БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ



BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Передовые инженерные школы

БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

Серия основана в 2022 году

Том 1

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
В.А. Быков	— д-р техн. наук, профессор, президент Нанотехнологического общества России
М.Ф. Булатов	— д-р физ.-мат. наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова
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 Информационно-аналитического 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)»

Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения

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
Т38

Издание доступно в электронном виде по адресу:
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8207

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:
Д.В. Андреев, А.Е. Курносенко, В.В. Макарчук, В.А. Соловьев

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 кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета *Д.Ю. Муромцев*

Т38 **Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения** / [Д. В. Андреев и др.]. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. — 387, [1] с. : ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 1).

ISBN 978-5-7038-6098-4
ISBN 978-5-7038-6320-6 (т. 1)

Учебное пособие по дисциплине «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения» содержит нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций, практических занятий, лабораторных работ, перечень слайдов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава и студентов по данной дисциплине.

Соответствует стандартам WorldSkills по компетенции «Производство и инженерные технологии», а также содержанию и уровню подготовки студентов по укрупненным группам специальностей и направлений «Информатика и вычислительная техника», «Электроника, фотоника, приборостроение и связь». Может представлять интерес для преподавателей, студентов, а также специалистов, занимающихся вопросами приборостроения и созданием цифровых систем.

Электронная версия учебного пособия имеет свободный доступ — ее можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на 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

ISBN 978-5-7038-6320-6 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-6098-4

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

Предисловие

Учебно-методические комплексы (УМК) дисциплин по направлению подготовки «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 на цифровую трансформацию промышленности.

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

Основная особенность предметной области «Приборостроение» — ее междисциплинарный характер, 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 УМК, которые обеспечат учебно-методическую поддержку подготовки бакалавров и магистров по основным образовательным программам высшего профессионального образования в рамках тематического направления «Приборостроение» образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории Российской Федерации.

Целью создания УМК дисциплин 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 и командной работы.

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

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

Образование будущего предусматривает переход от рутинного обучения инженеров к подготовке участников инженерных команд, способных объединяться для решения конкретных практических задач приборостроения, для чего необходима глубокая интеграция образования с промышленностью, наукой и органами власти.

Создание УМК дисциплин по направлению «Приборостроение» нацелено на развитие образовательных технологий, базирующихся на практическом опыте, что позволит выпускникам работать над перспективными проектами, спрос на которые возрастает в текущих условиях.

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

Авторы выражают благодарность рецензентам: заведующему кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета Н.К. Юркову и научному руководителю кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета Д.Ю. Муромцеву, замечания которых позволили улучшить содержание данного учебно-методического комплекса.

Разработанные УМК дисциплин обеспечат подготовку по основным образовательным программам высшего профессионального образования по направлениям подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (уровень бакалавриата) и 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата) образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории Российской Федерации.

Сетевые версии УМК 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 данного учебно-методического комплекса, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4.

В.А. Шахнов

Список сокращений

АСО — атомно-слоевое осаждение (см. также ALD)
БИС — большая интегральная схема
БЛЭ — базовый логический элемент
БМК — базовый матричный кристалл
БСС — боросиликатное стекло
БФСС — борофосфорсиликатное стекло
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ГИС — гибридная интегральная схема
ГХО — газохимическая очистка
ДАР — диск с алмазной режущей кромкой
ИК — инфракрасное (излучение)
ИМС — интегральная микросхема
КМОП — комплементарная (структура) металл–оксид–полупроводник
КНИ — (структура) кремний на изоляторе (см. также SOI)
КНС — (структура) кремний на сапфире
КО — каналоограничительная область
МДМ — (структура) металл–диэлектрик–металл
МДП — (структура) металл–диэлектрик–полупроводник
МИС — малая интегральная схема
МЛЭ — молекулярно-лучевая эпитаксия
МОП — (структура) металл–оксид–полупроводник
НИЛ — наноимпринт-литография
ОЗУ — оперативно-запоминающее устройство
ПЗС — прибор с зарядовой связью
ПФШ — промежуточный фотошаблон
ПХТ — плазмохимическое травление
САПР — система автоматизированного проектирования
СБИС — сверхбольшая интегральная схема
СВЧ — сверхвысокочастотное (излучение)
СИС — средняя интегральная схема
СТО — скоростной термический отжиг
ТКЛР — температурный коэффициент линейного расширения
ТКС — температурный коэффициент сопротивления
ТПИ — твердый планарный источник
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика
УФ — ультрафиолетовое (излучение)
ФСС — фосфорсиликатное стекло
ХМП — химико-механическая планаризация, химико-механическое полирование (см. также CMP)
ЭСЛ — эмиттерно-связанная логика

ALD (Atomic Layer Deposition) — атомно-слоевое осаждение (см. также АСО)
APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды при нормальном атмосферном давлении
AR (Aspect Ratio) — отношение высоты рельефа поверхности к ширине зазора
ARC (Antireflective Coating) — антиотражающее покрытие
CD (Control Dimension) — пространственное разрешение, или размер минимального технологического элемента
CMP (Chemical Mechanical Polishing) — химико-механическое полирование (см. также ХМП)
COB (Chip-on-Board) — кристалл на плате
COF (Chip-on-Flex) — кристалл на полимере
COG (Chip-on-Glass) — кристалл на стекле
CVD (Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды (парофазное осаждение)
DIP (Dual in line Package) — корпус (пластмассовый) с двухрядным расположением выводов
DOF (Depth of Field) — глубина резкости
DPF (Dense Plasma Focus) — плотно сфокусированная плазма
DTI (Deep Trench Isolation) — структура с глубокой щелевой изоляцией
DUV (Deep Ultraviolet) — дальнее ультрафиолетовое излучение
EBL (Electron-Beam Lithography) — электронно-лучевая литография
EUV (Extreme Ultraviolet) — экстремальное (сверхжесткое) ультрафиолетовое излучение
EUVL (Extreme Ultraviolet Lithography) — литография в экстремальном (сверхжестком) ультрафиолетовом излучении
FinFET (Fin Field-Effect Transistor) — полевой транзистор с каналом-плавником, ребристый полевой транзистор
HDP-CVD (High-Density Plasma Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды в плазме высокой плотности
IBL (Ion-Beam Lithography) — ионно-лучевая литография
LOCOS (LOCal Oxidation of Silicon) — локальное окисление кремния
LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды при пониженном атмосферном давлении
MCM (MultiChip Module) — многокристальный модуль
MF (Mid-Frequencies) — средние частоты
MISFET (Metal–Dielectric–Semiconductor Field-Effect Transistor) — МДП-полевой транзистор
MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) — МОП-полевой транзистор
MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition) — химическое осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы
MPCVD, MW-PCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды, активированное сверхвысокочастотной плазмой

MUV (Middle Ultraviolet) — среднее ультрафиолетовое излучение
NA (Numerical Aperture) — числовая апертура (мера светособирающей способности объектива)
NIL (Nanoimprint Lithography) — наноимпринт- (нанопечатная) литография
NUV (Near Ultraviolet) — ближнее ультрафиолетовое излучение
OAI (Off Axis Illumination) — внеосевое излучение
OPC (Optical Proximity Correction) — эффект оптической близости
PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды, усиленное плазмой
PETEOS, PE-TEOS (Plasma-Enhanced TEtraethyl OrthoSilicate) — плазмохимическое осаждение из элементоорганических соединений
PSM (Phase-Shift Mask) — фазосдвигающая маска
PVD (Physical Vapor Deposition) — физическое нанесение из паровой (газовой) среды
SACVD (Subatmospheric Chemical Vapor Deposition) — химическое осаждение из газовой среды при атмосферном давлении
SOI (Silicon-on-Insulator) — кремний на изоляторе (см. также КНИ)
TEOS (TEtraethyl OrthoSilicate) — тетраэтил ортосиликат (тетраэтоксилан)
STI (Shallow Trench Isolation) — структура с мелкой щелевой изоляцией
VUV (Vacuum Ultraviolet) — вакуумное ультрафиолетовое излучение

Термины и определения

Базовая технология	—	определенная технологическая последовательность обработки, определенный комплект оборудования, постоянная отработанная настройка оборудования, т. е. жесткие технологические режимы. Базовая технология не зависит от размеров элементов в плане, их расположения и т. п.
Гибридная интегральная микросхема	—	микросхема, которая наряду с пленочными элементами, полученными с помощью интегральной технологии, содержит компоненты, имеющие самостоятельное конструктивное оформление.
Интегральная микросхема	—	микроэлектронное устройство произвольной сложности, изготовленное по интегральной технологии (на жаргоне — чип, chip).
Интегральная технология	—	совокупность методов обработки, позволяющая при наличии структурного подобия (технологической совместимости) различных элементов интегральных микросхем формировать их одновременно в едином технологическом цикле.
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 предполагаемые потребности в соответствии с ее назначением.
Контроль	—	процесс определения и оценки информации об отклонениях действительных значений от заданных или их совпадении и результатах анализа.
Нормативный документ	—	документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.
Общая топология	—	чертеж, на котором показаны все слои (как правило, разными цветами).
Операция	—	законченная часть технологического процесса, которая выполняется непрерывно на одном рабочем месте.

Пленочная интегральная микросхема — микросхема, содержащая пленочные элементы, полученные с помощью интегральной технологии.

Подложка микросхемы — заготовка, на которой методами интегральной технологии формируются функциональные элементы и проводники.

Полупроводниковая интегральная микросхема — монолитное функциональное устройство, элементы которого изготовлены в одном объеме и (или) на поверхности полупроводникового материала.

Послойная топология — чертеж, на котором изображен только один слой.

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

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, определяющих направление деятельности и осуществляющих управление организацией на высшем уровне.

Совмещенная интегральная микросхема — комбинированная полупроводниковая интегральная микросхема, в которой некоторые элементы (обычно пассивные) наносят на поверхность пластины (кристалла) методами пленочной технологии.

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

Степень интеграции — показатель степени сложности интегральной микросхемы, характеризуемый числом элементов, которые получены с помощью интегральной технологии на общем кристалле.

Структура (вертикальный профиль) — последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, различающихся материалом, толщиной и электрофизическими свойствами.

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.

Технологический процесс	—	часть производственного процесса, непосредственно связанная с превращением предмета труда в готовую продукцию. Технологический процесс делится на операции, а операции — на установы, позиции, технологические переходы, ходы, приемы.
Топология интегральной микросхемы	—	чертеж, определяющий форму, размеры и взаимное расположение элементов и соединений микросхемы в плоскости, параллельной плоскости кристалла.
Унификация	—	действия, направленные на сведение к технически и экономически обоснованному рациональному минимуму неоправданного многообразия различных изделий, деталей, узлов, технологических процессов и документации.
p—*n*-переход, или электронно-дырочный переход	—	область соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости — дырочной (*p*, от англ. positive — положительная) и электронной (*n*, от англ. negative — отрицательная).

1. Конспект лекций

Основная цель дисциплины: изучение основ технологических процессов в приборостроении в части электронной компонентной базы приборов и систем: интегральных схем, микропроцессоров, микро- и наносборок; ознакомление с базовым технологическим оборудованием, методами проектирования технологических процессов производства электронной компонентной базы.

Задачи дисциплины:

– изучить физико-химические явления, сопровождающие операции технологического процесса изготовления электронной компонентной базы приборостроения;

– изучить методику выполнения базовых технологических процессов: эпитаксии, избирательного легирования, литографии, формирования пленок, химической и ионно-плазменной обработки;

– изучить принципы расчета технологических параметров операций технологического процесса производства микросхем;

– изучить принципы проектирования технологических маршрутов основных типов интегральных микросхем;

– изучить особенности устройства и применения технологического оборудования;

– изучить методику контроля технологических параметров и параметров формируемых структур.

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных основной профессиональной образовательной программой на основе самостоятельно установленного образовательного стандарта по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

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

1.1. МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Цель лекции: ознакомление с курсом, изучение принципов микроминиатюризации компонентной базы приборостроения.

1.1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Приборостроение — междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, предметом которой являются исследования, проектирование и совершенствование методов производства приборов и применения интегрированных приборных систем. К области приборостроения относятся высокоточное приборостроение, машиностроение и биотехнологии.

Начало микроминиатюризации интегрированных систем было положено с первых дней зарождения радиотехники. Развитие полупроводниковой электроники связано с изобретением в 1948 г. (а точнее, в декабре 1947 г.) сотрудниками американской компании Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) У. Шокли[*], Дж. Бардиным[**] и У. Браттейном[***] так называемого точечного транзистора (рис. 1.1), за что все трое в 1956 г. получили Нобелевскую премию по физике.

В точечном транзисторе золотая фольга разделяется на две части в вершине пластиковой призмы и образует два отдельных контакта с верхней частью германиевой подложки *p*-типа, когда призма поджимается к контактам пружиной. Два куска золотой фольги образуют коллектор и эмиттер, а металлический электрод, прикрепленный к другой стороне полупроводника, образует контакт к базе.

---

[*] Шокли У. (1910–1989) — американский физик, специалист по физике твердого тела. Родился в Лондоне. Степень бакалавра получил в Калифорнийском технологическом институте (1932), степень доктора наук — в Массачусетском технологическом институте (1936).

[**] Бардин Дж. (1908–1991) — американский физик-теоретик, единственный в мире дважды лауреат Нобелевской премии по физике, вторая премия — за работы по сверхпроводимости в 1972 г. (теория Бардина — Купера — Шриффера).

[***] Браттейн У. (1902–1987) — американский физик, специалист по квантовой механике. Родился в Китае. Степень бакалавра получил в Уитменском колледже (1924), степень магистра — в Орегонском университете (1926). Защитил докторскую диссертацию (1929) в университете штата Миннесота, куда приезжали читать лекции по новой квантово-механической теории ее создатели — А. Зоммерфельд, Э. Шрёдингер и Дж. Франк. В 1929 г. поступил на работу в компанию Bell Labs. В 1931 г. возглавил в ней вместе с Дж. Беккером работы по исследованию купроксных выпрямителей.

История создания транзистора заслуживает отдельного повествования, поскольку является невероятно интересной. Следует отметить, что если бы не Вторая мировая война, то транзистор был бы открыт на семь лет раньше. Уже в 1940 г. исследователи, сами того не подозревая, получили первый *p*–*n*-переход и начали изучать его свойства. Однако война помешала продолжению этих работ, и все три будущих нобелевских лауреата были направлены в разные исследовательские группы, работавшие на военные нужды.

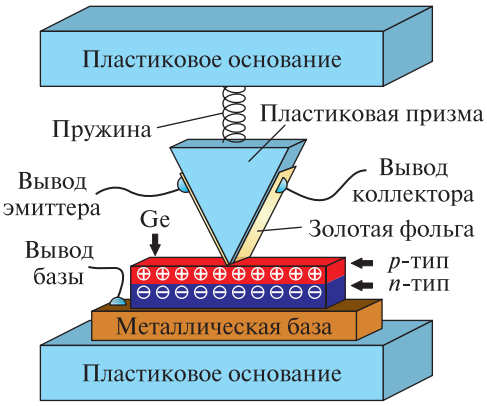


Рис. 1.1. Схема точечного транзистора

В 1930-е гг. промышленностью выпускались купроксные выпрямители — по сути, приборы, в которых использовались полупроводниковые свойства твердого тела. Однако принцип их работы в то время никто не понимал.

В работы по получению сверхчистых материалов, в частности германия и кремния, и в исследование их свойств внесли вклад Р. Ол (химик, изучавший возможность получения кремния высокой чистоты), Дж. Скафф и Х. Тойерер (металлурги, работавшие с кремнием в начале 1940-х гг.).

В 1948 г. независимо от группы Шокли транзистор был изобретен работающими во Франции двумя немецкими физиками — Х. Матаре и Х. Велкером. Оба прибора были с неудобным в производстве точечным контактом к полупроводнику.

В 1951 г. Шокли изобрел биполярный транзистор с двумя *p*–*n*-переходами, полностью заменивший точечные к середине 1950-х гг. К 1954 г. транзисторы стали обязательными компонентами в телефонных станциях и аппаратах компании Bell Labs.

В СССР благодаря работам физиков школы А.Ф. Иоффе было быстро освоено производство полупроводниковых элементов. Первый транзистор получен учеником Иоффе — Б.М. Вулом в 1957 г. (по другим сведениям, в 1953 г.).

В 2000 г. нашему соотечественнику — академику Ж. Алферову — была присуждена Нобелевская премия по физике за работы по созданию полупроводниковых приборов на гетеропереходах. При этом еще в 1972 г., в советское время, за эти же работы ему была присуждена Ленинская премия.

Все это свидетельствует о важности работ по микроминиатюризации электронной аппаратуры.

После изобретения транзистора Шокли в 1956 г. основал компанию Shockley Semiconductor Laboratory, где изобрел еще один полупроводниковый прибор, названный им «диод Шокли». В отличие от транзистора, в нем не три, а четыре слоя полупроводника, что дало возможность

блокировать прибор в открытом или закрытом состоянии без поддерживающего напряжения.

Изначально транзисторы изготовляли из германия, однако *p–n*-переходы из этого материала отличались термической нестабильностью и элемент сильно нагревался. Кроме того, применение германия ограничивалось его высокой стоимостью. В 1952 г. удалось получить кристаллический кремний, после чего через два года компания Texas Instruments (США) начала применять его для производства транзисторов.

В 1955 г. специалисты Bell Labs впервые использовали для производственных целей почти все основные технологические операции микроэлектроники: осаждение изолятора, фотолитографию с масками, травление и диффузию.

Нерешительность Шокли при управлении проектами не давала возможности немедленно воплотить идею в производство. Это так расстроило его коллег, что восемь наиболее молодых из них потребовали сменить главу компании. Когда стало ясно, что навстречу им не пойдут, «вероломная восьмерка», как назвала их супруга Шокли, покинула компанию и в 1957 г. основала компанию Fairchild Semiconductor для производства полупроводниковых транзисторов.

1.1.2. СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И РАЗВИТИЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

В 1950-е гг. были созданы первые интегральные микросхемы (ИМС). Впервые идею об интегральной микросхеме как о «твердом бруске без соединяющих проводов» в 1952 г. выдвинул британский электронщик Дж. Даммер, но его попытка реализовать идею в 1956 г. была неудачной.

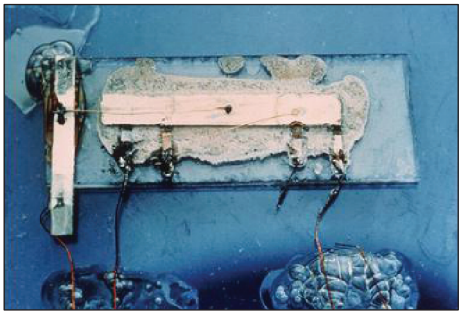


Рис. 1.2. Осциллятор Килби (http://www.ti.com/corp/graphics/press/image/on_line/co1034.jpg)

12 июля 1958 г. работавший в компании Texas Instruments инженер-электрик Дж. Килби построил первую ИМС из пяти элементов (рис. 1.2), выполняющую роль генератора, хотя она еще не была однокристальной. Патент на изобретение ИМС был выдан Дж. Килби* в 1961 г. За это открытие в 2000 г. он получил Нобелевскую премию по физике.

Изобретение Килби имело большой недостаток: компоненты микросхемы соединялись золотыми проводками, что делало технологию малопригодной к дальнейшему уменьшению размеров, усложнению и массовому производству компонентов. К концу 1958 г. Ж. Эрни из Fairchild Semiconductor продемонстрировал размещение в кремнии областей с избытком электронов

* Дж. Килби начал свою деятельность в 1947 г. в компании Centralab (США, штат Миллуоки).

и дырок, вместе составляющих *p*–*n*-переход, над которым располагался изолятор из диоксида кремния SiO_2. В изоляторе было протравлено отверстие, которое заполнялось алюминием, образующим контакт. В то же время чешский физик К. Леховец, работавший в компании Sprague Electric (США), догадался использовать в качестве изолятора *p*–*n*-переход. В 1959 г. Р. Нойс* из Fairchild Semiconductor объединил обе идеи с возможностью напылять на микросхему тонкий слой металла. Этот слой затем выборочно вытравливали, получая одновременно все необходимые межсоединения, что сделало возможным изготовление более сложной микросхемы за несколько шагов. Эта технология была названа *планарной*. Первая созданная планарная микросхема показана на рис. 1.3.

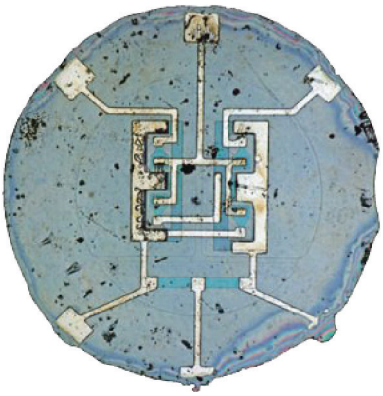


Рис. 1.3. Кристалл первой «современной» микросхемы (триггер с четырьмя транзисторами и пятью резисторами), Fairchild Semiconductor, 1960 г.

В 1958 г. Дж. Лэст и Р. Нойс построили один из первых фотоповторителей, позволявших на одну пластину проецировать множество копий маски. В 1961 г. выпущены первые промышленные фотоповторители с уменьшением изображения, благодаря чему маску можно сделать в 5–10 раз больше, что упрощало процесс ее подготовки. Маски изготовляли переносом выполненных на прозрачной пленке чертежей на лист рубилита, в рубиновом слое которого специалист полуручным способом гравировал оттиск. Изначально кристаллы микросхем изготовляли из пластин диаметром 13,3 мм, введенных в 1960 г. Право называться первой коммерческой компанией оспаривают Fairchild Semiconductor и Texas Instruments.

Параллельно с биполярными транзисторами развивались и другие полупроводниковые элементы — полевые транзисторы, впервые созданные в 1955 г. В 1959 г. Дж. Аталла и Д. Канг из Bell Labs изготовили полевой транзистор с изолированным затвором (рис. 1.4). В результате получилась всем известная структура металл–оксид–полупроводник (МОП): металлический (алюминий) затвор, подзатворный оксид (SiO_2) и канал-полупроводник (кремний). Несмотря на то что первые два элемента давно выполняют из других материалов, этот компонент до настоящего времени называют МОП-транзисторами или МДП-транзисторами (если используется структура металл–диэлектрик–полупроводник). Изначально *p*-канальные полевые транзисторы (в большинстве из них канал между истоком и стоком открыт при отрицательном напряжении на затворе относительно напряжения истока) работали медленнее биполярных, но их производили, потому что они

* Нойс Р. — американский инженер и физик, представитель «вероломной восьмерки», основавшей одну из первых компаний по производству кремниевых полупроводников — Fairchild Semiconductor. Работая в Fairchild Semiconductor, Нойс практически одновременно с Дж. Килби из Texas Instruments изобрел интегральную микросхему.

были дешевле. Более быстрые *n*-канальные транзисторы (канал открыт при положительном напряжении на затворе) появились в 1964 г.

В 1960 г. в Bell Labs изобрели еще один важный для массового производства процесс — эпитаксиальное осаждение тонкого слоя на кристаллическую подложку, попутно обнаружив, что при малой толщине базы биполярный транзистор ускоряется.

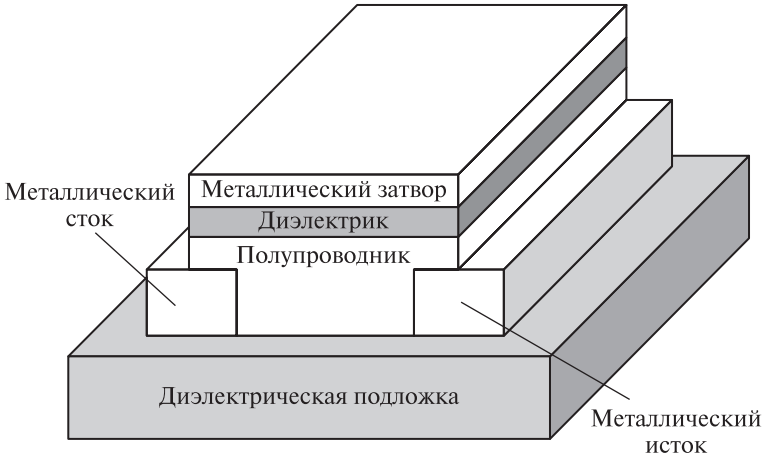


Рис. 1.4. Схема МДП-транзистора с изолированным затвором, 1959 г.

В 1951 г. Ж. Эрни, используя легирование золотом и эпитаксиальное осаждение, получил кремниевый биполярный транзистор, работающий быстрее германиевых.

В 1960-е гг. микроэлектроника бурно развивалась. Одним из главных стимулов для создания компьютеров на базе биполярных транзисторов послужило соперничество между космическими державами в исследовании Луны. До того момента первые микросхемы были относительно медленными и по стоимости в несколько раз превышали аналогичный набор дискретных компонентов. Но для применения в авиационной и космической промышленности их миниатюрность и энергоэффективность оказались важнее недостатков, хотя микросхемы в то время содержали лишь несколько компонентов. В 1961 г. коллега Килби — Х. Крэгон сделал демонстрационный «молекулярный электронный компьютер» для Военно-воздушных сил США, в котором 587 микросхем производства компании Texas Instruments заменяли 8500 деталей. В том же году в простых компьютерах стали использовать микросхемы.

В 1963 г. появились первые микросхемы на ТТЛ-логике (транзисторно-транзисторная логика, самая популярная до конца 1970-х гг.). В том же году Ф. Уанласс из Fairchild Semiconductor показал, что симметричное спаривание *p*- и *n*-канальных МОП-транзисторов уменьшает потребление энергии при простое (когда транзисторы не переключаются) в 10^6 раз, назвав этот вид логики «комплементарная (структура) МОП» (КМОП). Впервые эту

микросхему, изготовленную спустя два года, стали применять в авиации, в космической технике, а также в коммерческих устройствах. Вследствие использования медленных *p*-МОП-транзисторов скорость таких микросхем была невысокой.

Когда массовое производство ИМС стало исчисляться миллионами, оказалось, что с применением пластин большего диаметра себестоимость микросхем снижается, а массовость возрастает. В результате в 1964 г. были введены пластины диаметром 25 мм, а через два года — 38 мм. В последующие годы увеличение диаметра пластин продолжилось: в 1970 г. внедрены пластины диаметром 57 мм, в 1973 г. — 76 мм, в 1975 — 100 мм, в 1979 г. — 125 мм, в 1981 г. — 150 мм, в 1985 г. — 200 мм (до настоящего времени используемые на не самых передовых предприятиях) и в 1996 г. — 300 мм. В результате число производимых ИМС увеличивалось, а их себестоимость уменьшалась. В дальнейшем планировалось перейти на пластины диаметром 450 мм, однако этот процесс затянулся вследствие чрезвычайной дороговизны оборудования, покупку которого в настоящее время могут позволить себе лишь пять-шесть компаний в мире.

Кроме того, уменьшались размеры транзисторов. В 1970 г. при уменьшении всех частей транзисторов в 5 раз, помимо очевидного уменьшения площади поверхности, была обнаружена почти линейная зависимость основных параметров — скорости переключения транзисторов и потребляемой мощности. Однако уменьшать интегральные МОП-транзисторы оказалось труднее, чем биполярные, поскольку усложнялось производство и снижалась надежность. Но в течение 1963–1966 гг. специалисты из американских, европейских и японских компаний (в сотрудничестве и конкуренции) исследовали и решили бóльшую часть вопросов надежности МОП-микросхем. После этого выяснилось, что параметры биполярных транзисторов с уменьшением их размеров не масштабируются так же хорошо, как полевых. Это поставило точку в использовании биполярных транзисторов для цифровых устройств, до того времени применявшихся в самых быстрых логических микросхемах типа ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика). В результате в 1980-е гг. все цифровые устройства стали создавать на МОП-микросхемах.

В течение 1960-х гг. развитие литографии позволяло увеличивать число создаваемых транзисторов экспоненциально. Впервые это заметил химик Г. Мур, работавший тогда руководителем в компании Fairchild Semiconductor. В 1965 г. он написал внутренний доклад «Будущее интегральной электроники». В докладе был представлен график, связывающий число компонентов ИМС и их минимальную цену для периода 1959–1964 гг., с предсказанием развития на последующие 10 лет. Оно основывалось на том, что число компонентов на микросхеме будет продолжать удваиваться каждый год. Позже, 19 апреля 1965 г., отредактированная версия доклада появилась в виде статьи в журнале Electronics.

В 1975 г. на ежегодной встрече Международной организации инженеров-электронщиков (IEEE) Мур (уже как президент и исполнительный директор компании Intel) указал, что увеличение диаметра пластин, успехи

в технологических процессах и совершенствование схем и устройств позволило продолжить прогнозирование (рис. 1.5). Следует отметить, что Мур скорректировал предложенную им закономерность до удвоения через каждые два года, добавив в последние данные большую долю микропроцессоров как наиболее сложных логических (т. е. нерегулярных) микросхем. Предсказание оказалось самоподдерживающимся. Многочисленные компании (в том числе Intel) до сих пор стараются соответствовать прогрессии. Титул закона ей присвоил известный информатик К. Мид в 1980 г. Еще раз публично проверив свое предсказание в 1995 г., Мур сделал вывод, что оно будет реализовываться еще довольно долго.

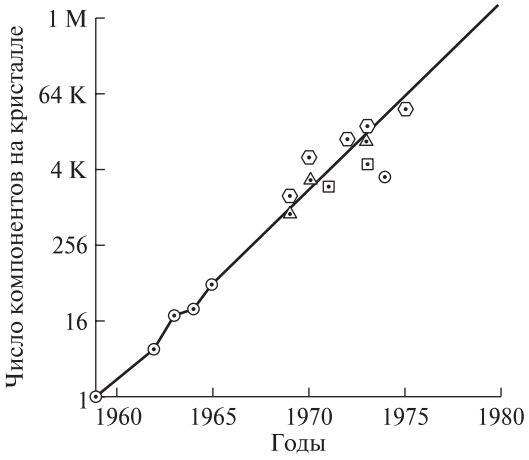


Рис. 1.5. Закономерность Мура, 1975 г.:
⊙ — биполярные транзисторы; ◬ — биполярная транзисторная матрица; ⊡ — МОП-транзисторы; ⊙ — МОП-транзисторная матрица

В 1968 г. произошел важнейший прорыв, не повторившийся в последующие 35 лет: Р. Кервин, Д. Кляйн и Дж. Сэрэс из Bell Labs в качестве материала затвора использовали не алюминий, а поликремний (поликристаллическая форма кремния, сильно легированная проводящими примесями). Несмотря на то что сопротивление поликремния больше, чем сопротивление металла (и потому контакт к затвору — по-прежнему металлический), осаждение и выборочное вытравливание кремния для затвора позволило использовать его в качестве маски для формирования истока и стока, идеально подогнанных к его краям (поэтому поликремниевый затвор называется самосовмещенным — self-aligned). В результате резко снизился разброс характеристик, вызванный неидеальным наложением масок при литографическом формировании истока и стока. Меньший разброс характеристик улучшает надежность работы, а расположенные более плотно части транзистора увеличивают скорость и плотность размещения самих транзисторов. Кроме того, оказалось, что поликремниевый затвор ускоряет доступ к транзистору

в 3–5 раз и уменьшает площадь поверхности транзистора по сравнению с обычным МОП-транзистором. Первой коммерческой ИМС с поликремниевыми затворами стала Fairchild 3708 (рис. 1.6).

В 1968 г. восьмерке «молодых и дерзких» стало тесно в Fairchild Semiconductor, они покинули ее и за 20 лет основали 65 разных компаний, хотя не все они стали известными.

В том же году трое специалистов, ранее работавших в компании Fairchild Semiconductor, — Р. Нойс, Г. Мур и Э. Гроув, — основали в Кремниевой долине (США, штат Калифорния) компанию Intel, где в 1971 г. был разработан и выпущен в продажу первый микропроцессор — микросхема Intel-4004, содержащая 2250 *p*-канальных МОП-транзисторов. Процессор был разработан М. Хоффом и М. Шимой. В том же году Intel выпустила микросхему динамического оперативно-запоминающего устройства (ОЗУ) объемом 1 Кбит.

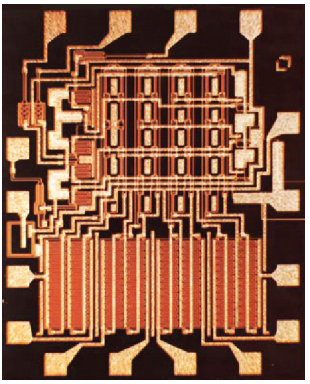


Рис. 1.6. Fairchild 3708 — первая коммерческая интегральная микросхема с поликремниевыми затворами, Fairchild Semiconductor, 1968 г.

В 1969 г. пять «fairchildren» («прекрасных детей») основали компанию AMD, которая до настоящего является одним из главных конкурентов Intel в производстве микропроцессоров.

В 1973 г. компания PerkinElmer, США (в настоящее время — SVG Lithography), представила проекционный принтер — первый пример массовой фотолитографии. До этого все микросхемы выполняли контактным способом: маску буквально впечатывали в пластину и только затем облучали. Это порождало большое число осколков и много пыли, выбиваемых с поверхности и загрязнявших пластину. Применяя новый принтер с положительным фоторезистом, удалось добиться революционного прорыва в выходе годных: плотность дефектов на единицу площади резко снизилась, так как физический контакт маски с пластиной отсутствовал. Маска представляла собой кварцевую пластину с хромовым слоем, содержащим нужный рисунок. Совершенствованию оборудования способствовала всемирная «борьба за микроны» (а позже — и нанометры).

В 1970-е гг. интенсивно развивались микропроцессоры, за 10 лет из 4-битных они стали 32-битными, для многих приложений этого объема достаточно и в настоящее время. Совершенствовались микросхемы памяти. Именно в те годы была открыта динамическая память, которая стала более емкой и надежной, и к тому же более дешевой, чем память на магнитных кольцах.

Пожалуй, одно из самых важных событий в мировой микроэлектронике произошло в 1980 г., когда компания IBM (США), рассматривая центральные процессоры Motorola и Intel, выбрала Intel 8088 для вышедшего через год IBM PC. Возможно, конкурент — 32-битный микропроцессор Motorola 68000 был слишком дорог (содержал около 70 000 транзисторов против 29 300 у i8088) или не был приспособлен для относительно недорогих систем (имея

16-битную шину данных). К тому времени Intel переделала 16-битный i8086 для 8-битных чипсетов (наборов микросхем) в виде i8088. В 1982 г. Motorola также выпустила урезанную версию с 8-битной шиной (MC68008), но проиграла в конкурентной борьбе.

Ажиотажный успех первых PC (неожиданный даже для IBM, где к проекту относились с сомнением и считали его экспериментальным) все расставил по местам: в Intel поняли, что миру будет нужно много «персональных процессоров», причем с регулярной сменой поколений. Непрофильные микросхемы постепенно уступали место процессорам ×86.

Еще до успешного выпуска PC компания Intel смогла продать несколько лицензий на производство аналогов i8086 другим компаниям; AMD получила лицензию в 1982 г., по распространенному заблуждению, — из-за политики IBM иметь нескольких поставщиков каждого важного компонента. Однако потребовалось быстро обойти собственноручно созданных конкурентов, для чего выбрали улучшение не только микроархитектур центральных процессоров, но и технологических процессов для их выпуска. Для Intel эта стратегия важна до настоящего времени, хотя большинство компаний (включая главного конкурента — AMD) давно перешли на модель fabless + foundry, т. е. бесфабричного разработчика и контрактного завода-производителя.

В 1990-е гг. размеры транзисторов в ИМС уменьшились настолько, что возник ряд проблем, связанных в первую очередь с ограничениями процесса фотолитографии. Для решения этих проблем потребовалось значительное удорожание оборудования. Кроме того, из-за повышения тактовых частот, на которых работали ИМС, и увеличения числа транзисторов существенно возросло тепловыделение микросхем. Эта проблема была частично решена в 1997 г. компанией IBM, которая нашла способ заменить алюминиевые проводники на медные, что потребовало существенных изменений в технологии. Кроме того, проводились исследования, направленные на уменьшение токов утечки. Для ее решения в 1998 г. IBM анонсировала технологию «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI*). Ее особенностью является то, что на кремниевой пластине формируется слой SiO_2 (изолятора), а поверх него — тонкий слой кремния. Использование этой технологии позволяет существенно снизить тепловыделение, хотя и удорожает производство ИМС. Однако конкуренты IBM, в первую очередь компания Intel, не спешили использовать эту технологию по причине ее дороговизны.

В 2000-е гг. появились технологические процессы с проектными нормами 90 и 65 нм, что было меньше длины волны, используемой для процесса фотолитографии. Если для технологического процесса с проектной нормой 90 нм еще можно было применять вычислительную литографию (основными процессами являются использование фазосдвигающих масок (PSM) и оптическая коррекция близости (OPC)), то для технологического процесса с проектной нормой 65 нм этого было недостаточно.

---

* Расшифровку приведенных здесь и далее наиболее важных англоязычных аббревиатур см. в списке сокращений.

Решением возникших проблем фотолитографии, основательно обновившим мировое производство микросхем, стало множественное шаблонирование, более известное по его простейшей реализации — двойному шаблонированию. Это семейство технологий позволяет снизить минимальный экспонируемый размер увеличением числа экспонирований. Позже появились и другие технологии. Кроме того, для этих целей стали применять технологию «напряженного кремния», впервые предложенную компанией IBM в 2001 г., что позволило увеличить быстродействие транзисторов.

