование электронных средств», «Технологические процессы микроэлектроники» и ряда других при выполнении практической части курсового проекта, курсовых работ по технологии производства ЭВС и подготовке магистерской диссертации.

Задачи дисциплины — получение теоретических и практических навыков работы с коммутационными структурами электронных средств.

Методологически дисциплина строится на основе наилучшего соотношения теоретических и прикладных вопросов с обязательным участием студентов в самостоятельном исследовании особенностей проведения процессов измерения коммутационных структур.

Теоретические основы изложены в такой мере, чтобы показать общие принципы основных методов микроскопии, их особенности, достоинства и недостатки. Содержание соответствующих тем разделов направлено на усиление роли фундаментальных знаний в теоретической и профессиональной подготовке студента, что способствует формированию у студента фундаментальных системных знаний, развивает творческие способности будущего специалиста.

Прикладные вопросы ориентируют студентов на решение задач измерения и сертификации при производстве коммутационных структур, выбор адекватных методов, алгоритмов, прикладных пакетов и технических средств, обладающих максимальной эффективностью. Во всех разделах предусмотрены темы, содержание которых связано с формированием и развитием у будущих специалистов практических навыков решения задач с использованием цифровых инструментальных средств анализа и проектирования.

В основу методических материалов по дисциплине «Введение в технологию коммутационных структур электронных средств» положены курсы, читаемые авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Материалы учебно-методического комплекса соответствуют стандартам World Skills по компетенции «Производство и инженерные технологии». Разработаны с привлечением и в кооперации с НИИСИ РАН, ИРЭ РАН, РНЦ «Курчатовский институт», ФТИАН РАН, НТЦ УП РАН, ООО «Резонит» и другими представителями академической науки и промышленности.

Литература

1. *Гриднев В.Н.*, *Гриднева Г.Н.* Проектирование коммутационных структур электронных средств. М.: Издательство МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 344 с.

2. *Гриднев В.Н.* Методические указания к домашнему заданию по курсу ТПС и ТП ЭВА / под ред. О.Д. Парфенова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1981. 32 с.

3. *Ивченко В.Г.* Конструирование и технология ЭВМ: конспект лекций. Таганрог, 2001.

4. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / под общ. ред. В.А. Шахнова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 568 с.

5. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов и др.; под общ. ред. В.А. Шахнова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.

6. *Медведев А.* Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.

7. *Пирогова Е.В.* Проектирование и технология печатных плат: учебник. М.: Форум, ИНФРА-М, 2005. 560 с.

8. *Стерлинг Дж.* Волоконная оптика. Техническое руководство. М.: Издательство «ЛОРИ», 2001. 288 с.

9. Технологии в производстве электроники. Ч. I. Справочник по производству печатных плат / под ред. П. Семенова. М.: ООО Группа ИТД, 2007. 586 с.

10. *Тупик В.А.* Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 144 с.

11. *Гриднев В.Н.*, *Кондаков Н.А.*, *Трошина Д.П.*, *Фатхутдинов Т.М.* Анализ проектирования многослойных печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 2. С. 139–142.

12. *Резчикова Е.В.*, *Соловьев В.А.*, *Долуханян А.М.*, *Жукова А.А.* Морфологический подход к анализу многослойных печатных плат со встроенными компонентами // Технологии инженерных и информационных систем. 2020. № 1. С. 71–82.

13. *Гриднев В.Н.*, *Емельянов Е.И.*, *Власов А.И.*, *Леонидов В.В.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer // Датчики и системы. 2016. № 5 (203). С. 28–36.

14. *Гриднев В.Н.*, *Емельянов Е.И.*, *Власов А.И.*, *Карпунин А.А.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур

в среде Altium Designer. Управление проектом // Датчики и системы. 2016. № 6 (204). С. 46–52.

15. *Гриднев В.Н.*, *Григорьев П.В.*, *Емельянов Е.И.*, *Камышная Э.Н.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer. Разработка библиотеки посадочных мест // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 33–41.

16. *Арабов Д.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Емельянов Е.И.*, *Леонидов В.В.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer. Разработка библиотеки компонентов // Датчики и системы. 2016. № 8–9 (206). С. 42–51.

17. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Жалнин В.П.*, *Емельянов Е.И.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer: Схемотехническое проектирование // Датчики и системы. 2016. № 10 (207). С. 37–45.

18. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Жалнин В.П.*, *Емельянов Е.И.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer: Топологическое проектирование // Датчики и системы. 2016. № 11 (208). С. 28–39.

19. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Жалнин В.П.*, *Емельянов Е.И.* Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в среде Altium Designer. Синтез проекта коммутационной структуры // Датчики и системы. 2016. № 12 (209). С. 34–45.

20. *Гриднев В.Н.*, *Миронова Ж.А.*, *Шахнов В.А.* Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной коммутационной платы // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 4 (8). С. 19–25.

21. *Билибин К.И.*, *Гриднев В.Н.* Проектирование маршрутных и операционных технологических процессов в технологии приборостроения. М.: Издательство МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987.

22. *Миронова Ж.А.*, *Шахнов В.А.*, *Гриднев В.Н.* Высокоплотная компоновка проводящего рисунка многослойных коммутационных плат // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2014. № 6 (99). С. 61–70.

23. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Константинов П.*, *Юдин А.В.* Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат // Электронные компоненты. 2004. № 8. С. 148–155.

24. *Гриднев В.Н.*, *Емельянов Е.И.* Монтаж микросхем в корпусах BGA в электронные модули пространственной компоновки // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 3. С. 41–47.

25. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Милешин С.А.*, *Козлова А.Ю.* Маршрут технологической подготовки производства печатных плат в среде CAM350 // Технологии инженерных и информационных систем. 2017. № 1. С. 14–45.

26. *Гриднев В.Н.*, *Жалнин В.П.*, *Козлова А.Ю.* Комплексная методика автоматизированного технологического проектирования в среде CAM350 // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2 (166). С. 55–66.

27. *Зимин Д.В.*, *Гриднев В.Н.* Обеспечение качества проектирования многослойных печатных плат при конструировании высокочастотных устройств // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2017. Т. 2. С. 183–186.

28. *Преснухин Л.Н.*, *Шахнов В.А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем. М.: Высшая школа, 1986.

29. *Александров К.К.*, *Кузьмина Е.Г.* Электротехнические чертежи и схемы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

30. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 430 с.

31. *Глушко А.В.*, *Кузьмина Н.В.*, *Савенков И.И.* Анализ систем автоматизированного проектирования печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2020. № 4. С. 64–76.

32. *Сергеева М.Д.*, *Кузьмина С.В.*, *Борисов Г.М.* Анализ систем автоматизированного проектирования печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2021. № 1. С. 59–71.

33. *Арабов Д.И.*, *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Григорьев П.В.* Концепция цифрового инструментального производства (FAB LAB) для прототипирования изделий электронной техники // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5–3 (47). С. 23–34.

34. *Арабов Д.И.*, *Верясова А.Ю.*, *Гриднев В.Н.* Комплексное макетирование узлов вычислительной техники с использованием инфраструктуры цифрового производства (FAB-LAB) в условиях сквозного обеспечения качества // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. № 1. С. 189–192.

35. *Власов А.И.*, *Завьялов Н.В.*, *Селиванов К.В.*, *Скальченков И.И.* Применение нейронных сетей в обнаружении дефектов печатных плат // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2022. Т. 24. № 6. С. 5–19.

36. *Аверьянихин А.Е.*, *Власов А.И.*, *Евдокимова Е.В.* Иерархическая пирамидальная субдискретизация в глубоких сверточных сетях для распознавания визуальных образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23. № 1. С. 17–31.

37. *Вирясова А.Ю.*, *Власов А.И.*, *Гладких А.А.* Нейросетевые методы дефектоскопии интегральных структур // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2019. № 2. С. 54–67.

38. *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Константинов П.*, *Юдин А.В.* Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат // Электронные компоненты. 2004. № 8. С. 148–155.

39. *Макушина Н.В.*, *Сергеева М.Д.* Анализ дефектов металлизированных отверстий печатных плат // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 1. С. 3–12.

40. *Макушина Н.В.*, *Сергеева М.Д.* Методика контроля качества металлизированных отверстий печатных плат на микрошлифах // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 2. С. 44–48.

41. *Панфилова С.П.*, *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 6 (72). С. 42–49.

42. *Панфилова С.П.*, *Власов А.И.*, *Гриднев В.Н.*, *Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники // Производство электроники. 2007. № 3. С. 25–30.

43. *Гриднев В.Н.*, *Сергеева М.Д.*, *Чебова А.И.* Линейные модели распознавания тепловизионных изображений неисправностей электронных ячеек // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 57–66.

44. *Селиванов К.В.*, *Долотов И.И.*, *Домников А.С.* Выбор конструкционных материалов и приемов для эффективного отвода тепла от печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 1. С. 3–11.

45. *Аминев Д.А.*, *Захаров Е.Р.*, *Семенякина В.О.*, *Бортник Б.Ю.* Особенности применения технологии обратного высверливания при создании печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2018. № 4. С. 27–35.

46. *Гордеев Д.В.*, *Зайкин В.А.*, *Селиванов К.В.*, *Цветков А.А.* Анализ материалов для изготовления печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2020. № 3. С. 26–45.

47. *Назаров А.В.*, *Смирнов К.К.*, *Лягин И.В.* Автоматизация проектирования электрической оснастки для функционального контроля сверхбольших интегральных схем // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 1. С. 64–76.

48. *Макушина Н.В.*, *Долотов И.И.*, *Пылев С.С.* Анализ дефектов паяных соединений // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 2. С. 68–7.

49. Единая система конструкторской документации: Справочное пособие. М.: Издательство стандартов, 1989.

50. Единая система технологической документации: Справочное пособие. М.: Издательство стандартов, 1992.

51. Правила оформления конструкторской документации электронной аппаратуры. Методические указания к дипломному проектированию / А.В. Еланцев и др. В 2 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1994.

Приложение

Классификатор технологических операций машиностроения и приборостроения (№ 1-85-151. Москва, Издательство Стандартов. 1987. 74 с.).

Таблица П1

Классификационная таблица

Код	Вид технологического процесса по методу выполнения
01	Операции общего назначения
02, 03	Технический контроль
04	Перемещение
06, 07	Испытания
08	Консервация и упаковывание
10	Литье металлов и сплавов
21	Обработка давлением
41, 42	Обработка резанием
50, 51	Термообработка
55	Фотохимико-физическая обработка
60	Формообразование из полимерных материалов, керамики, стекла и резины
65	Порошковая металлургия
71	Получение покрытий (металлических и неметаллических неорганических)
73, 74	Получение покрытий органических (лакокрасочных)
75	Электрофизическая, электрохимическая и радиационная обработка
80, 81	Пайка
85	Электромонтаж
88	Сборка
90, 91	Сварка

Таблица П2

Операции общего назначения — код 01

Код	Наименование операции	
0101	Разметка	
0102	Нарезка	
0103	Нагревание	
0104	Раскрой	
0105	Охлаждение	
0106	Выдержка	
0107	Обдувка	
0108	Слесарная	
0109	Зачистка	
0113	Вакуумирование	
0114	Смазывание	
0115	Пломбирование	
0116	Распломбирование	
0117	Герметизация	
0118	Регенерация	
0119	Ориентация	
0120	Галтовка	
0121	Сбор технологических отходов	
0122	Сдача технологических отходов	
0123	Корректировка составов	
0124	Дефектация	
0125	Промывка	
0126	Промывка	водой
0127		растворителями
0128	Термостатирование	
0129	Фильтрование	
0130	Очистка	

Продолжение табл. П2

0131	Очистка	пескоструйная	
0132		гидроструйная	
0133		струйно-абразивная	
0134		дробеметная	
0135		ультразвуковая	
0136		дробеструйная	
0137		газопламенная	
0138		электрохимическая	
0139		виброабразивная	
0143		химическая	
0144		ионная, плазменная	
0145	Изолирование, защита		
0146	Изолирование, защита	составами	органическими
0147			неорганическими
0148		лентами, трубками и др.	
0150	Травление		
0151	Травление	химическое	
0152		электрохимическое	
0153		ультразвуковое	
0154		ионное	
0155		плазмохимическое	
0156	Дозирование		
0157	Дозирование	по счету	
0158		по объему	
0159		по массе	
0160	Пропитка		
0161	Пропитка	под давлением	
0162		в вакууме	
0163		при атмосферном давлении	
0164	Заливка, засыпка		
0165	Протирка		
0166	Разгерметизация		
0167	Развакуумирование		
0168	Подготовка (оснастки, оборудования, арматуры, кабеля и т. д.)		

Окончание табл. П2

0169	Приготовление (смесей, флюсов, композиций и др.)	
0170	Сушка	
0171	Сушка	атмосферная
0172		конвективная
0173		терморадиационная
0174		вакуумная
0175		в электромагнитном поле
0176		фотохимическая
0177		световыми лучами
0178		ультразвуковым, электронным облучением
0179		в активной, в пассивной среде
0180	Маркирование	
0181	Маркирование	ударом
0182		гравированием
0183		травлением
0184		лазерное
0185		литьем под давлением
0186		лентой, краской, трубкой, биркой, этикеткой и др.
0187		вжиганием
0188		электрохимическое
0189		электроэрозионное
0190	Обезжиривание, обессмоливание	
0191	Обезжиривание	химическое
0192		электрохимическое
0193		ультразвуковое
0194		плазмохимическое
0195	Удаление	покрытий
0196		изоляций
0197	Намагничивание	
0198	Размагничивание	

Таблица П3

Технический контроль — код 02

Код	Наименование операции		
0200	Контроль		
0210	Контроль величин пространства и времени		
0211	Контроль величин пространства и времени	Контроль	времени
0212			площади
0213			объема
0214			скорости
0215			ускорения
0216			плоского угла
0217			телесного угла
0218			длины
0220		Контроль линейных размеров	
0221		Контроль	между плоскими поверхностями
0222			между криволинейными поверхностями
0223			между осями поверхностей
0224			между координатами
0225		Контроль размеров криволинейных поверхностей	
0226		Контроль	кривизны
0227			диаметра
0228			радиуса
0230		Контроль расположения поверхности	
0231		Контроль	параллельности
0232			перпендикулярности
0233			наклона
0235			соосности (концентричности)
0236			симметричности
0237			пересечения осей
0238			позиционного расположения

Продолжение табл. П3

0240	Контроль величин пространства и времени	Контроль формы поверхности		
0241		Контроль	плоскостности	
0242			прямолинейности	
0245			цилиндричности	
0246			круглости	
0247			профиля продольного сечения	
0250		Контроль формы и расположения поверхностей		
0251		Контроль	биения	радиального
0252				торцевого
0253				в заданном направлении
0254			формы	заданного профиля
0255				заданной поверхности
0260		Комплексный контроль геометрических параметров		
0261		Комплексный контроль геометрических параметров	Контроль резьбовых деталей	
0262			Контроль	среднего диаметра
0263				приведенного диаметра
0264				шага резьбы
0265			Контроль шлицевых деталей	
0266			Контроль шероховатости	
0270			Контроль зубчатых деталей	
0271			Контроль	кинематической погрешности
0272				радиального биения зубчатого венца
0273				накопленной погрешности шага
0274				окружного шага
0275				циклической погрешности
0276				межосевого расстояния на одном зубе
0277				профиля зубьев
0278				колебания длины общей нормали
0281				направления зуба
0282				суммарного пятна контакта
0283				шага зацепления
0284				элементов колеса
0285				толщины зуба
0286				гарантированного бокового зазора
0287				смещения исходного контура

Окончание табл. П3

0290	Контроль величин пространства и времени	Комплексный контроль геометрических параметров	Контроль червячных деталей	
0291			Контроль	винтовой линии червяка
0292				осевого шага червяка
0293				кинематической погрешности червяка
0294				биения витков червяка
0295				элементов колеса
0296				пятна контакта
0297				угла и формы червяка

Таблица П4

Технический контроль — код 03

Код	Наименование операции		
0310	Контроль механических величин		
0311	Контроль	массы	
0312		плотности	
0314		момента инерции	
0315		силы, веса	
0316		давления	
0317		вязкости	динамической
0318			кинематической
0320	Контроль электрических и магнитных величин		
0321	Контроль	силы электрического тока	
0322		электрического напряжения	
0323		электрического сопротивления	
0324		электрической емкости	
0326		магнитного потока	
0327		индуктивности	
0328		магнитного сопротивления	
0329		динамических электрических величин	
0330	Контроль тепловых величин		
0331	Контроль	температуры	
0332		теплоемкости	
0333		теплового потока	
0334		теплопроводности	
0335	Контроль акустических величин		
0336	Контроль	звукового давления	
0337		объемной скорости	
0338		интенсивности звука	

Продолжение табл. П4

0340	Контроль световых величин и величин электромагнитных излучений	
0341	Контроль	силы света
0342		светового потока
0343		освещенности
0344		яркости
0346		энергии излучения
0347		потока излучения
0348		энергетической освещенности
0349		энергетической яркости
0350	Контроль величин физической оптики	
0351	Контроль	оптических параметров и характеристик
0354		теплового излучения
0355	Контроль периодических величин	
0356	Контроль	частоты периодического процесса
0357		частоты вращения
0360	Контроль величин ионизирующих излучений	
0361	Контроль	активности нуклида в радиоактивном источнике
0362		поглощенной дозы излучения
0365	Контроль величин физической химии и молекулярной физики	
0366	Контроль	молярной массы
0367		молярного объема
0368		химического потенциала
0369		температуропроводности
0371		количества вещества
0372		концентрации