Еще одной проблемой, возникшей при уменьшении размеров транзисторов, стало утончение подзатворного диэлектрика. Для 90-нанометрового технологического процесса толщина затвора уменьшилась до 1,2 нм у Intel и 1,9 нм у Fujitsu, Япония (оба значения — для *n*-каналов). При толщине кристаллической решетки кремния, равной 0,543 нм, начинают существенно проявляться квантовые эффекты и электроны туннелируют сквозь изолятор, вызывая утечку тока. В связи с этим для технологического процесса с проектной нормой 65 нм уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины затвора, так как в противном случае ни о какой энергоэффективности не могло быть и речи.

Для того чтобы решить эту проблему, пришлось использовать материал с более высокой диэлектрической проницаемостью k. Заменив применявшийся с 1990-х гг. оксинитрид кремния SiO_xN_y на оксинитрид кремния-гафния (HfSiON, $k = 20–40$) толщиной 3 нм, для технологического процесса с проектной нормой 45 нм удалось уменьшить утечки тока в 20–1000 раз. Однако гафниевый изолятор оказался несовместим с поликремниевым затвором, так что пришлось менять и его — на металлический. В качестве материала затвора использовали не алюминий, как в 1960-х гг., а сплав двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Изначально было известно лишь то, что сплав отличается для *p*- и *n*-канальных транзисторов, причем компания Intel (которая первой применила такой способ в 2007 г.) держала оба состава в строгом секрете. В 2008 г. инженеры IBM (результаты работы которых с тех пор используются в том числе на заводах GlobalFoundries, ранее принадлежавших AMD) предложили свою версию этой технологии, так что деталями пришлось делиться и Intel.

В 2010-е гг. для снижения токов утечки компания Intel решила вместо обычных МОП-транзисторов использовать FinFET-транзисторы (полевые транзисторы с каналом-плавником). В настоящее время для всех ИМС с проектными нормами 22 нм и менее используются именно такие транзисторы.

Охарактеризуем кратко электронную компонентную базу приборостроения:

– первое поколение (1895–1948 гг.) — активные компоненты (электровакуумные приборы и дискретные компоненты);

– второе поколение (1948–1961 гг.) — транзистор и печатные платы, которые имеют более высокую надежность, бóльшую воспроизводимость параметров, легкость автоматизации производства и снижение себестоимости;

– третье поколение (1961 г. — конец 1970-х гг.) — толсто- и тонкопленочные, полупроводниковые ИМС, микросборки;

– четвертое поколение (конец 1970-х гг. — до настоящего времени) — большие и сверхбольшие ИМС, функциональная микроэлектроника (узлы и приборы, в которых невозможно выделить компоненты, эквивалентные традиционным дискретным);

– пятое поколение — наноэлектроника.

Тесты к лекции 1.1

1. ***Кто создал первую интегральную микросхему?***

а) Дж. Килби;

б) Г. Мур;

в) А. Эйнштейн.

2. ***Как формулируется закон Мура?***

а) каждые два года число транзисторов в ИМС будет удваиваться;

б) каждые пять лет типы микросхем будут обновляться;

в) размеры транзисторов будут уменьшаться каждый год.

1.2. ВИДЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лекции: ознакомление с видами интегральных микросхем.

1.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Интегральная микросхема — микросхема, ряд компонентов которой неразделько выполнен и электрически соединен между собой таким образом, что с точки зрения технических требований, испытаний, торговли и эксплуатации устройство рассматривается как целое.

Структура (*вертикальный профиль*) ИМС — последовательность слоев в составе микросхемы по нормали к поверхности кристалла, различающихся материалом, толщиной и электрофизическими свойствами. Пример структуры современной ИМС приведен на рис. 1.7.

Топология ИМС — чертеж, определяющий форму, размеры и взаимное расположение компонентов и соединений ИМС в плоскости, параллельной плоскости кристалла. Различают два вида топологии: общую (совмещенную) и послойную.

Пример *общей* топологии приведен на рис. 1.8 и 1.9: на одном чертеже все слои показывают разными цветами. На *послойном* чертеже изображают только один слой; как правило, такую топологию используют для фотошаблонов.

Все компоненты ИМС выполняют по интегральной технологии — это совокупность методов обработки, позволяющая при наличии структурного подобия (технологической совместимости) различных компонентов ИМС формировать их одновременно в едином технологическом цикле. Благодаря этому экономически выгодно изготовлять ИМС на подложках большого диаметра, размещая на них больше кристаллов, что снижает себестоимость ИМС.

1.2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Интегральные микросхемы можно классифицировать по разным признакам:
– степени интеграции;
– физическому принципу работы компонентов;
– функциональному назначению;
– быстродействию;
– потребляемой мощности;
– конструктивным признакам;
– применяемости.

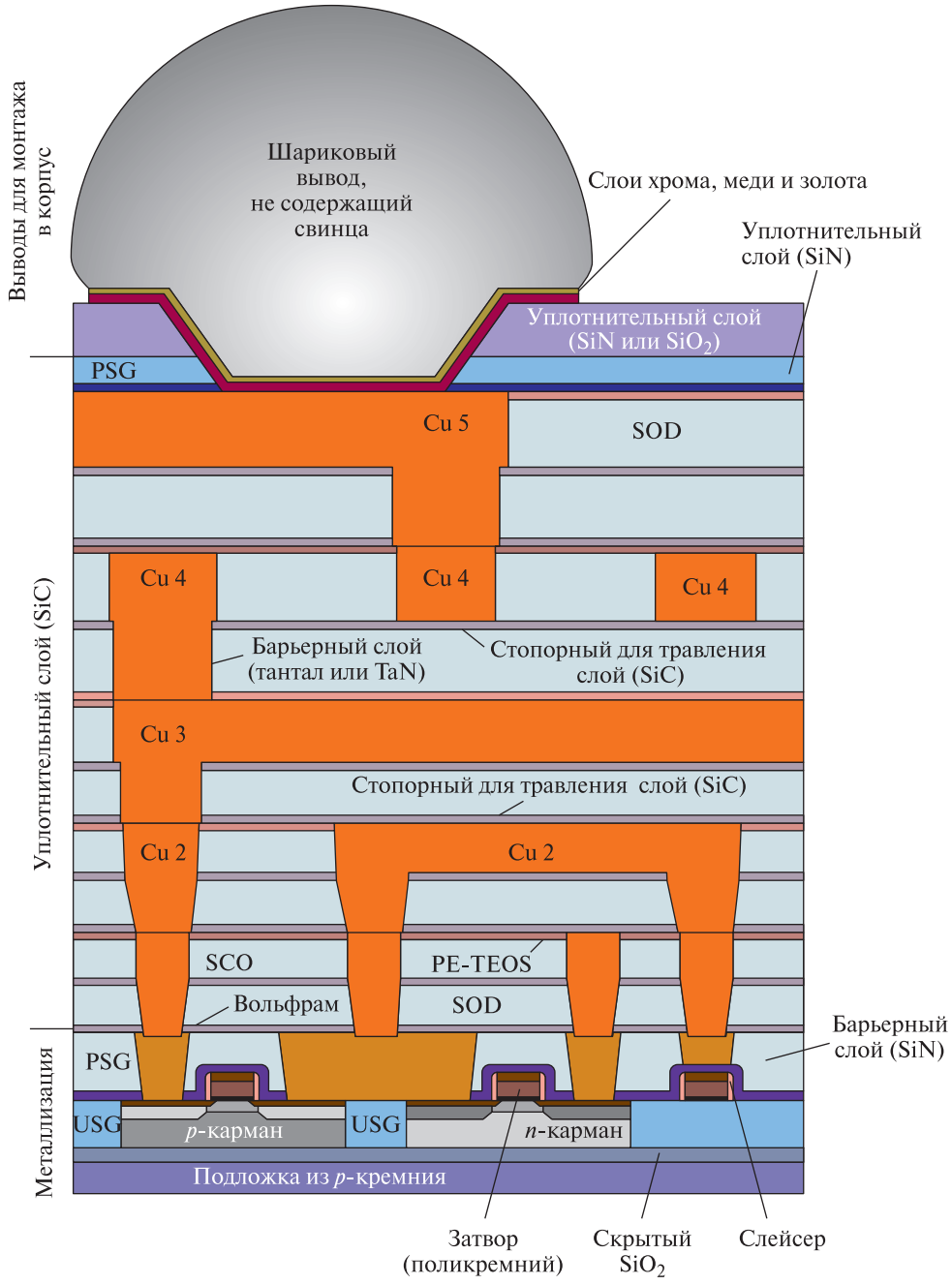


Рис. 1.7. Структура современной интегральной микросхемы (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cmos-chip_structure_in_2000s_(en).svg)

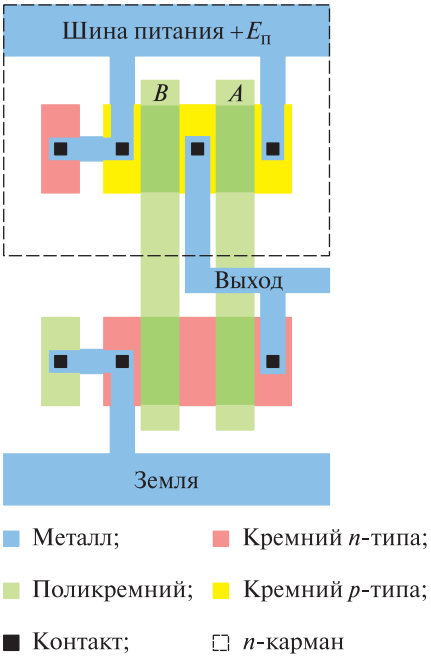


Рис. 1.8. Пример общей топологии фрагмента КМОП-микросхемы: (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CMOS_NAND_Layout.svg)

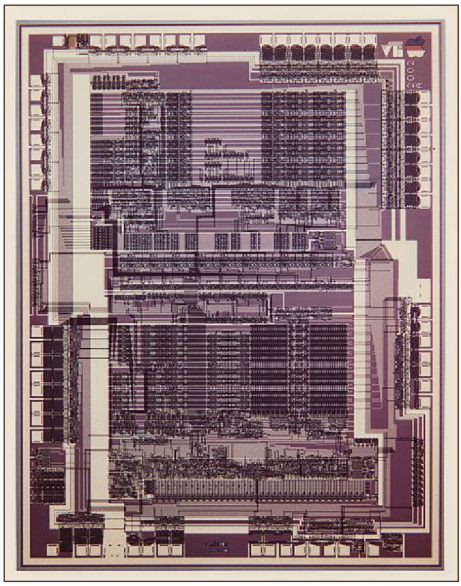


Рис. 1.9. Общая топология процессора Apple VTI Bagpipe

По степени интеграции (числу компонентов в кристалле) различают следующие виды ИМС:

– малые (МИС) — до 100 компонентов;
– средние (СИС) — до 1000 компонентов;
– большие (БИС) — до 10 000 компонентов;
– сверхбольшие (СБИС) — свыше 100 000 элементов. В настоящее время число транзисторов в СБИС может составлять несколько десятков миллиардов.

По конструктивным признакам различают ИМС:

– полупроводниковые;
– пленочные;
– совмещенные;
– гибридные (среди них выделяют сверхвысокочастотные ИМС);
– функциональные.

Полупроводниковая ИМС представляет собой полупроводниковый кристалл, в поверхностном слое которого с помощью методов полупроводниковой технологии сформированы области, эквивалентные компонентам электрической схемы, и соединения между ними.

В полупроводниковой ИМС все элементы и соединения выполнены в приповерхностном объеме или на поверхности полупроводника.

Физические свойства наиболее часто применяемых в приборостроении полупроводниковых материалов и диэлектриков представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Физические свойства материалов приборостроения

Параметр	Кремний	Германий	GaAs	SiO_2	Si_3N_4
Плотность, г/см^3	2,238	5,327	5,316	2,190	3,440
Температура плавления, °С	1412	926	1238	1700	1900
Диэлектрическая проницаемость	11,7	16,0	12,9	3,9	7,5
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	$1{,}25\cdot10^2$	$0{,}59\cdot10^2$	$0{,}52\cdot10^2$	0,014	0,185
Термический коэффициент линейного расширения, 1/°С	$2{,}33\cdot10^{-6}$	$5{,}75\cdot10^{-6}$	$5{,}64\cdot10^{-6}$	$5{,}0\cdot10^{-7}$	$2{,}8\cdot10^{-6}$
Молярная теплоемкость, Дж/(°С·моль)	23,3	20,1	–	–	–
Критерий хрупкости	2,0	4,4	3,0	–	–

При этом, несмотря на то что технологические процессы производства ИМС относятся к сфере высоких технологий, только около 3 % объема кремниевой пластины используется для формирования структур компонентов микросхемы. Остальной объем кремниевой пластины (около 97 %) не используется и служит лишь держателем (подложкой) для изготовленной сверхтонкой ИМС, защищающим ее от разрушения (рис. 1.10).

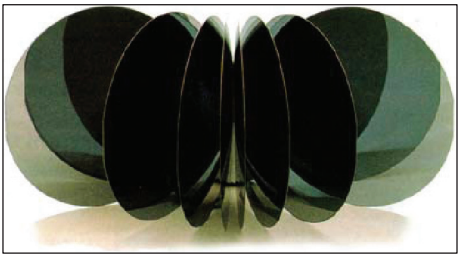


Рис. 1.10. Кремниевые пластины

Классификация полупроводниковых ИМС приведена на рис. 1.11.

Пленочные ИМС — это ИМС, все пассивные компоненты и соединения в которых выполнены в виде пленок (рис. 1.12).

Различают тонкопленочные (с толщиной пленок, формирующих структуру ИМС, до 2 мкм) и толстопленочные (20 мкм и более) ИМС. В настоящее время толстопленочные ИМС практически не встречаются.

Совмещенные ИМС — комбинированные полупроводниковые ИМС, в которых некоторые компоненты (обычно пассивные) наносят на поверхность пластины (кристалла) методами пленочной технологии.

Гибридные ИМС (ГИС) — это ИМС, которые наряду с пленочными компонентами, полученными с помощью интегральной технологии, содержат компоненты, имеющие самостоятельное конструктивное оформление. В зависимости от технологии изготовления пленочных компонентов различают



Рис. 1.11. Классификация полупроводниковых интегральных микросхем

тонкопленочные и *толстопленочные* ГИС. В настоящее время используется в основном только их разновидность — сверхвысокочастотные ИМС, которые работают в СВЧ-диапазоне.

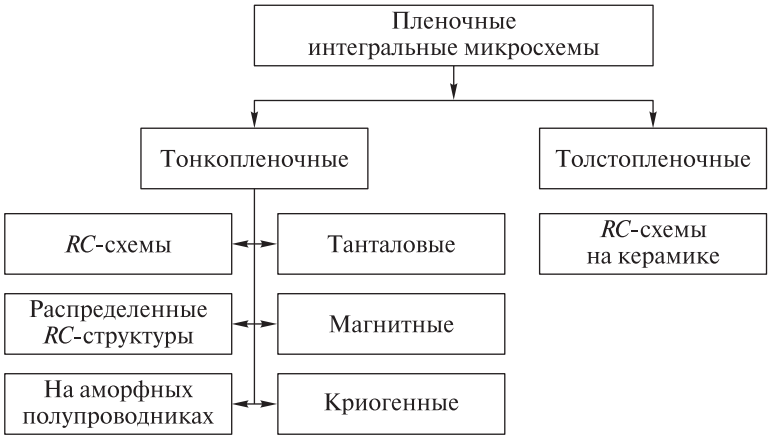


Рис. 1.12. Классификация пленочных интегральных микросхем

Функциональные ИМС — это ИМС, в которых используются различные физические эффекты и принципы для обработки сигнала (рис. 1.13).

Пьезоэлектрические ИМС содержат пленочные пьезоэлектрические элементы, которые позволяют генерировать электрические сигналы за счет использования механической энергии деформации (пьезоэффекта).

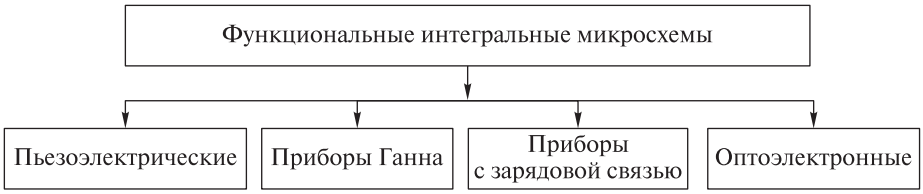


Рис. 1.13. Классификация фунциональных интегральных микросхем

Приборы Ганна — ИМС, в работе которых используется эффект Ганна.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) — специализированные аналоговые ИМС, состоящие из светочувствительных фотодиодов и выполненные на основе кремния.

Оптоэлектронные ИМС — это ИМС, которые содержат одну или несколько оптопар, а также согласующие компоненты или электронные ИМС, объединенные с помощью гибридной технологии в одном корпусе.

Конструктивной особенностью ИМС является наличие корпуса. В зависимости от этого выделяют *корпусные* и *бескорпусные* ИМС.

По функциональному назначению различают ИМС:

– цифровые (содержат только цифровые компоненты);

– аналоговые (содержат только аналоговые компоненты);

– аналого-цифровые (содержат и цифровые и аналоговые компоненты).

Для цифровых ИМС существует классификация по типу логики (рис. 1.14). Современные цифровые ИМС выполняются в основном на основе КМОП-логики.

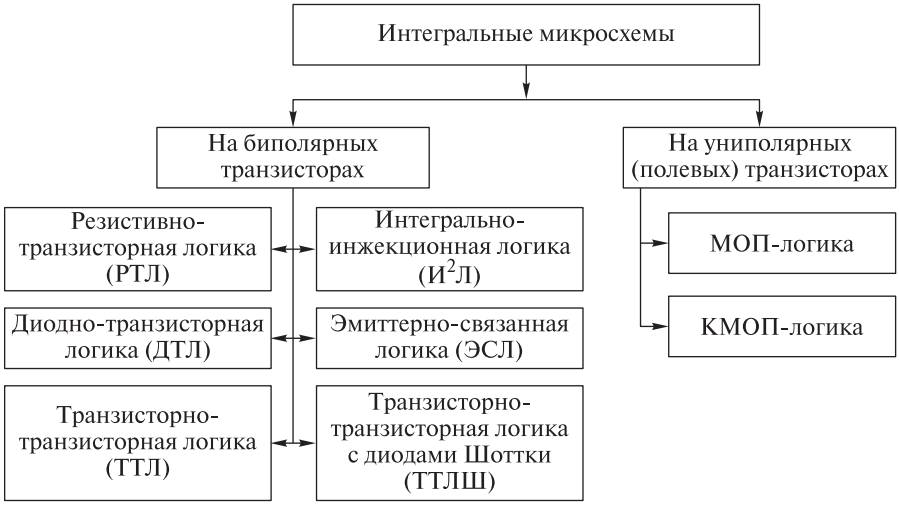


Рис. 1.14. Классификация интегральных микросхем по типу логики

По применяемости различают ИМС:

– широкого применения (выпускаемые серийно);

– специализированные (разработанные по заказу потребителя).

1.2.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Для того чтобы понять технологию создания *p*–*n*-перехода в полупроводниковых кристаллах, необходимо изучить понятие примесной проводимости. Выделяют донорную и акцепторную примесную проводимость.

ДОНОРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

В четырехвалентном кремнии все электроны участвуют в создании ковалентных связей кристалла. Если некоторые атомы в кристалле пятивалентны, то один электрон этих атомов не будет участвовать в создании связей. В результате он будет гораздо слабее притягиваться своим атомом и его подвижность будет выше даже без повышения температуры.

Примесная проводимость полупроводника, в которой пятивалентные атомы являются источником свободных электронов, называется *донорной* (рис. 1.15, *а*).

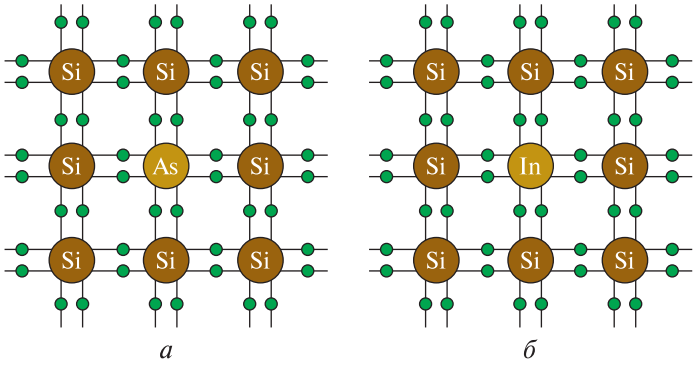


Рис. 1.15. Схемы образования примесной проводимости:
а — донорная (электронная) проводимость; *б* — акцепторная (дырочная) проводимость

В качестве донорной примеси чаще всего используют пятивалентные фосфор (обладает наивысшей скоростью диффузии), мышьяк, сурьму.

Полупроводники, имеющие донорную примесную проводимость, называются полупроводниками *n*-типа или *электронными* полупроводниками.

АКЦЕПТОРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Другой вариант создания примесной проводимости — добавление в кристалл трехвалентных атомов. В этом случае одна из связей трехвалентного атома будет одноэлектронной. Образуется дырка, которая может заполняться электронами соседних атомов (рис. 1.15, *б*).

Примесная проводимость полупроводника, в которой трехвалентные атомы образуют дырки в кристалле, называется *акцепторной*.

В качестве акцепторной примеси используются трехвалентные бор (чаще всего, поскольку он обладает наиболее высокой предельной растворимостью в кремнии), индий, галлий.

Полупроводники, имеющие акцепторную примесную проводимость, называются полупроводниками *p*-типа или *дырочными* полупроводниками.

СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ *p*–*n*-ПЕРЕХОДА

Слой полупроводника, располагающийся по обе стороны от границы раздела *p*- и *n*-областей, называют *p*–*n*-переходом. Чтобы получить электронно-дырочный переход (*p*–*n*-переход), нужно в одном и том же кристалле полупроводника образовать тонкую границу полупроводника с разными типами проводимости. Проще всего это сделать *сплавным методом*.

Рассмотрим полупроводник, в котором имеются две области: электронная и дырочная (рис. 1.16). В *p*-области основными носителями заряда являются дырки, в *n*-области — свободные электроны. Обе области до образования контакта между ними были электрически нейтральными. При образовании контакта вследствие диффузии небольшое количество свободных электронов из *n*-области перейдет в *p*-область, где есть дырки, в результате чего заряд будет нейтрализован. Дырки, в свою очередь, станут диффундировать из *p*-области в *n*-область, где будут рекомбинировать со свободными электронами. Таким образом, концентрация свободных электронов и дырок в месте контакта уменьшается, а сопротивление полупроводника становится больше.

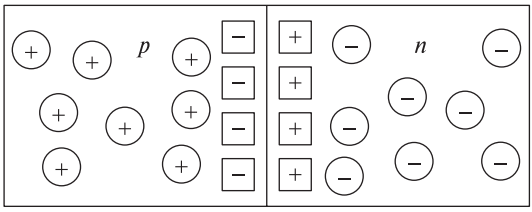


Рис. 1.16. Схема образования поля объемного заряда при контакте полупроводников *p*- и *n*-типов

Кроме того, *n*-область вблизи контакта с *p*-областью зарядится положительно, поскольку, во-первых, она утратила часть свободных электронов, а во-вторых, к ней перешла часть дырок из *p*-области. В свою очередь, *p*-область зарядится отрицательно. Электрическое поле, которое при этом возникает, препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. Таким образом, на границе полупроводников с разными типами проводимости возникает *p*–*n*-переход.

ПРЯМОЕ И ОБРАТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА *p–n*-ПЕРЕХОДЕ

Если *p–n*-переход подключить в электрическую цепь так, как показано на рис. 1.17, *б* (*p*-область соединить с положительным полюсом источника тока, а *n*-область — с отрицательной), то под действием внешнего электрического поля свободные носители заряда будут двигаться к *p–n*-переходу, концентрация их на переходе будет возрастать и через *p–n*-переход пойдет значительной силы ток. Если полярность включения *p–n*-перехода изменить (рис. 1.17, *а*), то ширина его возрастет, поскольку свободные носители заряда под действием внешнего электрического поля будут двигаться от него.

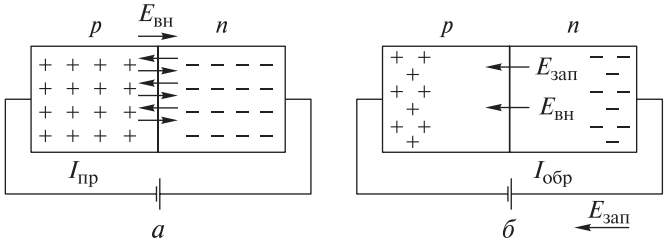


Рис. 1.17. Включение *p–n*-перехода:
а — прямое; *б* — обратное; $E_{вн}$ — напряжение внешнего электрического поля; $I_{пр}$ — прямой ток; $E_{зап}$ — запирающее напряжение; $I_{обр}$ — обратный ток

Сопротивление перехода значительно возрастает, и сила тока в цепи будет незначительной.

1.2.4. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ *p–n*-ПЕРЕХОДОВ

Существует три вида *p–n*-переходов.

Сплавные переходы. На кристаллы *n*-типа, помещенные в графитовые кассеты, накладывают таблетку акцепторного материала, чаще всего индия. Затем кассету помещают в вакуумную печь, в которой таблетка индия и слой полупроводника под ней расплавляются. Нагрев прекращается, и при охлаждении полупроводник кристаллизуется, образуя под слоем индия слой *p*-типа.

Диффузионные переходы. Такие переходы получают термической диффузией примесного вещества в исходную полупроводниковую пластину. Целью проведения диффузии является внедрение атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника для образования области с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости. При этом вновь образованная область оказывается ограниченной *p–n*-переходом.

Переходы, полученные ионной имплантацией. В настоящее время наиболее распространенным способом получения *p–n*-переходов является ионное легирование примеси (ионная имплантация). Оно основано на контролируемом внедрении в материал ускоренных в электростатическом поле ионизированных атомов примеси.

Использовать чистые атомарные фосфор, мышьяк, бор трудно: фосфор легко воспламеняется, мышьяк токсичен, бор имеет высокую температуру плавления. По этой причине в качестве источников примеси при диффузии используют химические соединения указанных элементов — ангидриды, галогениды, гидриды, обладающие достаточной летучестью.

Пример взаимодействия молекул ангидрида с кремнием и выделение атомов примеси:

$$2P_2O_5 + 5Si = 5SiO_2 + 4P$$ — донорная примесь;

$$2B_2O_3 + 3Si = 3SiO_2 + 4B$$ — акцепторная примесь.

Тесты к лекции 1.2

1. ***Какие виды проводимости возможны в полупроводниках?***
а) донорная и акцепторная;
б) электронная и туннельная;
в) полупроводники ток не проводят.
2. ***Сколько элементов содержат сверхбольшие интегральные микросхемы?***
а) более 100 000;
б) более 10;
в) более 10 000.

1.3. ПОДЛОЖКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лекции: изучение видов подложек интегральных микросхем.

1.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Подложка в ИМС выполняет две основные функции:

– является несущим элементом конструкции, обеспечивающим механическую прочность микросхемы в корпусном и бескорпусном исполнении;

– является элементом структуры микросхемы, в приповерхностном слое или на поверхности которого формируется топология.

Общая классификация подложек ИМС приведена на рис. 1.18.

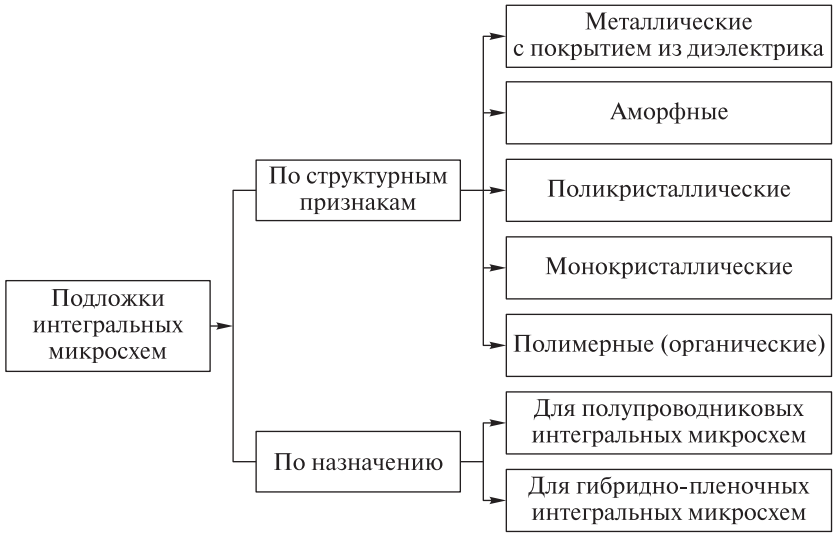


Рис. 1.18. Классификация подложек интегральных микросхем

Монокристаллические кремниевые подложки в настоящее время чаще всего используют для производства полупроводниковых ИМС. Остальные группы подложек используют для производства ГИС.

1.3.2. КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Пригодность подложек из полупроводниковых материалов для изготовления ИМС определяется параметрами, зависящими от физических, электрических, оптических свойств материала.

При выборе материала подложки учитывают следующие его физические свойства:

– термические;
– термоэлектрические;
– зонная структура;
– ширина запрещенной зоны;
– положение примесных уровней.

Очень важны электрические свойства материала подложек:

– тип электрической проводимости;
– удельное сопротивление;
– концентрация носителей заряда;
– подвижность носителей;
– время жизни неосновных носителей заряда и их диффузионная длина.

Перечисленные свойства зависят от метода получения полупроводникового материала.

В настоящее время из всех полупроводниковых материалов, применяемых для производства объектов приборостроения, наибольшее распространение получил *кремний* (рис. 1.19). По сравнению с германием он обладает лучшими *термическими* свойствами; кроме того, он гораздо дешевле.



Рис. 1.19. Поликристаллический кремний (чистота 99,9 %) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SiliconCroda.jpg)

Кремний — элемент IV группы Периодической таблицы Менделеева. Наиболее широко он распространен в земной коре (29,5 %). В природе встречается в виде оксидов и солей кремниевой кислоты. Кварц содержит 99,99 % кремния, чистый песок — 99,8...99,9 %.

Природный кремний состоит из трех стабильных изотопов: ^{28}Si — 92,2 %; ^{29}Si — 4,68 %; ^{30}Si — 3,05 %. Остальные изотопы кремния радиоактивны.

Плотность кремния — 2,32 г/см^3, $t_{пл}$ — 1412°С, ширина запрещенной зоны 1,09 эВ (при $t_{пл}$ = 300 °С).

Подвижность носителей заряда в чистом кремнии: электронов — 1450 см^2/(В·с), дырок — 480 см^2/(В·с).

В зависимости от назначения различают следующие разновидности кремния.

Кремний *электронного качества* («электронный кремний») — наиболее качественный, с массовой долей кремния свыше 99,999 %, удельное

электрическое сопротивление кремния электронного качества может составлять примерно 0,001...150 Ом·см, при этом требуемое сопротивление должно быть обеспечено исключительно заданной примесью, т. е. попадание в кристалл иных примесей, хотя бы и обеспечивающих заданное удельное электрическое сопротивление, как правило, недопустимо.

Кремний *солнечного качества* («солнечный кремний») — материал с массовой долей кремния свыше 99,99 %, используемый для производства фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей).

Технический кремний — блоки кремния поликристаллической структуры, полученного методом карботермического восстановления из чистого кварцевого песка; содержит 98 % кремния, основная примесь — углерод, отличается высоким содержанием легирующих элементов — бора, фосфора, алюминия. Используется в основном для получения поликристаллического кремния.

По сравнению с германием кремний обладает:

– большей шириной запрещенной зоны, поэтому ИМС, созданные на его основе, работоспособны в большем температурном диапазоне;

– меньшими токами утечки;

– бóльшим рабочим напряжением.

Кроме того, на поверхности кремния несложно получить оксид — SiO_2. Он не растворяется в воде и обладает маскирующими свойствами, т. е. разными скоростями диффузии в кремнии и SiO_2 для основных легирующих примесей. На этом физическом принципе основана планарная технология изготовления полупроводниковых ИМС.

1.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРЕМНИЯ

Полупроводниковый кремний получают по следующей технологии:

1) получают технический кремний из кварцевого песка;

2) технический кремний растворяют в летучей жидкости и получают летучее соединение кремния (легковосстановимое);

3) проводят очистку соединения химическими и физико-химическими методами;

4) кремний восстанавливают из летучего соединения цинком;

5) поскольку достигаемая степень чистоты недостаточна, проводят конечную очистку кремния;

6) выращивают монокристаллический кремний методом Чохральского.

В настоящее время разработаны промышленные технологии получения кремния с содержанием примесей $10^{12}...10^{13}$ ат./см^3.

ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ ИЗ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Исходным сырьем для получения технического кремния является кварцевый песок, представляющий собой диоксид кремния SiO_2.

Технический кремний получают восстановлением SiO_2 в электрической дуге между графитовыми электродами с использованием кокса (рис. 1.20).

Исходное сырье — SiO_2 и кокс — поступают в электродуговую печь, где при нагреве происходит химическая реакция

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$$

Процесс получения металлургического кремния схож с выплавкой чугуна из железной руды. Технический кремний охлаждают и дробят на куски.

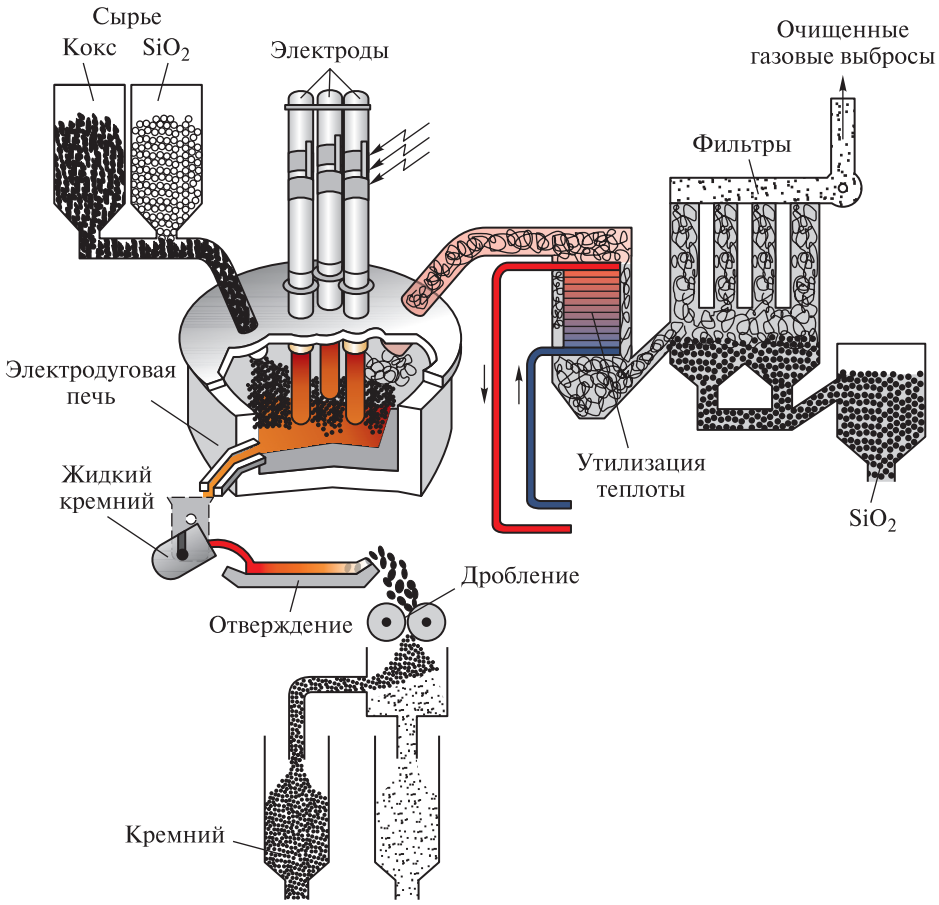


Рис. 1.20. Схема установки для восстановления кремния

Полученный материал содержит 2...5 % примеси и не является полупроводником. Он служит исходным сырьем для получения полупроводникового кремния высокой чистоты (с содержанием примесей менее 10^{-6} %).

Для получения кремния электронного качества производят очистку через силаны. Сущность метода представлена следующими химическими

реакциями. На первом этапе при температуре 300 °С осуществляют химическую реакцию металлургического кремния, содержащего примеси (FeCl3, AlCl3, BCl3 и пр.), с соляной кислотой:

$$Si + 3HCl \rightarrow + H_2$$

Концентрация электрически активных примесей в жидком трихлорсилане $SiHCl_3$, таких как алюминий, фосфор, бор, железо, медь или золото, составляет менее одного атома на 1 млрд атомов кремния. На втором этапе при температуре 650...1300 °С осуществляют восстановление кремния:

$$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3HCl$$

В результате получают химически чистый кремний, который служит сырьем для выращивания монокристалического кремния, в основном по методу Чохральского.

ОЧИСТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Зонная плавка — метод очистки твердых веществ, основанный на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Сущность метода заключается в нагреве ограниченной зоны вытянутого образца и последующем ее перемещении с одного конца образца на другой. Такая расплавленная зона передвигается по образцу, что приводит к перераспределению примесей.

Метод был предложен У. Пфанном в 1952 г. и завоевал большую популярность. В настоящее время этот метод используют для очистки более 1500 веществ.

МЕТОД ЗОННОЙ ПЛАВКИ В ТИГЛЕ

Очищаемое вещество помещают в лодочку (тигель) из тугоплавкого материала (рис. 1.21). Основные требования к материалу лодочки:

– высокая температура плавления;

– нерастворимость в очищаемом веществе или невозможность реакции с ним.

Лодочку помещают в горизонтальную трубу, один конец которой может быть запаян, или же через него можно подавать инертный газ. Если один конец трубы запаян, то другой ее конец соединен с вакуумной установкой.Один конец образца расплавляется, затем расплавленная зона начинает двигаться вдоль слитка. Длина зоны расплава зависит от длины слитка и составляет несколько сантиметров. Вещество плавится либо индукционными токами, либо за счет теплопередачи в печи сопротивления. Скорость движения зоны расплава составляет, как правило, от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в час. Движение может осуществляться либо вытягиванием лодочки через неподвижную печь, либо смещением зоны нагрева. Иногда для повышения эффективности увеличивают число проходов зоны или число зон.

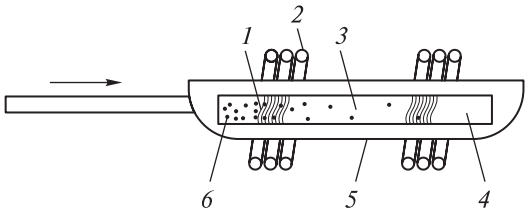


Рис. 1.21. Схема устройства для зонной плавки:
1 — расплавленные зоны; *2* — индукционные катушки; *3* — очищенный полупроводник; *4* — сверхчистый полупроводник; *5* — графитовая лодочка (тигель); *6* — полупроводник с повышенным содержанием примесей

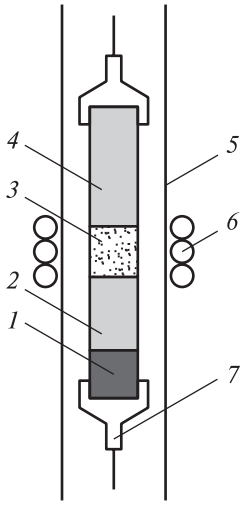


Рис. 1.22. Схема метода бестигельной зонной плавки:
1 — затравка; *2* — кристалл; *3* — расплавленная зона; *4* — исходный материал; *5* — стенки герметичной камеры; *6* — индуктор; *7* — кристаллодержатель

Метод обладает рядом недостатков, основной из них — невозможность масштабирования, так как скорость процесса определяется скоростью диффузии примеси. В связи с этим метод применяется на конечной стадии очистки при получении особо чистых веществ.

Если расплав вступает в реакцию с материалом тигля (лодочки) или если очищаемое вещество имеет высокую температуру плавления (более 1500 °С), применяют *бестигельную* зонную плавку. Тогда стержень из поликристаллического полупроводника удерживается в вертикальном положении и вращается, в то время как расплавленная зона (высотой 1...2 см) медленно проходит от нижней части стержня до его верха (рис. 1.22).

Основными недостатками метода бестигельной зонной плавки являются трудность управления температурными градиентами вблизи фронта кристаллизации и трудность управления распределением температур вдоль слитка, что ведет к относительно высокой концентрации собственных дефектов в получаемых кристаллах.

МЕТОД ЧОХРАЛЬСКОГО

Польский химик Я. Чохральский открыл свой метод в 1916 г. и изложил суть открытия в статье «Новый метод измерения степени кристаллизации металлов», опубликованной в немецком журнале Zeitschrift für Physikalische Chemie (1918).

В 1950 г. сотрудники компании Bell Labs (США) Г. Тил и Дж. Литтл использовали метод Чохральского для выращивания монокристаллов германия (рис. 1.23).

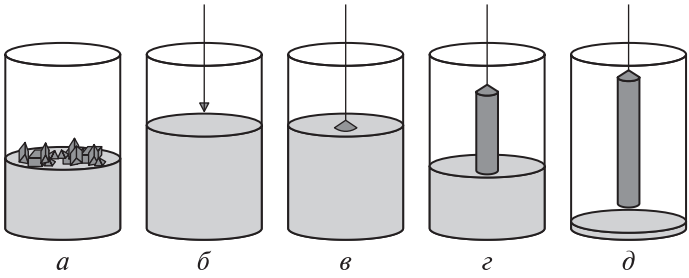


Рис. 1.23. Схема метода Чохральского:

а — плавление поликристаллического легированного кремния; *б* — введение затравки; *в* — начало выращивания кристалла; *г* — вытягивание кристалла; *д* — выращенный монокристалл и остаток расплава

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czochralski_Process-ru.svg)

Сырьем служит необожженный поликристалический кремний (поликремний), который закладывают в тигель из тугоплавкого материала (рис. 1.24). Расплавленный кремний обладает высокой химической активностью, поэтому подбор для него контейнерного и тигельного материалов вызывает определенные затруднения. Наиболее чистые материалы, из которых изготовляют тигли (кварц и графит), при высоких температурах взаимодействуют с кремнием. Отсутствие прямого контакта растущего монокристалла с тиглем и возможность изменения его геометрической формы позволяют получать практически бездислокационные монокристаллы.

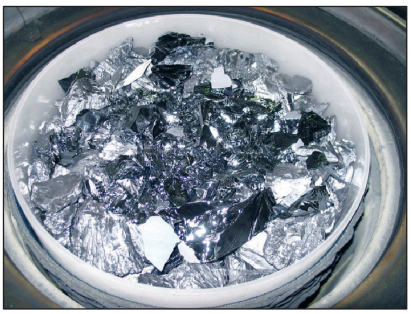


Рис. 1.24. Необожженный поликремний в тигле



Рис. 1.25. Выращенный кристалл

Затем поликремний нагревают до температуры 1420 °С в специальной герметичной печи, очищенной от воздуха и заполненной инертным газом — аргоном (рис. 1.23, *а*). Расплавленный кремний раскручивают в тигле, и в него погружают охлаждаемый холодильником затравочный кристалл кремния, размером и формой напоминающий карандаш (рис. 1.23, *б*). В начале процесса роста монокристалла часть затравочного монокристалла расплавляют для устранения в нем участков с повышенной плотностью механических

напряжений и дефектами. Пока расплавленный монокристаллический кремний остывает, затравочный кристалл, вращая в противоположном направлении, медленно извлекают, и он увлекает за собой монокристалл полупроводникового материала (рис. 1.23, *в* и *г*). Расплав смачивает затравку и удерживается на ней силами поверхностного натяжения. Скорость роста кристалла составляет до 80 мм/ч. В результате получается сплошной кремниевый кристалл с нужными длиной и диаметром (рис. 1.23, *д*; 1.25).

Монокристалл после охлаждения калибруют по диаметру до заданного размера (300 мм) с точностью ±1 мм. Затем проводят травление его поверхности на глубину 0,3...0,5 мм и ориентируют кристалл по заданному кристаллографическому направлению, чтобы получить после резки пластины, ориентированные строго в заданной плоскости. Для кремния ориентация обычно проводится по осям <111> и <100> (рис. 1.26). Правильная

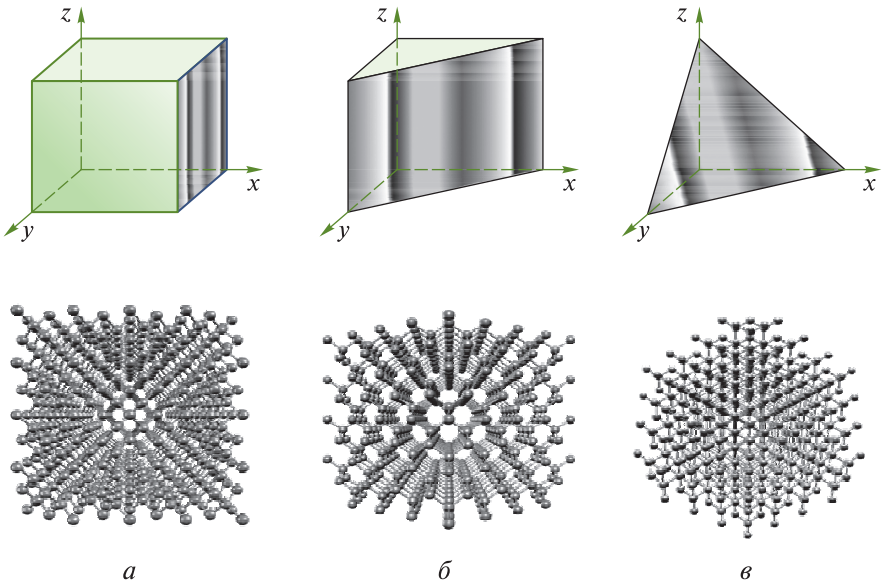


Рис. 1.26. Типы ориентации кристалла (индексы Миллера):
а — <100>; *б* — <110>; *в* — <111>

ориентация пластин обеспечивает высокую воспроизводимость электрофизических параметров создаваемых на пластине микросхем.

РЕЗКА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

Существует два основных способа резки слитка на пластины: алмазным диском с внутренней режущей кромкой и проволокой с применением абразива.

Сущность метода резки *алмазным диском* с внутренней режущей кромкой состоит в следующем. На шпиндель станка (рис. 1.27) крепят алмазный диск

и с помощью специальных растягивающих болтов регулируют его радиальное натяжение. Внутрь полого шпинделя помещают держатель с приклеенным к нему полупроводниковым слитком. Перед началом резки весь слиток находится внутри шпинделя, а торцовая его часть немного выступает за кромку плоскости алмазного диска. При включении станка шпиндель с закрепленным на нем алмазным диском начинает вращаться. Если держатель со слитком перемещать в горизонтальном (или вертикальном) направлении, то в определенный момент слиток коснется боковой поверхностью кромки алмазного диска и начнется процесс резки. При полном отрезании пластины от слитка держатель отводится в первоначальное положение и выдвигается из шпинделя на длину, равную толщине отрезаемой пластины. После этого процесс повторяется.

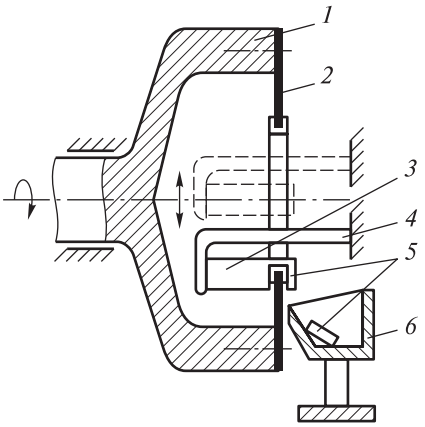


Рис. 1.27. Схема резки слитка алмазным диском с внутренней режущей кромкой:

1 — шпиндель; *2* — диск с алмазной кромкой; *3* — слиток; *4* — держатель слитка; *5* — отрезанная пластина; *6* — сборник пластин

Режим резки выбирают, исходя из конкретных условий: вида полупроводникового материала, диаметра, толщины отрезаемой пластины, требований к классу чистоты обработанной поверхности, точности геометрических размеров, плоскостности и плоскопараллельности пластины.

На процесс резки существенное влияние оказывает скорость подачи слитка (сила прижатия к алмазному диску). При малых скоростях подачи слитка производительность резки слишком мала. С увеличением скорости подачи производительность повышается, а точность обработки снижается вследствие прогибания диска. Отрезаемая пластина будет иметь искривленную поверхность. При малой толщине пластины это может привести к ее разлому в процессе резки (более низкая скорость подачи для тонких и более высокая — для толстых пластин). На скорость подачи существенное влияние оказывает твердость обрабатываемого материала.

Качество процесса резки в значительной степени зависит от применяемой охлаждающей жидкости и ее расхода (2...4 л/мин). Процесс изнашивания рабочей поверхности алмазного диска характеризуется тремя периодами: выкрашивание из связки отдельных непрочно закрепленных алмазных зерен; округление вершин и расщепление алмазных зерен, а также частичное скалывание отдельных зерен по плоскости спайности; увеличение усталостных явлений в основе диска, зерне, связке. Тепловые явления, возникающие при резке слитка на пластины, влияют на качество резки — увеличивается толщина нарушенного слоя, создаются остаточные напряжения и микронеровности, возникают структурные изменения поверхности полупроводникового материала и алмазного диска.

Резка *проволокой* (рис. 1.28) с применением абразива получила в настоящее время наибольшее распространение. Резка происходит по принципу перемотки проволоки с одного ролика на другой с большой скоростью $v_п$. Разрезаемый слиток подводят к движущейся проволоке до соприкосновения и устанавливают определенную скорость подачи слитка $v_с$. В процессе перемотки происходит резка пластин на кристаллы.

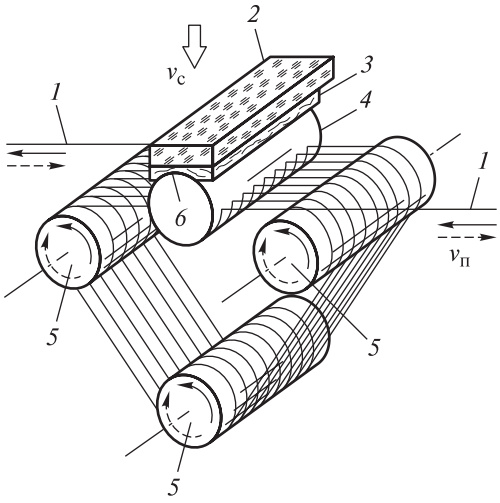


Рис. 1.28. Схема резки слитка проволокой:
1 — проволока; *2* — станина; *3* — держатель; *4* — слиток; *5* — ролики; *6* — место приклейки слитка к держателю

На проволоку непрерывно подается абразивная суспензия. Взаимодействие абразивных зерен с полупроводниковым материалом приводит к появлению в последнем микротрещин и дефектов и послойному удалению обрабатываемого материала.

При малых скоростях подачи полупроводникового материала происходит незначительное его разрушение. Для резки полупроводниковых слитков обычно используют проволоку из вольфрама, стали, никеля, нихрома. Диаметр проволоки 0,05...0,15 мм, ширина реза 0,08...0,20 мм.

Геометрические характеристики получаемых кремниевых подложек приведены ниже:

Диаметр, мм	100	150	200	300
Толщина, мкм	300	500	650	800–900

МЕХАНИЧЕСКОЕ ШЛИФОВОВАНИЕ И ПОЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Под процессом шлифования понимают обработку полупроводниковых пластин на твердых шлифовальных дисках абразивными микропорошками. По технологическим признакам шлифование подразделяют на предварительное (с более крупным порошком) и окончательное (с более мелким порошком). *Предварительное* шлифование проводят для того, чтобы быстро выровнять плоскости пластин и удалить припуск. *Окончательное* шлифование проводят для дальнейшего улучшения геометрических параметров и качества поверхности обрабатываемых пластин. Утончение пластин также производят шлифованием.

Шлифование и полирование пластин выполняют на плоскошлифовальных прецизионных станках (рис. 1.29) с использованием абразивных материалов с зернами размером около 40 мкм (микропорошки). Чаще всего

применяют группы микропорошков с зернами размером 14 мкм и менее. Микропорошки изготовляют из карбидов бора, кремния, электрокорунда и алмаза.

Привод станка осуществляется от электродвигателя через систему шестерен. Верхний шлифовальник *1* закреплен на поднимающейся крышке. Из дозатора через отверстия в верхнем шлифовальнике в зону обработки подается абразивная суспензия. Обрабатываемые пластины помещают в круглые отверстия сепаратора *4*, выполненные с наружным зубчатым венцом. Шлифовальники изготовляют из достаточно твердых материалов (сталь, чугун, стекло, керамика, твердосплавы). Отверстия в сепараторах делают на 0,2...0,5 мм больше диаметра пластин. Уменьшение зазора приводит к плотному заполнению пластин абразивом и продуктами шлифования и затруднению вращения пластин внутри сепараторов, увеличение зазора способствует ударам пластин о кромки сепараторов и их разрушению. Сепараторы на 10...15 мкм тоньше обработанной пластины.

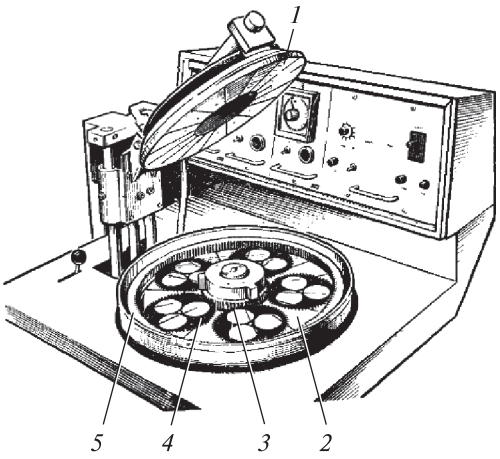


Рис. 1.29. Схема шлифовального станка:
1 — верхний шлифовальник; *2* — нижний шлифовальник; *3* — центральная шестерня; *4* — сепаратор; *5* — зубчатое колесо

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИН

Для улучшения качества поверхности полупроводниковых пластин и уменьшения глубины механически нарушенного слоя проводят процесс полирования на станках, аналогичных шлифовальным. Процесс полирования проводят с помощью полировальных дисков, обтянутых мягким материалом. В качестве абразива используют микропорошки синтетического алмаза, оксида алюминия Al_2O_3, оксида хрома Cr_2O_3, диоксида кремния SiO_2 более мелких фракций.

1.3.4. ПОДЛОЖКИ ДЛЯ ПЛЕНОЧНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

К материалам подложек для пленочных и гибридных ИМС предъявляют следующие требования:

– высокое удельное электрическое сопротивление изоляции;

– низкая диэлектрическая проницаемость и малый тангенс угла диэлектрических потерь;

– высокая электрическая прочность для обеспечения качественной изоляции;

– высокая механическая прочность при малой толщине, обеспечивающая целостность подложки при изготовлении и эксплуатации;

– высокий коэффициент теплопроводности для обеспечения нормального теплового режима;

– высокая физическая и химическая стойкость к воздействию высокой температуры в процессе нанесения тонких пленок, термообработки при формировании толстых пленок;

– стойкость к воздействию химических реактивов при использовании электрохимических и химических методов обработки для формирования элементов;

– минимальное газовыделение в вакууме во избежание загрязнения пленок;

– механическая обрабатываемость (возможность полирования, резки, шлифования);

– значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), по возможности близкие к ТКЛР материалов напыляемых пленок, для предотвращения механических напряжений;

– высокая химическая инертность к осаждаемым материалам.

Особые требования предъявляют к качеству поверхностей подложек. Для тонкопленочной технологии используются поверхности 14-го класса чистоты, допустимая высота микронеровностей 25 нм. Для толстопленочной технологии используются поверхности 8-го класса чистоты, допустимая высота микронеровностей 2 мкм.

В качестве материала подложек могут применяться следующие материалы:

– стекло;

– керамика;

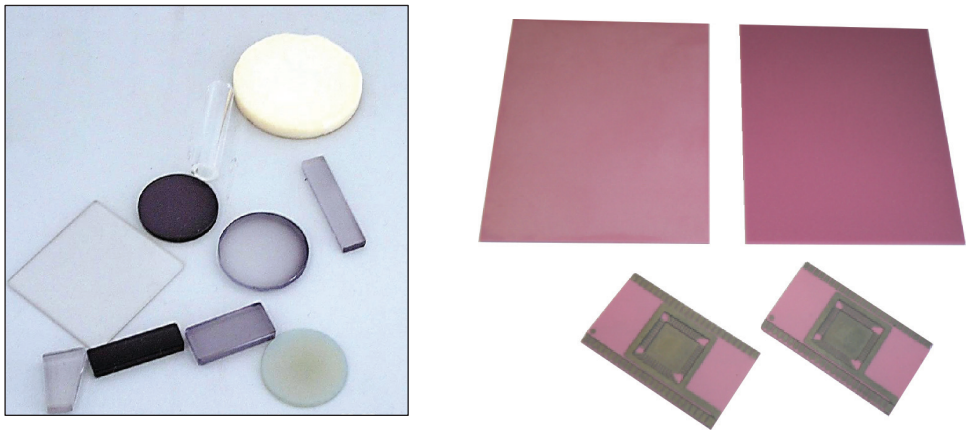
– поликор;

– ситалл.

Стеклянные подложки (рис. 1.30, *а*) относятся к группе аморфных. Для их производства могут использоваться боросиликатные и алюмосиликатные стекла. Главные достоинства подобных подложек — низкая шероховатость поверхности, легкость полирования. К недостаткам можно отнести малую теплопроводность и невысокую механическую прочность.

Керамические подложки (рис. 1.30, *б*) обладают не только высокой теплопроводностью, но и значительной шероховатостью поверхности. По этой причине они используются для изготовления толстопленочных ИМС. Применяют также бериллиевую и корундовую керамику (на основе оксида алюминия Al_2O_3). Корундовая керамика обладает более высокой прочностью, стабильностью электрических и физических характеристик, но ее теплопроводность ниже, чем у бериллиевой керамики.

Одной из разновидностей коррундовой керамики является *поликор* (за рубежом — люкалос, рис. 1.31). Беспористый и прозрачный поликор содержит 99,7...99,9 % Al_2O_3 и 0,3...0,2 % MgO. В отличие от обычной корундовой керамики поликор прозрачен.



а *б*

Рис. 1.30. Подложки:
а — стеклянные; *б* — керамические

Одним из самых распространенных материалов для тонкопленочной технологии является *ситалл* (рис. 1.32), который представляет собой стеклокерамический материал, получаемый термообработкой (кристаллизацией) стекла. К достоинствам ситалла относят хорошую обрабатываемость: его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом. Он прочнее стекла, выдерживает температуры до 700 °С, обладает высокой химической стойкостью и малой газоотдачей.



Рис. 1.31. Подложка из поликора

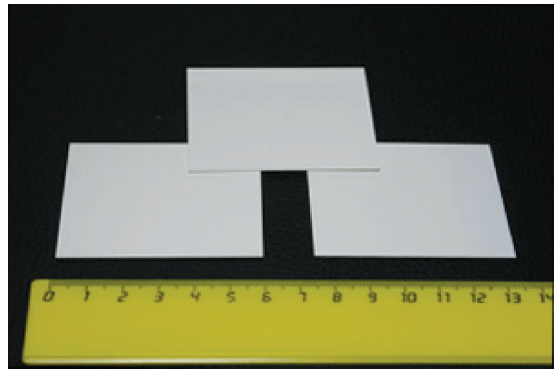


Рис. 1.32. Подложки из ситалла

Распространенным материалом для подложек является *полиимид*. Это полимерный материал, подложки из которого представляют собой гибкую пленку толщиной 40...50 мкм (рис. 1.33). Полиимид допускает двухстороннюю обработку и нанесение пленок в вакууме, фототравление отверстий под переходы. Главные достоинства полиимидных подложек — гибкость, прочность,

малые толщина и масса. Недостатками подобных подложек являются термоусадка и низкая диэлектрическая проницаемость.

Еще одной разновидностью подложек для пленочных и гибридных ИМС являются металлические (рис. 1.34).

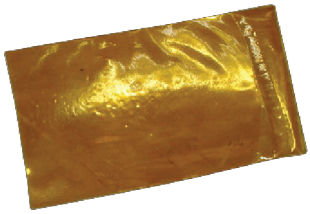


Рис. 1.33. Полиимидная пленка

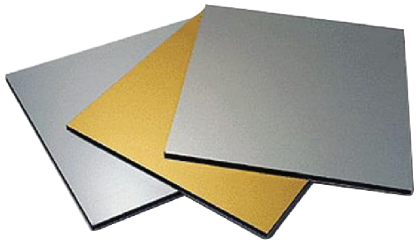


Рис. 1.34. Металлические подложки

Их изготовляют из двух материалов: анодированного алюминия (толщина диэлектрического слоя 40...60 мкм) и стали, покрытой диэлектрическим слоем из полиимидного лака, эмали, стекла. Главными достоинствами металлических подложек являются хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность. Кроме того, металл можно использовать как шину питания или шину земли.

Тесты к лекции 1.3

1. ***Какой метод является основным для получения чистого кремния?***
а) метод Чохральского;
б) метод Герца;
в) метод Ньютона.
2. ***Из чего получают чистый кремний?***
а) из кварцевого песка;
б) из графита;
в) из мрамора.

1.4. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Цель лекции: ознакомление с основами тонкопленочной технологии.

1.4.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Тонкопленочная технология — это совокупность способов получения и обработки тонких пленок металлов и диэлектриков при изготовлении транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и других пассивных компонентов пленочных, гибридных и совмещенных интегральных микросхем, а также при изготовлении полупроводниковых приборов, коммутационных соединений и монтажных площадок в микросхемах. Толщина получаемых пленок обычно составляет 0,01...2,00 мкм. Тонкопленочная технология позволяет создать пассивные компоненты микросхемы с параметрами более стабильными, чем при толстопленочной технологии.

Существует два основных способа получения тонких пленок: термическое испарение и ионное распыление (рис. 1.35).

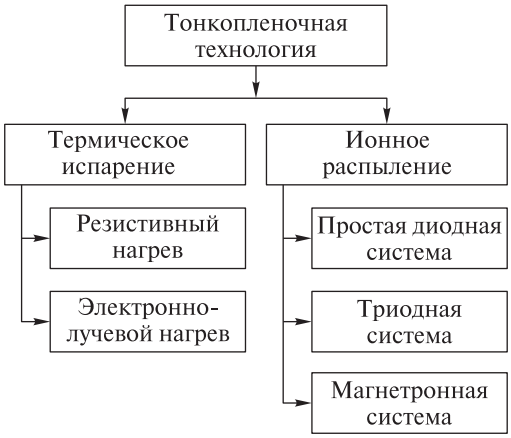


Рис. 1.35. Классификация способов получения тонких пленок

Рассмотрим эти способы подробнее.

1.4.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Термическое испарение основано на нагреве напыляемого материала до температуры испарения, после чего тот конденсируется на поверхности подложки (рис. 1.36).

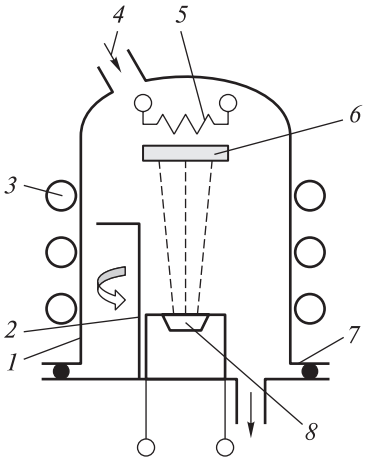


Рис. 1.36. Схема типовой установки для термического вакуумного напыления:
1 — вакуумный колпак из нержавеющей стали; *2* — заслонка; *3* — трубопровод для водяного нагрева или охлаждения вакуумного колпака; *4* — игольчатый натекатель для подачи атмосферного воздуха в камеру; *5* — нагреватель подложки; *6* — подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; *7* — герметизирующая прокладка из вакуумной резины; *8* — испаритель с размещенными в нем веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым)

Процесс термовакуумного напыления состоит из четырех этапов:
1) образование пара вещества;
2) перемещение частиц пара от источника к подложкам;
3) конденсация пара на подложках;
4) образование зародышей и рост пленки.

Процесс напыления проводится в глубоком вакууме в такой последовательности. Подложки устанавливают на подложкодержатель *6*, после чего опускается вакуумный колпак и включается система вакуумных насосов (сначала — низковакуумный, затем — высоковакуумный). Для того чтобы ускорить десорбцию воздуха с внутренних поверхностей вакуумного колпака и сократить время откачки воздуха, в трубопровод *3* подается горячая проточная вода. Давление контролируют по манометру. При достижении заданного значения давления включают нагреватели испарителя *8* и подложек *5*. Их температура контролируется с помощью термопар. Заслонка *2* при этом находится в закрытом состоянии; при достижении заданной температуры заслонка отводится, после чего пары испаренного вещества достигают поверхности подложек и начинается процесс роста пленок.

Контроль толщины пленок проводится с использованием автоматизированной системы. Для резистивных пленок фиксируется поверхностное сопротивление, для диэлектрических материалов — толщина пленки, для проводников, контактов и защитных покрытий — время напыления. После достижения заданного значения подается сигнал на соленоиды заслонки и она перемещается в закрытое положение, после чего напыляемый материал перестает поступать на подложки. Затем отключаются нагреватели, выключается система откачки, а в трубопровод начинает поступать холодная

проточная вода. После остывания подколпачных устройств через натекатель *4* плавно впускают атмосферный воздух. Когда давление внутри колпака достигает атмосферного, можно поднять вакуумный колпак и начать следующий цикл обработки.

Для проведения процесса напыления в объеме рабочей камеры необходимо низкое давление воздуха. Оно обеспечивает прямолинейное движение атомов осаждаемого вещества без столкновения с атомами остаточного воздуха, которое приводит к рассеянию материала в объеме камеры (рис. 1.37, *а*), в результате чего частицы могут осаждаться на стенки камеры и даже с обратной стороны подложки, а также увеличивается время напыления. Кроме того, молекулы газа могут быть адсорбированы подложкой или пленкой, что приведет к дефектам полученной пленки (рис. 1.38). При достижении высокого вакуума рассеяние частиц практически отсутствует (рис. 1.37, *б*). Кроме того, исключается химическое взаимодействие напыляемого вещества с молекулами кислорода.

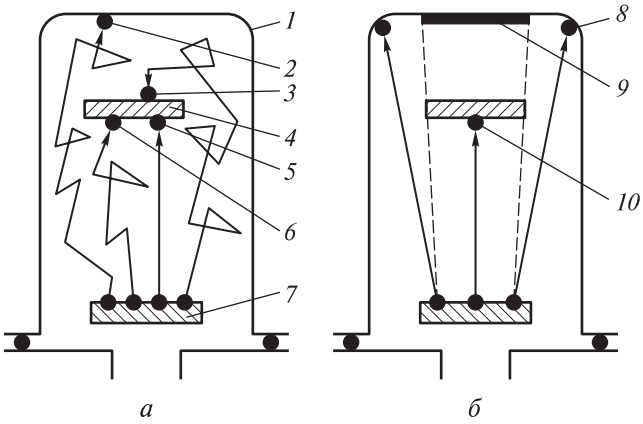


Рис. 1.37. Движение частиц наносимого вещества:

а — при среднем вакууме; *б* — при высоком вакууме; *1* — камера; *2*, *8* — частицы, осажденные на стенку камеры; *3* — частица, осажденная на обратную сторону подложки; *4* — подложка; *5*, *10* — частицы, осажденные на лицевую сторону подложки без столкновений; *6* — частица, осажденная на лицевую сторону подложки после столкновений; *7* — источник потока частиц; *9* — тень от подложки

В установках термического вакуумного напыления давление обычно составляет около 10^{-4} Па. Для достижения требуемого давления используется система из двух насосов. На первой стадии включается форвакуумный насос, который позволяет достичь среднего вакуума, на второй — диффузионный насос.

Температура подложки ниже температуры источника пара, поэтому направленный поток вещества конденсируется на ней. Пленка при

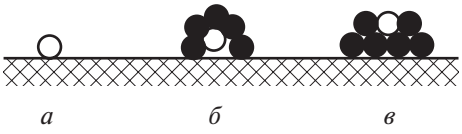


Рис. 1.38. Взаимодействие молекул газа с атомами осаждаемого вещества:

а — молекула газа, адсорбированная на подложке; *б* — молекула газа, замурованная атомами осаждаемого вещества; *в* — молекула газа, хемосорбированная пленкой осаждаемого вещества

конденсации формируется из отдельных атомов или молекул пара вещества. Процесс роста пленки на подложке показан на рис. 1.39. Частица, достигшая поверхности, сохраняет энергию и начинает двигаться в поисках прочной связи. Сталкиваясь, частицы слипаются и образуют центры кристаллизации, вокруг которых продолжается рост пленки. Чтобы интенсифицировать этот процесс, подложку нагревают. Постепенно на подложке образуется сплошная пленка, на ее поверхности начинается рост следующего слоя.

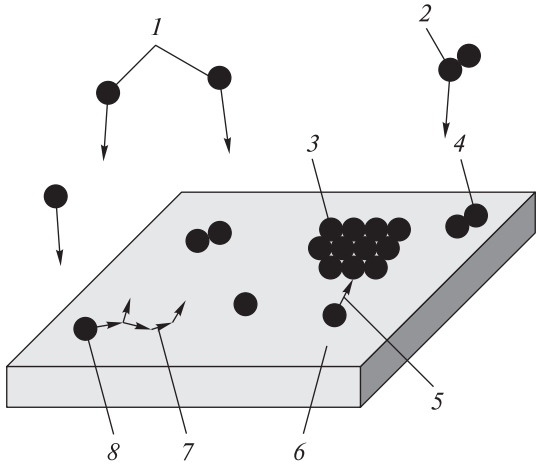


Рис. 1.39. Формирование пленок на подложке:

1 — частицы в пространстве; *2* — дуплет частиц в пространстве; *3* — центр кристаллизации; *4* — адсорбированный дуплет частиц; *5* — рост кристаллита за счет мигрирующих частиц; *6* — подложка; *7* — поверхностная миграция частиц; *8* — адсорбированная частица

Интенсивность испарения осаждаемого вещества удобно характеризовать упругостью пара P_s — давлением пара в состоянии насыщения, которое определяют по формуле

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T},$$

где A, B — коэффициенты (табл. 1.2); T — абсолютная температура вещества, К.

Скорость испарения вещества $v_и$ определяют как

$$v_и = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{t_{усл}}},$$

где M — молярная масса испаряемого вещества, г/моль; $t_{усл}$ — условная температура вещества, °С.

Оптимальной будет интенсивность испарения, при которой упругость пара составляет около 1,3 Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется *условной*. Для большинства элементов при температуре, равной $t_{усл}$, скорость испарения равна 10^{-4} г/(см^2·с).

Таблица 1.2

Значения температуры плавления и условной температуры материалов для пленок

Материал	$t_{пл}$, °С	$t_{усл}$, °С	Коэффициенты*		Рекомендуемые материалы для испарителя	
			A	*B*	проволочно-ленточного	тигельного
Серебро	961	1047	(11,4)	(14850)	Молибден, тантал	Молибден, графит
			10,78	14090		
Алюминий	660	1150	11,11	15630	Вольфрам	Графит, BN, TiB_2–BN
Золото	1063	1465	10,77	19250	Вольфрам, молибден	Молибден, графит
Хром	1800	1205	(12)	(17560)	Вольфрам, тантал	–
Медь	1083	1273	10,84	16580	Вольфрам, молибден, тантал	Молибден, графит, Al_2O_3
Молибден**	2622	2533	(10,92)	(30310)	–	–
Никель	1455	1510	(12,40)	(21840)	Вольфрам	Оксиды
			11,67	20600	Вольфрам	Al_2O_3
Палладий	1555	1566	10,58	19230		
Платина	1774	2090	11,75	27500	Вольфрам	TiO_2, ZrO_2
Тантал**	2996	3070	12,12	40210	–	–
Титан	1725	1546	(10,37)	(18640)	Вольфрам, тантал	Графит, TiO_2
			11,1	20110		
Вольфрам**	3382	3309	(11,36)	(40260)	–	–

* Значения в скобках приведены для твердого состояния материала.
** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Одной из проблем, которая возникает при термическом вакуумном напылении, является высокая неравномерность толщины получаемой пленки, которая может достигать 20 %. Такая неравномерность обусловлена особенностями осаждения частиц, испаряющихся на плоский подложкодержатель из точечного источника. Поскольку расстояние до края подложки больше, чем до ее центра, толщина пленки на краях меньше, чем в центре (рис. 1.40).

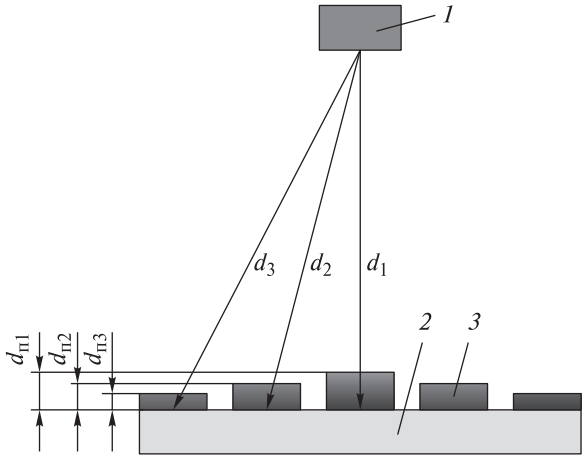


Рис. 1.40. Особенности осаждения на плоский подложкодержатель частиц, испаряющихся из точечного источника:

1 — точечный источник; *2* — подложкодержатель; *3* — пленка; $d_п$ — толщина пленки; d_n — расстояние от источника до подложкодержателя ($d_1 < d_2 < d_3$, $d_{п1} > d_{п2} > d_{п3}$)

Существует несколько способов уменьшить неравномерность толщины пленки. Можно увеличить расстояние от источника до подложки. Однако это приведет к уменьшению скорости роста пленки; кроме того, максимальное расстояние ограничено размерами камеры. Можно использовать сферический или планетарный подложкодержатель (рис. 1.41). При использовании сферического подложкодержателя неравномерность толщины пленки снижается до 10 %, а при использовании планетарного — до 3...4 %. Однако установки с планетарными подложкодержателями имеют высокую стоимость.