Окончание табл. П4

0375	Контроль качественных характеристик		
0376	Контроль	неразрушающий	акустический (ультразвуковой)
0377			вихревой
0378			магнитный
0379			оптический
0381			радиационный
0382			радиоволновый
0383			тепловой
0384			электрический
0386			проникающими веществами
0387		внешнего вида изделий, наличия клейм	
0390	Контроль прочих величин и характеристик		
0391	Контроль	технического состояния	
0392		функционирования	
0393		работоспособности	
0394		надежности	
0396		количества штук	
0397		расхода	

Таблица П5

Перемещение — код 04

Код	Наименование операции
0400	Перемещение
0401	Транспортирование
0404	Погрузка
0405	Загрузка
0406	Разгрузка
0407	Выгрузка
0408	Перегрузка
0409	Перекладка
0411	Кантование
0412	Штабелирование
0413	Дештабелирование
0414	Стеллажирование
0415	Дестеллажирование
0416	Переливание
0417	Пересыпание
0418	Комплектование
0419	Раскладка
0421	Сортирование
0422	Пакетирование
0423	Распакетирование
0424	Укладывание
0425	Рыхление
0426	Разравнивание
0427	Раскрепление
0428	Закрепление
0429	Накопление
0430	Хранение
0431	Поворотная
0432	Укрывание
0433	Раскрывание
0434	Раскомплектование
0435	Перекачивание
0436	Торцевыравнивание
0440	Складирование

Таблица П6

Испытания — код 05

Код	Наименование операции			
0600	Испытания			
0610	Испытания на надежность			
0611	Испытания на	безотказность		
0612		сохраняемость		
0613		ремонтопригодность		
0614		долговечность		
0615	Испытания на функциональность			
0620	Испытания механические			
0621	Испытания механические на воздействие	статической нагрузки		
0622		статической нагрузки на	растяжение	
0623			срез	
0624			ползучесть	
0625			кручение	
0626			изгиб	
0627			сжатие	
0628			длительную прочность	
0629			твердость, микротвердость	
0631			релаксацию	
0632			прокаливаемость	
0633			адгезию	
0634			пластичность	
0635		динамической нагрузки		
0636		динамической нагрузки на	усталость	
0637			усталость при	растяжении-сжатии
0638				изгибе
0639				кручении
0641			ударную вязкость	
0642			механическое старение	
0643			прочность	
0644			адгезию	

Окончание табл. П6

0645	Испытания механические на воздействие	трения		
0646		трения при	вращательном движении	
0647			возвратно-поступательном движении	
0650		удара		
0651		удара	механического	
0652			механического	однократного действия
0653				многократного действия
0654				при свободном падении
0655			гидравлического	
0656			аэродинамического	
0657			сейсмического	
0658			баллистического	
0659			ударной (взрывной) волны	
0660		ускорения		
0661		ускорения	линейного	
0662			углового (центробежного)	
0663			центростремительного	
0664			невесомости	
0665		колебаний		
0666		колебаний	качки	
0667			наклона (крена)	
0668			акустического шума	
0669			вибрации	
0670		давления		
0671		давления	гидравлического	повышенного
0672				пониженного
0673			пневматического	повышенного
0674				пониженного
0675	Испытания на герметичность			
0676	Испытания на герметичность			пневматические
0677				гидравлические
0678	Испытания на отрыв			
0679	Испытания на безопасность			

Таблица П7

Испытания — код 07

Код	Наименование операции			
0710	Испытания климатические			
0712	Испытания климатические на воздействие	температуры среды	повышенной	
0713			пониженной	
0714		смены температур (термоциклирования)		
0716		атмосферного давления	повышенного	
0717			пониженного	
0719		атмосферных осадков	выпадающих	
0721			конденсированных	
0722		влажности (брызг)		
0723		солнечного излучения		
0724		тумана		
0725		ледово-грунтовой среды		
0726		пыли, песка		
0729		потока воздуха	скоростного	дозвукового
0731				сверхзвукового
0732		ветра		
0735	Испытания термические			
0736	Испытания термические на воздействие	теплового удара		
0737		теплового удара	теплового удара	
0738				
0739		нагрева		
0741		нагрева	аэродинамического	
0742			трением	
0743			тепловым потоком	
0744			пламенем	
0750	Испытания химические			
0751	Испытания химические на воздействие	кислот		
0752		щелочей		
0753		масел, смазок, красок		
0754		специальных сред		
0755	Испытания химические на воздействие	топлива		
0757		среды с коррозионно-активными агентами	атмосферы	
0758			водной	
0759			почвенно-грунтовой	

Окончание табл. П7

0760	Испытания биологические			
0761	Испытания биологические на воздействие	позвоночных жинотных		
0762		беспозвоночных животных		
0763		растений		
0765	Испытания электрические			
0766	Испытания электрические на воздействие	постоянного тока (напряжения)		
0767		переменного тока (напряжения)		однофазного
0768				многофазного
0769		электрического импульса тока (напряжения)		
0770	Испытания электротермические			
0771	Испытания электротермические на воздействие	постоянного тока (напряжения)		при температуре выше °С
0772				при температуре ниже °С
0773		переменного тока	однофазного	при температуре выше °С
0774				при температуре ниже °С
0775			многофазного	при температуре выше °С
0776				при температуре ниже °С
0777		электрического импульса тока (напряжения) при температуре ниже °С		при температуре выше °С
0778				при температуре ниже °С
0780	Испытания радиационные			
0782	Испытания радиационные на воздействие	ионизирующего	альфа- и бета-излучения	
0783			гамма-излучения	
0784			рентгеновского излучения	
0785			нейтронного, электронного и протонного излучений	
0786			излучения многозарядных частиц	
0790	Испытания магнитные и электромагнитные			
0791	Испытания магнитные и электромагнитные на воздействие	импульсного электрического поля		
0793		магнитного поля	низкочастотного	
0794			высокочастотного	
0795			сверхвысокочастотного	
0796		лазерного излучения		
0797		электромагнитного импульса взрыва		

Таблица П8

Консервация и упаковывание — код 08

Код	Наименование операции			
0800	Консервация и упаковывание			
0801	Консервация			
0802	Консервация	окунанием		
0803		обливом		
0804		смазыванием		
0805		прокачиванием		
0808		продуванием		
0809		распылением		
0811		завертыванием		
0812		заливкой		
0813		летучими ингибиторами на носителях		
0814		в процессе испытаний		
0815		герметизацией		
0816		герметизацией	осушением	статическим
0817				динамическим
0818			ингибированным воздухом	
0819			инертными газами	
0821			летучими ингибиторами	
0822		внутренним упаковыванием		
0830	Упаковывание			
0831	Упаковывание	в бумагу		
0832		в полимерную пленку		
0834		герметизированным покрытием		
0836		в потребительскую тару		
0837		в ящик, коробку		
0838		в контейнер		
0839		в мешок		
0841		в связку		
0842		в обрешетку		
0843		на поддон		
0844	Обандероливание			
0845	Обвязывание тары (упаковочной единицы)			
0850	Распаковывание			

Окончание табл. П8

0851	Распаковывание	вскрытием	
0852		разборкой	
0853		развязыванием	
0854		развертыванием	
0856		потребительской тары	
0860	Расконсервация		
0865	Расконсервация	удалением консервационного материала	
0866		удалением консервационного материала	протиранием
0867			окунанием
0868			оплавлением
0869			разгерметизацией
0871			продуванием
0872			смыванием
0873			срезанием
0874			сливом
0876			летучих ингибиторов на носителях

Таблица П9

Литье металлов и сплавов — код 10

Код	Наименование операции			
1000	Литье металлов и сплавов			
1010	Изготовление литейных моделей			
1011	Изготовление литейных моделей	неметаллических	многократных	
1012			разовых	растворяемых
1013				выплавляемых
1014				выжигаемых
1016		металлических	многократных	
1020	Изготовление песчаных литейных форм			
1021	Изготовление песчаных литейных форм	ручным уплотнением формовочной смеси	с помощью модели	по-сырому
1022				по-сухому
1023				химическим отверждением
1024			по шаблону	по-сырому
1025				по-сухому
1026				химическим отверждением
1027		машинным уплотнением формовочной смеси	с помощью модели	по-сырому
1028				по-сухому
1029				химическим отверждением
1040	Изготовление песчаных стержней			
1043	Изготовление песчаных стержней	ручным уплотнением стержневой смеси с последующей сушкой	по стержневому ящику	сушкой
1044				химическим отверждением
1045			по шаблону	химическим отверждением
1046				сушкой
1047		машинным уплотнением стержневой смеси	по стержневому ящику	по горячей модельной оснастке
1048				сушкой
1049				химическим отверждением
1051	Завалка шихтовых материалов в плавильный агрегат			
1053	Плавка металлов и сплавов			

Окончание табл. П9

1060	Заливка формы			
1061	Заливка формы	свободная	в оболочковые формы с применением песчано-смоляных смесей	без вращательного движения
1062				с вращательным движением
1063			в керамические формы	без вращательного движения
1064				с вращательным движением
1065			в песчаные формы	
1066			в кокиль	
1067			по выплавляемым моделям	
1068		принудительная	под давлением	
1069			с противодавлением	
1071			под низким давлением	
1072			вакуумным всасыванием	
1073		комбинированная	жидкой штамповкой	
1074			выдавливанием	
1075	Удаление стержней, формовочных смесей			
1076	Выбивка отливок, форм			
1077	Обрубка отливки			
1087	Модифицирование			
1088	Рафинирование			
1089	Футеровка			
1090	Исправление дефектов литья			

Таблица П10

Обработка давлением — код 21

	Код	Наименование операции	
Разделительные	2100	Обработка давлением	
	2101	Отрезка	
	2102	Разрезка	
	2103	Обрезка	
	2104	Надрезка	
	2105	Пробивка	
	2106	Проколка	
	2107	Отрубка	
	2108	Разрубка	
	2109	Вырубка	
	2111	Надрубка	
	2112	Ломка	
	2114	Высечка	
	2115	Просечка	
Формоизменяющие	2121	Осадка	
	2122	Высадка	
	2123	Протяжка	
	2124	Разгонка	
	2125	Радиальное обжатие	
	2126	Передача	
	2127	Прошивка	
	2128	Раскатка	
	2129	Гибка	
	2131	Скручивание	
	2132	Закатка	
	2133	Завивка	
	2134	Навивка	
	2135	Вытяжка	
	2136	Вытяжка	с утонением
	2137		ротационная
	2138	Отбортовка	
	2139	Раздача	

Окончание табл. П10

Формоизменяющие	2141	Обжим		
	2142	Рельефная формовка		
	2143	Чеканка		
	2144	Кернение		
	2145	Выдавливание		
	2147	Проглаживание		
	2148	Обкатка		
	2149	Калибровка		
	2152	Волочение		
	2153	Накатка		
	2154	Профилирование		
	2155	Редуцирование		
	2156	Правка		
	2157	Обтяжка		
	2158	Поверхностное пластическое деформирование		
	2159	Подкатка		
	2160	Ковка		
	2170	Штамповка		
	2171	Штамповка	объемная	
	2172		вальцовкой	
	2173		листовая	
	2175		импульсная	
	2176		импульсная	взрывная
	2177			электрогидравлическая
	2178			электромагнитная
	2180		эластичными средами	
	2180		эластичными средами	жидкостью
	2182			резиной
	2183			полиуретаном

Таблица П11

Обработка резанием — код 41

Код	Наименование операции	
4100	Обработка резанием	
4101	Агрегатная	
4102	Автоматно-линейная	
4105	Резьбонарезная	
4107	Резьбонарезные	Гайконарезная
4108		Болтонарезная
4110	Токарная	
4111	Токарные	Токарно-револьверная
4112		Автоматная токарная
4113		Токарно-карусельная
4114		Токарно-винторезная
4115		Лоботокарная
4116		Токарно-затыловочная
4117		Токарно-копировальная
4118		Специальная токарная
4119		Торцеподрезная-центровальная
4121		Вальцетокарная
4122		Резьботокарная
4123		Токарно-бесцентровальная
4130	Шлифовальная	
4131	Шлифовальные	Круглошлифовальная
4132		Внутришлифовальная
4133		Плоскошлифовальная
4134		Бесцентрово-шлифовальная
4135		Резьбошлифовальная
4136		Координатно-шлифовальная
4137		Обдирочно-шлифовальная
4138		Ленточно-шлифовальная
4139		Шлифовально-затыловочная
4141		Шлицешлифовальная
4142		Заточная
4143		Центрошлифовальная
4144		Карусельно-шлифовальная

Окончание табл. П11

4145	Шлифовальные	Торцешлифовальная
4146		Специальная шлифовальная
4147		Вальцешлифовальная
4150	Зубообрабатывающая	
4151	Зубообрабатывающие	Зубошлифовальная
4152		Зубодолбежная
4153		Зубофрезерная
4154		Зубострогальная
4155		Зубопротяжная
4156		Зубозакругляющая
4157		Зубошевинговальная
4158		Зубопритирочная
4159		Зубоприрабатывающая
4161		Зубообкатывающая
4162		Специальная зубообрабатывающая
4163		Зубохонинговальная
4164		Зуботокарная
4165		Шлицефрезерная
4166		Шлицестрогальная
4167	Комбинированная	
4170	Строгальная	
4171	Строгальные	Продольно-строгальная
4172		Поперечно-строгальная
4173		Специальная строгальная
4175	Долбежная	
4180	Протяжная	
4181	Протяжные	Горизонтально-протяжная
4182		Вертикально-протяжная
4183		Специальная протяжная
4190	Отделочная	
4192	Отделочные	Хонинговальная
4193		Суперфинишная
4194		Доводочная
4195		Притирочная
4196		Полировальная
4197		Глянцовочная

Таблица П12

Обработка резанием — код 42

Код	Наименование операции	
4210	Сверлильная	
4211	Сверлильные	Сверлильно-центровальная
4212		Радиально-сверлильная
4213		Горизонтально-сверлильная
4214		Вертикально-сверлильная
4216		Координатно-сверлильная
4220	Расточная	
4221	Расточные	Горизонтально-расточная
4222		Вертикально-расточная
4223		Координатно-расточная
4224		Алмазно-расточная
4230	Программная	
4231	Программные	Расточная с ЧПУ
4232		Сверлильная с ЧПУ
4233		Токарная с ЧПУ
4234		Фрезерная с ЧПУ
4236		Шлифовальная с ЧПУ
4237		Комплексная на обрабатывающих центрах с ЧПУ
4260	Фрезерная	
4261	Фрезерные	Вертикально-фрезерная
4262		Горизонтально-фрезерная
4263		Продольно-фрезерная
4264		Карусельно-фрезерная
4265		Барабанно-фрезерная
4267		Копировально-фрезерная
4268		Гравировально-фрезерная
4269		Фрезерно-центровальная
4271		Шпоночно-фрезерная
4272		Специальная фрезерная
4273		Универсально-фрезерная
4274		Резьбофрезерная

Окончание табл. П12

4280	Отрезная	
4281	Отрезные	Ножовочно-отрезная
4282		Ленточно (проволочно)-отрезная
4283		Алмазно-отрезная
4284		Токарно-отрезная
4285		Пило-отрезная
4286		Фрезерно-отрезная
4287		Абразивно-отрезная

Таблица П13

Термическая обработка — код 50

Собственно термическая обработка	Код	Наименование операции				
	5000	Термическая обработка				
	5010	Отжиг				
	5011	Отжиг	без фазовых превращений	гомогенизационный		
	5012			увеличивающий зерно		
	5014			графитизирующий		
	5015			релаксационный (уменьшающий напряжение)		
	5016			промежуточный на возврат		
	5017			рекристаллизационный	полный	
	5018				неполный	
	5019			дорекристаллизационный	упрочняющий	
	5021				смягчающий	на отдых
	5022					на возврат
	5023		с фазовыми превращениями	полный	гетерогенизирующий	
	5024				гомогенизирующий	
	5025			изотермический		
	5026			неполный	гетерогенизирующий	
	5027				гомогенизирующий	
	5028			сфероидизирующий		
	5029			нормализационный		
	5030	Закалка				
	5031	Закалка	общая	непрерывная	в одной среде	
	5032				возврат после старения	
	5033			прерывистая		
	5034			прерывистая	в двух средах	
	5035				многократная	
	5036				с обработкой холодом	
	5037				программированная	
	5038				ступенчатая	
	5039				изотермическая	
	5041				изотермическая с подстуживанием	
	5042			от субкритических температур		
	5043		местная	объемная		
	5044			поверхностная		

Окончание табл. П13

Собственно термическая обработка	5045	Термоциклическая обработка (ТЦО)		
	5050	Отпуск		
	5051	Отпуск	высокий	
	5052		средний	
	5053		низкий	
	5054		упрочняющий	
	5056		смягчающий	
	5057		ступенчатый	
	5060	Старение		
	5061	Старение	естественное (без нагрева)	
	5062		искусственное (упрочняющее)	полное
	5063			неполное
	5064			без предварительной закалки
	5066		смягчающее (перестаривание)	
	5067		ступенчатое	
	5068		стабилизирующее	