Для испарения осаждаемого вещества можно использовать резистивные испарители с прямым или косвенным нагревом, электронно-лучевые или индукционные испарители. В *резистивных* испарителях разогрев испаряемого вещества происходит вследствие пропускания электрического тока через материал с высоким сопротивлением. Подобные нагреватели обладают высоким КПД, имеют небольшие габариты и низкую стоимость. Однако при этом они обладают малым ресурсом работы; кроме того, материал испарителя может загрязнить осаждаемую пленку. Основными материалами, используемыми для изготовления резистивных испарителей, являются вольфрам, молибден и тантал.

Вид и форма резистивных испарителей зависят от типа осаждаемого вещества. Различают следующие основные виды резистивных испарителей:

– проволочные;
– ленточные;
– коробчатого типа;
– тигельные.

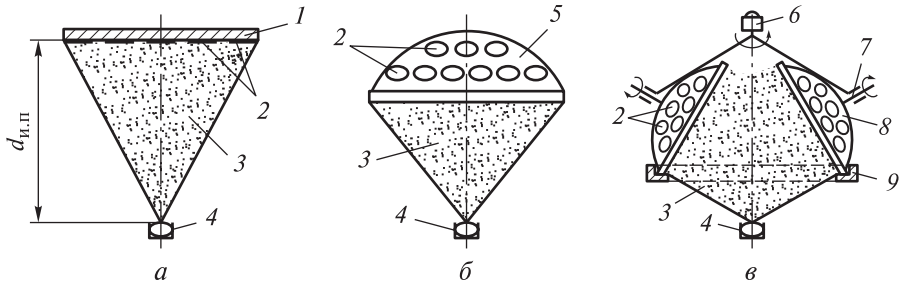


Рис. 1.41. Варианты подложкодержателей:

а — плоский; *б* — сферический; *в* — планетарный; *1*, *5*, *8* — подложкодержатели; *2* — подложки; *3* — поток осаждаемых частиц; *4* — точечный источник осаждаемых частиц; *6* — приводная вращающаяся ось; *7* — ось подложкодержателя; *9* — кольцо; $d_{и.п}$ — расстояние от источника до подложкодержателя

Проволочные испарители (рис. 1.42) применяются для испарения веществ, которые смачивают материал нагревателя. Их достоинствами являются простота конструкции, возможность модификации под конкретные технологические условия. Кроме того, они хорошо компенсируют расширение и сжатие материалов при нагреве и охлаждении. Их недостаток — малое количество испаряемого за один процесс материала.

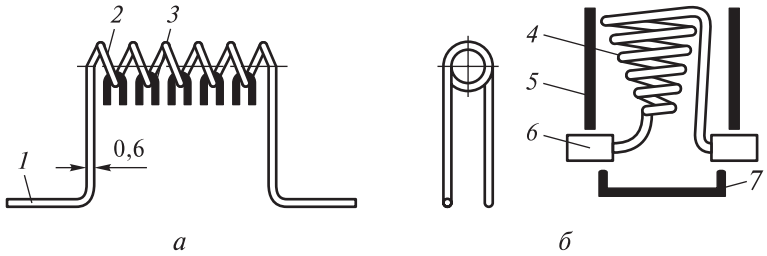
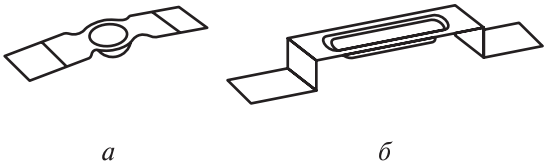


Рис. 1.42. Проволочные испарители:

а — с цилиндрической спиралью; *б* — с конической спиралью; *1* — отогнутый конец спирали; *2* — цилиндрическая спираль; *3* — испаряемый материал (гусарик); *4* — коническая спираль; *5* — цилиндрический тепловой экран; *6* — зажим токоподвода; *7* — ограничивающий экран

Ленточные испарители (рис. 1.43) применяются для испарения материалов, плохо удерживающихся на проволочных испарителях, а также диэлектрических материалов.



а *б*

Рис. 1.43. Ленточные испарители:
а — с углублением в виде полусферы; *б* — лодочного типа

Для неметаллических веществ, например, диэлектриков, обладающих низкой теплопроводностью в вакууме, существует большая вероятность их разбрызгивания при форсированном испарении. В этих случаях применяют испарители *коробчатого типа* (рис. 1.44), выполненные из ленты толщиной 0,1 мм в виде коробочки *1*, в которую засыпают испаряемое вещество *5*. Сверху коробочка закрывается однослойным или двухслойным экраном *3* с отверстиями, через которые проходят пары *4* испаряемого вещества. Иногда для уменьшения разбрызгивания вещества используют двухслойные экраны, отверстия в которых располагают в шахматном порядке, что позволяет полностью исключить прямой пролет крупных частиц испаряемого вещества. Такие испарители дают возможность создавать над поверхностью испаряемого вещества ограниченное пространство, в котором образующийся пар близок к насыщенному.

Наиболее эффективную защиту от разбрызгивания испаряемого вещества в виде капель, которым сопровождается процесс испарения некоторых веществ, обеспечивают *лабиринтные* испарители (рис. 1.45).

Их конструкция исключает прямой путь для выхода крупных частиц вещества в момент взрывного испарения.

Испаритель изготовляют в виде коробочки *1*, которая закрывается крышкой *5*, имеющей боковой и нижний *6* экраны для снижения тепловых потерь излучением. В верхней части крышки имеются два патрубка. Через патрубок *3* в левую часть коробочки засыпают испаряемое вещество *7*, а затем этот патрубок закрывают круглой крышкой *4*. Через выходной патрубок *9*

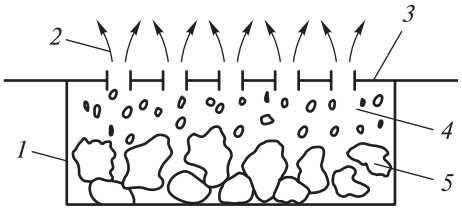


Рис. 1.44. Испаритель коробчатого типа:
1 — коробочка; *2* — поток паров наносимого вещества; *3* — экран; *4* — пары испаряемого вещества; *5* — испаряемое вещество

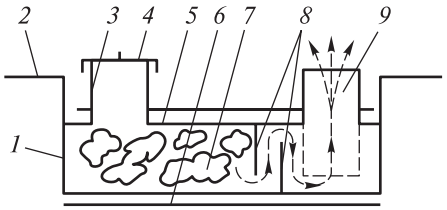


Рис. 1.45. Коробчатый лабиринтный испаритель:
1 — коробочка; *2* — лапки; *3* — патрубок для загрузки материала; *4* — крышка патрубка; *5* — крышка испарителя; *6* — нижний экран; *7* — испаряемое вещество; *8* — разделительные экраны; *9* — выходной патрубок

поступают пары наносимого вещества, которые предварительно в коробочке проходят по лабиринту, образованному экранами *8*, и из них отсеиваются макроскопические частицы.

Для напыления многокомпонентных сплавов, составные части которых имеют разное давление образующегося пара, используется метод *взрывного* (дискретного) *испарения* (рис. 1.46).

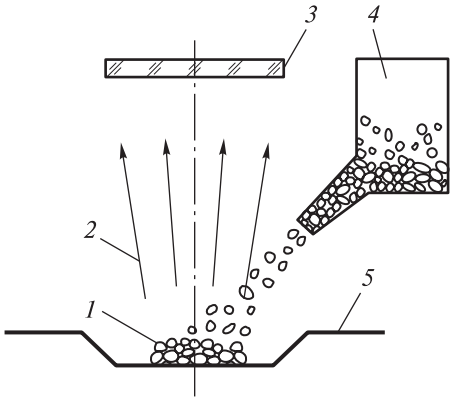


Рис. 1.46. Схема метода взрывного (дискретного) испарения:

1 — испаряемый порошок; *2* — пары наносимого вещества; *3* — подложка; *4* — дозатор; *5* — ленточный испаритель

Сущность этого метода состоит в том, что из дозатора *4* на ленточный разогретый испаритель *5* дискретно сбрасываются небольшие порции порошка *1* испаряемого сплава с частицами размером 100...200 мкм. Испарение микродоз происходит практически мгновенно и полностью, в результате чего на подложке *3* последовательно осаждаются очень тонкие слои. В пределах каждого слоя наблюдается неоднородный состав (вследствие фракционирования сплава), однако уже в процессе нанесения, вследствие взаимной диффузии атомов составляющих компонентов, выравнивается концентрация каждого из них по толщине пленки. Температуру испарителя выбирают такой, чтобы испарялось наименее летучее вещество.

Основной недостаток данного метода — сложность наладки дозатора для подачи особо мелких порций испаряемого вещества. В условиях большого теплоизлучения (от перегретого металлического испарителя) устойчивую работу дозатора обеспечить трудно. Кроме того, имеется опасность не испарения, а разбрызгивания вещества в виде капель или твердых частиц.

Для испарения большого количества сыпучих диэлектрических материалов используют *тигельные* испарители (рис. 1.47). Тигли изготовляют из тугоплавких металлов, кварца, графита, а также керамических материалов (нитрида бора BN, оксида алюминия Al_2O_3).

Существует две разновидности таких испарителей: с *внутренним* нагревателем (рис. 1.47, *а*) и с *внешним* (рис. 1.47, *б*). При равной мощности питания первый испаритель нагревается до более высокой температуры, чем второй. Достоинством второго испарителя является отсутствие контакта испаряемого вещества со спиральным нагревателем.

Эксплуатационный недостаток тигельных испарителей состоит в том, что они довольно инерционны, так как малая теплопроводность материала, из которого изготовляют тигель, не обеспечивает быстрого нагрева испаряемого вещества.

Испарители с резистивным нагревом невозможно использовать для напыления тугоплавких металлов. В таком случае нужно применять *электронно-лучевые испарители* (рис. 1.48). Принцип их действия основан на преобра-

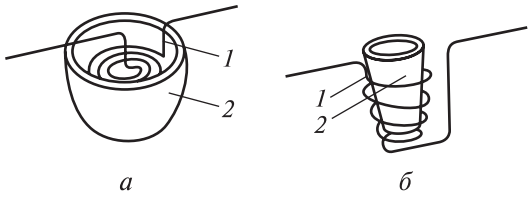


Рис. 1.47. Тигельные испарители:
а — с внутренним спиральным нагревателем;
б — с внешним спиральным нагревателем;
1 — спираль; *2* — тигель

зовании кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировке ими испаряемого вещества.

Подобные испарители состоят из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы, водоохлаждаемого тигля. Электронная пушка, в состав которой входят вольфрамовый термокатод *6* и фокусирующая система *7*, формирует поток электронов. Эмитируемые катодом электроны ускоряются до энергии 10 кэВ и формируют электронный луч *8*. Отклоняющая система предназначена для создания магнитного поля, перпендикулярного вектору скорости электронов. Она состоит из полюсных наконечников *1* и электромагнита *2*. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель *3* и электронная пушка. Отклоняющая система с помощью магнитного поля направляет электронный луч в центр тигля. В месте падения луча создается локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретое вещество испаряется и осаждается на подложке в виде тонкой пленки. Изменяя ток в электромагните, можно сканировать лучом вдоль тигля, предотвращая образование «кратера» в испаряемом веществе. Водоохлаждаемый тигель выполняют из меди. Вместимость тигля — 50 см^3 — обеспечивает длительную работу без добавления материала. Испаряемое вещество не контактирует со стенками тигля, что обеспечивает отсутствие загрязнения.

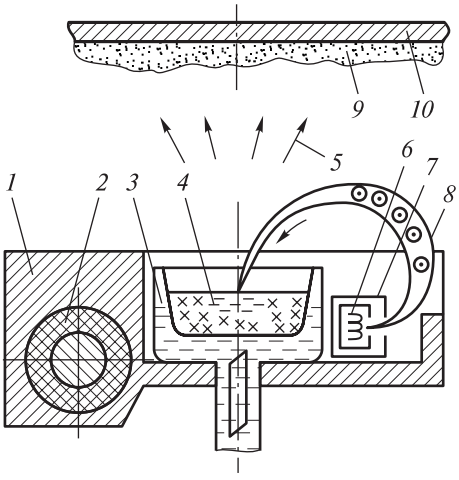


Рис. 1.48. Электронно-лучевой испаритель:
1 — полюсный наконечник; *2* — электромагнит; *3* — водоохлаждаемый тигель; *4* — испаряемое вещество; *5* — поток наносимого вещества; *6* — вольфрамовый термокатод; *7* — фокусирующая система; *8* — электронный луч; *9* — тонкая пленка; *10* — подложка

Электронно-лучевые испарители не загрязняют камеру материалом нагревателя и тигля и имеют больший срок эксплуатации. Однако они обладают рядом недостатков, в частности, при длительной бомбардировке некоторые материалы разлагаются на фракции.

Электронно-лучевые испарители сложнее и дороже испарителей с резистивным нагревом. Кроме того, при испарении металлов с высокой теплопроводностью (медь, алюминий, золото, серебро) возникают трудности.

Установки для термического вакуумного напыления имеют ряд недостатков:

– для напыления пленок из тугоплавких материалов (вольфрам, молибден, SiO_2, Al_2O_3 и ряд других) требуются высокие значения температуры испарителя, при которых неизбежно загрязнение потока материалом испарителя;

– при напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава пленки по сравнению с исходным составом материала, помещенного в испаритель;

– в связи с инерционностью процесса необходимо введение в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом;

– создается неравномерность толщины пленки.

1.4.3. ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Процесс распыления ионной бомбардировкой является «холодным» процессом, так как атомарный поток вещества на подложку образуется при бомбардировке поверхности твердого образца (мишени) ионами инертного газа и возбуждении поверхности атомов до энергии, превышающей энергию связи с соседними атомами. Необходимый поток ионов создается в электрическом газовом разряде, для чего давление газа в рабочей камере должно быть на несколько порядков выше, чем в камере установки для термовакуумного напыления. Благодаря относительно высокому давлению в камере повышается равномерность толщины осаждаемой пленки, достигающая 1 %, без применения дополнительных устройств.

Различают следующие системы ионного распыления:

– катодные (диодные);

– ионно-плазменные (триодные);

– магнетронные (высокочастотные).

Схема катодной (диодной) системы распыления приведена на рис. 1.49. Из рабочей камеры откачивается воздух и запускается инертный газ (аргон). Давление в камере составляет 1...10 Па. Если распыляемая мишень металлическая, то распыление ведется при постоянном токе, если диэлектрическая — при переменном.

При подаче напряжения между двумя электродами образуется разряд, который разделен на две зоны: темное катодное пространство и светящаяся область. На темное катодное пространство приходится основное падение напряжения. Здесь заряженные частицы ускоряются до энергии, достаточной для того, чтобы ионы, бомбардируя катод-мишень, освобождали поверхностные атомы и электроны (если мишень выполнена из проводящего материала), а электроны на границе темного катодного пространства — ионизировали молекулы аргона. При ионизации образуются ионы аргона, которые, ускоряясь, стремятся к мишени, и электроны, которые, как и «отработанные»

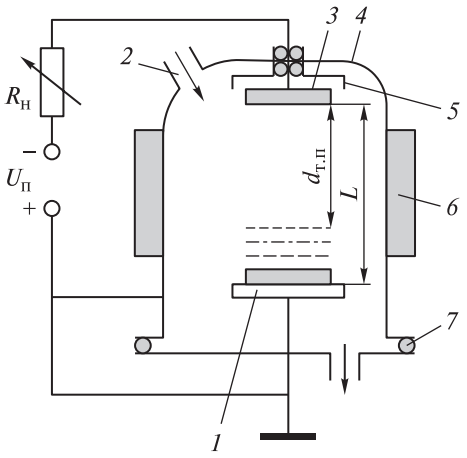


Рис. 1.49. Схема катодной (диодной) системы распыления:

1 — анод с размещенными на нем подложками; *2* — игольчатый натекатель, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; *3* — катод-мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; *4* — вакуумный колпак из нержавеющей стали; *5* — экран, охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; *6* — постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; *7* — герметизирующая прокладка; $R_н$ — сопротивление нагрузки; $U_п$ — напряжение питания; $d_{т.п}$ — размер темного подкатодного пространства; L — расстояние от подложки до мишени

ионизирующие электроны, дрейфуют к аноду в слабом поле светящейся области. Освобожденные атомы с поверхности мишени, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, достигают поверхности подложки. Процесс ионизации является лавинообразным, поскольку при этом образуются дополнительные электроны. Непрерывный поток ионов бомбардирует мишень, выбивая из нее атомы вещества (рис. 1.50), которые затем непрерывным потоком движутся к подложке.

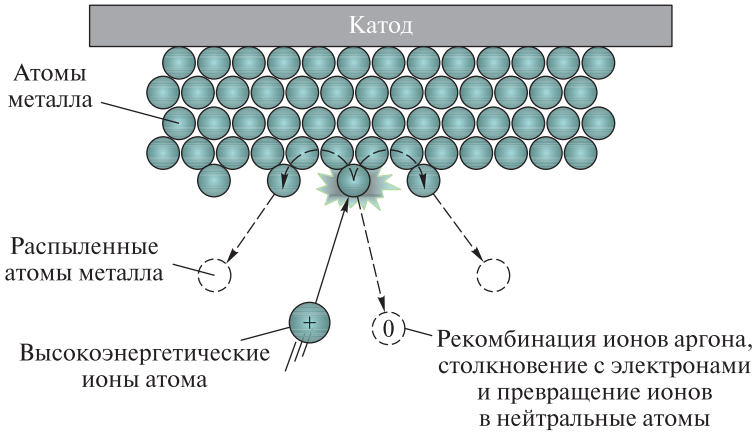


Рис. 1.50. Общая схема катодного распыления

Катодные (диодные) системы имеют недостатки:

– можно распылять только проводящие материалы, которые способны эмитировать в разряд электроны, ионизирующие молекулы аргона и поддерживающие горение разряда;

– малая скорость роста пленки (единицы нанометров в секунду) вследствие значительного рассеяния распыляемых атомов материала в объеме рабочей камеры.

В *ионно-плазменных* (триодных) системах распыления (рис. 1.51) добавленный третий электрод выполняет функцию термоэмиссионного катода. Благодаря этому увеличивается концентрация электронов и, следовательно, ионизированных атомов рабочего газа (аргона). При этом увеличение количества ионов возможно при уменьшении давления рабочего газа до $10^{-1}...10^{-2}$ Па, что обеспечивает нанесение пленок, не загрязненных посторонними примесями. Наличие третьего электрода позволяет приблизить мишень к подложке и, соответственно, увеличить скорость нанесения пленки. Электроны, испускаемые термокатодом, ионизируют атомы аргона, которые после подачи отрицательного потенциала на катод-мишень (3...5 кВ), вытягиваясь из плазмы, бомбардируют и распыляют поверхность.

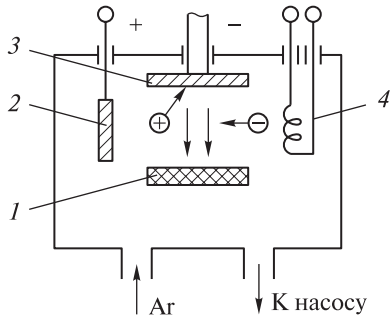


Рис. 1.51. Схема ионно-плазменной (триодной) системы распыления:

1 — подложка; *2* — анод; *3* — катод-мишень; *4* — термокатод

Более низкое давление обеспечивает нанесение пленок, не загрязненных посторонними примесями, а также увеличивает скорость нанесения пленки. При этом процесс является безынерционным: распыление после снятия потенциала с катода-мишени прекращается. Недостаток метода состоит в выделении большого количества теплоты в разрядной камере и на мишени, что требует системы охлаждения.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили *магнетронные* (высокочастотные) системы ионного распыления (рис. 1.52).

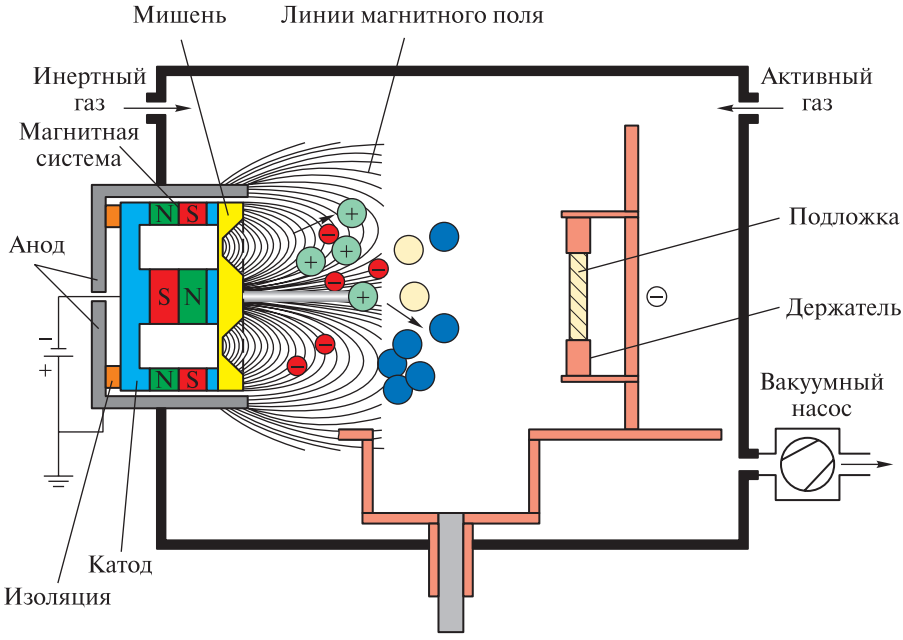


Рис. 1.52. Схема магнетронной системы распыления

В них устанавливается магнетрон, накладывающий на разряд плазмы постоянное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического поля. В результате движение электронов происходит по сложным траекториям (близким к циклоидам), степень ионизации рабочего газа существенно повышается, что дает возможность снизить давление газа, не снижая (и даже повышая) разрядный ток. В результате скорость роста пленки повышается до нескольких нанометров в секунду, что сравнимо со скоростями в процессах термического вакуумного напыления.

Тесты к лекции 4

1. ***Какие компоненты можно получить с помощью тонкопленочной технологии?***

а) резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и другие пассивные компоненты;

б) любые компоненты;

в) активные компоненты.

2. ***Какой способ получения тонких пленок преимущественно используется в настоящее время?***

а) магнетронное распыление;

б) термическое испарение;

в) диодное распыление.

1.5. ОСОБЕННОСТИ ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель лекции: ознакомление с основами толстопленочной технологии.

Толстопленочную технологию используют для создания пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, проводников, контактов) в гибридных толстопленочных ИМС. Кроме того, ее применяют для создания проводников и изолирующих слоев в многоуровневых коммутационных микроплатах некоторых типов. Толщина пленки составляет несколько десятков микрометров.

При реализации данного метода используются дешевые и высокопроизводительные процессы, требующие небольших единовременных затрат на подготовку производства, что обеспечивает довольно низкую стоимость микросхем, получаемых в условиях мелкосерийного прозводства. Кроме того, процесс вжигания пасты в поверхностный слой керамики приводит к прочному сцеплению получаемых элементов с керамической подложкой, обеспечивающему их высокую надежность (рис. 1.53).

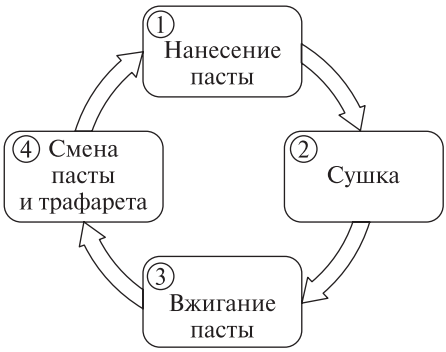


Рис. 1.53. Структурная схема цикла толстопленочной технологии

На первом этапе цикла толстопленочной технологии происходит *нанесение пасты* через трафарет. В состав толстопленочных паст входят:

– функциональные частицы;

– низкотемпературное стекло ($t_{пл}$ = 400...500 °С), которое склеивает функциональные частицы;

– технологическая связка (обычно — органическое масло), которая в процессе вжигания должна разлагаться и полностью удаляться из слоя.

В готовом (вожженном) состоянии толстопленочный элемент состоит из мелких функциональных частиц, массово находящихся в контакте друг с другом (рис. 1.54) и «склеенных» стеклом с невысокой температурой плавления (400...500 °С).

Существуют следующие виды паст:

– для проводящих элементов, включающие порошки серебра, палладия и других металлов с высокой электрической проводимостью;

– для резистивных элементов, включающие смеси порошков проводящих частиц и частиц оксидов металлов в различных пропорциях;

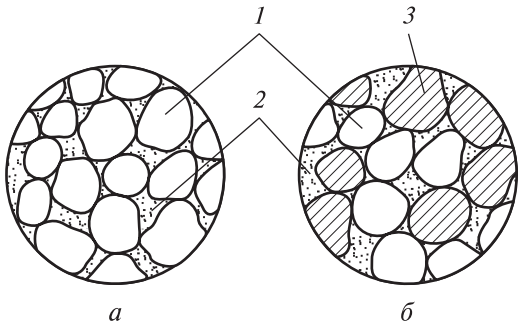


Рис. 1.54. Структура толстопленочных элементов:

а — проводники; *б* — резисторы; *1* — частицы металла; *2* — конструкционная связка (стекло); *3* — частицы оксида

– для диэлектрических слоев конденсаторов, включающие порошки сегнетоэлектриков, которые обладают большим значением относительной диэлектрической проницаемости;

– лудящие пасты, включающие смоченные раствором флюса частицы припоя.

Пасты наносят через сетчатые трафареты. Для трафаретов используют сетки из нержавеющей стали с размерами ячеек 40...100 мкм и диаметром нитей 25...55 мкм.

Сушка необходима для удаления летучих компонентов технической связки. Она проходит при температуре 120...200 °С.

Вжигание пасты идет при температуре 500...1000 °С в конвейерных электропечах. Типовой температурный профиль вжигания пасты приведен на рис. 1.55.

Вжигание пасты проходит в четыре этапа. На этапе I, температура которого достигает 300...400 °С, происходят разложение и удаление органической связки, состав которой, а также скорость нагрева подбирают таким образом, чтобы удаление компонентов органической связки происходило не одновременно, иначе пленка получится пористой. На этапе II оплавляется стекло, которое смачивает функциональные частицы и подложку. На этапе III происходит выдержка при постоянной высокой температуре в течение 7...15 мин. На этапе IV идет медленное охлаждение, позволяющее избежать возникновения внутренних механических напряжений.

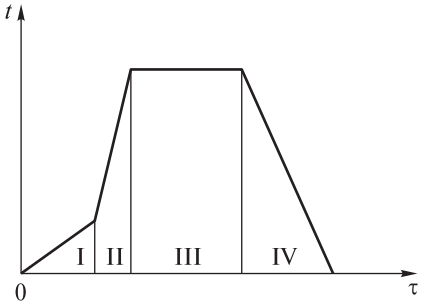


Рис. 1.55. Температурный профиль вжигания пасты:

t — температура; τ — время; I–IV — этапы

Каждый последующий слой пасты вжигается при более низкой температуре.

Толстопленочная технология проще в реализации, чем тонкопленочная. Кроме того, толстопленочные элементы могут быть рассчитаны на более высокие мощности рассеивания.

К недостаткам толстопленочной технологии относятся необходимость высоких температур, относительная дороговизна некоторых паст, небольшая разрешающая способность, которая, впрочем, может быть улучшена при замене трафаретной печати на фотолитографию. Кроме того, толстопленочные элементы имеют больший температурный коэффициент сопротивления, чем тонкопленочные.

Тесты к лекции 1.5

1. ***Пленки какой толщины можно получить при толстопленочной технологии?***

а) десятки микрометров;

б) несколько нанометров;

в) несколько сантиметров.

2. ***Какие функциональные частицы входят в состав резистивных паст?***

а) смесь металлов и диэлектриков;

б) металлы;

в) диэлектрики.

1.6. ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лекции: ознакомление с особенностями пленочных гибридных интегральных микросхем.

1.6.1. ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Пленочный резистор — один из компонентов ГИС и совмещенных схем. Тонкопленочные резисторы изготовляют напылением резистивной пленки, толстопленочные — вжиганием резистивной пасты. В качестве функциональных частиц используются силициды хрома, никеля, железа. Содержание кремния 15...95 % обеспечивает широкий диапазон значений удельного сопротивления. Кроме того, могут использоваться двойные или тройные системы на их основе.

Характеристики резистивных материалов:

– удельное поверхностное сопротивление $R_{сл}$, Ом;

– допустимая удельная мощность рассеивания P_0, Вт/см^2;

– температурный коэффициент сопротивления (ТКС), 1/К;

– коэффициент старения $\gamma_{ст}$ (необратимые изменения за 1000 ч при температуре 85 °С и нагрузке 1 Вт/см^2).

Существует три метода формирования пленочных резисторов:

1) *фотолитографический* (напыление сплошной резистивной пленки, напыление сплошной проводящей пленки, фотолитография по проводящей пленке, фотолитография по резистивной пленке);

2) *трафаретный* (напыление резистивных элементов через трафарет, напыление проводящих элементов через трафарет);

3) *комбинированный* (напыление сплошной резистивной пленки, напыление проводящих элементов через трафарет, фотолитография по резистивной пленке).

Структура и топология пленочных резисторов при разных методах изготовления приведена на рис. 1.56, основные характеристики — в табл. 1.3. Трафаретный вариант является более производительным и дешевым, фотолитографический заметно превосходит трафаретный по разрешающей способности (минимальная ширина резистора a_{min}) и точности (производственная погрешность $\Delta_п$).

При проектировании группы интегральных резисторов возникает задача определения рабочих размеров l и a для каждого резистора с таким расчетом,

чтобы суммарная площадь, занимаемая резисторами, была минимальна. Исходными данными при этом являются:

– номинальные значения сопротивлений резисторов R_i;
– мощность рассеивания P_i;
– предельные допустимые отклонения сопротивления — $\pm\gamma_{R_i}$;
– температурный диапазон эксплуатации — от $t_{\min}$ до $t_{\max}$.

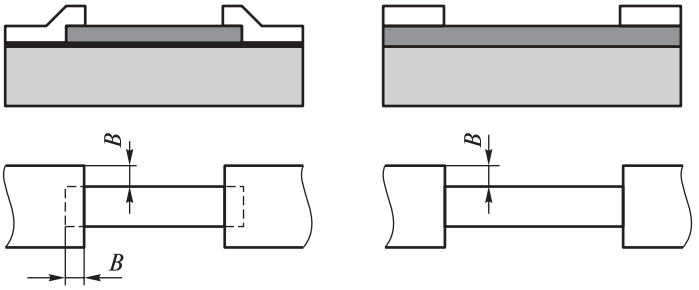


Рис. 1.56. Структура и топология пленочных резисторов:
а — трафаретный метод; *б* — фотолитографический и комбинированный методы; *B* — ширина пояска

Таблица 1.3

Основные характеристики методов изготовления резисторов

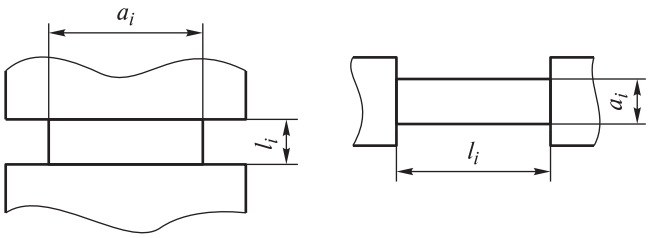
Параметр	Фотолитографический метод	Трафаретный метод
$a_{\min}$, мм	0,1	0,3
$\pm\Delta_{\text{п}}$, мм	±0,005	±0,02
B, мм	0,1	0,2
$(l/a)_{\max}$	Не ограничено	10

Сначала необходимо определить оптимальное значение удельного поверхностного сопротивления $R_{\text{сл}} = R_0$. Искомое значение лежит внутри ряда значений, выстроенного по возрастающей: $R_1, R_2, R_m, \left(R_0\right), R_{m+1}, R_n$. Расчет проводят по формуле

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}}.$$

Таким образом, все резисторы можно разделить на две группы (рис. 1.57), расчет параметров которых будет различным.

По найденному значению R_0 выбирают марку резистивного сплава так, чтобы значение R_0 удовлетворяло рекомендованному диапазону значений $R_{\text{сл}}$. При наличии двух и более вариантов марок сплавов следует ориентироваться на большее значение P_0, меньшие значения a и $\gamma_{\text{ст}}$. При окончательном выборе марки сплава будут известны конкретные значения P_0, a и $\gamma_{\text{ст}}$.



а *б*

Рис. 1.57. Формы резисторов в зависимости от соотношения значений сопротивления:
а — первая группа, $R_i < R_0$; *б* — вторая группа, $R_i > R_0$

Затем определяют критические размеры резисторов с учетом мощности рассеивания:

– для резисторов первой группы

$$l_i = \sqrt{\frac{P_i R_i}{P_0 R_0}};$$

– для резисторов второй группы

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i R_0}{P_0 R_i}}.$$

Кроме того, корректируют размеры с учетом заданной точности:

– для резисторов первой группы

$$l_i = \frac{\Delta_a \dfrac{R_i}{R_0} + \Delta_l}{\gamma_{\text{техн}} - \gamma_{R_0}};$$

– для резисторов второй группы

$$a_i = \frac{\Delta_l \dfrac{R_0}{R_i} + \Delta_a}{\gamma_{\text{техн}} - \gamma_{R_0}},$$

где Δ_l, Δ_a — абсолютные предельные погрешности длины и ширины (см. табл. 1.3); значение γ_{R_0} составляет 2 % для трафаретного метода, 1 % — для фотолитографического.

Для приближения выводов высокоомного резистора друг к другу и сокращения длины связей в ИМС конструктор может отступить от прямолинейной конфигурации резистора и спроектировать элемент в форме меандра, введя в него два или более изгибов под прямым углом (рис. 1.58). При любой конфигурации резистора входной и выходной токи должны быть ориентированы в одну сторону. В противном случае предусмотренные уширения выводов не будут выполнять своих функций и погрешность совмещения

проводящего и резистивного слоев вызовет дополнительную погрешность сопротивления.

Участок изгиба имеет пониженное сопротивление по сравнению с линейным участком той же длины (по средней линии $l_{ср}$), что требует корректировки длины резистора в сторону ее увеличения. Так, Г-образный участок, включающий три квадрата, имеет сопротивление 2,55 $R_{сл}$ вместо $3R_{сл}$, а сопротивление П-образного, включающего пять квадратов, — $4R_{сл}$ вместо $5R_{сл}$. Это явление объясняется тем, что плотность тока на изгибах оказывается более высокой у внутреннего контура резистора, в результате чего электрическая длина резистора (по средней плотности тока) уменьшается.

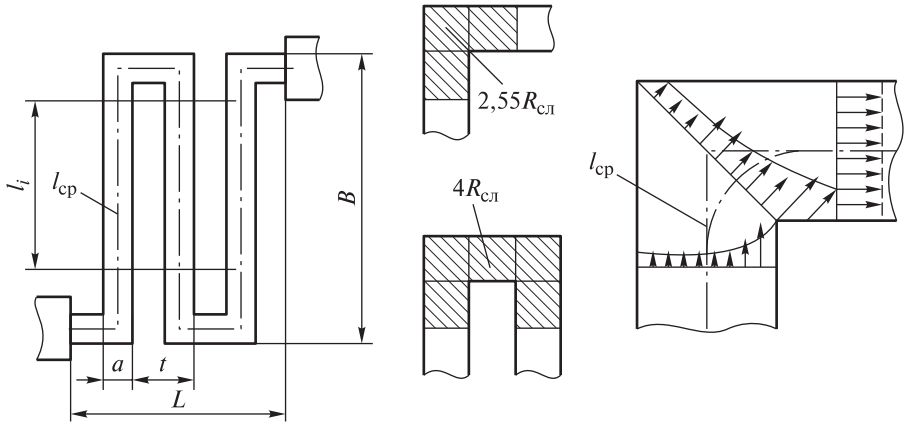


Рис. 1.58. Проектирование резистора в форме меандра

После получения резистора может оказаться, что его сопротивление отличается от заданного. Для того чтобы была возможность скорректировать сопротивление, существует специальная конструкция резисторов — *подгоняемые* резисторы (рис. 1.59).

Перерезание перемычек приводит к увеличению сопротивления (рис. 1.58, *а*) или к его уменьшению (рис. 1.58, *б*). Кроме того, возможна лазерная подгонка параметров резисторов (рис. 1.60).

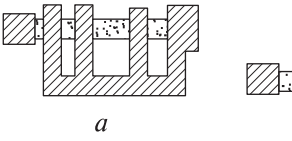


Рис. 1.59. Подгоняемые резисторы:

а — добавление секций перерезанием перемычек; *б* — уменьшение числа параллельно подключенных резистивных дорожек

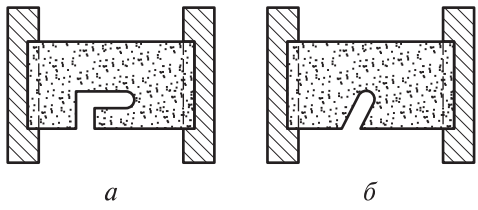


Рис. 1.60. Лазерная подгонка сопротивления резисторов:

а — с участками грубой и точной подгонки; *б* — с подгонкой под углом

Необходимо иметь в виду, что использование подгоняемых резисторов усложняет конструкцию ИМС и требует дополнительных операций и оборудования.

1.6.2. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Наиболее часто используемые конструкции пленочных конденсаторов приведены на рис. 1.61. В качестве обкладок выступают металлические проводники. В широко применяемых плоских конденсаторах диэлектрик помещен между верхней и нижней обкладками, причем верхняя обкладка полностью вписывается в нижнюю (рис. 1.61, *а*). Такая конструкция позволяет создавать конденсаторы повышенной емкости (от ста до нескольких тысяч пикофарад); кроме того, точность совмещения слоев в ней никак не влияет на емкость. Если не требуется большая емкость, можно использовать конструкцию, изображенную на рис. 1.61, *б*.

При активной площади поверхности конденсатора менее 5 мм^2 начинает проявляться краевой эффект, который тем сильнее влияет на емкость конденсатора, чем меньше эта площадь. Если расчетная площадь менее 1 мм^2, конденсатор лучше выполнять в виде двух последовательно включенных конденсаторов (рис. 1.61, *в*).

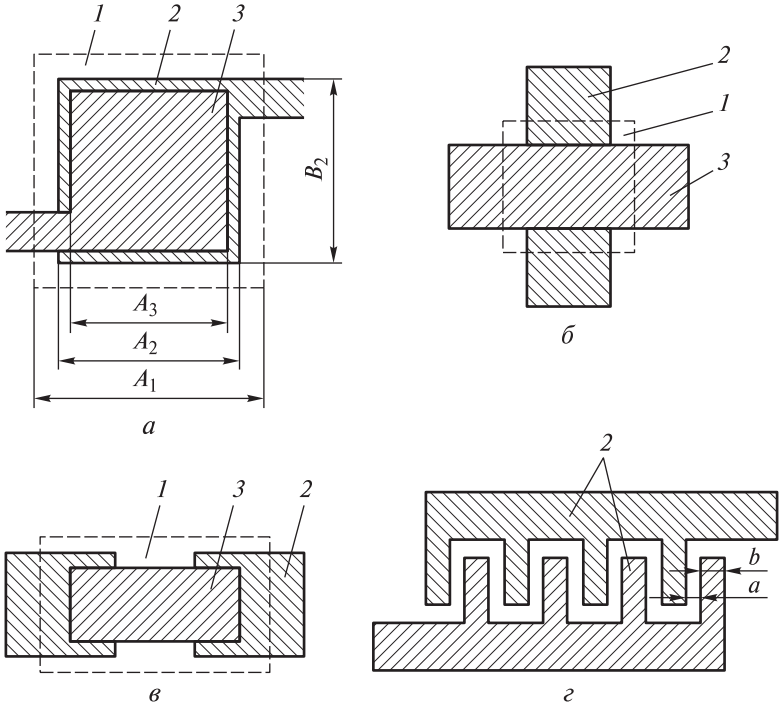


Рис. 1.61. Конструкции пленочных конденсаторов:
а, *б*, *в* — плоские с тонкопленочным диэлектриком; *г* — гребенчатый;
1 — верхняя обкладка; *2* — нижняя обкладка; *3* — диэлектрик

В высокочастотных ИМС используют гребенчатые конденсаторы (рис. 1.61, *г*), в которых роль обкладок выполняют два проводника, имеющих вид гребенки. В таких схемах диэлектрик составной: «подложка–воздух» или «подложка–диэлектрическое покрытие».

В качестве материала диэлектрика могут применяться монооксид SiO или диоксид SiO_2 кремния, монооксид германия GeO, оксиды алюминия Al_2O_3, тантала Ta_2O_5, а также алюмосиликатное, боросиликатное или иттрий-боратное стекло.

Емкость пленочного конденсатора определяют по формуле

$$C = \frac{0{,}885\varepsilon_r S}{d} = C_0 S,$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; S — площадь взаимного перекрытия обкладок, см^2; d — толщина диэлектрика, см; C_0 — удельная емкость, пф/см^2.

Толщину диэлектрика выбирают исходя из условия обеспечения заданного рабочего напряжения $U_р$:

$$d = \frac{k_з U_р}{E_{пр}},$$

где $k_з = 3–10$ — коэффициент запаса; $E_{пр}$ — напряжение пробоя, для большинства диэлектрических материалов $E_{пр} = (1...9)\cdot 10^6$ В/см.

При необходимости в микросхемах можно использовать подгоняемые конденсаторы (рис. 1.62).

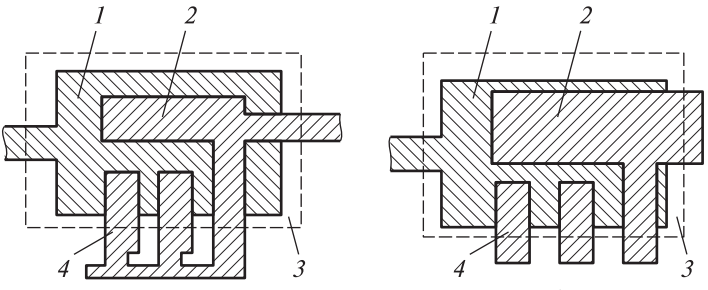


Рис. 1.62. Конструкции подгоняемых пленочных конденсаторов:

1 — нижняя обкладка; *2* — верхняя обкладка; *3* — диэлектрик; *4* — подгоночные секции

Необходимо иметь в виду, что использование подгоняемых конденсаторов усложняет конструкцию ИМС и требует дополнительных операций и оборудования.

1.6.3. ПЛЕНОЧНЫЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Пленочные катушки индуктивности выполняют в виде круглых или прямоугольных одновитковых петель или многовитковых спиралей (рис. 1.63). Индуктивность подобных пленочных спиралей на низких частотах ограничена значением примерно 2...3 мкГн. При одинаковых габаритных размерах и числе витков индуктивность квадратной спирали в 1,27 раза больше индуктивности круглой спирали.

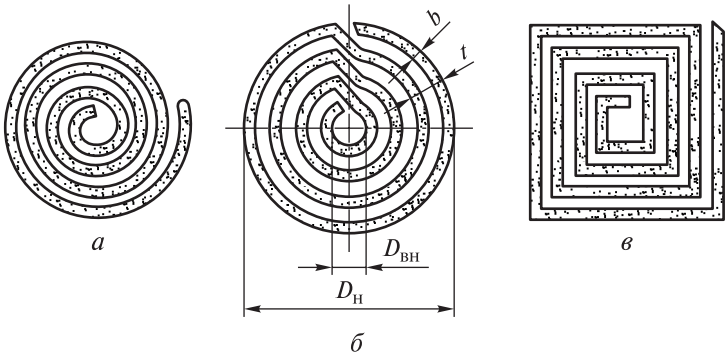


Рис. 1.63. Конструкции пленочных катушек индуктивности:
а, *б* — круглая форма спирали; *в* — квадратная форма спирали; *b* — ширина проводника; *t* — шаг спирали; $D_{вн}$ — диаметр внутренней спирали; $D_н$ — диаметр наружной спирали

Индуктивность L, нГн, круглой спирали определяют по формуле

$$L = \frac{25 D_{ср} n^2}{1 + 3h / D_{ср}},$$

где $D_{ср} = 0{,}5\left(D_н + D_{вн}\right)$ — средний диаметр витка, см^2; n — число витков спирали; $h = nt + b$ — ширина спирали, см (t — шаг спирали, см; b — ширина проводника, см).

В гибридных ИМС площадь, занимаемая одной спиралью, обычно не превышает 1 см^2. Максимальное число витков, которые можно разместить на этой площади, определяется разрешающей способностью технологического процесса создания спирали, в частности значением b_{min}. При $b_{min} \approx 50$ мкм индуктивность пленочных спиралей составляет около 10 мкГн, а добротность при оптимальном соотношении внутреннего и наружного диаметров спирали $D_{вн} / D_н \approx 0{,}4$ мкм равна 80–120.

Для изготовления пленочных спиралей применяют материалы с высокой электрической проводимостью. Толщина спирали зависит от рабочей частоты и от глубины проникновения электромагнитной волны в материал проводника (скин-эффект).

Тесты к лекции 1.6

1. ***Какой из методов изготовления пленочных резисторов точнее?***
а) фотолитографический;
б) трафаретный;
в) у них одинаковая точность.
2. ***Какой из методов изготовления пленочных резисторов дешевле?***
а) трафаретный;
б) фотолитографический;
в) у них одинаковая стоимостью.

1.7. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Цель лекции: ознакомление с основами фотолитографии.

1.7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Литография — процесс формирования рельефного рисунка в актиночувствительном слое, нанесенном на поверхность подложек с целью последующего переноса этого рисунка на материал подложки.

Актиночувствительный слой — слой, свойства которого, в частности растворимость, изменяются под действием актиничного излучения (например, ультрафиолетового излучения или потока электронов).

Экспонирование — процесс облучения актиночувствительного слоя материала. Для реализации процесса применяется излучение в диапазоне от рентгеновского до видимого.

Фоторезист — светочувствительный слой материала (полимерная пленка), физико-химические свойства которого изменяются под действием света (растворимость).

Фотошаблон — прозрачная для излучения с определенной длиной волны пластина, рисунок на которой выполнен непрозрачным красителем.

Оригинал — увеличенный рисунок слоя ИМС.

Эталонный фотошаблон — первый фотошаблон, с которого изготовляют рабочие копии.

Рабочий шаблон — шаблон, с которого изготовляют топологию структуры слоя ИМС.

Процесс литографии является самым дорогим и самым трудозатратным в технологическом процессе получения микросхем. Современные элементы микросхем имеют малые размеры и малые допуски, что требует минимизации ошибок при их получении.

Место литографии в общем цикле производства показано на рис. 1.64.

Литографические процессы при изготовлении ИМС используются для следующих целей:

– получения на поверхности окисленных полупроводниковых подложек свободных от слоя оксида областей, задающих конфигурацию полупроводниковых приборов и элементов ИМС (при локальной диффузии примесей);

– формирования топологического рисунка межсоединений (проводников) элементов ИМС;

– создания технологических масок из резистов, обеспечивающих избирательное маскирование при ионном легировании.

Процесс литографии состоит из двух основных стадий:

1) формирования необходимого рисунка элементов в слое актиночувствительного вещества (резиста) с помощью его экспонирования и проявления;

2) травления нижележащего технологического слоя (диэлектрика, металла) через сформированную топологическую маску или непосредственного использования слоя резиста в качестве топологической маски при ионном легировании.

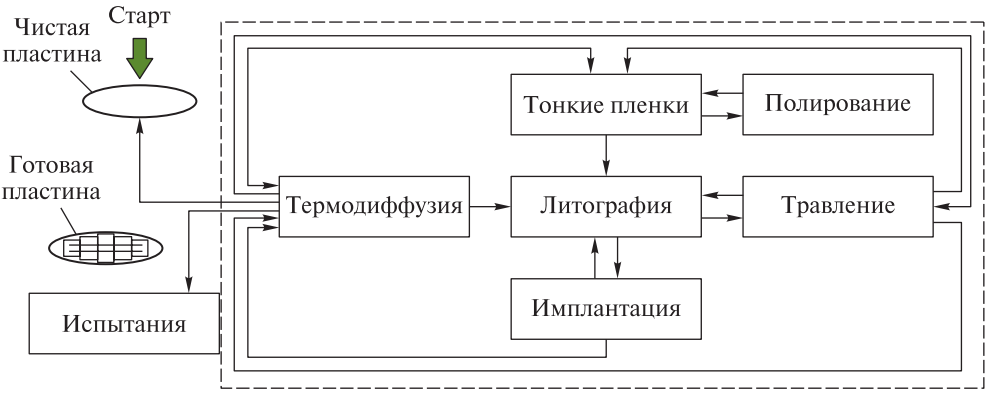


Рис. 1.64. Общий технологический цикл изготовления пластины интегральной микросхемы

Ключевыми факторами в процессе литографии являются:

– метод формирования рисунка (использование масок или фоторигинала);
– длина волны актиничного излучения;
– разрешающая способность фоторезистора;
– точность совмещения фотошаблона и пластины;
– технологическая погрешность.

В современном производстве к литографическим процессам предъявляются следующие требования:

– высокая разрешающая способность фоторезиста;
– высокая чувствительность фоторезиста;
– точность совмещения фотошаблона и пластины;
– стабильное управление параметрами литографического процесса;
– малое количество дефектов.

В зависимости от длины волны (рис. 1.65) различают следующие виды оптической литографии:

– фотолитография;
– рентгенолитография;
– электронолитография;
– ионная литография.

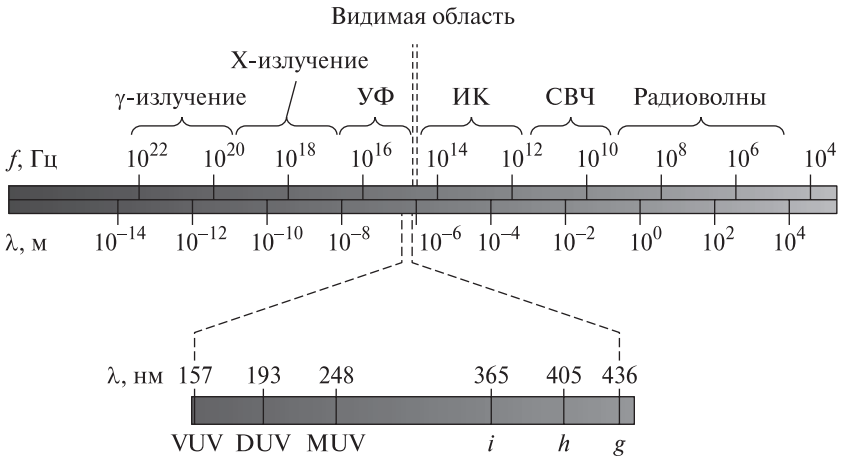


Рис. 1.65. Длины волн, используемые в оптической литографии

Последовательность типовых операций при фотолитографии приведена на рис. 1.66.

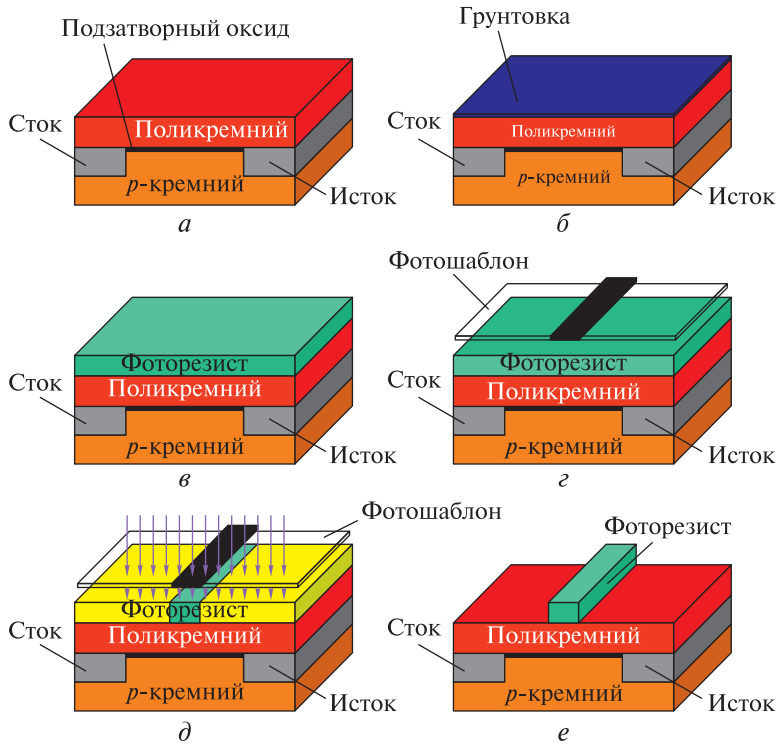


Рис. 1.66. Последовательность типовых операций при фотолитографии:

а — заготовка; *б* — предварительная обработка и грунтовка; *в* — нанесение и сушка фоторезиста; *г* — совмещение фотошаблона с подложкой; *д* — экспонирование и дополнительная сушка; *е* — проявление, задубливание и контроль

1.7.2. ФОТОРЕЗИСТЫ

Резист — химически стойкий материал, чувствительный к актиничному излучению. Его временно наносят на подложку и на нем с помощью операции экспонирования формируют изображение, которое в дальнейшем переносят на подложку. Этот материал похож на тот, что используется для изготовления фотопленки, но устойчив к действию агрессивных химических веществ и плазмы. Резист является основным материалом для формирования рисунка на кристаллах микросхем. Резисты, чувствительные к видимому и ультрафиолетовому излучению, называются *фоторезистами*.

Первоначально фоторезисты применяли для производства печатных плат, но в 1950 г. они были адаптированы для полупроводниковой промышленности. Основные этапы развития фоторезистов и способов литографии приведены на рис. 1.67.

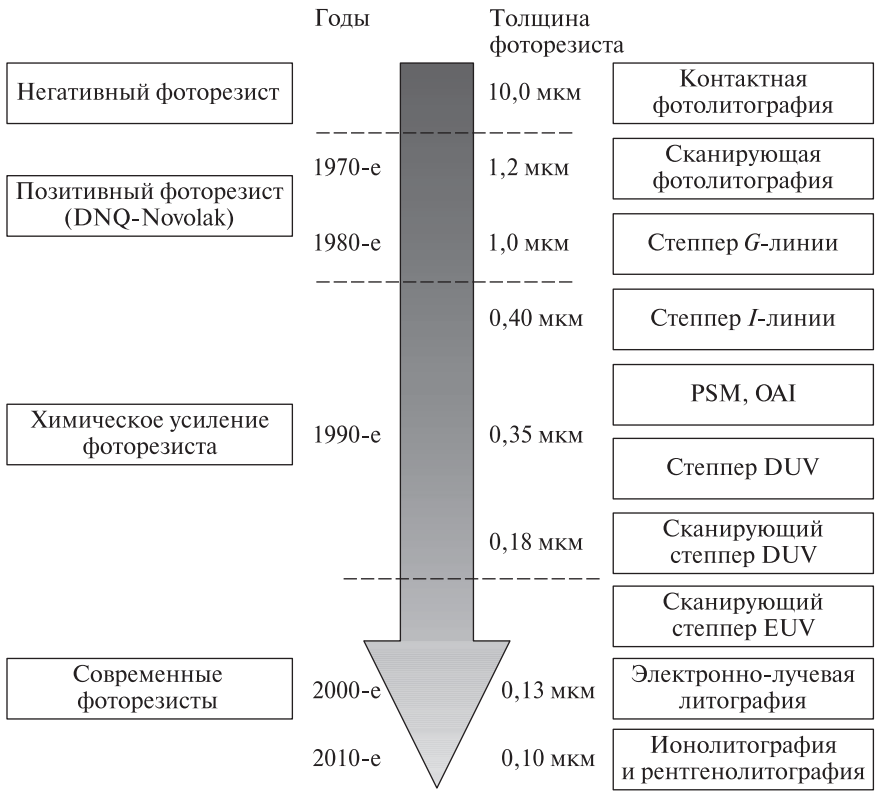


Рис. 1.67. Развитие фоторезистов и способов литографии

Различают позитивные и негативные резисты. В зависимости от их типа методы литографии по характеру переноса изображений подразделяют на *позитивные* и *негативные*.

По спектральной чувствительности (диапазону длин волн актиничного излучения) различают следующие виды резистов:

– оптические фоторезисты (для ультрафиолетового (УФ) излучения);

– фоторезисты для экстремального УФ-излучения (EUV);

– электронорезисты;

– рентгенорезисты.

Различают два вида фоторезистов:

1) сухой пленочный, представляющий собой «сэндвич» из трех слоев полимеров, средний слой — актиночувствительный; используется для получения элементов с разрешением 125...250 мкм;

2) жидкий, представляющий собой раствор полимера и актиночувствительного соединения в органическом растворителе; используется для получения элементов с разрешением 0,013...0,500 мкм.

Для производства современных ИМС применяют жидкие фоторезисты.

Фоторезисты включают в себя несколько составляющих:

– связующий состав;

– растворитель;

– актиночувствительный компонент.

Кроме того, в фоторезисты могут быть введены дополнительные добавки, позволяющие управлять другими параметрами (например, краситель для уменьшения отражения от фоторезиста УФ-излучения).

Связующий состав, представляющий собой актиночувствительный полимер, занимает основной объем фоторезиста. При облучении УФ-излучением его растворимость изменяется. У позитивных фоторезистов засвеченный объем разлагается и из нерастворимого состояния он переходит в растворимое. У негативных фоторезистов засвеченный объем полимеризуется и из растворимого состояния переходит в нерастворимое.

Растворитель добавляют в полимер, чтобы добиться требуемой вязкости. Благодаря этому можно получать слои с контролируемой толщиной.

Актиночувствительный компонент позволяет управлять химической реакцией при экспонировании фоторезиста и определяет спектральный диапазон, к которому фоторезист чувствителен.

При производстве ИМС чаще всего используются позитивные фоторезисты, из которых удаляется засвеченная область (рис. 1.68). Основой для получения изображения служат фотохимические превращения фотоактивных добавок или полимеров. Основными позитивными фоторезистами являются НХД (полимер на основе новолачной смолы) и ПММА (на основе полиметилметакрилата).

Основа НХД — эфиры нафтохинондиазидов сульфокислоты, обеспечивающие светочувствительность, и формальдегидные смолы, обеспечивающие пленкообразование. Эфиры и смолы связаны между собой кислородом. В данное вещество добавляются ацетатные растворители. Типичный состав НХД-фоторезиста (DNQ-Novolak):

– основа (новолачная фенолформальдегидная смола);

– фоточувствительный компонент (диазохиноновый эфир, который под действием УФ-излучения переходит из растворимого состояния в нерастворимое).

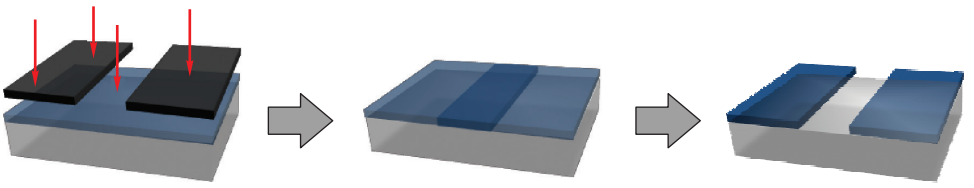


Рис. 1.68. Позитивная литография

При поглощении квантов света происходит *фотолиз* (распад) НХД на азот и неустойчивый радикал. Радикал превращается в инденкарбен. Инденкарбен принимает воду из фоторезиста, и образуется инденкарбоновая кислота. Инденкарбоновая кислота становится гидрофильной и легко удаляется проявителем с щелочными свойствами. После экспонирования растворимость НХД-фоторезистов возрастает в 1000 раз.

Средняя чувствительность фоторезистов НХД составляет 75 мДж/см^2. Они обладают высокой плазмо- и термостойкостью. Спектральный диапазон НХД-фоторезистов — ближнее и среднее УФ-излучение с длиной волны 350...450 нм. Данный вид фоторезистов непригоден для литографии дальнего УФ-излучения, поскольку оно интенсивно поглощается новолачной смолой, что приводит к малой чувствительности фоторезиста.

Для того чтобы повысить чувствительность фоторезистов в дальнем УФ-излучении, проводят химическое усиление фоторезистов (*сенсибилизацию*). Сенсибилизаторы управляют фотохимической реакцией, протекающей при экспозиции, или модифицируют ее. Сенсибилизатор внедряется в фоторезист с поперечными связями структуры. При облучении дальним УФ-излучением (эксимерным лазером) возникает эффект *фотокатализа*, в течение которого наведенная кислотность усиливает каталитическую реакцию. В результате кислота разрушает поперечные связи полимера и засвеченный фоторезист лучше растворяется.

Фоторезист ПММА растворяется в таких органических растворителях, как ацетон, хлорбензол, анизол и т. п., и весьма устойчив к действию этилового и изопропилового спиртов. В качестве проявителя для ПММА используются смеси на основе изопропилового спирта с растворителями, способными вымывать молекулы, которые образуются при облучении ПММА. Чистый изопропиловый спирт используется для смывки проявителя и остановки процесса проявления.

В качестве растворителей для позитивных фоторезистов используют PGMEA (1-метокси-2-пропил-ацетат), этоксиэтилацетат, 2-метоксиэтил.

При использовании негативных фоторезистов удаляется засвеченная область (рис. 1.69).

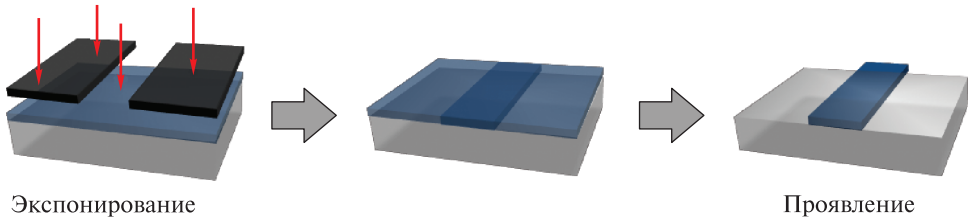


Рис. 1.69. Негативная литография

Негативные фоторезисты могут вступать в реакцию с кислородом воздуха, что приводит к уменьшению толщины пленки. Для проявления используют органические растворители. Негативные фоторезисты имеют лучшую адгезию и более высокую скорость проявления, чем позитивные.

Основой негативных резистов являются поливинилцинамат (эфир цинамольной кислоты), обеспечивающий актиночувствительность, и поливиниловый спирт, обеспечивающий пленкообразование. Обе части связываются кислородом. При поглощении квантов облучения наиболее слабые в молекулах связи CH–CH разрываются. Освободившиеся связи обеспечивают фотоструктурирование (поперечное сшивание в химически стойкую трехмерную сетку).

В настоящее время иногда используют негативные резисты на основе каучуков, их основой часто служит полимер полиизопрен (изопреновый синтетический каучук), фотоактивным компонентом выступает бисазид. При освещении он превращается в нитрен, который способствует связыванию полимерных цепей.

В качестве растворителей негативных фоторезистов применяют ксилен и толуол.

Недостатком негативных фоторезистов является меньшая разрешающая способность, чем у позитивных, поскольку образующаяся после проявления пленка негативного фоторезиста имеет больший клин травления (рис. 1.70, *а*), чем пленка позитивного фоторезиста (рис. 1.70, *б*).

При выборе фоторезиста необходимо учитывать следующие параметры:

– степень разложения при облучении;
– адгезию к подложке;
– скорость экспонирования, чувствительность;
– возникновение точечных дефектов;

– уровень загрязнения;
– разрешающую способность;
– тепловое оплавление.

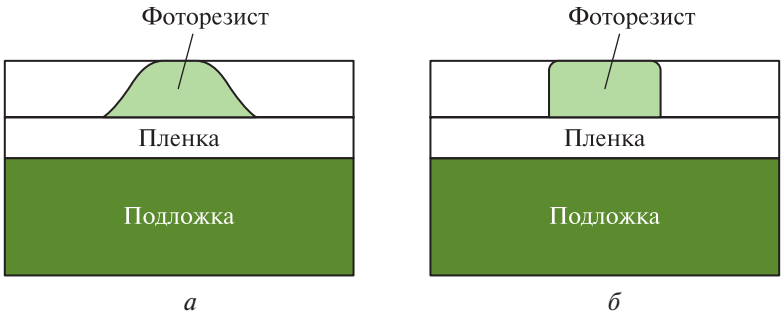


Рис. 1.70. Пленки фоторезистов после проявления:
а — негативного; *б* — позитивного

Разрешающей способностью определяется минимальный размер, который может быть создан в пленке фоторезиста (рис. 1.71) на конкретном технологическом оборудовании. Для лучшей разрешающей способности требуется более тонкая пленка фоторезиста. Однако для операции травления и ионной имплантации требуется более толстая пленка фоторезиста.

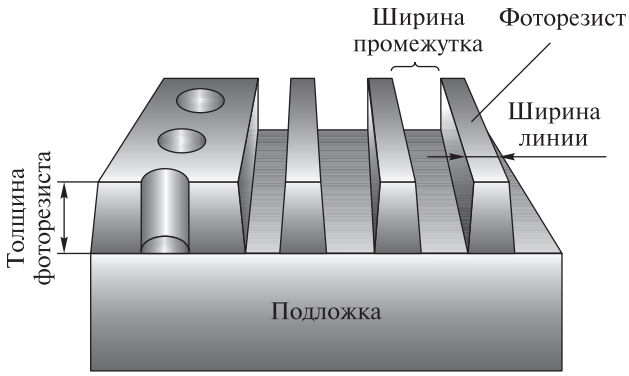


Рис. 1.71. Размеры, влияющие на разрешающую способность фоторезиста

Численно разрешающая способность равна максимальному количеству линий, воспроизводимых отдельно на 1 мм:

$$R = \frac{1000}{2a_{\min}},$$

где $a_{\min}$ — расстояние между соседними линиями, мкм (рис. 1.72).



Рис. 1.72. Определение разрешающей способности фоторезиста

При выборе фоторезиста необходимо учитывать его стойкость к термической обработке, нанесению тонких пленок, плазменной обработке и травлению, минимальную ширину линий, которую можно получить, оптимальную толщину, чувствительность, параметры термической обработки и проявления. Этот набор параметров противоречив, и создать идеальный фоторезист невозможно. В связи с этим состав фоторезистов подбирают для конкретного применения.

Необходимо учитывать, что все фоторезисты чувствительны к синей области видимого спектра, поэтому на производственных участках фотолитографии используется специальное освещение красным и желтым светом, поскольку его воздействие на фоторезист минимально.

1.7.3. НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Перед нанесением фоторезиста поверхность подложки необходимо очистить, поскольку наличие загрязнений снижает адгезию фоторезиста и увеличивает количество точечных дефектов. Очистку проводят в три этапа:

1) химическая отмывка;
2) промывка деионизированной водой;
3) сушка.

Сушку проводят при температуре около 100 °С, что позволяет удалить влагу с поверхности подложки и улучшить адгезию фоторезиста с поверхностью. Обычно эту операцию совмещают с операцией нанесения грунтовки.

Грунтовка (рис. 1.73) повышает адгезию фоторезиста к подложке. Основной реагент — гексаметилдисилозан (HMDS). Покрытие наносится паром.

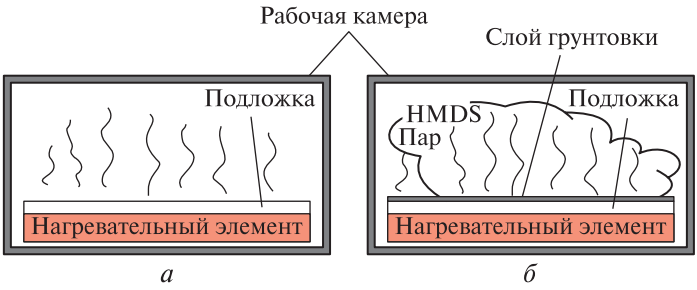


Рис. 1.73. Сушка подложки перед нанесением фоторезиста:
а — предварительная термообработка; *б* — нанесение грунтовки

Операция грунтовки проводится в камере дегидрационной сушки с прокачкой газа (рис. 1.74). Температура операции 200...250 °С, время операции — около 60 с.

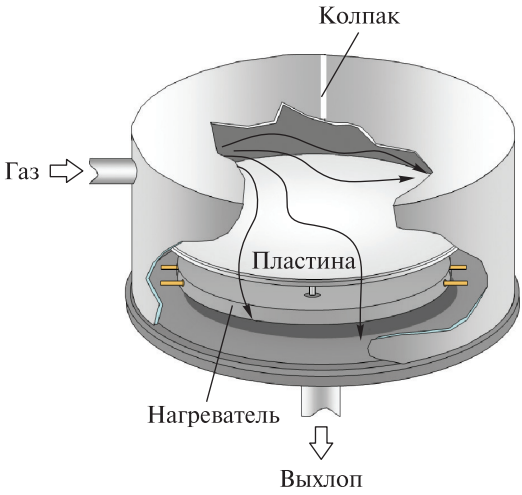


Рис. 1.74. Камера дегидрационной сушки с прокачкой газа

После нанесения грунтовки пластина медленно охлаждается водой.

Затем центрифугированием наносится фоторезист (рис. 1.75). Подложка крепится на установке с помощью вакуумной присоски. Жидкий фоторезист подается в центр подложки, его дозировка составляет около 5 мл. Диск начинает вращаться с высокой скоростью (3000...5000 об/мин). Центробежная сила расплющивает фоторезист, который равномерно распределяется по поверхности подложки. Для равномерности покрытия скорость должна быть постоянной. Толщина h покрытия определяется вязкостью фоторезиста и скоростью вращения диска:

$$h = A\sqrt[3]{\frac{\eta}{\omega}},$$

где A — коэффициент пропорциональности; η — вязкость фоторезиста; ω — угловая скорость вращения диска.

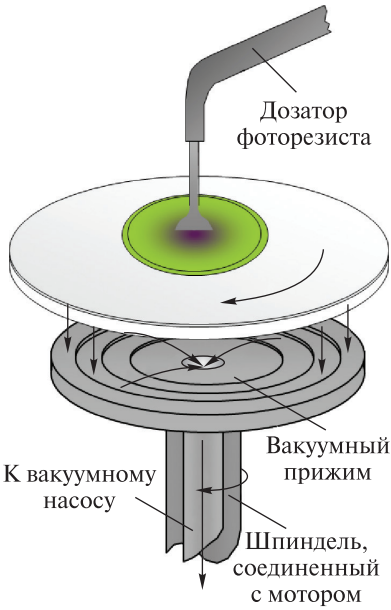


Рис. 1.75. Нанесение фоторезиста центрифугированием

В завершение операции проводится обрамление края кромки подложки с помощью растворителя.

1.7.4. СУШКА И ЗАДУБЛИВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

После нанесения жидкого фоторезиста его необходимо высушить. Процесс преобразования жидкой пленки в твердую заключается в физическом удалении растворителя из пленки без деградации резистных компонентов. Типичное значение концентрации растворителя — 20...40 % (в зависимости от толщины пленки).

Удаление растворителя позволяет:

– предотвратить загрязнение и прилипание маски;

– избежать вздутия фоторезиста вследствие выделения азота после экспозиции;

– улучшить адгезию фоторезиста;

– минимизировать скорость травления неэкспонированного фоторезиста;

– наносить несколько слоев фоторезиста;

– предотвратить образование пузырьков при последующих термических процессах (нанесение следующего слоя, сухое травление).

Необходим подбор оптимальных режимов параметров сушки. Так, для ПММА-фоторезиста необходима сушка при температуре выше 160 °С, для НХД-фоторезиста — при 100 °С. Длительность сушки — 1 мин на 1 мкм толщины фоторезиста. В качестве оборудования чаще всего используют конвекционные печи.

В процессе сушки концентрация воды в фоторезисте уменьшается, что может привести к увеличению скорости травления и контрастности фоторезиста. По этой причине перед экспонированием необходимо провести *регидрацию*. Ее проводят при комнатной температуре, влажность составляет 45...50 %, длительность — от 10 с до 10 ч в зависимости от толщины пленки.

После эскпонирования фоторезиста перед проявлением может проводиться послеэкспозиционная сушка фоторезиста (soft-baking). Она применяется в одном из следующих случаев:

– для завершения фотореакции, инициированной экспозиционированием (при использовании химически усиленных фоторезистов);

– при поперечном сшивании фоторезиста;

– для снятия механических напряжений, что улучшает адгезию и снижает подтравливание под фоторезистом;

– для компенсации стоячих волн при экспонировании, которые могут возникнуть в случае сильно отражающей подложки или термоактивированной диффузии инденовой кислоты.

Обычно послеэкспозиционную сушку проводят при температуре около 110 °С в течение 1...2 мин.

После проявления фоторезиста необходимо провести *задубливание* (hard-baking), которое позволяет:

– повысить термическую, химическую и физическую стойкость фоторезиста;

– восстановить адгезию фоторезиста к подложке;

– устранить дефекты (заплывание проколов);
– ограничить температуру задубливания (110...130 °С);
– предотвратить искажение изображения, обусловленное плавлением;
– избежать химической деструкции фоторезиста.

Выбор параметров задубливания — результат компромисса между стабилизацией фоторезиста и его плавлением.

Существует два основных режима термообработки. Для жидкостного травления через маску — мягкий режим при температуре 100...140 °С. При этом удаляется растворитель с границы раздела фоторезист—подложка и улучшается адгезия. Для сухого травления используются более высокие температуры и задубливание сочетают с процессом отверждения.

1.7.5. ВЗРЫВНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Прямая литография имеет существенный недостаток: необходимо использовать химическое или плазменное травление. Это может привести к несовместимости процесса травления с технологией и (или) материалами. Кроме того, она имеет ограничения по точности нанесения элементов при травлении. В случаях, когда требуется получить рисунок из материала, плохо подвергающегося травлению, используют *взрывную* (обращенную) литографию. При этом на нанесенный и проявленный фоторезист напыляется тонкий слой материала (обычно металла), из которого требуется сформировать рисунок.

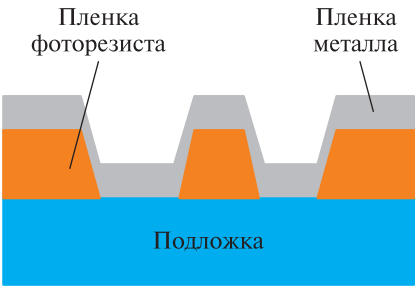


Рис. 1.76. Нанесение металла на пленку стандартного позитивного фоторезиста

При нанесении металла на пленку стандартного позитивного фоторезиста (рис. 1.76) пленка фоторезиста имеет положительный угол наклона, на ее боковых стенках осаждается металл и ее трудно удалить. При взрывной литографии используются специальные фоторезисты, у которых экспонированная область сшивается при термической обработке и становится нерастворимой в проявителе.