Таблица П14

Термическая обработка — код 51

	Код	Наименование операции	
Химико-термическая обработка	5110	Диффузионное насыщение металлами	
	5111	Диффузионное насыщение металлами	простое (одноэлементное, одностадийное)
	5112		комплексное (двухкомпонентное, двухстадийное)
	5113		комплексное сложное
	5120	Диффузионное насыщение неметаллами	
	5121	Диффузионное насыщение неметаллами	простое (одноэлементное, одностадийное)
	5122		комплексное (двухкомпонентное, двухстадийное)
	5123		комплексное сложное
	5130	Диффузионное совместное насыщение металлами и неметаллами	
	5135	Диффузионное удаление примесей	
	5136	Диффузионное удаление примесей	простое
	5137		комплексное
	5140	Термомеханическая обработка (ТМО)	
	5541	Термомеханическая обработка	предварительная (ПТМО)
	5142		высокотемпературная (ВТМО)
	5143		низкотемпературная (НТМО)
	5144		высокотемпературная изотермическая (ВТМИзо)
	5546		низкотемпературная изотермическая (НТМИзо)
	5147		высоко-низкотемпературная (ВНТМО)
	5148		предварительная поверхностная (ПТМПО)
	5149		высокотемпературная поверхностная (ВТМПО)
	5151		контролируемая прокатка
	5152		изоформинг
	5153		термоэлектрохимическая
	5154		деформационное старение
	5156		электротермомеханическая
	5157		термомагнитная
	5161	Вжигание	
	5162	Осаждение пленки	
	5163	Ионная имплантация	
	5164	Наращивание	эпитаксиального слоя
	5166		поликремния
	5167	Сплавление	
	5168	Обжиг	

Таблица П15

Фотохимико-физическая обработка — код 55

Код	Наименование операции		
5500	Фотохимико-физическая обработка		
5510	Изготовление оригинала		
5511	Изготовление оригинала	пересчетом таблицы координат	
5512		вырезанием	
5513		вырезанием	на автоматическом координатографе
5514			на координатографе в режиме ручного ввода информации
5515		фотонабором	
5516		аппликацией	
5517		комбинированным способом	
5520	Изготовление фотошаблонов		
5521	Изготовление фотошаблонов	Съемка репродукционной камерой	
5522		Обработка фотоматериалов	
5523		Фотопечать	
5524		Ретуширование	
5525		Мультиплицирование	
5526		Изготовление промежуточного фотошаблона	
5527		Изготовление копий промежуточного фотошаблона	
5528		Изготовление эталонного фотошаблона	
5529		Изготовление рабочего фотошаблона	
5540	Фотолитография		
5541	Фотолитография	Экспонирование	
5542		Экспонирование	контактное
5543			бесконтактное (проекционное)
5544			совмещенное
5545		Проявление	
5546		Задубливание (полимеризация), фиксирование	
5547		Сенсибилизация	

Таблица П16

Формообразование из полимерных материалов, керамики, стекла и резины — код 60

Код	Наименование операции		
6000	Формообразование из полимерных материалов, керамики, стекла и резины		
6009	Смешивание		
6011	Окрашивание		
6012	Дробление		
6013	Гранулирование		
6014	Таблетирование		
6015	Жгутирование		
6016	Шприцевание		
6017	Набор пакета		
6020	Прессование		
6021	Прессование	прямое	
6022		литьевое	
6023		с декорированием	
6030	Литье		
6031	Литье	под давлением	термопластов
6032			реактопластов
6033		под давлением со вспениванием	физическим
6034			химическим
6036		многокомпонентное	
6037		центробежное	
6040	Вспенивание		
6041	Вспенивание	прессовое	
6042		беспрессовое	
6050	Экструзия		
6051	Экструзия	заготовок	
6052		с непрерывным калиброванием	
6053		с непрерывным раздувом	
6056	Соэкструзия		
6057	Интрузия		

Окончание табл. П16

6060	Формование		
6061	Формование	герметичной эластичной упаковкой	
6063		пуансоном и матрицей	
6063		на оправке	
6064		контактное	
6065		протяжным кольцом	
6066		термовакуумное	
6007		термопневматическое	
6068		комбинированное	
6069		экструзионно-раздувное	
6073	Армирование		
6074	Термоштампование		
6076	Дублирование		
6077	Ламинирование		
6078	Каландрирование		
6079	Вальцевание		
6081	Тиснение		
6082	Спекание		
6083	Растяжение		
6084	Стерилизация		
6085	Вулканизация		
6086	Вулканизация	горячая	в прессах
6087			в автоклав-прессах
6088			на открытом воздухе
6089		холодная	радиационная
6090	Гуммирование		
6091	Гуммирование	горячее	
6092		холодное	
6093	Желатинирование		
6094	Прорезинивание		
6095	Девулканизация		
6096	Девулканизация	в прессах	
6097		радиационная	
6098	Пластикация каучука		
6099	Выдувание		

Таблица П17

Порошковая металлургия — код 65

Код	Наименование операции			
6500	Порошковая металлургия			
6530	Формование порошков			
6531	Формование с приложением статического давления	без нагрева	прессованием	без оболочки
6532				в оболочке
6533			прокаткой	без оболочки
6534				в оболочке
6535			протяжкой	без оболочки
6536				в оболочке
6537			выдавливанием	без оболочки
6539		с нагревом	прессованием	в оболочке
6541			прокаткой	без оболочки
6542				в оболочке
6544			выдавливанием	в оболочке
6545	Формование с приложением динамического давления	без нагрева	прессованием	без оболочки
6546				в оболочке
6548		с нагревом	прессованием	в оболочке
6551			выдавливанием	в оболочке
6552			ковкой	в оболочке
6553	Формование с приложением циклического давления	без нагрева	прессованием	без оболочки
6554		с нагревом	прессованием	без оболочки
6555	Формование без нагрева под воздействием вибрации			
6556	Формование без нагрева и приложения давления	пластифицированных масс		
6557		свободно насыпного порошка		
6558		шликера		
6560	Уплотнение порошковых формовок			
6561	Уплотнение с приложением статического давления	без нагрева	прессованием	без оболочки
6562				в оболочке
6563			прокаткой	без оболочки
6564				в оболочке
6565			выдавливанием	без оболочки
6566				в оболочке

Окончание табл. П17

6567	Уплотнение с приложением статического давления	с нагревом	прессованием	без оболочки
6568				в оболочке
6569			прокаткой	в оболочке
6571			выдавливанием	в оболочке
6572	Уплотнение с приложением динамического давления	без нагрева	прессованием	без оболочки
6573				в оболочке
6574		с нагревом	прессованием	без оболочки
6575				в оболочке
6576			выдавливанием	в оболочке
6577			ковкой	в оболочке
6578	Уплотнение с приложением циклического давления	с нагревом	прессованием	без оболочки
6580	Спекание порошковых формовок			
6581	Спекание при низком давлении (в вакууме) защитной (газовой) среды	неактивированное		
6582		активированное	с введением активирующих факторов в порошковую формовку	
6583			с приложением к порошковой формовке давления	статического
6584				циклического
6585			с циклическим изменением температуры	
6586			с инфильтрацией	
6587	Спекание при нормальном давлении защитной (газовой, сыпучей, жидкой) среды	неактивированное		
6588		активированное	с введением активирующих факторов	в защитную среду
6589				в порошковую формовку
6591			с приложением к порошковой формовке давления	статического
6592				циклического
6593			с циклическим изменением температуры	
6594			с инфильтрацией	
6595	Спекание при высоком давлении защитной (газовой, сыпучей, жидкой) среды	неактивированное		
6596		активированное	с введением активирующих факторов	в защитную среду
6597				в порошковую формовку
6598			с циклическим изменением температуры	

Таблица П18

Получение покрытий (металлических и неметаллических неорганических) — код 71

Код	Наименование операции		
7100	Получение покрытия		
7101	Кварцевание		
7102	Сатинирование	химическое	
7103		электрохимическое	
7104	Эмалирование, глазурование		
7105	Тонирование	химическое	
7106		электрохимическое	
7107	Матирование		
7108	Осветление		
7109	Хроматирование		
7110	Металлизация		
7111	Металлизация	Газотермическая	пламенная
7112			электродуговая
7113			плазменная
7114			детонационная
7115			высокочастотная
7116		Конденсационные (вакуумная)	катодная
7117			термическая
7118			ионная
7119	Нейтрализация		
7121	Золочение	химическое	
7122		электрохимическое	
7123	Амальгамирование		
7124	Восстановление катодное		
7125	Плакирование		
7126	Активация	химическая	
7127		электрохимическая	
7128	Наполнение покрытия	в воде	
7129		в растворителе красителя	
7131	Гидрофобизирование покрытия		
7132	Оплавление покрытия		
7133	алюминирование	металлизационное	
7134		электрохимическое	
7135	Пассивирование		

Окончание табл. П18

7136	Фосфатирование	химическое
7137		электрохимическое
7139	Флюсование	
7141	Окисление	химическое
7142		электрохимическое
7143		термическое
7144	Эматалирование	
7145	Железнение	электрохимическое
7146		металлизационное
7147	Индирование	
7148	Кадмирование	электрохимическое
7149		металлизационное
7151	Оловянирование	металлизационное
7152		химическое
7153		электрохимическое
7154		горячее
7155	Меднение	химическое
7156		электрохимическое
7157		металлизационное
7158	Родирование	
7159	Палладирование	химическое
7161		электрохимическое
7162	Платинирование	
7163	Никелирование	химическое
7164		электрохимическое
7165	Свинцевание	химическое
7166		электрохимическое
7167		горячее
7168		металлизационное
7169	Серебрение	химическое
7171		электрохимическое
7172	Хромирование	
7173	Цинкование	химическое
7174		электрохимическое
7175		горячее
7176		металлизационное
7180	Получение покрытия сплавами	