Типовые операции, используемые при взрывной литографии, показаны на рис. 1.77.

Сначала проводят экспонирование фоторезиста через маску (рис. 1.77, *а*), затем — термообработку, в результате которой засвеченный участок становится нерастворимым (рис. 1.77, *б*). После этого проводят сплошное экспонирование фоторезиста без маски, в результате чего он, исключая ранее обработанный участок, становится растворимым (рис. 1.77, *в*). Затем фоторезист удаляют (рис. 1.77, *г*) и остается пленка с фоторезистом, имеющая отрицательный угол наклона. В результате при нанесении металла он не осаждается на боковые стенки фоторезиста (рис. 1.77, *д*), поэтому фоторезист можно

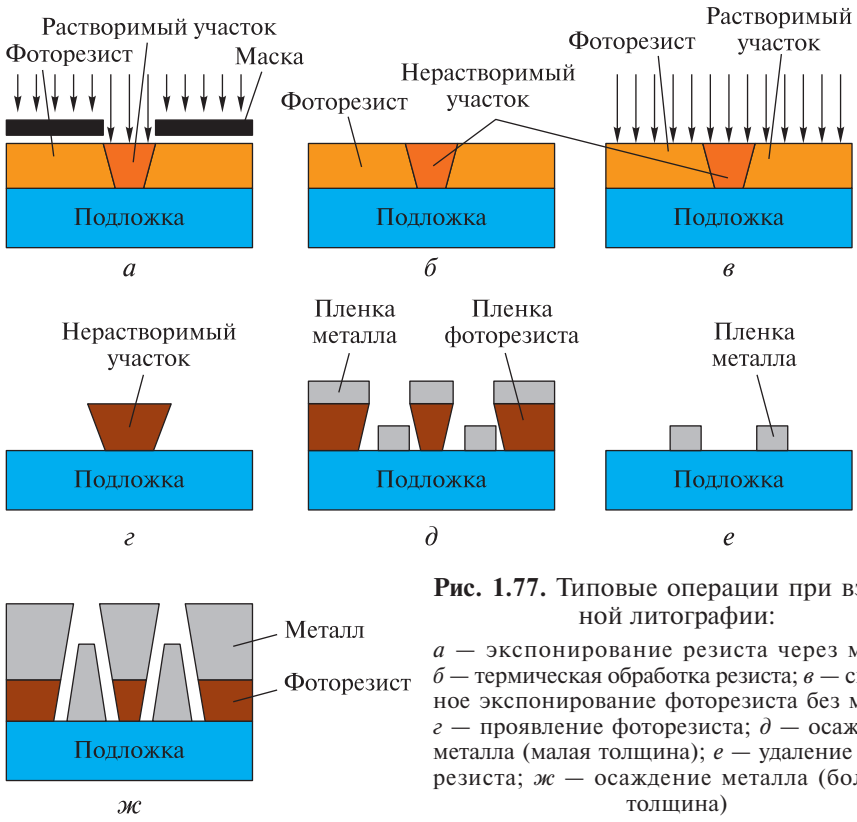


Рис. 1.77. Типовые операции при взрывной литографии:

а — экспонирование резиста через маску; *б* — термическая обработка резиста; *в* — сплошное экспонирование фоторезиста без маски; *г* — проявление фоторезиста; *д* — осаждение металла (малая толщина); *е* — удаление фоторезиста; *ж* — осаждение металла (большая толщина)

легко удалить (рис. 1.77, *е*) как при небольшой толщине металла (см. рис. 1.77, *д*), так и при большой (рис. 1.77, *ж*).

При взрывной литографии необходимо проводить дополнительную термообработку (reversal bake). Перед этим нужно выдержать подложку в течение определенного времени для удаления азота, который скапливается в местах с пониженной адгезией.

Форма маски для проведения взрывной литографии определяется дозой экспонирования, температурой термообработки, временем термообработки и временем проявления.

1.7.6. ЭКСПОНИРОВАНИЕ

Экспонирование — освещение фотоактивным светом слоя фоторезиста на поверхности пластины для формирования в нем рисунка, соответствующего рисунку маски (рис. 1.78). Основная цель операции — воспроизвести рисунок фотошаблона, обеспечив совмещение последовательных слоев с заданной точностью. Для экспонирования применяется актиничное излучение с длиной волны в области спектральной чувствительности фоторезиста. После экспонирования необходимо проявление фоторезиста.

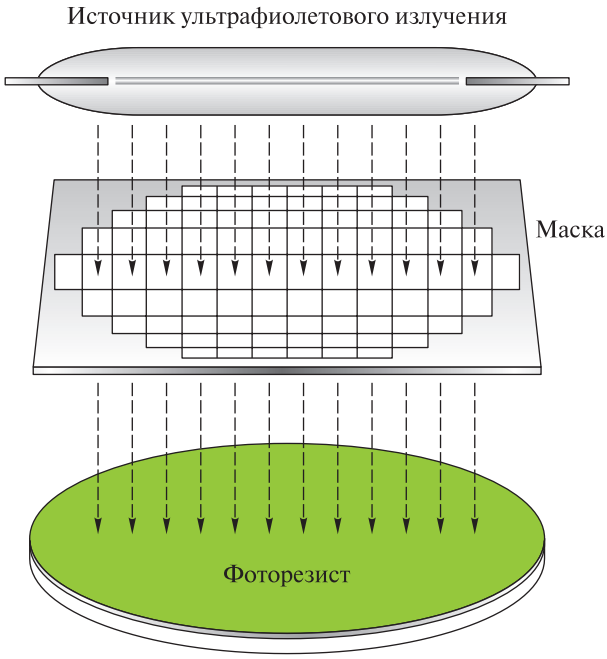


Рис. 1.78. Экспонирование

Операция экспонирования — ключевая и самая сложная в фотолитографии. При ее выполнении необходимо учитывать:

– предельное пространственное разрешение (зависит от используемого фоторезиста);

– точность совмещения слоев;

– производительность (число обработанных пластин в час).

Основные параметры процесса экспонирования:

– время экспонирования;

– доза актиничного излучения (плотность энергии);

– спектр излучения.

Время эскпонирования зависит от следующих параметров:

– толщины фоторезиста;

– длины волны излучения лампового источника;

– коэффициента поглощения фоторезиста;

– толщины остаточного фоторезиста;

– коэффициента отражения подложки;

– наличия усиливающего контраст слоя;

– интенсивности актиничного излучения.

В зависимости от способа переноса изображений различают следующие виды фотолитографии:

– контактная фотолитография (рис. 1.79, *а*);

– фотолитография с зазором (рис. 1.79, *б*);

– проекционная фотолитография с преломляющей оптикой (рис. 1.79, *в*);

– проекционная фотолитография с отражающей оптикой (рис. 1.79, *г*).

При *контактной* фотолитографии шаблон накладывают на пластину, фиксируют с помощью мягкого, жесткого или вакуумного контакта. Изображение переносится в масштабе 1:1.

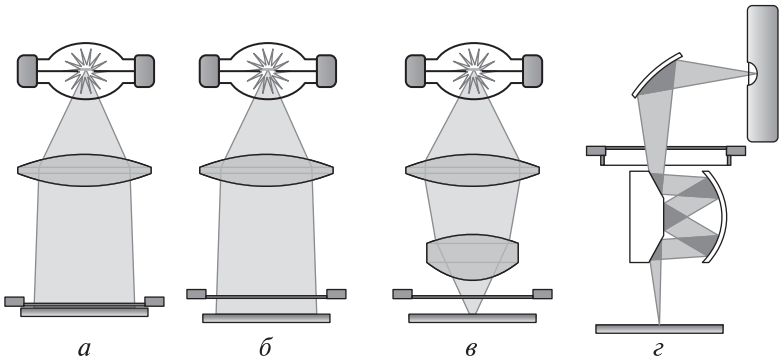


Рис. 1.79. Виды фотолитографии в зависимости от способа переноса изображений:

а — контактная; *б* — с зазором; *в* — проекционная с преломляющей оптикой; *г* — проекционная с отражательной оптикой

Достоинства контактной фотолитографии:

– низкая стоимость системы, поскольку нет необходимости в сложной проекционной оптике;

– пригодность для исследовательских применений.

Недостатки:

– ограничение максимального размера пластин;

– разрешение, значительно худшее, чем у современной проекционной фотолитографии;

– проблемы, обусловленные неудовлетворительным контактом вследствие загрязнений и неровности пластины;

– трудоемкость совмещения;

– повреждение шаблона.

Части этих недостатков лишена фотолитография *с зазором*, при использовании которой шаблон фиксируется на расстоянии около 10 мкм от пластины.

При *проекционной* литографии изображение с фотошаблона проецируется на подложку с помощью оптической системы. При этом возможно масштабирование изображения (рис. 1.80).

Для совмещения и экспонирования в настоящее время используются установки двух видов:

– литографический степпер;

– литографический сканер.

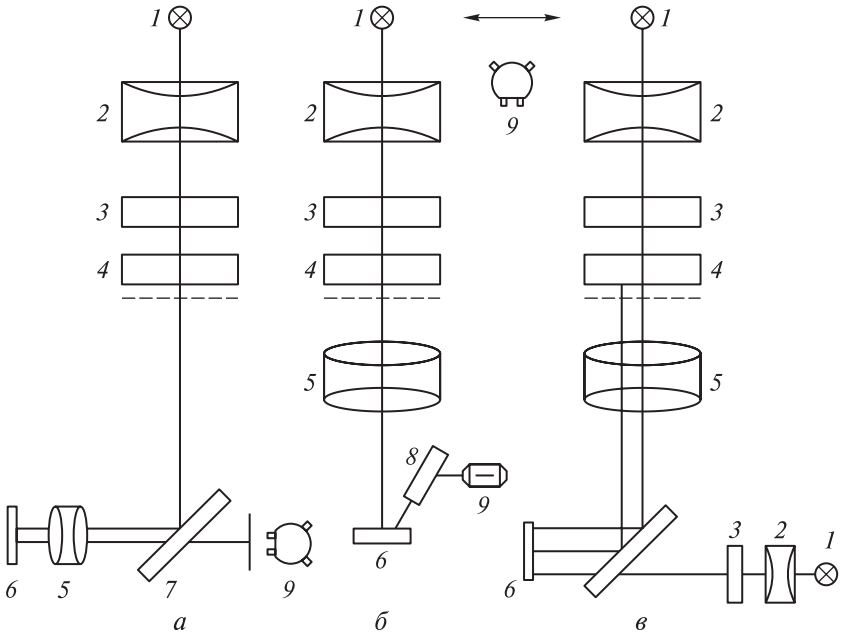


Рис. 1.80. Схемы проекционной фотолитографии:

а — одновременное проецирование и совмещение; *б* — совмещение в пространстве изображения; *в* — обратное изображение; *1* — источник света; *2* — конденсор; *3* — фильтр; *4* — фотошаблон; *5* — объектив; *6* — подложка; *7* — полупрозрачное зеркало; *8* — зеркало; *9* — микроскоп

Степпер — установка для фотолитографии, управляемая с компьютера. Является самым сложным и дорогостоящим оборудованием во всем цикле изготовления СБИС (рис. 1.81).

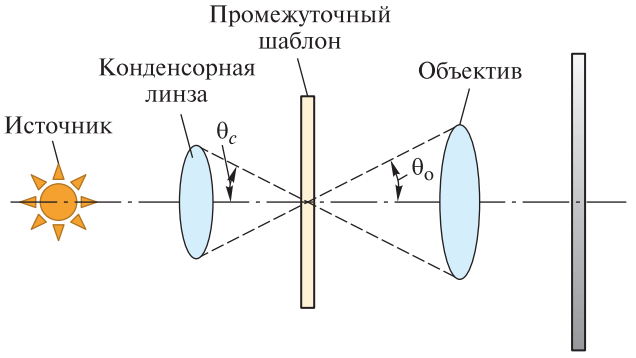


Рис. 1.81. Упрощенная оптическая система степпера:

θ_c, θ_o — половина апертурного угла конденсаторной линзы и объектива соответственно

Основные характеристики оптической системы:
– числовая апертура NA;
– когерентность σ;
– пространственное разрешение CD;
– глубина фокуса DOF.

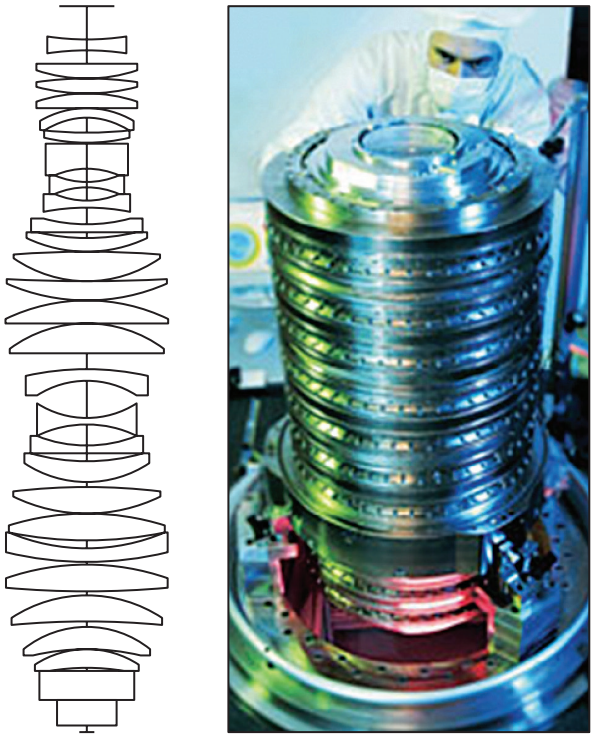
Числовую апертуру определяют по формуле

$$NA = n \sin \theta_o,$$

где n — кратность поляризации света; θ_o — см. рис. 1.81.

Увеличение значения NA приводит к увеличению разрешения, уменьшению глубины резкости, кроме того, при этом значительно повышаются требования к рельефу пластин, что дополнительно усложняет технологию, а необходимость увеличения диаметра линз объектива требует увеличения массы объектива.

Современные объективы степперов, позволяющих получить большую апертуру и устранить аберрации и искажения, имеют массу более 500 кг, сложны в изготовлении, поскольку включают в себя более 20 оптических элементов (рис. 1.82), и очень дорогостоящи. Кроме того, они оптимизированы на



а *б*

Рис. 1.82. Проекционные линзы объектива степпера:
а — схема; *б* — внешний вид

узкую часть спектра. Оптическая система дает возможность уменьшать изображение, перенося его в масштабах 5:1 и 10:1.

Когерентность определяют по формуле

$$\sigma = \frac{\sin\theta_c}{\sin\theta_o}.$$

Оптимальное значение когерентности для изображения линий составляет 0,6...0,8, для контактных окон — 0,3...0,5.

Пространственное разрешение

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA},$$

где k_1 — константа оптической системы; λ — длина волны актиничного излучения.

Глубина фокуса

$$DOF = \pm k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2},$$

где k_2 — константа оптической системы.

Существует несколько факторов, которые ограничивают разрешение литографических процессов. Среди них:

– искажения в проекционной системе;
– астигматизм, кома, искажения, хроматические и сферические аберрации;
– контраст фоторезиста;
– соотношение глубины фокуса и толщины фоторезиста;
– эффект близости;
– стоячие волны в пленке фоторезиста.

Следует иметь в виду, что экспозиция всей пластины за один раз затруднительна, поскольку:

– необходима высокая однородность излучения;
– требуются плоскостность пластины и точная настройка фокуса;
– невозможно совмещение за один раз всей пластины при размерах пластин 200...300 мм и субмикронном разрешении.

В связи с этим на современном литографическом оборудовании (степперах и сканерах) применяются методики последовательного экспонирования.

При экспонировании на степпере происходит последовательное засвечивание модуля, содержащего один или несколько кристаллов (рис. 1.83). В современных степперах размер сетки поля составляет 5...20 мм, в результате чего в модуль попадает максимум четыре микросхемы. Обход пластины осуществляется по змейке. Изображение с фотошаблона переносится в масштабе 5:1.

Литографические *сканеры* обеспечивают перенос изображения засветкой через щелевую апертурную диафрагму при одновременном синхронизированном движении шаблона и пластины относительно проекционной системы (рис. 1.84). Скорость пластины больше скорости шаблона в число раз, соответствующее масштабу объектива.

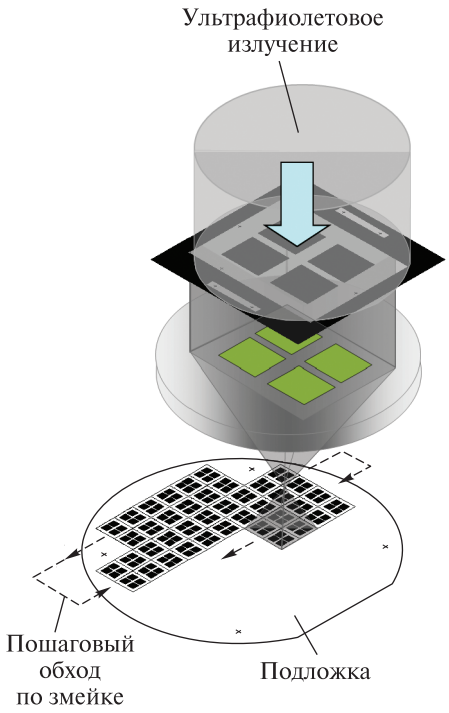


Рис. 1.83. Экспонирование на степпере

Диаметр современных пластин 200...300 мм, каждая пластина содержит сотни микросхем. Для последовательного экспонирования требуется прецизионная система перемещения подложки или линза (рис. 1.85).

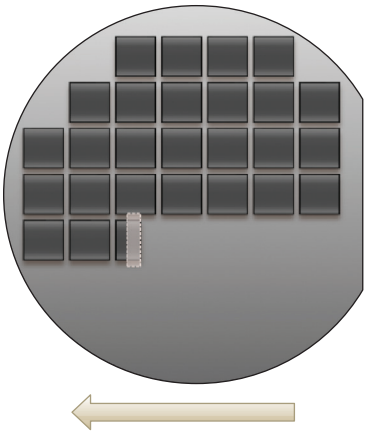


Рис. 1.84. Перенос изображения на сканере

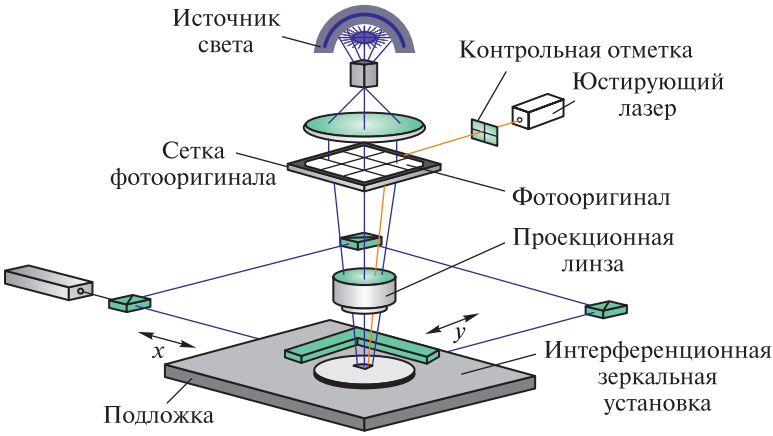


Рис. 1.85. Схема системы совмещения

При этом необходимо обеспечить нанометрическую точность. Контроль положения подложки осуществляется лазерной интерферометрией.

Рентабельность литографической установки определяется ее производительностью. Современные установки позволяют проводить экспонирование от 30 до 200 пластин/ч.

1.7.7. ИСТОЧНИКИ АКТИНИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Выделяют четыре вида актиничного излучения, используемого для фотолитографии (рис. 1.86):

1) дальнее УФ-излучение (DUV), менее 122...200 нм;
2) среднее УФ-излучение (MUV), 200...300 нм;
3) ближнее УФ-излучение (NUV), 300...400 нм;
4) видимая область, 400...450 нм.

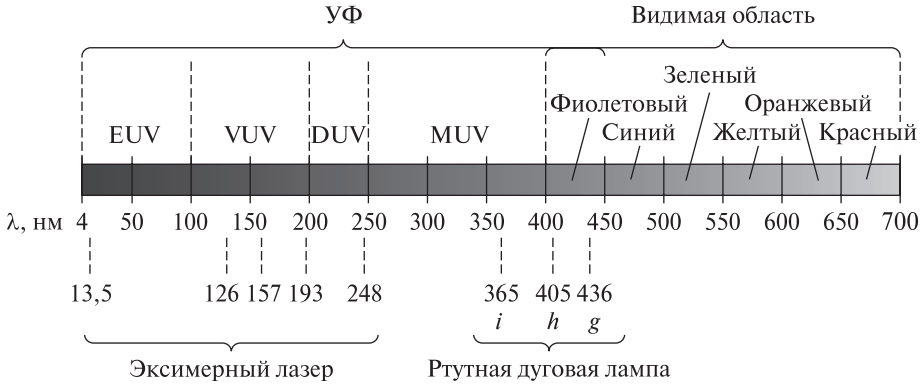


Рис. 1.86. Источники актиничного излучения для фотолитографии в зависимости от длины волны

Основным источником актиничного излучения для ближнего (длина волны 300...400 нм) и среднего УФ-излучения (200...300 нм) являются ртутные дуговые лампы высокого давления, для дальнего УФ-излучения (122...200 нм) — ртутные дуговые лампы. Они являются мощными источниками, которые излучают из малого объема светящегося тела (несколько миллиметров в диаметре). Их общая мощность 100...2000 Вт, но большая часть — тепловое излучение и видимый свет, которые отфильтровываются. При этом энергия, необходимая для засвечивания одного кадра, составляет более 1,5 Вт.

Обычно используется только одна из полос линейчатого спектра лампы: *g*-линия — 435,83 нм, *h*-линия — 404,65 нм или *i*-линия — 365,48 нм. Каждая из этих линий несет не более 2 % общей энергии излучения дуговой лампы.

Для получения среднего и дальнего ультрафиолетового излучения используются эксимерные лазеры. Эксимер (excimer) — сокращенная форма понятия «возбужденный димер» (excited dimer), означает комплекс из двух атомов — инертного газа и галогена, который может существовать только в возбужденном состоянии. Неустойчивая молекула образуется в результате газового разряда. Эксимерные лазеры генерируют импульсы длительностью 5...20 нс с частотой повторения до 4000 Гц и энергией до 20 Вт. Их достоинство — большая эффективность в осветительных системах литографических степперов и сканеров.

Характеристики используемых в микроэлектронике эксимерных лазеров приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Характеристики используемых в микроэлектронике эксимерных лазеров

Тип эксимерного лазера	Тип ультрафиолетового излучения	Длина волны, нм
XeF	Среднее	351
XeCl		308
XeBr		282
KrF	Дальнее	248
ArF		193
F2		157

Главным недостатком эксимерных лазеров является их высокая стоимость.

1.7.8. ФОТОШАБЛОНЫ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Фотошаблон для полупроводниковых структур — это стеклянная пластина с нанесенным на ее поверхность маскирующим слоем — покрытием, образующим трафарет с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками (рис. 1.87). Для изготовления микросхем одного типа требуется несколько разных фотошаблонов.

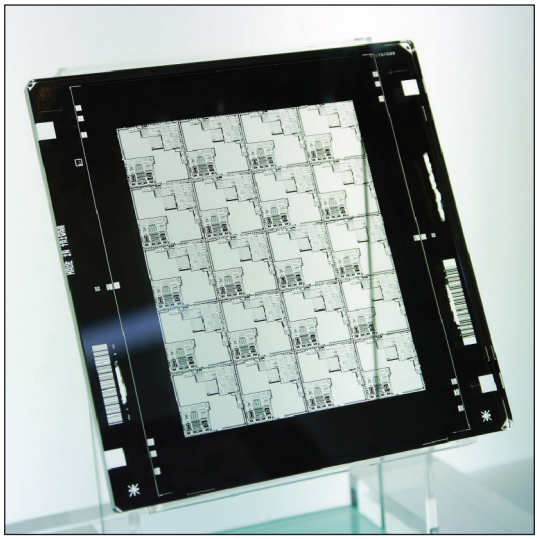


Рис. 1.87. Пример фотошаблона полупроводниковой структуры

К фотошаблонам для производства полупроводниковых структур предъявляется комплекс требований, и в первую очередь следующие:

– оптическая плотность маскирующего материала — не менее 2,0;

– толщина маскирующего материала — не более 100 нм;

– отражательная способность маскирующего материала — не выше 15 %;

– неплоскостность — от единиц микрометров до десятков микрометров (для разных классов фотошаблонов);

– микродефектность — около 0,1 $см^{-2}$;

– краевая четкость рисунка — не ниже 0,1 мкм для элементов изображения размером менее 1 мкм;

– большое число идентичных изображений (до 20 тыс.).

Высокая точность соблюдения размеров элементов и шага между элементами, точность размеров и шага определяются необходимостью последовательного совмещения фотошаблонов комплекта.

В полупроводниковой технологии в 90 % случаев используется не один фотошаблон, а комплект из многих (до 20) фотошаблонов, степень совмещаемости которых целиком зависит от указанной точности.

Эмульсионный фотошаблон теряет качество после 20 операций контактной печати, металлизированные, в частности хромовые, фотошаблоны обладают гораздо большей (по некоторым данным, в 3000 раз) износоустойчивостью, нежели эмульсионные.

При использовании любого фотолитографического метода — контактного, проекционного, метода сканирующего луча — необходим некоторый шаблон, образец, содержащий информацию о размерах, расположении, конфигурации и т. д. получаемых изображений.

Прежде чем произвести экспонирование, необходимо выполнить совмещение, т. е. добиться точной ориентации фотошаблона относительно подложки, в которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии. Например, фотошаблон, несущий рисунок эмиттерных областей, должен быть точно ориентирован относительно пластины, в которой уже сформированы области базы будущего транзистора. Процесс совмещения включает три этапа:

1) предварительная ориентация подложки по базовому срезу, обеспечивающая на границах модулей групповой пластины кристаллографическую плоскость, наивыгоднейшую с точки зрения качества разделения подложки на кристаллы;

2) предварительное грубое совмещение по границам крайних модулей, имеющее целью исключить разворот пластины и фотошаблона относительно вертикальной оси z;

3) точное совмещение, исключающее смещение рисунков фотошаблона и пластины по осям x и y.

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоев (рис. 1.88). Совмещение считается выполненным,

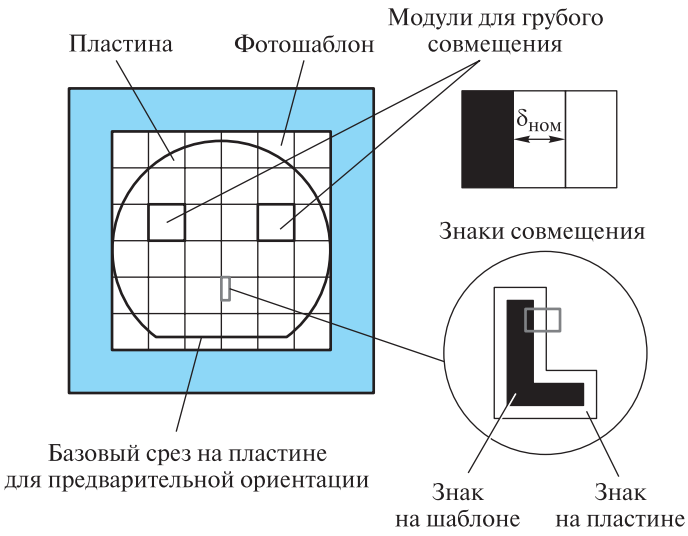


Рис. 1.88. Расположение знаков совмещения

если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор.

Минимальный зазор между знаками (рис. 1.89) определяют по формуле

$$\delta_{ном} = \delta_{min} + \Delta_и + \frac{\Delta_ш + \Delta_п}{2},$$

где $\delta_{min} = 200/Г$ (Г — кратность микроскопа); $\Delta_и$ — абсолютная предельная погрешность фиксации изображения на установке совмещения и экспонирования; $\Delta_ш$ — абсолютная предельная погрешность знака на шаблоне; $\Delta_п$ — абсолютная предельная погрешность знака на пластине.

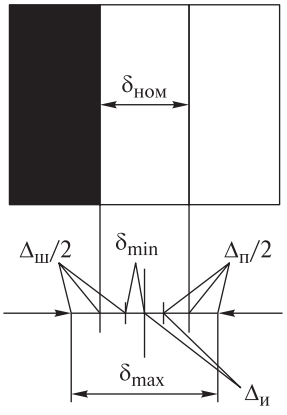


Рис. 1.89. Определение номинального зазора $\delta_{ном}$ между знаками

Абсолютную предельную погрешность совмещения определяют как

$$\Delta_с = \delta_{max} - \delta_{min} = \Delta_и + \Delta_ш + \Delta_п.$$

Одним из важных критериев при разработке реперных знаков (знаков совмещения) является их *уникальность* — рисунок реперного знака должен быть уникальным в некоторой области фотошаблона и подложки. Могут использоваться различные варианты реперных знаков.

Поскольку в настоящее время применяются установки автоматического совмещения, основанные на системах технического зрения, на качество и повторяемость процесса совмещения наибольшее влияние оказывают следующие факторы:

– конфигурация реперных знаков;
– контрастность и фокусировка изображения фотошаблона и подложки;
– повторяемость рисунка;
– свободный обзор подложки через фотошаблон.

От сочетания этих факторов зависит возможность выполнения автоматического совмещения, а также его скорость и точность. Система автоматического совмещения может находить заданные области изображения фотошаблона и подложки только в том случае, если эти изображения имеют достаточную контрастность. С наименьшей погрешностью совмещение выполняется только при наиболее точной передаче оттенков серого и границ изображения. Конечно, система технического зрения сможет распознать и не очень точные и контрастные реперные знаки, но тогда процесс совмещения будет выполняться дольше и менее точно, что приведет к снижению производительности и выхода годных.

Ограничением для получения минимальных размеров с помощью фотолитографии служит дифракция света. Минимальный размер определяется длиной волны используемого излучения. Длина волны видимого излучения 0,35...0,70 мкм, ультрафиолетового излучения — 0,1...0,3 мкм. Таким образом, использование УФ-излучения позволяет получить с помощью фотолитографии минимальную ширину линии $D = 0{,}1$ мкм. Для этого нужна проекционная фотолитография и тщательно спроектированная и изготовленная ультрафиолетовая оптика. Получить $D < 1$ мкм с помощью контактной фотолитографии практически невозможно вследствие размывания границы тени от фотошаблона.

Проблемы, возникающие при использовании проекционной фотолитографии:
– абберации оптической системы;
– необходимость обеспечения жесткости конструкции;
– необходимость в устранении вибраций;
– тепловое расширение маски и ИМС.

Высокая точность совмещения возможна, когда температура фотошаблона (маски) и обрабатываемого объекта (подложки) различается не более чем на 0,01 °С.

1.7.9. ПРОБЛЕМЫ ФОТОЛИТОГРАФИИ

У литографических процессов, в которых используется актиничное излучение, существует физическое ограничение: минимальный размер элемента определяется длиной волны используемого излучения. В результате формирование рисунка на поверхности усложняется, когда его размер оказывается меньше длины волны экспонирующего излучения. Несмотря на то что законы волновой оптики не запрещают формирование деталей с таким разрешением, при указанных размерах линейная оптика заменяется на более сложную дифракционную, требующую большей точности при всех операциях и более дорогостоящую.

В результате приходится использовать маски, рисунок которых вычислен с учетом волновых свойств излучения, для того чтобы добиться большего разрешения или меньших искажений при данной длине волны. Первые программы, позволяющие проводить подобные вычисления, были написаны в начале 1980-х гг. и использовались лишь для оптимизации рисунка маски. Однако в 1998 г. в связи с переходом на первый технологический процесс с технологической нормой меньше длины волны (180 нм) возросшая мощность компьютеров позволила использовать более точные алгоритмы и модели. Для современных технологических норм требуются тысячи процессоров и недели расчетов, чтобы вычислить рисунки для десятков масок самых сложных ИМС.

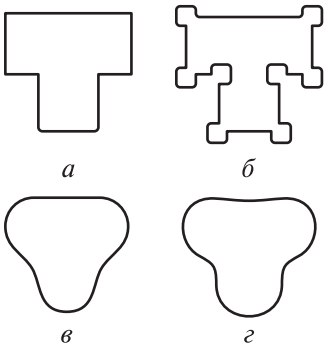


Рис. 1.90. Коррекция эффекта оптической близости:

а — исходная топология; *б* — модифицированная топология; *в* — топология, искаженная вследствие эффекта оптической близости; *г* — итоговая топология после коррекции

В первую очередь к искажениям топологии приводит эффект оптической близости — ОРС (рис. 1.90), в результате которого вследствие дифракции форма элементов при переносе изображений искажается. Топологический рисунок шаблона заранее модифицируют таким образом, чтобы дифракционные искажения модифицированного элемента приводили к реальному переносу на маску фоторезиста слоя, максимально приближенного к требуемому топологическому рисунку. При дифракционных ограничениях проекционной системы топология (рис. 1.90, *а*) переносится на слой фоторезиста с искажениями (рис. 1.90, *в*). При введении специальных дополнительных элементов топологии (serif) (рис. 1.90, *б*) форма приближается к исходной (рис. 1.90, *г*). Коррекция топологии осуществляется в САПР по специальной программе.

Дифракция при литографии (рис. 1.91) возникает вследствие волновой природы света. Кроме того, волна преломляется (рассеивается), что

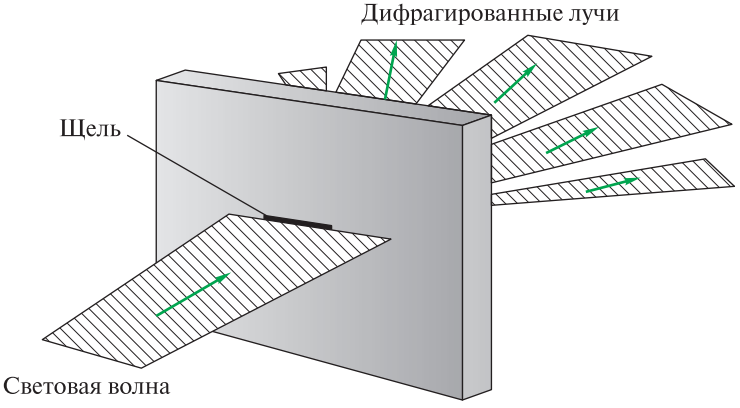


Рис. 1.91. Дифракция световой волны при прохождении сквозь щель

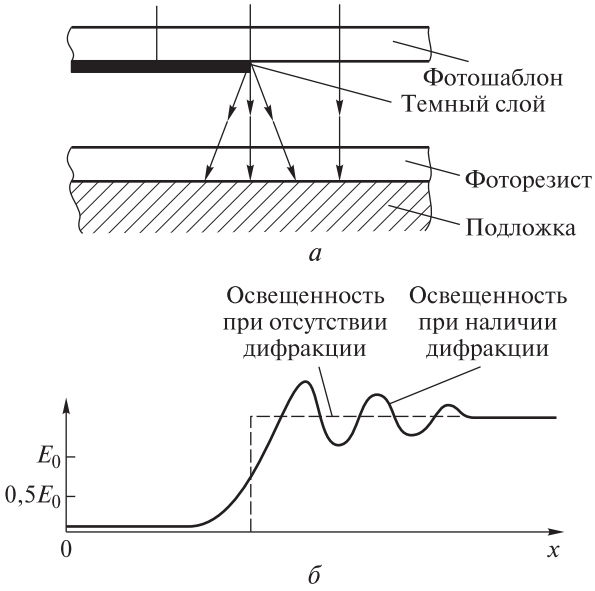


Рис. 1.92. Неравномерность засвечивания резиста вследствие преломления (рассеяния) излучения:

а — ход лучей; *б* — распределение освещенности в фоторезисте; E_0 — энергия, необходимая для засвечивания фоторезиста

приводит к неравномерной плотности освещения, а это, в свою очередь, ведет к неравномерности засветки фоторезиста (рис. 1.92). Результатом может стать «размытость» проявленного рисунка.

Кроме того, искажения топологии могут возникать в результате дифракции на углах и переотражения от обратной стороны маски, что приводит к дополнительному (неправильному) засвечивания фоторезиста (рис. 1.93).

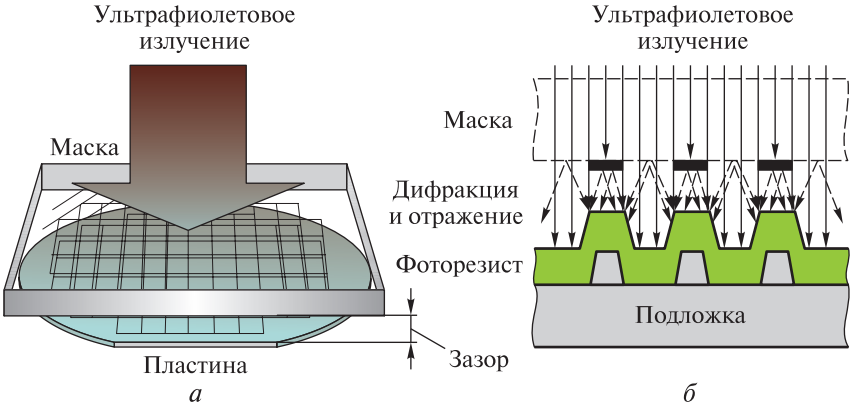


Рис. 1.93. Дифракция на границе и переотражение поверхности при фотолитографии на микрозазоре:

а — экспонирование с зазором; *б* — дифракция и переотражение

Решением указанной проблемы является сбор дифрагированного света линзой (рис. 1.94). Кроме того, дифракцию можно уменьшить, уменьшая длину волны. Но все это приводит к удорожанию оборудования.