Таблица П19

Получение покрытий органических (лакокрасочных) — код 73

Код	Наименование операции		
7300	Получение покрытий органических (лакокрасочных)		
7301	Преобразование ржавчины	распылением	
7302		кистью, тампоном	
7303	Порозаполнение древесины		
7304	Крашение древесины		
7310	Грунтование		
7311	Грунтование	распылением	пневматическим
7312			безвоздушным
7313			электростатическим
7314			пневмоэлектростатическим
7315			безвоздушным электростатическим
7325			аэрозольным
7326			центробежным
7327			ультразвуковым
7328		окунанием	без выдержки в парах растворителя
7329			с выдержкой в парах растворителя
7331		электроосаждением	анодным
7332			катодным
7333		наливом, обливом	
7334		струйным обливом	без выдержки в парах растворителя
7335			с выдержкой в парах растворителя
7336		в барабанах, центрифугах	
7337		кистью, валиком, тампоном и др.	
7338		валками	
7339		автоосаждением	
7340	Подгрунтовывание		
7341	Подгрунтовывание	кистью, валиком, тампоном и др.	
7342		распылением	

Окончание табл. П19

7350	Шпатлевание		
7351	Шпатлевание	местное	
7352		сплошное	
7355	Получение выявительного слоя		
7360	Окрашивание		
7361	Окрашивание	распылением	пневматическим
7362			безвоздушным
7363			электростатическим
7364			пневмоэлектростатическим
7365			безвоздушным электростатическим
7366			аэрозольным
7367			центробежным
7368			ультразвуковым
7369		окунанием	без выдержки в парах растворителя
7371			с выдержкой в парах растворителя
7372		электроосаждением	анодным
7373			катодным
7374		автоосаждением	
7375		обливом, наливом	
7376		валками	
7377		в барабанах, центрифугах	
7378		кистью, валиком, тампоном, иглой и др.	
7379		струйным обливом	без выдержки в парах растворителя
7381			с выдержкой в парах растворителя
7382		в псевдоожиженном слое	
7385	Подкрашивание		
7386	Подкрашивание	кистью, валиком, тампоном, иглой и др.	
7387		распылением	

Таблица П20

Получение покрытий органических (лакокрасочных) — код 74

Код	Наименование операции		
7410	Лакирование		
7411	Лакирование	распылением	пневматическим
7412			безвоздушным
7413			электростатическим
7414			пневмоэлектростатическим
7415			безвоздушным электростатическим
7416			аэрозольным
7417			центробежным
7418			ультразвуковым
7419		окунанием	без выдержки в парах растворителя
7421			с выдержкой в парах растворителя
7422		электроосаждением	катодным
7423			анодным
7424		наливом, обливом	
7425		валками	
7426		в барабанах, центрифугах	
7427		кистью, валиком, тампоном и др.	
7428		автоосаждением	
7429		струйным обливом	без выдержки в парах растворителя
7431			с выдержкой в парах растворителя
7432		в псевдоожиженном слое	
7433	Разравнивание		
7439	Загрубление		
7440	Напыление		

Окончание табл. П20

7441	Напыление	в псевдоожиженном слое
7442		электростатическое
7443		струйное
7444		газопламенное
7445		плазменное
7446		вакуумное
7447	Насыпание	
7450	Нанесение рисунка и надписей (в том числе имитация текстуры древесины, кожи, камня, ткани)	
7451	Нанесение рисунка и надписей	декалькоманией
7452		синтетическими материалами
7453		печатанием
7454		аэрографией
7456		шелкографией
7457		по трафарету
7458	Облицовывание	

Таблица П21

Электрофизическая, электрохимическая и радиационная обработка — код 75

<table>
<tr><th>Код</th><th colspan="5">Наименование операции</th></tr>
<tr><td>7500</td><td colspan="5">Электрофизическая, электрохимическая и радиационная обработка</td></tr>
<tr><td>7501</td><td rowspan="4">Копировально-прошивочная</td><td rowspan="2">электрофизическая</td><td colspan="3">электроэрозионная</td></tr>
<tr><td>7502</td><td>электромеханическая</td><td colspan="2">ультразвуковая</td></tr>
<tr><td>7503</td><td colspan="4">электрохимическая</td></tr>
<tr><td>7504</td><td>комбинированная</td><td colspan="3">электроэрозионно-химическая</td></tr>
<tr><td>7505</td><td rowspan="3">Прошивочная</td><td rowspan="3">электрофизическая</td><td rowspan="2">лучевая</td><td colspan="2">лазерная</td></tr>
<tr><td>7506</td><td colspan="2">электронно-лучевая</td></tr>
<tr><td>7507</td><td>электромеханическая</td><td colspan="2">ультразвуковая</td></tr>
<tr><td>7509</td><td rowspan="6">Профильно-вырезная</td><td rowspan="5">электрофизическая</td><td rowspan="2">электроэрозионная</td><td rowspan="2">электроискровая</td><td>проволочным электродом</td></tr>
<tr><td>7511</td><td>дисковым электродом</td></tr>
<tr><td>7512</td><td rowspan="2">лучевая</td><td colspan="2">лазерная</td></tr>
<tr><td>7513</td><td colspan="2">электронно-лучевая</td></tr>
<tr><td>7514</td><td>электромеханическая</td><td colspan="2">ультразвуковая</td></tr>
<tr><td>7515</td><td colspan="4">электрохимическая</td></tr>
<tr><td>7516</td><td>комбинированная</td><td colspan="3">электроэрозионно-химическая</td></tr>
<tr><td>7519</td><td rowspan="6">Отрезная</td><td rowspan="4">электрофизическая</td><td rowspan="2">электроэрозионная</td><td rowspan="2">электроискровая</td><td>проволочным электродом</td></tr>
<tr><td>7521</td><td>дисковым электродом</td></tr>
<tr><td>7523</td><td>лучевая</td><td colspan="2">лазерная</td></tr>
<tr><td>7524</td><td>электромеханическая</td><td colspan="2">ультразвуковая</td></tr>
<tr><td>7525</td><td colspan="3">плазменная</td></tr>
<tr><td>7526</td><td rowspan="2">электрохимическая</td><td rowspan="2">размерная</td><td rowspan="2">анодно-механическая</td><td>дисковым электродом</td></tr>
<tr><td>7527</td><td>ленточным электродом</td></tr>
</table>

Окончание табл. П21

7529	Заточная	электрохимическая	размерная	анодно-механическая	абразивная
7531					алмазная
7535	Расточная	электрофизическая	электроэрозионная		
7536			электромеханическая	ультразвуковая	
7541	Плоскошлифовальная	электрофизическая	электроэрозионная		
7542		электрохимическая	размерная	анодно-механическая	абразивная
7543					алмазная
7545	Круглошлифовальная	электрохимическая	размерная	анодно-механическая	абразивная
7546					алмазная
7548		электрофизическая	электроэрозионная		
7555	Гравировальная	электрохимическая			
7556		электрофизическая	электроэрозионная		
7557			электромеханическая	ультразвуковая	
7558		комбинированная	электрофотохимическая		
7561	Отделочно-зачистная	электрохимическая			
7562		электрофизическая	электромеханическая	ультразвуковая	
7565	Доводочная	электрохимическая			
7566		электрофизическая	электромеханическая	ультразвуковая	
7571	Упрочняюще-легирующая	электрофизическая	электроэрозионная		
7572			лучевая	лазерная	
7573				электронно-лучевая	
7576	Резьбонарезная	электрофизическая	электроэрозионная		
7577			электромеханическая	ультразвуковая	
7578	Обработка	ионизирующим излучением			
7579		терморадиационная			
7581		радиационная			

Таблица П22

Пайка — код 80

Код	Наименование операции			
8000	Пайка			
8006	Ограничение растекания припоя			
8010	Пайка готовым припоем			
8011	Пайка готовым припоем	флюсовая	тепловым контактjм (паяльником, нагретым газом, нагревательными матами)	
8012			газопламенная	
8013			индукционная	
8014			в печи	
8015			электросопротивлением	
8016			дуговая	
8017			экзотермическая	
8018			волной припоя	
8019			погружением	в расплавленный припой
8021				в расплавленную соль
8022			плазменная	
8035		в нейтральной газовой среде	в печи	
8036			индукционная	
8037			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)	
8038		в активной газовой среде	в печи	
8039			индукционная	
8041			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)	
8042		в вакууме	в печи	
8043			индукционная	
8044			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)	
8045			электронно-лучевая	
8046			тлеющим разрядом	

Окончание табл. П22

8050	Контактно-реактивная пайка		
8051	Контактно-реактивная пайка	в нейтральной газовой среде	в печи
8052			индукционная
8053			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)
8054		в активной газовой среде	в печи
8055			индукционная
8056			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)
8057		в вакууме	в печи
8058			индукционная
8059			радиационная (световыми лучами, инфракрасными лучами, лазерная)
8061			электронно-лучевая
8062			тлеющим разрядом
8070	Реактивно-флюсовая пайка		
8071	Реактивно-флюсовая пайка		в печи
8072			газопламенная
8073			погружением в расплавленный флюс
8074			экзотермическая
8077	Электролитная пайка		

Таблица П23

Пайка — код 81

Код	Наименование операции			
8100	Пайкосварка			
8111	Пайкосварка	флюсовая	газопламенная	
8112			дуговая	
8120	Сваркопайка			
8121	Сваркопайка	флюсовая	газопламенная	
8122			дуговая	
8123		в нейтральной газовой среде	дуговая	
8130	Комбинированная пайка			
8131	Комбинированная пайка	диффузионная контактно-реактивная в печи	в газовой среде	в нейтральной среде
8135				в активной среде
8133			в вакууме	
8134		диффузионная готовым припоем в печи	в нейтральной среде	в нейтральной среде
8135			в активной среде	в активной среде
8136			в вакууме	
8141		диффузионная контактно-реактивная электронно-лучевая		в вакууме
8142		диффузионная готовым припоем электронно-лучевая	в вакууме	
8160	Лужение			
8161	Лужение	абразивное	паяльником	
8162			газопламенное	
8163		абразивно-кристаллическое	паяльником	
8164			газопламенное	
8165		абразивно-кавитационное	погружением в расплавленный припой	
8167		ультразвуковое	паяльником	
8168			погружением в расплавленный припой	
8171		флюсовое	паяльником	
8172			газопламенное	
8173			в печи	
8174			погружением в расплавленный припой	

Таблица П24

Электромонтаж — код 85

Код	Наименование операции	
8500	Электромонтаж	
8501	Регулировка, настройка, юстировка	
8502	Бахромирование	
8504	Разделка провода, кабеля, жилы	
8505	Раскладка провода, кабеля	
8508	Бандажирование	
8509	Плетение	
8511	Свивание, скручивание	
8512	Мерная резка	
8521	Протягивание провода, кабеля, жгута	
8522	Размотка провода, кабеля	
8531	Формовка выводов электрорадиоэлементов	
8535	Намотка, перемотка	
8536	Намотка, перемотка	каркасная
8537		бескаркасная
8551	Вощение шпагата	
8552	Экранирование	

Таблица П25

Сборка — код 88

Код	Наименование операции
8800	Сборка
8801	Базирование
8803	Балансировка
8821	Стопорение
8822	Штифтование
8823	Запрессовывание
8824	Контровка
8831	Свинчивание
8832	Застегивание
8841	Клепка
8842	Развальцовка
8843	Фальцевание
8844	Накручивание
8846	Склеивание
8847	Сшивание
8848	Сколачивание
8849	Центрирование
8851	Шплинтование
8852	Распрессовывание
8853	Расштифтовывание
8854	Расшплинтовывание
8856	Развинчивание
8857	Расстегивание
8858	Монтаж
8859	Демонтаж
8861	Разборка
8862	Сборочно-подготовительная
8863	Сборочно-монтажная
8864	Слесарно-сборочная
8866	Приклеивание
8867	Отклеивание
8870	Сборка и монтаж изделий электронной техники (ИЭТ)

Окончание табл. П25

8871	Сборка и монтаж ИЭТ	сборка корпуса
8872		сборка блока арматуры
8873		монтаж ножки собранной
8874		монтаж блока арматуры на ножку
8876		монтаж блока арматуры (кристалла) на ножку
8877		монтаж кристалла в корпус
8878		монтаж комплектующих изделий
8879		загрузка кассет комплектующими изделиями
8881		присоединение выводов
8882		распайка в «тару-спутник»
8883		монтаж КМО ручной
8884		монтаж КМО полуавтоматический
8885		монтаж КМО автоматический
8886		монтаж КМП ручной
8887		монтаж КМП полуавтоматический
8888		монтаж КМП автоматический

Таблица П26

Сварка — код 90

Код	Наименование операции			
9000	Сварка			
9001	Индукционно-прессовая сварка			
9002	Газопрессовая сварка			
9003	Термокомпрессионная сварка			
9004	Дугопрессовая сварка			
9005	Шлакопрессовая сварка			
9006	Термитно-прессовая сварка			
9007	Печная сварка			
9010	Контактная сварка			
9011	Контактная сварка	точечная		
9012		шовная		
9013		стыковая		
9014		рельефная		
9015		шовностыковая		
9020	Диффузионная сварка			
9021	Диффузионная сварка	в инертных газах		
9022		в активных газах		
9023		в вакууме		
9025	Световая сварка			
9026	Световая сварка	лазерная		
9027		энергией лучей оптического диапазона		
9028		инфракрасным излучением		
9030	Дуговая сварка			
9031	Дуговая сварка	покрытым электродом		
9032		пучком покрытых электродов		
9033		самозащитной проволокой		
9034		порошковой проволокой		
9035		под флюсом		
9036		по флюсу	плавящимся электродом	
9037			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9038				без присадочного металла

Продолжение табл. П26

9039	Дуговая сварка	в инертных газах	плавящимся электродом	
9041			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9042				без присадочного металла
9043		в углекислом газе	сплошной проволокой	
9044			порошковой проволокой	
9045			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9046				без присадочного металла
9047	Дуговая сварка	в азоте	плавящимся электродом	
9048			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9049				без присадочного металла
9051		в смеси инертных и активных газов плавящимся электродом		
9052		в концентрических потоках инертного и активного газов	плавящимся электродом	
9053			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9054				без присадочного металла
9055		в водяном паре		
9056		в азоте	плавящимся электродом	
9057			неплавящимся электродом	с присадочным металлом
9058				без присадочного металла
9061	Электрошлаковая сварка			
9062	Электронно-лучевая сварка			
9063	Плазменная сварка			
9064	Ионно-лучевая сварка			
9065	Сварка тлеющим разрядом			
9066	Термоимпульсная сварка			
9067	Индукционная сварка			
9068	Газовая сварка			

Окончание табл. П26

9069	Термитная сварка	
9071	Литейная сварка	
9072	Сварка взрывом	
9073	Сварка трением	
9074	Магнитно-импульсная сварка	
9075	Сварка газовым теплоносителем	
9076	Сварка экструдированной присадкой	
9080	Ультразвуковая сварка	
9081	Ультразвуковая сварка	точечная
9082		шовная
9083		стыковая
9090	Холодная сварка	
9091	Холодная сварка	точечная
9092		шовная
9093		стыковая

Таблица П27

Сварка — код 91

Код	Наименование операции			
9110	Наплавка			
9111	Наплавка	дуговая	покрытым электродом	
9112			пучком покрытых электродов	
9113			самозащитной проволокой	
9114			порошковой проволокой	
9115			под флюсом	
9116			по флюсу	
9117			в инертных газах	плавящимся электродом
9118				неплавящимся электродом
9119			в углекислом газе	сплошной проволокой
9121				порошковой проволокой
9122				неплавящимся электродом
9123			в азоте	плавящимся электродом
9124				неплавящимся электродом
9125		вибродуговая		
9126		индукционная		
9127		электрошлаковая		
9128		плазменная		
9129		трением		
9131		с помощью контактной сварки		
9132		газопламенная		
9133		с использованием жидкого присадочного металла		

Окончание табл. П27

9170	Термическая резка		
9171	Термическая резка	лазерная	
9172		кислородная	
9173		кислородно-флюсовая	
9174		дуговая	
9175		воздушно-дуговая	
9176		плазменно-дуговая	
9177		кислородно-лазерная	
9180	Термоконтактная сварка		
9181	Термоконтактная сварка	оплавлением	
9182		проплавлением	
9183		нагретым инструментом	ленточным теплоносителем
9184			роликом
9185			полозом
9186		внахлестку	
9187		встык	

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5
Список сокращений 7
Термины и определения 9
1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ 16
1.1. Введение в технологию коммутационных структур 17
1.1.1. Общие сведения о коммутационных структурах 17
1.1.2. Геометрия и электрические параметры коммутационных структур 20
Тесты к лекции 1.1 26
1.2. Автоматизация проектирования коммутационных структур 27
1.2.1. Концепция развертывания цифрового инструментального производства в рамках единой цифровой среды 27
1.2.2. Концепция интеграции программной среды Altium Designer в единую инфраструктуру синхронного производства 30
1.2.3. Методика автоматизированного проектирования электронных коммутационных структур в пакете Altium Designer 32
Тесты к лекции 1.2 34
1.3. Классы точности и плотности печатного монтажа 36
1.3.1. Общие понятия о точности и плотности печатного монтажа . . . 36
1.3.2. Методика расчета геометрических параметров печатного монтажа с учетом технологических ограничений 40
Тесты к лекции 1.3 47
1.4. Типы печатных плат и их конструктивные особенности 49
Тесты к лекции 1.4 57
1.5. Способы получения рисунка печатной платы 59
1.5.1. Анализ способов получения рисунка печатной платы 59
1.5.2. Фотографический способ получения рисунка печатной платы 61
1.5.3. Сеткографический способ получения рисунка печатной платы 62
1.5.4. Способ фотоформирования рисунка печатной платы 63
1.5.5. Механический способ получения рисунка печатной платы . . . 63
1.5.6. Способ получения рисунка печатной платы с использованием лазерно-утюжной технологии 64
Тесты к лекции 1.5 65