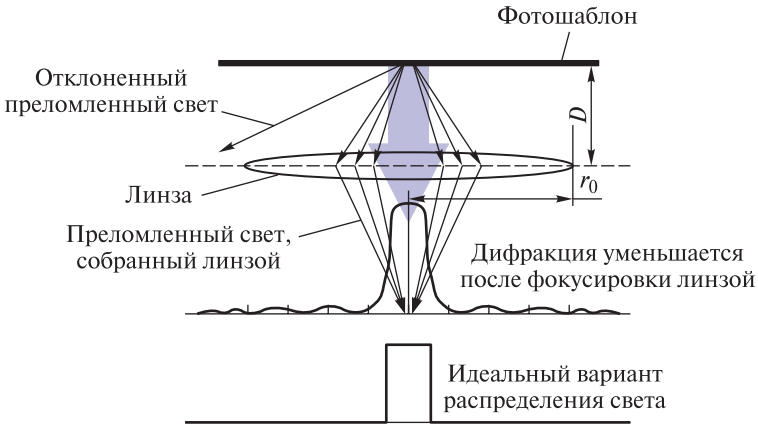


Рис. 1.94. Сбор дифрагированного света линзой

Повысить качество дифрагирования света можно, используя линзы с большей числовой апертурой (рис. 1.95). Значение NA линзы можно определить по формуле

$$\mathrm{NA} = \frac{2r_0}{D},$$

где r_0 — радиус линзы; D — расстояние от предмета до линзы.

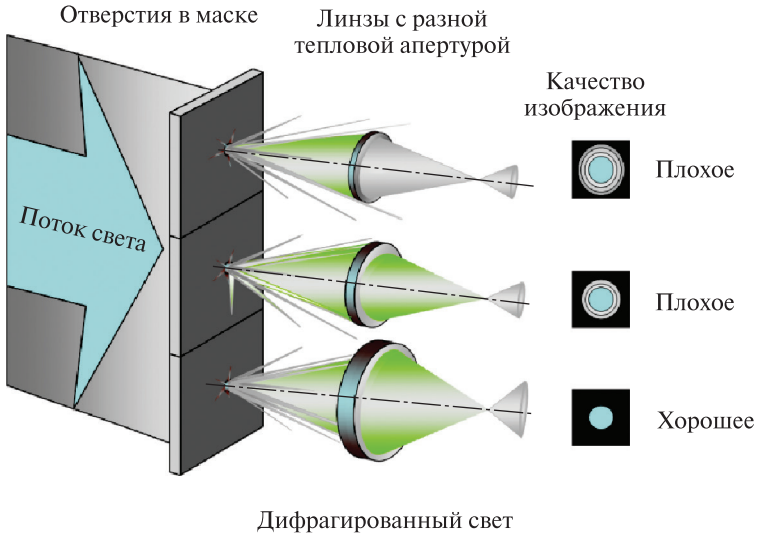


Рис. 1.95. Влияние числовой апертуры (NA) на дифрагирование света

Кроме того, к искажениям при фотолитографии приводит интерференция, которая может вызвать отражение или поглощение излучения. В результате возникает эффект *стоячей волны* (рис. 1.96), приводящий к переоблучению или недодержке фоторезиста и, соответственно, к уменьшению разрешения фотолитографии.

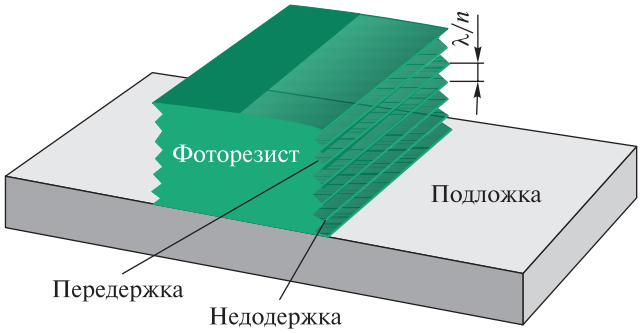


Рис. 1.96. Эффект стоячей волны на фоторезисте

Важным параметром является глубина фокуса (DOF). Для получения наибольшего разрешения центр фокуса должен располагаться в середине пленки фоторезиста, а глубина фокуса — превышать толщину фоторезиста (рис. 1.97). Для того чтобы увеличить глубину фокуса, нужно уменьшить числовую апертуру, но это приводит к уменьшению резкости. Практичнее уменьшить длину волны.

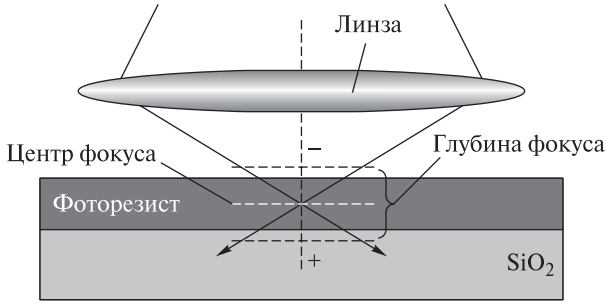


Рис. 1.97. Оптимальная глубина фокуса для получения наибольшего разрешения

Минимально достижимый стабильно воспроизводимый размер элемента при фотолитографии определяется разрешающей способностью литографического процесса. Есть несколько способов ее повысить.

1. Увеличить числовую апертуру NA линз. Однако использовать большие линзы слишком дорого и нерационально. Кроме того, увеличение значения NA приводит к уменьшению глубины фокуса DOF и к трудностям настройки оптики. Для неиммерсионных систем максимальное значение NA

составляет 0,93. Хотя теоретически его можно довести до 0,95, но это нерационально.

2. Уменьшить длину волны актиничного излучения. Но это ведет к необходимости разработать новые источник излучения, фоторезист и оборудование, что слишком затратно.

3. Понизить значение k_1 (константу оптической системы). Этого добиваются использованием внеосевого излучения, фазосдвигающих масок или иммерсионной литографии.

4. Использовать множественное шаблонирование.

5. Перейти к фотолитографии в экстремальном ультрафиолетовом излучении, рентгенолитографии, электронолитографии или ионолитографии.

1.7.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕОСЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФАЗОСДВИГАЮЩИХ МАСОК

Одним из способов повышения разрешающей способности литографического процесса является использование внеосевого излучения (OAI). Его суть заключается в вырезании с помощью диафрагм из осевого цилиндрического пучка излучения внеосевых трубчатых (кольцевых в сечении), дипольных (два полюса в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков освещения. В зависимости от угла наклона и длины волны при прохождении света через соседние элементы возникает разность фаз (рис. 1.98), которая обеспечит бóльшую четкость изображения на пластине и приведет к меньшей чувствительности от вариативности технологических параметров (например, вариативности профиля пластины). Величина этой разности фаз будет зависеть от угла наклона оси и длины волны актиничного излучения, а также определяться спецификой технологии, прежде всего шагом и размерами минимальных элементов.

Используемая со времени появления технологического процесса с технологической нормой 90 нм (2006 г.) технология фазосдвигающих масок (PSM) состоит в коррекции толщины отдельных «пикселей» маски для

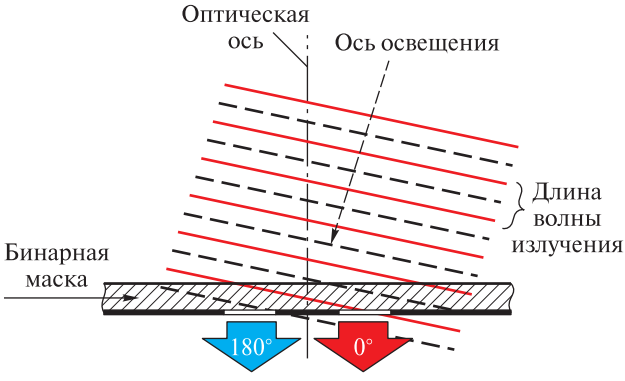


Рис. 1.98. Использование внеосевого излучения

изменения их прозрачности, что меняет фазу проходящего сквозь них света. Это позволяет, учитывая волновые свойства и не считаясь с длиной волны, экспонировать на фоторезисте рисунок, отдельные элементы которого либо усилены синфазным наложением волновых пиков, либо удалены противофазным. Это увеличивает разрешение, приближая значение параметра k_1 к оптимальному.

Сущность метода заключается в том, что в конструкцию шаблона вводятся фазосдвигающие элементы, которые локально изменяют фазу проходящего через шаблон актиничного света на заданную величину (обычно на π). В результате интерференционного взаимодействия дифрагированных на соседних элементах (краях) пучков актиничного света и взаимного гашения рассеянного излучения обеспечивается увеличение контраста формируемого изображения. В обычной бинарной маске (рис. 1.99, *а*) все прозрачные элементы имеют одну толщину и выполняются из одного материала. В результате световая волна приходит на подложку в одной фазе. Если линии на шаблоне расположены слишком близко, вследствие интерференции световые волны взаимно усиливаются и происходит засветка резиста, в том числе и там, где его должна закрывать маска. Для того чтобы избежать этого, определенные области делают толще (рис. 1.99, *б*) или тоньше (рис. 1.99, *в*). Сильный сдвиг фазы в такой чередующейся структуре приводит к перекрытию областей рассеяния от элементов изображения и их взаимному гашению, что увеличивает контраст изображения на пластине.

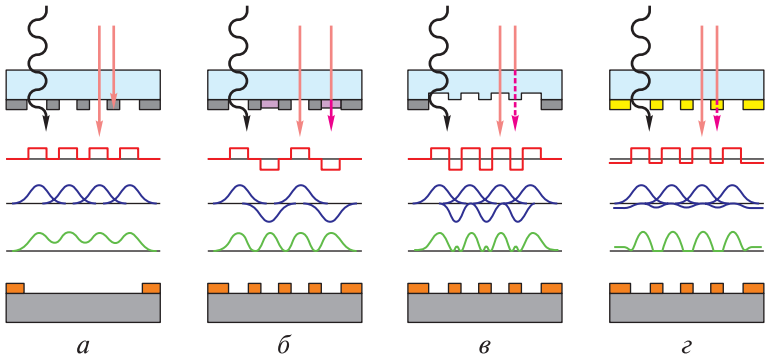


Рис. 1.99. Использование фазосдвигающих масок:
а — обычная бинарная маска; *б* — фазосдвигающая маска с нанесенным слоем; *в* — фазосдвигающая маска с протравленным слоем (маска Левенсона); *г* — маска с ослабленным фазовым сдвигом

Можно использовать маски с ослабленным фазовым сдвигом (рис. 1.99, *г*). При этом некоторые светоблокирующие части маски модифицируют таким образом, чтобы они пропускали некоторое количество света (обычно несколько процентов). Его интенсивности недостаточно для того, чтобы засветить фоторезист, но прошедшая сквозь них световая волна накладывается на волну, проходящую через прозрачные элементы, делая изображение более

контрастным. Хотя такие маски сложнее в производстве, чем другие фазосдвигающие маски, их более простая конструкция и удобство в эксплуатации обусловили их широкое применение в фотолитографии. Компания Intel, например, использует шаблоны с такими масками, начиная с технологической нормы 65 нм.

1.7.11. МНОЖЕСТВЕННОЕ ШАБЛОНИРОВАНИЕ

С 2006 г. только что внедренный технологический процесс с технологической нормой 65 нм уже не мог основываться лишь на вычислительной литографии, так как при длине волны 193 нм было недостаточно вычислительной мощности компьютера. Решением, основательно обновившим мировое производство ИМС, стало множественное шаблонирование, более известное по его простейшей реализации — *двойному шаблонированию* (рис. 1.100). Это семейство технологий позволяет снизить минимальный экспонируемый размер путем увеличения числа экспонирований. Как правило, в самых современных технологических процессах применяется несколько приемов из этого арсенала.

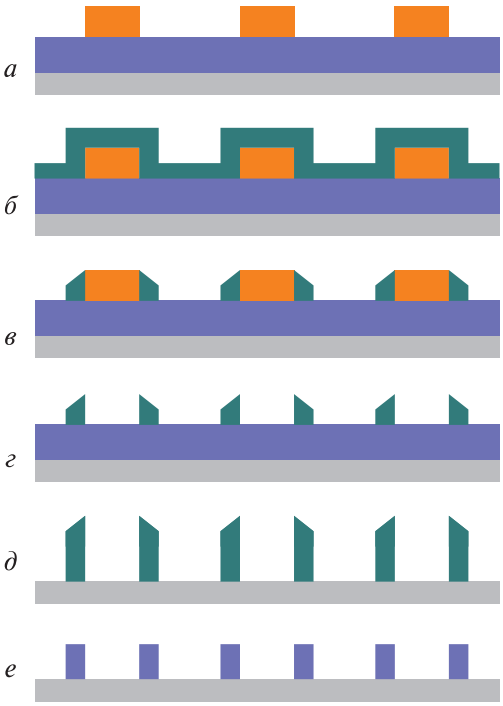


Рис. 1.100. Последовательность операций при двойном шаблонировании

Последовательность операций данного метода следующая. Сначала формируют первичный шаблон с помощью фоторезиста. Далее осаждают химическую маску. После ее травления формируют распорки, после чего первоначальный фоторезист удаляют. Затем травят нижележащий слой, после чего распорки удаляют.

Самосовмещеные распорки позволяют получить вдвое большее разрешение формируемого рисунка при той же технологической норме: вначале на боковые стенки фоторезиста налипает специальная химическая маска, используемая далее как финальный шаблон травления после удаления фоторезиста. Этот прием можно повторять, используя вторичный шаблон для изготовления третичного с вдвое бóльшим разрешением — насколько позволит химическая устойчивость материалов и повторяемость процессов.

Кроме того, можно использовать технологию двойного фотошаблонирования, которая заключается в декомпозиции фотошаблона. Сущность метода состоит в том, что элементы, которые расположены слишком близко друг к другу, разносятся на два разных фотошаблона (рис. 1.101). В результате расстояние между соседними линиями на каждом шаблоне становится больше критического, что позволяет получить их на кристалле.

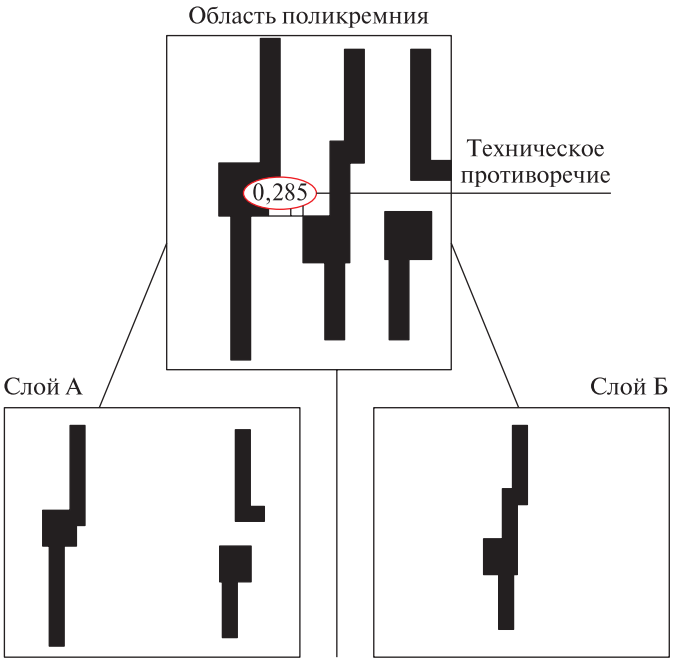


Рис. 1.101. Декомпозиция фотошаблона (технология двойного фотошаблонирования)

Кратное увеличение числа масок приводит к увеличению числа технологических операций, необходимых для формирования каждого критического слоя, а также обусловливает очень высокие требования к точности совмещения масок. Даже небольшое смещение при последующей операции может привести, например, к асимметрии истока и стока (относительно затвора) у всех транзисторов пластины.

1.7.12. ИММЕРСИОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Еще одним способом увеличения значения k_1 является иммерсионная (погруженная) литография (рис. 1.102). Она основана на том, что пространство между последней линзой и экспонируемой пластиной заполняется не воздухом, а жидкостью (в настоящее время — водой). Это улучшает разрешение на 30...40 % ввиду большего преломления жидкости, которое влияет на значение числовой апертуры NA, равное 1 для воздуха и 1,33 для воды.

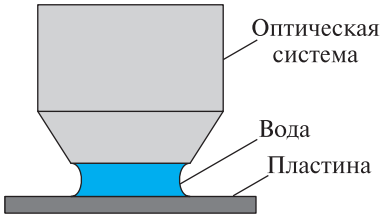


Рис. 1.102. Схема иммерсионной литографии

Первые «водные» сканеры появились в 2005 г., но технологические процессы с ними пришлось дорабатывать еще в течение года после внедрения на производстве до применения в массовом производстве. Компания Intel внедрила иммерсионную литографию вместо «сухой», начиная с технологической нормы 32 нм, а компания AMD — с 45 нм.

Предел разрешения степперов для иммерсионной литографии, работающих на длине волны 193 мм, с числовой апертурой 1,35 составляет 36 нм.

Тесты к лекции 1.7

1. ***Что приводит к увеличению разрешения литографическоо процесса?***

а) уменьшение длины волны актиничного излучения;

б) уменьшение значения числовой апертуры;

в) увеличение длины волны актиничного излучения.

2. ***Какое актиничное излучение используется в современной фотолитографии сверхбольших интегральных микросхем?***

а) ультрафиолетовое;

б) СВЧ-излучение;

в) гамма-излучение.

1.8. ЛИТОГРАФИЯ В СВЕРХЖЕСТКОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ИЗЛУЧЕНИИ И ДРУГИЕ ВИДЫ ЛИТОГРАФИИ

1.8.1. ФОТОЛИТОГРАФИЯ В СВЕРХЖЕСТКОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Существует ряд факторов, сдерживающих использование литографии в дальнем УФ-излучении (DUV):

– SiO_2 сильно поглощает УФ-излучение, когда длина волны меньше 180 нм;

– поглощение УФ-излучения не позволяет использовать стеклянную оптику и шаблоны;

– 157-нанометровая фотолитография F_2-лазером плавит SiO_2.

Дальнейшее снижение длины волны требует принципиально иного литографического оборудования и иных методов. Один из таких методов — литография в сверхжестком (экстремальном) УФ-излучения (EUV). Для нее используется актиничное излучение с длиной волны 12...14 нм, что более чем в 10 раз меньше минимальной длины волны для DUV-литографии. В результате можно без дополнительных ухищрений получать достаточно мелкие элементы на пластине. Для EUV-литографии используется не стеклянная, а отражательная оптика, обладающая низким значением числовой апертуры (NA = 0,24) и, следовательно, хорошей глубиной резкости, что позволяет получить высокое технологическое разрешение.

Типовая схема пошаговой сканирующей отражающей EUV-литографии (EUVL) приведена на рис. 1.103.

Источником актиничного излучения для установок EUV-литографии является неодимовый лазер (длина волны 1063 нм, продолжительность импульса 5 нс, частота следования импульсов 100 Гц). Фокусируя излучение на импульсной газовой струе ксеноновых кластеров, формируют лазерную плазму — источник актиничного излучения с длиной волны 10...25 нм.

Шаблоны для EUV-литографии не стеклянные, а отражательные (рис. 1.104). Они представляют собой подложку из кремния, на которой выращено 40...80 пар слоев молибдена или кремния атомарной толщины (рис. 1.105). В качестве поглотителя используется пленка из хрома. По подобной технологии выполняют и зеркала (рис. 1.106), покрытие которых состоит из 40 пар слоев молибдена или кремния. Их отражающая способность для актиничного излучения с длиной волны 13,5 нм составляет 70 %.

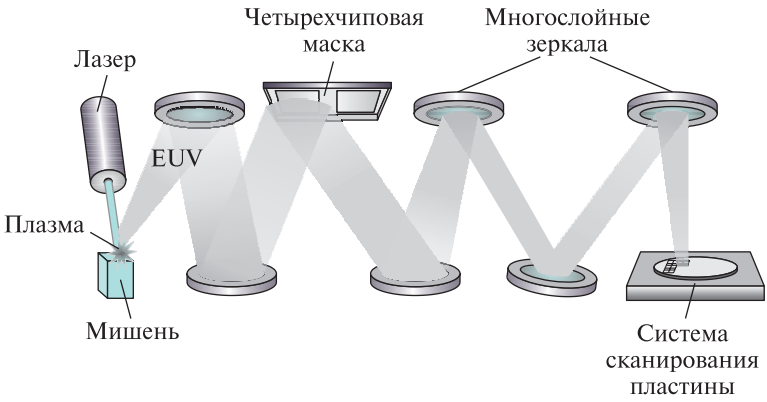


Рис. 1.103. Схема пошаговой сканирующей отражающей EUV-литографии

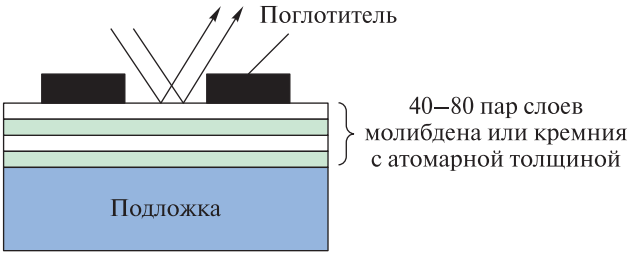


Рис. 1.105. Структура шаблона для EUV-литографии

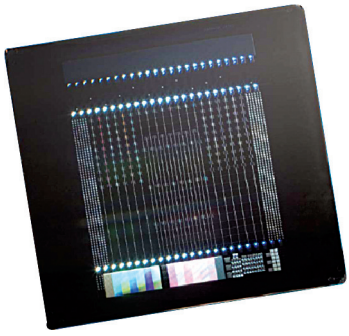


Рис. 1.104. Пример шаблона для EUV-литографии компании Intel (США)

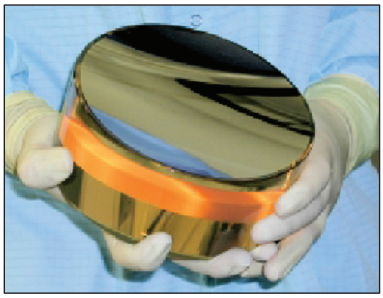


Рис. 1.106. Зеркало для EUV-литографии

Главный недостаток, ограничивающий использование EUV-литографии, — высокая стоимость оборудования, которое в настоящее время могут позволить себе иметь только две компании в мире — Intel и TCMG.

1.8.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Для формирования рисунка с помощью электронно-лучевой литографии (EBL) используется поток электронов с энергией 10...100 кэВ. Длина волны излучения электронов $\lambda = 0{,}05$ нм.

Пучок электронов, ускоренных до больших значений энергии, обладает волновыми свойствами. При этом длина волны электронного излучения очень мала по сравнению с длиной волны видимого излучения. Вследствие этого искажения, связанные с дифракцией, практически отсутствуют. Кроме того, электроны являются заряженными частицами, благодаря чему их можно разгонять в электростатическом поле, а также фокусировать с помощью электромагнитных линз.

Электронно-лучевая литография использовалась с 1957 г. для создания первых интегральных микросхем. В настоящее время ее применяют в основном для изготовления фотошаблонов, малых пилотных партий кристаллов и проведения исследований.

Существует две разновидности электронно-лучевой литографии:

1) проекционная (рис. 1.107);

2) сканирующая (рис. 1.108).

Особенностью *сканирующей* литографии является отсутствие шаблона: проводится последовательное экспонирование сфокусированным пучком. Главный недостаток метода — очень низкая скорость экспонирования. При этом размер пятна не ограничен дифракцией и обеспечивается большая глубина фокуса.

Для электронно-лучевой литографии обычно используют позитивные резисты, полученные на основе ПММА.

Электронно-лучевая литография имеет ряд недостатков:

– возникает эффект близости, вследствие чего отдельные линии и линии в массиве проявляются по-разному; в результате создается неоднородность рисунка при

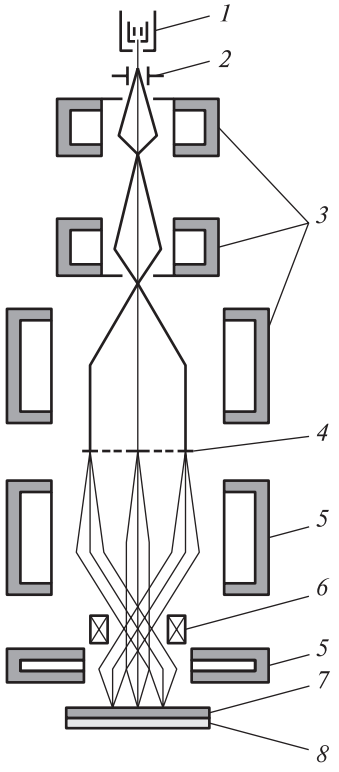


Рис. 1.107. Схема установки для проекционной электронно-лучевой литографии:

1 — электронная пушка; *2* — управляющий электрод; *3* — конденсорные линзы; *4* — шаблон; *5* — проекционные линзы; *6* — электронная линза; *7* — пластина со слоем резиста; *8* — подложкодержатель

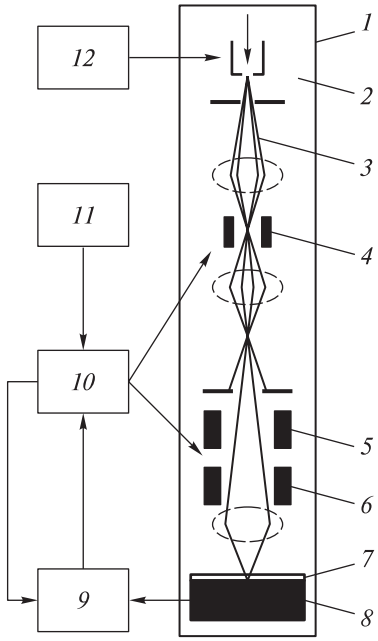


Рис. 1.108. Схема установки для сканирующей электронно-лучевой литографии:

1 — вакуумная камера; *2* — электронная пушка; *3* — электронный луч; *4* — ускоряющий электрод-модулятор (коммутатор) луча; *5*, *6* — система отклонения луча; *7* — слой резиста на подложке; *8* — подложка на подложкодержателе; *9* — блок механического перемещения подложкодержателя с регистратором положения; *10* — компьютерный блок управления; *11* — блок управления координатами *x*–*y* топологии рисунка шаблона; *12* — источник высокого напряжения

проявлении, которую трудно компенсировать;

– вследствие рассеяния электронов в резисте и подложке (рис. 1.109) появляется размытость рисунка;

– разная поглощающая способность высокоэнергетичных электронов в рисунке и подложке вызывает нагрев маски, что может привести к ее короблению;

– взаимодействие электронов между собой при большой плотности электронного тока вызывает расширение пространственного заряда в резисте, что приводит к снижению контрастности.

При использовании сканирующей электронно-лучевой литографии к указанным выше недостаткам добавляется малая производительность. Однако ее можно увеличить, формируя большое число малых независимо управляемых пучков. В 2008 г. компания Mapper Lithography (Нидерланды) выпустила установку для проведения сканирующей электронно-лучевой литографии с использованием пластин толщиной 300 мм с разрешением 22 нм и лучше. В ней задействовано более 10 тыс. пучков, данные для которых передавались по волоконно-оптической линии.

Для того чтобы увеличить контрастность изображения и снизить нагрев маски, в современной электронно-лучевой литографии заменяют традиционные шаблоны (поглощающие излучение) на маску SCALPEL, все элементы которой представляют собой мембраны, хорошо пропускающие электроны, но по-разному их рассеивающие (рис. 1.110).

Электроны, проходящие сквозь мембраны, рассеиваются под малыми углами, тогда как электроны, проходящие через область рисунка, рассеиваются под большими углами. Апертура, расположенная в обратной фокальной плоскости полевой оптической системы, пропускает электроны, рассеянные под малыми углами, и не пропускает электроны, рассеянные под большими углами, что приводит к формированию на подложке

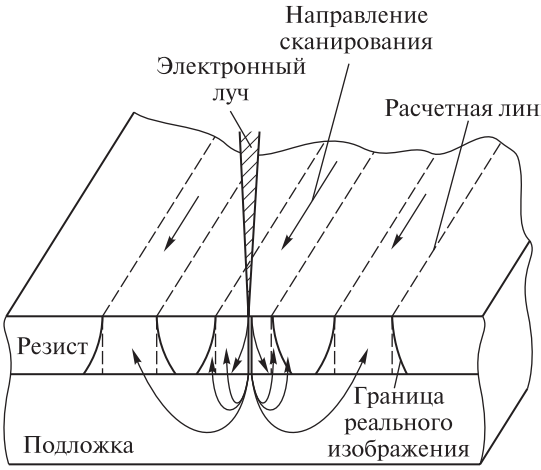


Рис. 1.109. Область реального засвечивания электронорезиста при экспонировании

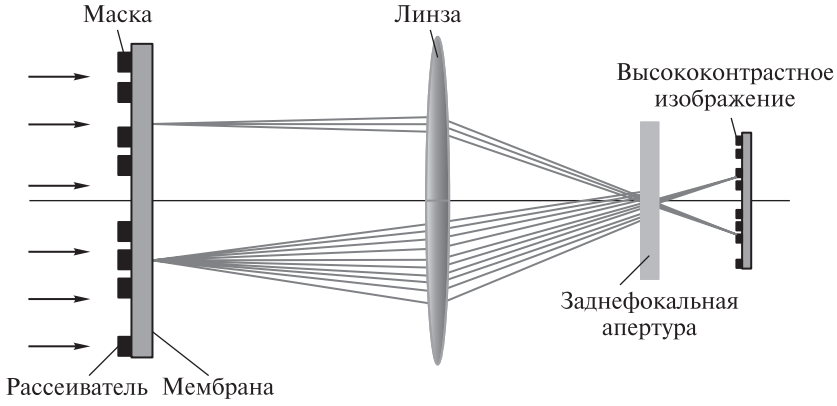


Рис. 1.110. Принцип работы с маской SCALPEL

высококонтрастного изображения. При этом в маске не происходит значительного поглощения электронного потока, что минимизирует тепловую нестабильность маски.

1.8.3. РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИЯ

Для рентгенолитографии используется коротковолновое, но слабоэнергетичное излучение (рис. 1.111). Разрешающая способность указанного метода составляет 10 нм. Рентгенолитография относится к контактным методам с зазором, который составляет около 10 мкм.

Вследствие малой длины волны (0,5...0,2 нм) в рентгенолитографии, как и в электронно-лучевой литографии, дифракция на элементах шаблона отсутствует. Но в отличие от электронно-лучевой литографии, нет влияния интерференционных эффектов в тонких слоях.

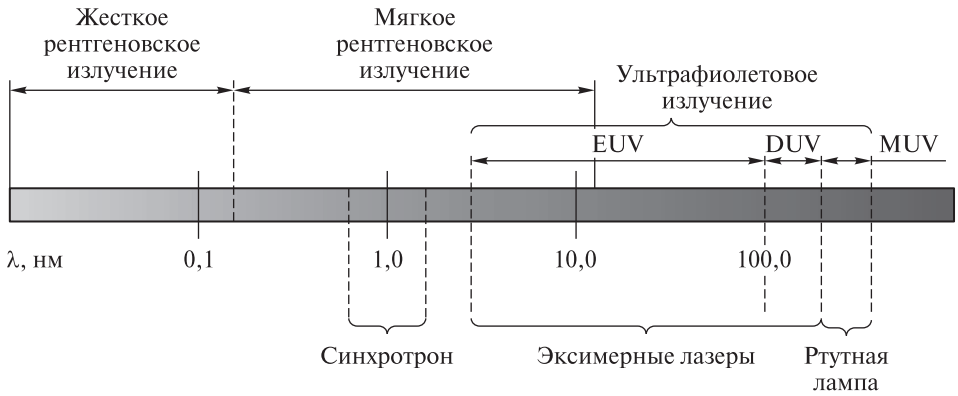


Рис. 1.111. Рентгеновское излучение

Общая схема установки для рентгенолитографии показана на рис. 1.112. Электронная пушка генерирует электронный пучок, фокусируемый на охлаждаемой водой мишени (часто используется палладиевая мишень). Напряжение на аноде составляет 25 кВ, потребляемая мощность 4...6 кВт. В результате анод испускает рентгеновские лучи с длиной волны 0,437 нм, которые через бериллиевое окно попадают в камеру экспонирования. Между шаблоном и подложкой устанавливается зазор около 10 мкм.

Рентгенолитография подобна фотолитографии с зазором, однако существуют две серьезные проблемы:

1) трудно найти мощный источник излучения;

2) сложно изготовить шаблоны.

Внедрению рентгенолитографии препятствует то, что изображение на подложке формируется в масштабе 1:1. Соответственно, необходимы альтернативные высокоразрешающие методы создания изображения на шаблоне.

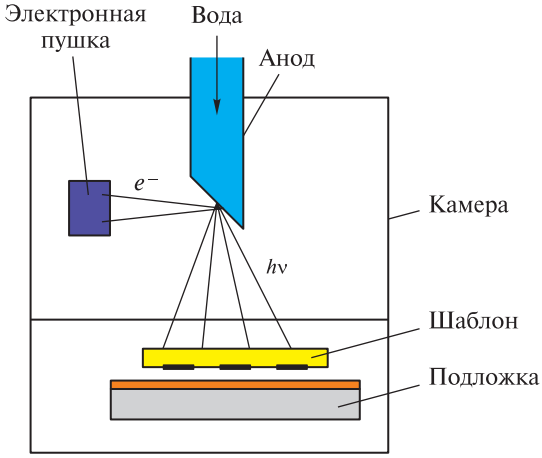


Рис. 1.112. Схема установки для рентгенолитографии

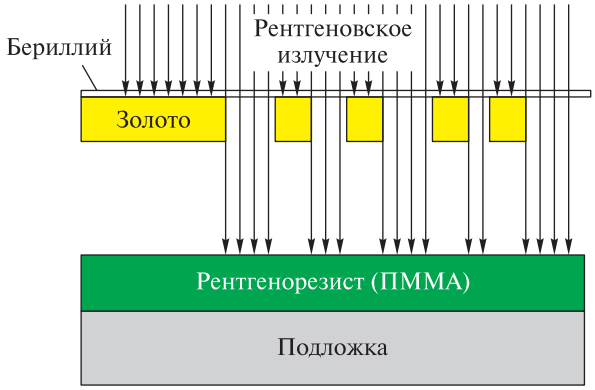


Рис. 1.113. Схема рентгенолитографии через бериллиевый шаблон

Существует несколько разновидностей шаблона для рентгенолитографии. В качестве поглотителя используется золото. Основу шаблона можно изготовить из бериллия (рис. 1.113), кремния (рис. 1.114), оксида SiO_2 и нитрида Si_3N_4 кремния (рис. 1.115).

В качестве резиста наиболее часто используют позитивные резисты на основе ПММА.

Одной из проблем рентгенолитографии является реализация источника актиничного излучения. Могут использоваться следующие источники:

– синхротрон;

– лазерно-плазменные источники;

– источники на основе сфокусированной плотной плазмы (DPF).

Чаще всего используют синхротрон, но нужно учитывать его особенности:

– синхротрон способен обеспечить работу 15 и более рентгеновских степперов, поэтому экономически выгоден только при массовом производстве;

– имеет большие размеры;

– рентгеновское излучение из синхротрона выходит по горизонтали, что требует вертикального размещения пластины и шаблона в степпере.

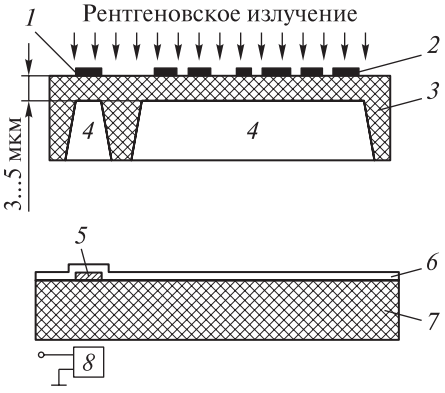


Рис. 1.114. Кремниевый шаблон для рентгенолитографии:

1, *5* — маркерные знаки; *2* — слой золота; *3* — кремниевый шаблон; *4* — окна в кремнии; *6* — резист; *7* — кремниевая пластина; *8* — детектор рентгеновского излучения

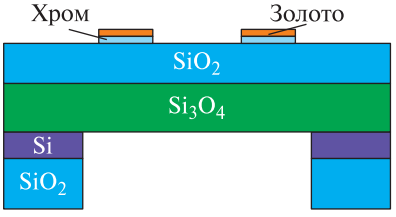


Рис. 1.115. Шаблон для рентгенолитографии

Недостатки рентгенолитографии:

– продолжительное время экспонирования (до 20 мин);

– дисторсия изображения на шаблоне вследствие механических напряжений в пленках золота;

– высокая стоимость шаблонов.