1.6. Способы получения проводящего рисунка печатной платы 67
1.6.1. Анализ способов получения проводящего рисунка печатной платы 67
1.6.2. Способ химического травления для получения проводящего рисунка печатной платы 68
1.6.3. Способ химического осаждения для получения проводящего рисунка печатной платы 68
1.6.4. Электрохимический способ наращивания проводящего рисунка печатной платы 69
1.6.5. Термический способ вакуумного напыления проводящего рисунка печатной платы 69
Тесты к лекции 1.6 70
1.7. Методы изготовления печатных плат 71
1.7.1. Общие сведения о методах изготовления печатных плат 71
1.7.2. Химический метод изготовления печатных плат 74
1.7.3. Комбинированный позитивный метод изготовления печатных плат 76
1.7.4. Тентинг-метод изготовления печатных плат 79
1.7.5. Электрохимический метод изготовления печатных плат 81
1.7.6. Фотоаддитивный метод изготовления печатных плат 82
1.7.7. Аддитивное производство печатных плат 84
Тесты к лекции 1.7 87
1.8. Основные операции технологического процесса изготовления печатных плат 88
1.8.1. Химическое осаждение меди 88
1.8.2. Гальваническое осаждение меди 89
1.8.3. Травление меди 91
1.8.4. Сверление монтажных отверстий 92
Тесты к лекции 1.8 96
1.9. Анализ технологии изготовления некоторых типов печатных плат . 97
1.9.1. Односторонние печатные платы с неметаллизированными отверстиями 97
1.9.2. Односторонние печатные платы без монтажных отверстий . . . 98
1.9.3. Двусторонние печатные платы на диэлектрическом основании 98
1.9.4. Двусторонние печатные платы на металлическом основании 99
1.9.5. Двусторонние печатные платы без монтажных отверстий 99
1.9.6. Гибкие печатные платы 104
1.9.7. Гибкие печатные кабели 105
1.9.8. Рельефные платы 105
Тесты к лекции 1.9 106

1.10. Анализ технологии изготовления многослойных печатных плат ... 107
1.10.1. Многослойные печатные платы попарного прессования 107
1.10.2. Многослойные печатные платы с металлизацией сквозных отверстий 109
1.10.3. Многослойная печатная плата послойного наращивания 119
Тесты к лекции 1.10 121
1.11. Анализ гибко-жестких печатных плат 122
Тесты к лекции 1.11 125
1.12. Обзор оборудования для макетирования и прототипирования печатных плат 127
Тесты к лекции 1.12 136
1.13. Обзор оборудования для серийного производства печатных плат комбинированным позитивным методом 137
1.13.1. Этапы производства печатных плат 137
1.13.2. Получение заготовки 137
1.13.3. Сверление переходных и монтажных отверстий. 139
1.13.4. Предварительная металлизация отверстий 139
1.13.5. Получение рисунка схемы 141
1.13.6. Гальваническое осаждение меди 143
1.13.7. Травление меди 143
1.13.8. Нанесение паяльной маски 144
1.13.9. Горячее лужение 145
1.13.10. Оптический контроль качества 146
Тесты к лекции 1.13 148
1.14. Коммутационные структуры в жидкокристаллических и плазменных панелях. 149
1.14.1. Технологии плоскоэкранных дисплеев. 149
1.14.2. Низкотемпературная поликремниевая технология 152
1.14.3. Плазменные панели 153
Тесты к лекции 1.14 155
1.15. Оптоволоконные коммутационные структуры. 156
1.15.1. Оптические коммуникации и проводящие среды 156
1.15.2. Перспективы использования 158
1.15.3. Оптическое волокно 160
1.15.4. Классификация оптических волокон 161
1.15.5. Основные параметры волокон 165
1.15.6. Конструкционные особенности оптического кабеля 167
1.15.7. Технология изготовления 167
1.15.8. Печатные платы с оптоволоконными проводниками 169
Тесты к лекции 1.15 171
1.16. Электрический контроль коммутационных структур 172
1.16.1. Общие положения электрического контроля коммутационных структур 172

1.16.2. Электрические методы локализации неисправностей 174
Тесты к лекции 1.16 192
1.17. Контроль качества коммутационных структур 194
1.17.1. Методы и средства управления качеством коммутационных структур 194
1.17.2. Основы дефектоскопии коммутационных структур 195
1.17.3. Методы и средства рентгеновского контроля коммутационных структур 198
1.17.4. Общие положения оптического контроля коммутационных структур 199
1.17.5. Оптические методы анализа паяных соединений 200
1.17.6. Анализ дефектов печатных плат по микрошлифам 208
1.17.7. Выводы и рекомендации по управлению качеством коммутационных структур 217
Тесты к лекции 1.17 218
1.18. Разработка пакета документации на коммутационные структуры . . . 219
1.18.1. Технические условия на коммутационные структуры 219
1.18.2. Документация на коммутационные структуры и ее комплектность 219
1.18.3. Чертежи печатных плат 232
1.18.4. Чертежи жгутов и кабелей, электромонтажный чертеж 236
Тесты к лекции 1.18 247

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 248
2.1. Общие требования по технике безопасности при выполнении лабораторных работ 248
2.2. Лабораторная работа № 1. Изготовление печатной платы лазерно-утюжной технологией 251
Контрольные вопросы и задания 256
2.3. Лабораторная работа № 2. Изготовление печатной платы технологией с использованием фотолитографии 257
Контрольные вопросы и задания 263
2.4. Лабораторная работа № 3. Исследование геометрических параметров проводящего рисунка коммутационных структур 264
Контрольные вопросы и задания 272
2.5. Лабораторная работа № 4. Исследование качества переходных отверстий в печатных платах . . . 273
Контрольные вопросы и задания 281
2.6. Лабораторная работа № 5. Локализация неисправностей компонентов на смонтированных коммутационных структурах 282

Контрольные вопросы и задания. 288
2.7. Лабораторная работа № 6.1.
Контроль пассивных компонентов: контроль резисторов 289
Контрольные вопросы и задания. 292
2.8. Лабораторная работа № 6.2.
Контроль пассивных компонентов: контроль конденсаторов 293
Контрольные вопросы и задания. 296
2.9. Лабораторная работа № 6.3.
Контроль пассивных компонентов: контроль индуктивностей. 297
Контрольные вопросы и задания. 300
2.10. Лабораторная работа № 6.4.
Контроль полупроводниковых компонентов: контроль диодов, светодиодов, стабилитронов. 301
Контрольные вопросы 305
2.11. Лабораторная работа № 6.5.
Контроль активных компонентов: контроль транзисторов 306
Контрольные вопросы и задания. 315

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ 316
3.1. Семинар № 1.
Проектирование в пакете Altium Designer: управление проектом . . . 316
Контрольные вопросы и задания. 327
3.2. Семинар № 2.
Проектирование в пакете Altium Designer: разработка библиотеки компонентов 328
Контрольные вопросы и задания. 343
3.3. Семинар № 3.
Проектирование в пакете Altium Designer: разработка библиотеки посадочных мест 344
Контрольные вопросы и задания. 353
3.4. Семинар № 4.
Проектирование в пакете Altium Designer: разработка создания электрической принципиальной схемы 354
Контрольные вопросы и задания. 362
3.5. Семинар № 5.
Проектирование в пакете Altium Designer: топологическое проектирование 363
Контрольные вопросы и задания. 379
3.6. Семинар № 6.
Проектирование в пакете Altium Designer: разработка синтез-проекта коммутационной структуры 380
Контрольные вопросы и задания. 392
3.7. Семинар № 7.
Анализ сборочного состава изделий электронной техники 393
Контрольные вопросы и задания. 398

3.8. Семинар № 8.
Эскизирование коммутационных структур 399
Контрольные вопросы и задания 403
3.9. Семинар № 9.
Расчет узких мест проводящего рисунка 404
Контрольные вопросы и задания 405
3.10. Семинар № 10.
Метод расчета ширины печатного проводника 406
Контрольные вопросы и задания 408

4. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ 409
4.1. Примерная базовая программа дисциплины 409
4.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине 425
4.2.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий 425
4.2.2. Примеры вариантов экзаменационных билетов 428
4.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов плакатов и других дидактических материалов 433
4.3.1. Спецификация слайдов — конспектов лекций 433
4.3.2. Пример оформления дидактических материалов по лекциям . . . 435

Заключение 448

Литература 450

Приложение 454

Учебное издание

Гриднев Владимир Николаевич
Гриднева Галина Николаевна
Жалнин Владимир Петрович
Селиванов Кирилл Владимирович
Козырев Александр Николаевич

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *Л.С. Филатова*
Компьютерная верстка *И.Д. Звягинцевой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 25.12.2024. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 41,6. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
https://press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.