1.8.4. ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

При ионно-лучевой литографии (IBL) облучение резиста происходит потоком ионов. Длина волны излучения ионов составляет 0,05...0,10 нм.

Ионо-лучевая литография имеет ряд достоинств:

– меньшая подверженность ионных пучков влиянию паразитных электрических и магнитных полей;

– высокое разрешение, обеспечиваемое малой энергией и длиной пробега вторичных ионов менее 10 нм и отсутствием эффекта близости;

– отсутствие дифракции;

– возможность получать сильно коллимированные пучки благодаря электростатической фокусировке;

– высокая производительность благодаря большому току пучка и высокой чувствительности резистов к ионам;

– возможность безрезистной литографии.

Существует три разновидности ионно-лучевой литографии:

1) проекционная;

2) зондовая (сканирующая);

3) безрезистная.

Схема установки для проекционной ионно-лучевой литографии показана на рис. 1.116, для зондовой — на рис. 1.117.

В безрезистной литографии резист отсутствует. Как и при использовании зондового метода, проводят непосредственное формирование рисунка, совмещение, экспозицию и проявление, но, кроме этого, на той же установке выполняют прямое легирование и травление. Скорость травления зависит от концентрации примеси. Однако следует отметить очень низкую производительность подобных установок.

Ионы обладают бóльшим разбросом энергий, чем электроны, что требует специальных мер по уменьшению аберраций. Кроме того, вследствие большой массы ионов для их фокусировки используют электростатические линзы, электромагнитные линзы применяют только для юстировки и масссепарации ионов.

Для экспонирования обычно используют легкие ионы — протоны, ионы гелия. Более тяжелые ионы позволяют легировать подложку или создавать на ней тонкие слои новых химических соединений.

Источники ионов:

– дуаплазмотронный;

– жидкометаллический;

– газофазный с полевой ионизацией.



Рис. 1.116. Схема установки для проекционной ионно-лучевой литографии

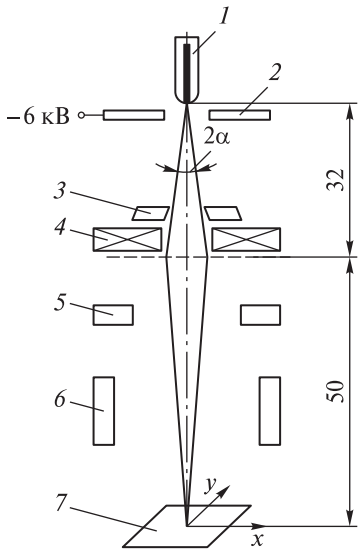


Рис. 1.117. Схема установки для зондовой ионно-лучевой литографии:
1 — источник ионов; *2* — эдектрод, вытягивающий электроны; *3* — вырезающая диафрагма; *4* — фокусирующая линза; *5* — ускоряющая линза; *6* — система электростатического сканирования; *7* — подложка

Шаблон для ионно-лучевой литографии приведен на рис. 1.118.



Рис. 1.118. Шаблон для ионно-лучевой литографии

Недостатки ионно-лучевой литографии:
– необходимостью устранения дисторсий;
– сложность обеспечения однородности экспонирования по полю кадра;
– низкая производительность.

1.8.5. НАНОИМПРИНТ-ЛИТОГРАФИЯ

Современная литография по мере развития и совершенствования становится все более и более дорогостоящей. Оптическая литография при современных технологических нормах имеет технические ограничения. Экстремальная фотолитография сложна технически и затратна. Растущая стоимость литографического оборудования может сделать производство кристаллов

убыточным. В связи с этим разрабатываются альтернативные литографические методы, которые позволят удешевить производство ИМС. Одним из таких методов является наноимпринт-(нанопечатная) литография (НИЛ, NIL).

Этот метод был разработан в 1990-е гг. В 2003 г. Массачусетский технологический институт включил его в список 10 недавно появившихся технологий, которые в будущем способны изменить мир. В настоящее время этот метод широко используется как академическими учеными, так и в исследовательских центрах компаний, а целый ряд компаний применяет НИЛ в промышленном производстве.

Ключевые преимущества НИЛ-технологии:

– минимальный размер получаемых структур;

– высокая точность и воспроизводимость изображения при переходе от пластины к пластине;

– повторяемость изображения по всей площади пластины.

Для НИЛ-технологии и не требуется использование излучения, чтобы передать изображение в резист. При этом идея НИЛ основана на самом старом методе литографии.

Существует три разновидности НИЛ:

– термоконтактная НИЛ (T-NIL);

– мягкая НИЛ (микроконтактная печать, soft-NIL);

– фотонаноимпринт-литография (P-NIL).

Технология *термоконтактной* НИЛ во многом напоминает классическую технику горячего тиснения полимеров. При термоконтактной литографии резист из термопластичного полимера наносят на плоскую поверхность подложки центрифугированием и нагревают до температуры, превышающей температуру его стеклования T_c (рис. 1.119). Затем сверху под давлением опускают жесткий штамп (шаблон) с микро- или наноразмерным рельефным рисунком. Образец охлаждают до температуры ниже температуры стеклования полимера, после чего давление снимают. На подвергшейся такому воздействию полимерной пленке формируется полная реплика печати.

При *мягкой* НИЛ изготовляют форму из эластомерного материала по шаблону. В качестве такого материала может использоваться полидиметил-

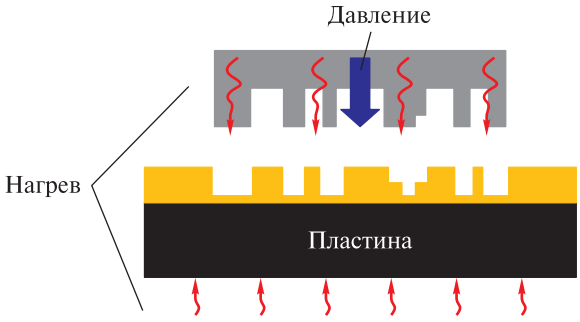


Рис. 1.119. Схема термоконтактной наноимпринт-литографии

силоксан (PDMS). Затем происходит самосборка монослоя «чернил» на форме, например, октадекантиола (ODT) из раствора в этаноле. Форма придавливается к подложкес напыленным тонким слоем золота. Рисунок переносится на подложку травлением.

Схема *фотонаноимпринт-литографии* (запатентованное название технологии — S-FIL) приведена на рис. 1.120. Ее особенность заключается в том, что жидкий резист после опускания жесткого штампа полимеризуется под действием УФ-излучения.

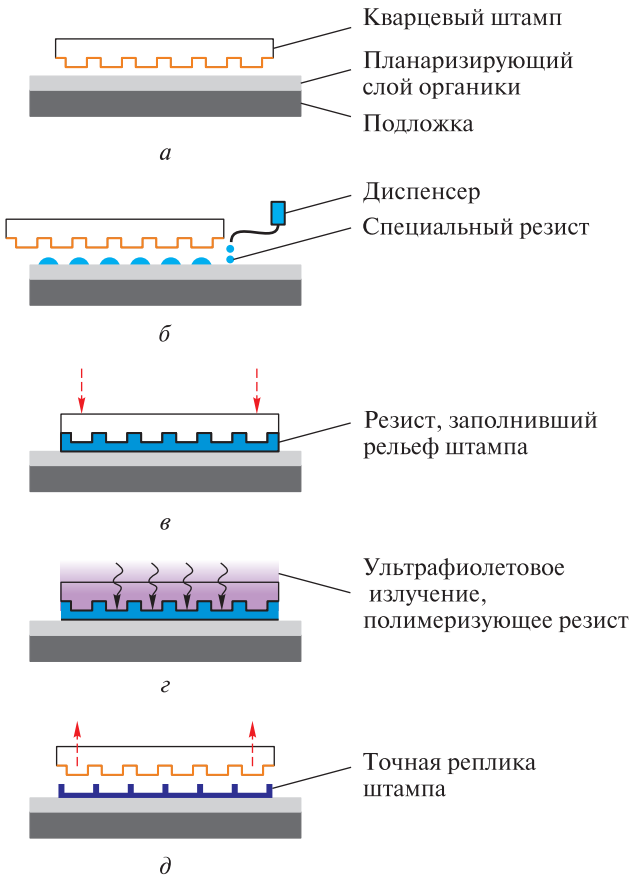


Рис. 1.120. Схема технологии S-FIL:

а — ориентация штампа и подложки; *б* — нанесение капель жидкого специального резиста; *в* — опускание штампа и выдавливание рисунка; *г* — полимеризация специального резиста УФ-излучением; *д* — отделение штампа от подложки

Существует также технология обращенной наноимпринт-литографии (S-FIL/R), которая позволяет получить негативное изображение (рис. 1.121). Ее суть в том, что после формирования отпечатка с помощью НИЛ поверхность покрывают планаризирующим слоем, этот слой травят до вскрытия

слоя, на котором выполнялась печать, и затем, с использованием селективной маски планаризирующего материала, проводят реактивное ионное травление, формирующее обращенную маску с большим аспектным отношением.

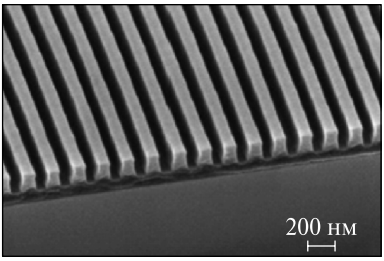


Рис. 1.121. Фотография рисунка, полученного с помощью наноимпринт-литографии

Достоинства НИЛ:

– низкая стоимость оборудования и технологии, так как не используются дорогие оптические системы, источники излучения и фотошаблоны;

– широкий спектр получаемых размеров;

– нечувствительность к изменению плотности рисунка;

– отсутствие сложностей, характерных для оптической литографии, например, отсутствие потребности в коррекции эффекта близости;

– гладкость краев формируемых линий, высокий рельеф маски;

– возможность реализации позитивного и негативного процессов.

Тесты к лекции 1.8

1. ***При каком из перечисленных видов литографии не используется актинично излучение для получения рисунка?***

а) наноимпринт-литография;

б) фотолитография;

в) электронно-лучевая литография.

2. ***При каком из перечисленных видов литографии отсутствует эффект близости?***

а) рентгенолитография;

б) фотолитография;

в) электронно-лучевая литография.

1.9. ТРЕБОВАНИЯ К ОСНОВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И ПРИМЕНЯЕМОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Цель лекции: ознакомление с основными технологическими процессами и оборудованием для производства интегральных микросхем.

1.9.1. ЖИДКОСТНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В производстве ИМС с проектными нормами 0,5 мкм и менее необходимо обеспечить чистоту поверхности пластины с поверхностной концентрацией:

– щелочных и тяжелых металлов — менее 50 ат./см^2;

– алюминия и кальция — менее 10 ат./см^2;

– органических примесей (по углероду) — менее 10 ат./см^2.

Привносимая дефектность, связанная с наличием микрочастиц на поверхности, должна составлять не более 0,02 см$^{-2}$.

Комплекс химической обработки в процессе производства состоит из следующих операций (в соответствии с базовым технологическим маршрутом):

1) финишная химическая обработка;

2) удаление фоторезиста;

3) травление оксидов, стекол;

4) травление нитрида кремния Si_3N_4.

Жесткими требованиями к чистоте поверхности пластин после химической обработки определяются требования к оборудованию для их проведения:

– конструкционные материалы, контактирующие с химическими реактивами и пластинами, не должны подвергаться деградации под их влиянием и вносить дополнительные загрязнения в химические реактивы и деионизованную воду; как правило, используется фторопласт типа PFA или кварц двойного переплава;

– степень обработки поверхности (шероховатость) деталей и узлов оборудования должна исключить возможность накопления загрязнений и генерации микрочастиц; шероховатость должна быть менее 0,3 мкм, нагрев реагентов должен проводиться радиационными нагревателями; точность поддержания температуры в ваннах не должна превышать 0,1 °С;

– перемещение пластин должно производиться автооператором с точностью позиционирования не хуже 1 мкм;

– метод обработки — бесконтактный (облегченные кассеты, имеющие минимальные площадь поверхности и массу, изготовленные, предпочтительно, из кварца);

– трубопроводы подачи реагентов и деионизованной воды должны иметь минимальное число разъемных соединений;

– необходимо обеспечить автоматический ввод и корректировку технологических программ, отображение текущей информации о работе систем оборудования, диагностирование оборудования.

Учитывая, что для проведения процессов требуется различная компоновка линий химической обработки, оборудование должно иметь модульное исполнение с высокой степенью унификации узлов и деталей.

Для экономии дорогостоящих высококачественных реактивов и увеличения экологической безопасности оборудование должно быть ресурсосберегающим с рециркуляцией реагентов и их повторным использованием.

Решающее влияние на качество химической обработки и выход годных изделий оказывает чистота применяемых химических *реактивов*. Это влияние начинает заметно проявляться при содержании металлических примесей на уровне единиц ppb (лат. parts per billion — частей на миллиард), а на некоторых операциях, таких как формирование подзатворного диэлектрика, — при концентрациях ниже 1 ppb. На таких операциях необходимо использование реактивов с суммарным содержанием примесей 1 ppb и ниже, причем число контролируемых элементов должно составлять 40–50. Кроме того, качество химических реактивов определяется содержанием микрочастиц. Исходные реактивы должны содержать не более 250 частиц (размером более 0,5 мкм) в 1 мл. Такие химические реактивы выпускаются зарубежными компаниями (например, компанией MERK).

Подготовка химических реактивов указанного качества и доставка их к технологическим ваннам — сложная техническая задача, так как необходимо не только сохранить общий уровень содержания примесей, но и значительно уменьшить количество микрочастиц. Оборудование для подготовки химических реактивов (перекачка из тары поставщика в оборудование заказчика, смешивание необходимых компонентов) и система их доставки (насосы, трубопроводы) должны содержать хотя бы двухступенчатую систему фильтрации (предварительная и финишная фильтрация). Конструкционные материалы не должны вносить дополнительные загрязнения в химические реактивы. Данные материалы и оборудование изготовляют такие компании, как Millipore (США), Georg Fischer (Швейцария) и др. Учитывая ограниченный размер зон обслуживания химического оборудования, необходимо разгрузить их от систем закачки химических реактивов, разместив в специальных помещениях, а доставку реактивов к точкам потребления осуществлять по трубопроводам. Оборудование для подготовки растворов должно предоставлять возможность приема реактивов из тары поставщика и одновременной фильтрации, хранения их с постоянной рециркуляцией через фильтр. Кроме того, с помощью насосов или методом «передавливания» должна осуществляться подача реактивов к точкам использования.

Для производства плавиковой HF, соляной HCl кислот, раствора аммиака водного NH_4OH и пероксида водорода H_2O_2 необходимо использовать так называемые генераторы химических реактивов. Их применение

позволит получать продукцию высокой степени чистоты (суммарное содержание металлических примесей — не более 500 ppb) и снизить их стоимость на порядок.

1.9.2. ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

К группе физико-термических процессов относят: эпитаксию, осаждение поликремния Si^*, а также Si_3N_4, SiO_2, окисление, отжиг, включая активацию ионно-легированных слоев, и вплавление контактов (рис. 1.122).

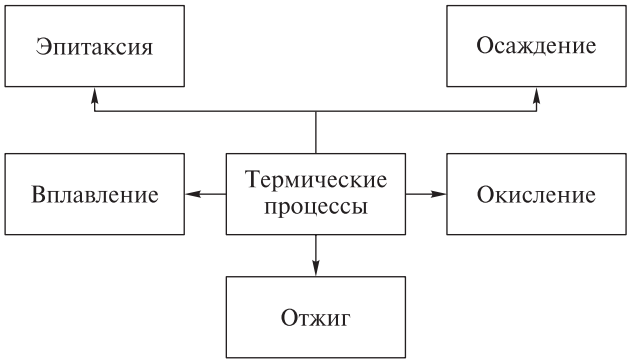


Рис. 1.122. Классификация термических процессов

Определим основные принципы построения технологических процессов и выбора оборудования:

– интеграция процессов окисления и осаждения для устранения (уменьшения числа) перегрузок пластин из реактора в реактор;

– дополнительная газохимическая очистка поверхности перед каждым термическим процессом;

– минимизация факторов неконтролируемого воздействия на параметры структур (эрозия поверхности кремния при формировании подзатворного SiO_2, генерация микрочастиц и др.).

ЭПИТАКСИЯ

Эпитаксия представляет собой процесс наращивания монокристаллических слоев вещества на подложку (кристалл), при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

Эпитаксиальный слой — монокристаллический материал, осажденный на монокристаллическую подложку и сохраняющий ее структуру. Таким образом, эпитаксиальный слой имеет тот же тип кристаллической решетки, что и подложка. Технологии эпитаксии полупроводниковых структур позволяют проводить контролируемое легирование выращиваемых структур примесями различных типов.

Эпитаксия применяется при изготовлении биполярных и КМОП-микросхем. Кроме этого, использование эпитаксии для изготовления КМОП-микросхем позволяет нанесением специально формируемого высоколегированного скрытого слоя эффективно решить проблему паразитной тиристорной структуры (эффект «защелки»). Еще одним положительным эффектом применения эпитаксии является геттерирующий эффект скрытого слоя относительно микропримесей металлов, имеющихся в подложке.

Эпитаксиальный слой для КМОП и биполярных СБИС характеризуется следующими основными требованиями:

– диапазон толщин 1,5...5,0 мкм с разбросом 3 %;

– диапазон удельного сопротивления 0,5...5,0 Ом·см с разбросом 5 %;

– плотность дислокаций — менее 1 $см^{-2}$;

– отсутствие линий скольжения;

– привнесенный прогиб — менее 20 мкм;

– привнесенная дефектность (частицы размером более 0,2 мкм) — менее 0,05 $см^{-2}$.

Для реализации этих требований необходимо применить процесс низкотемпературной эпитаксии ($t < 1000$ °C) из моносилана или дихлорсилана при пониженном давлении на оборудовании с инфракрасным нагревом, многопозиционным контролем температуры и ее регулированием в реальном масштабе времени. Обеспечение высокой равномерности температуры и распределения парогазовой смеси в реакторе достигается на оборудовании с индивидуальной обработкой пластин (рис. 1.123).

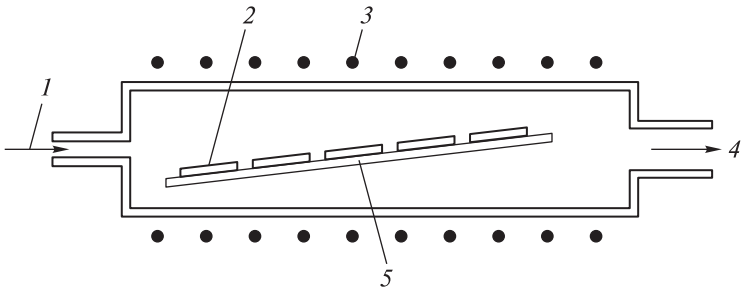


Рис. 1.123. Камера реактора для эпитаксии:
1 — поступление газа; *2* — подложка; *3* — катушка индуктивного нагрева; *4* — выход; *5* — графитовая основа

Газофазная эпитаксия, реализуемая с помощью химического взаимодействия подложки и вещества в газовой или парогазовой фазе, осуществляется в камере реактора эпитаксии (рис. 1.124) при температуре 1200 °C, при этом происходит следующая химическая реакция

$$SiCl_4\,(\text{газ}) + 2H_2\,(\text{газ}) = Si\,(\text{тв.}) + 4HCl\,(\text{газ})$$

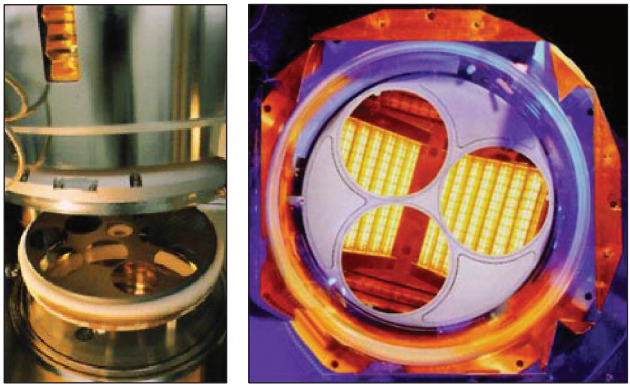


Рис. 1.124. Реакторы для эпитаксии

С помощью эпитаксии можно получать как разнотипные p–n-переходы (например, n-пленку на p-подложке, и наоборот), так и изотипные (n^+–n и p^+–p).

Для получения нужного уровня привносимой дефектности оборудование должно обеспечивать газохимическое травление стенок реактора, роботизированную загрузку-выгрузку пластины, систему эффективной фильтрации газов, а также быть совместимым с SMIF-портом. Для той же цели предусматривается газовое травление внутренней поверхности камеры после обработки каждой пластины.

Монокристаллическая подложка в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла. Выделяют гомоэпитаксию и гетероэпитаксию. *Гомоэпитаксия* (автоэпитаксия) — процесс ориентированного нарастания вещества, не отличающегося по химическому составу от вещества подложки (например, наращивание эпитаксиальной пленки кремния на подложу из монокристаллического кремния).

Гетероэпитаксия — процесс роста слоя, отличающегося по химическому составу от вещества подложки (например, наращивание эпитаксиальной пленки кремния на сапфире в структурах «кремний на сапфире», КНС).

При гетероэпитаксии кристаллические решетки пленки и подложки должны быть подобны, а параметры решеток близки для обеспечения роста монокристаллического слоя.

При росте пленки по схеме пар (газ) — кристалл процесс осаждения атомов на подложку с образованием и ростом монокристаллических зародышей можно представить следующим образом. При соударении атома с поверхностью подложки он либо адсорбируется на ней, либо возвращается обратно в газообразную фазу (рис. 1.125). Процесс адсорбции характеризуется коэффициентом термической аккомодации αT. После достижения равновесия в адсорбированном слое (равновесие между адсорбированными частицами и зародышами) начинается образование стабильных зародышей конденсируемой фазы (центров новой фазы). Рост и срастание центров новой фазы приводят к образованию эпитаксиальных слоев.

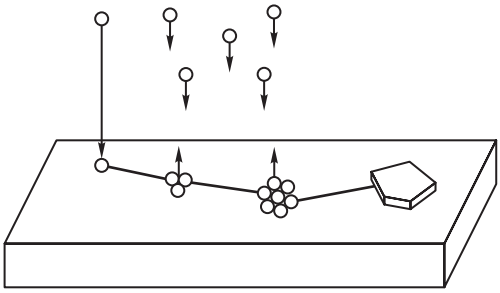


Рис. 1.125. Схема осаждения атомов и образования ориентированных зародышей на монокристалле

Таким образом, адсорбированный на поверхности подложки атом может участвовать в одном из трех следующих процессов:

1) десорбция с поверхности (обычно при больших значениях температуры подложки);

2) образование вместе с другими атомами стабильного зародыша;

3) присоединение к уже существующему зародышу.

Режим, при котором происходит адсорбция значительной части падающих на подложку атомов совместно с их миграцией, должен быть следующим: температура поверхности подложки меньше температуры атомов адсорбированного слоя, которая должна быть меньше температуры поступающих на поверхность атомов.

Газофазная эпитаксия позволяет наращивать эпитаксиальные слои из парогазовой смеси. Для ее проведения используется специальное оборудование с пониженным давлением. Установка для газофазного напыления представляет собой кварцевый реактор с нагревателями и газопроводом (рис. 1.126). Внутри реактора размещается подложка, которая нагревается до температуры 400...1200 °С. Газовая смесь взаимодействует с подложкой и оседает на ней, образуя эпитаксиальные слои. Добавляя в газовую смесь легирующие элементы, можно получить легированный слой.

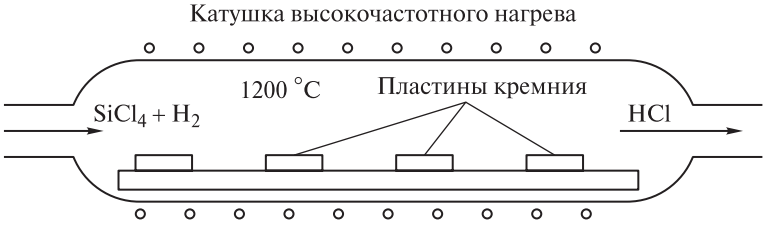


Рис. 1.126. Схема получения эпитаксиальных слоев кремния из газовой фазы

Методы газофазной эпитаксии основаны на осаждении молекул кремния или германия с помощью химических реакций. Температура нагрева зависит от состава смеси и кинетики химических процессов.

Чаще всего используют следующие химические методы эпитаксии:

– восстановление хлоридов водородом;

– пиролитическое разложение моносилана.

Стадии процесса эпитаксии:

1) продувка реактора водородом для восстановления пленки оксида кремния SiO_2, появившейся при транспортировке и хранении подложек, до кремния;

2) подача в реактор HCl для стравливания тонкого поверхностного слоя кремния;

3) подача в реактор смеси тетрахлорида кремния $SiCL_4$ и водорода H_2:

$$SiCl_4\,(\text{газ}) + 2H_2\,(\text{газ}) = Si\,(\text{тв.}) + 4HCl\,(\text{газ})$$

Перед наращиванием с поверхности подложки удаляют все загрязнения, включая мельчайшие пленки оксидов, для чего подложку обрабатывают водородом при очень высокой температуре. В результате происходит восстановление кремния. Затем вводят хлорид водорода HCl, который стравливает верхний слой.

После очищения начинается эпитаксиальное наращивание, для чего в камеру вводят определенный газовый состав. Происходит химическое взаимодействие веществ: необходимые элементы оседают на подложку, остальные выводятся из камеры. Это нужно для того, чтобы предотвратить перенасыщение пространства камеры продуктами распада, поскольку химическая реакция восстановления — процесс обратимый и возможна обратная реакция.

Недостаток метода эпитаксии — необходимость использования очень высоких температур, что приводит к образованию легированного слоя.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ НА САПФИРЕ

Долгое время структура «кремний на сапфире» являлась основой для производства радиационно-стойких ИМС, что в первую очередь важно для космической промышленности, атомной энергетики и военного применения. Вследствие снижения паразитных емкостей повышается быстродействие элементов, а отсутствие необходимости в дополнительной изоляции элементов друг от друга позволяет увеличить степень их интеграции.

Сапфировая подложка дает возможность значительно снизить (практически исключить) токи утечки приборов и уменьшить энергопотребление (рис. 1.127).

Однако структура КНС слишком дорога в производстве, и в настоящее время при производстве радиационно-стойких ИМС вытеснена структурой «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI).

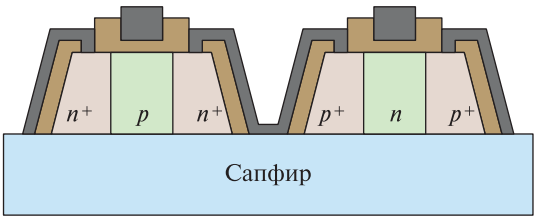


Рис. 1.127. Поперечное сечение подложки сапфира с транзисторами на основе технологии «кремний на сапфире»

ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЛАНАРИЗАЦИЯ

Химико-механическая планаризация, или химико-механическое полирование (ХМП, CMP), представляет собой комбинацию химических и механических способов планаризации (удаления неровностей с поверхности изготовляемой полупроводниковой пластины).

Причину использования ХМП может пояснить рис. 1.128: на рис. 1.128, *а* показан срез микросхемы, изготовленной без химико-механической планаризации, видны неровности слоев; на рис. 1.128, *б* — микросхема, при производстве которой планаризация проводилась многократно. В результате архитектура микросхемы становится более идеальной и, как следствие, качество ее существенно повышается.

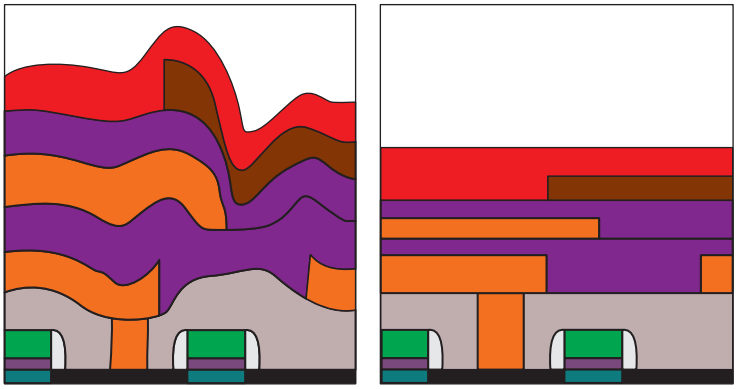


Рис. 1.128. Схема полупроводникового кристалла:
а — без применения планаризации; *б* — с применением планаризации

При химико-механической планиризации используется сочетание абразивных и агрессивных химических суспензий (например, коллоидных) и полировальной подушки, большей по площади, чем обрабатываемая пластина. Могут применяться как круглые полировальные подушки, так и ленты. Пластину устанавливают в специальный держатель, и она вращается вместе с ним (рис. 1.129).

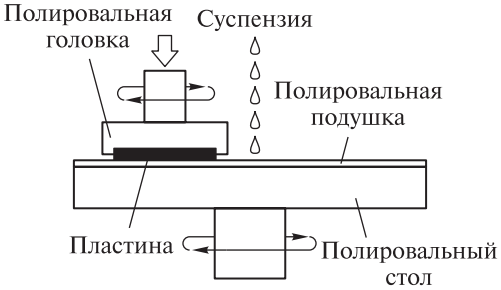


Рис. 1.129. Схема химико-механической планаризации

Держатель прижимает пластину к полировальной подушке. Точность обработки на современных установках для ХМП составляет несколько нанометров.

АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Атомно-слоевое осаждение (АСО, ALD) — технология осаждения тонких пленок, которая базируется на последовательных химических реакциях между паром и твердым телом и имеет свойство самоограничения.

В большинстве АСО-реакций используются два химических соединения, которые обычно называют *прекурсорами*. Они поочередно вступают в реакцию с поверхностью. В результате многократного влияния прекурсоров происходит рост тонкой пленки.

Атомно-слоевое осаждение может быть использовано для нанесения тонких пленок нескольких типов, в том числе оксидов металлов (например, Al_2O_3, TiO_2, SnO_2, ZnO, HfO_2), нитридов металлов (например, TiN, TaN, WN, NbN), металлов (например, рутений, иридий, платина) и сульфидов металлов (например, ZnS).

Рост слоев материала в АСО состоит из четырех характерных этапов, которые циклически повторяются:

1) действие первого прекурсора;

2) удаление из реактора непрореагировавших прекурсоров и газообразных продуктов реакции;

3) действие второго прекурсора или другой вид обработки для активирования поверхности перед применением первого прекурсора;

4) удаление из реактора остатков реагентов.

ОКИСЛЕНИЕ, ОСАЖДЕНИЕ, ОТЖИГ

Маршрут изготовления БИС включает в себя операции термического окисления кремния, осаждения нитрида кремния Si_3N_4, осаждения поликремния. Технологический процесс создания подзатворного диэлектрика должен обеспечить:

– толщину 10 нм и разброс значений размеров менее 2 %;

– фиксированный заряд на поверхности менее $1{,}5 \cdot 10^9$ см$^{-2}$;

– подвижный заряд на поверхности менее $5 \cdot 10^8$ см$^{-2}$;

– плотность дефектов менее 0,2 см$^{-2}$.

Для реализации указанных параметров технологический процесс окисления должен включать следующие операции.

1. Газохимическая очистка (ГХО) пластин в парах плавиковой кислоты HF (стравливание естественного оксида с удалением примеси металлов) проводится непосредственно на установке для окисления перед загрузкой в реактор. Пластины после ГХО и в процессе загрузки должны находиться в контролируемой азотной среде. Применение ГХО позволяет снизить уровень загрязнения металлами на один-два порядка.

2. Для снижения температуры нагрева уже сформированного канала и сокращения времени на нагрев и охлаждение пластин температура окисления не должна превышать 1120...1170 °С. Для пластин диаметром 200 мм с целью минимизации эффекта коробления рекомендуется скорость нагрева

менее 10 °С/мин, а скорость охлаждения — менее 3 °С/мин. Для массивных пластин требуется применение специальной термостабилизации в течение 15...30 мин после вывода печи на температурный режим (700...900 °С).

3. Подзатворный оксид должен формироваться пирогенным влажным окислением с последующим отжигом в хлорсодержащей среде при температуре 850 °С (рис. 1.130). Пирогенное окисление, в отличие от сухого, повышает устойчивость оксида к электрическому пробою.

4. Важным приемом является предокисление (на глубину 2 нм) при температуре 700 °С (в сухом кислороде) перед выводом печи на рабочий режим 850 °С. Этим исключается возможная эрозия поверхности кремния, которая способна резко снижать электрическую прочность подзатворного оксида.

5. Выгрузка пластин должна осуществляться при температуре 600 °С после завершения медленного охлаждения в чистом азоте, снижающего механические напряжения при сохранении низкой плотности поверхностных состояний.

6. Для обеспечения гарантированного контроля газовых сред в реакторе и сокращения временны́х потерь при замене среды целесообразно использование вакуумной откачки.

7. Принцип интеграции процессов на базе универсального реактора вертикального типа с формированием узла подзатворного оксида и затвора должен реализовываться в едином процессе.

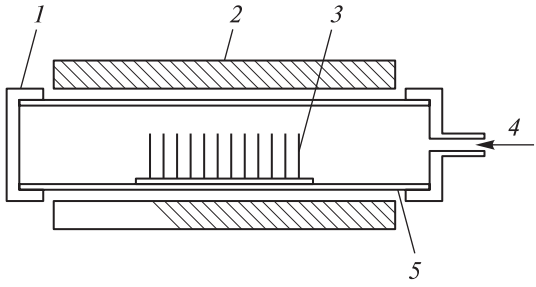
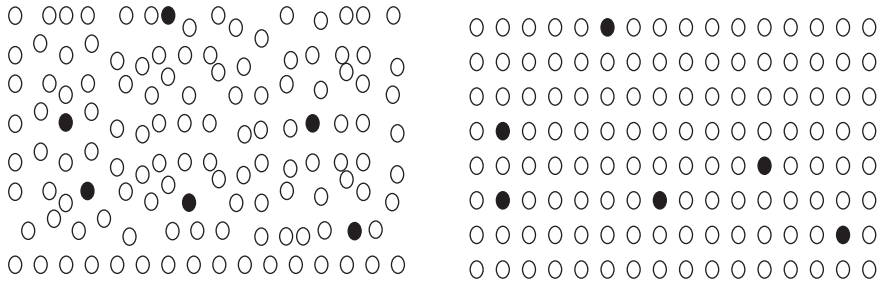


Рис. 1.130. Камера отжига:

1 — заглушка; *2* — трехзонная печь; *3* — подложки; *4* — поступление кислорода или пара; *5* — реактор (кварцевая трубка)

Отжиг требуется и после некоторых других операций. Так, после операции ионной имплантации сильно повреждается кристаллическая структура монокремния, поэтому необходим послеимплантационный отжиг (рис. 1.131).

При формировании силицидов металлов (в частности, $TiSi_2$, WSi_2, $CoSi_2$, $MoSi_2$), которые в настоящее время используются в качестве затворов, межсоединений и обкладок конденсаторов, применяется операция *возбуждающего отжига* (рис. 1.132) — термического процесса, в котором различные атомы связываются друг с другом, формируя металлический сплав.



а *б*

Рис. 1.131. Структура приповерхностного слоя кремния:
а — после ионного легирования примесей; *б* — после послеимплантационного отжига;
○ — атомы кремния; ● — примесные атомы

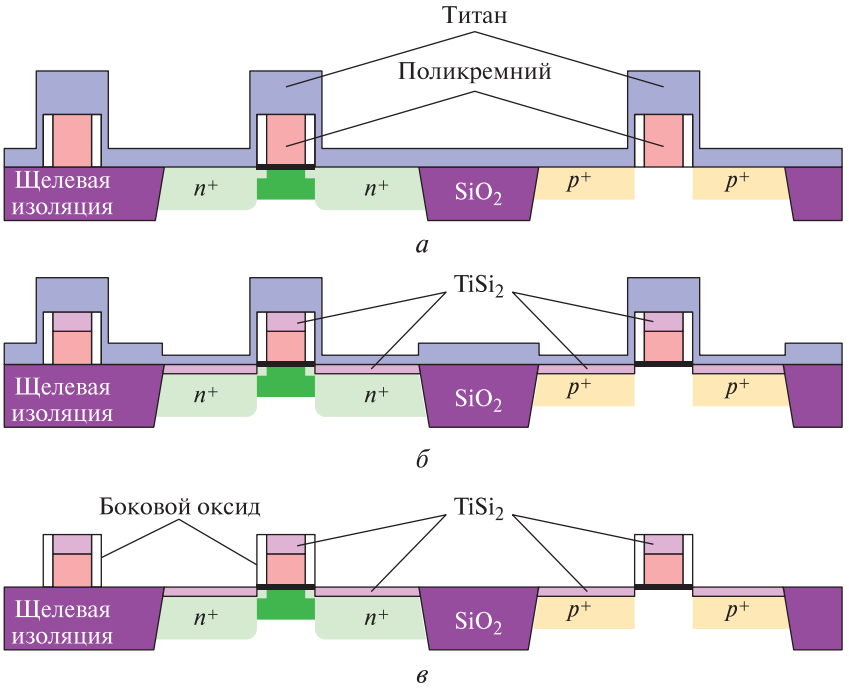


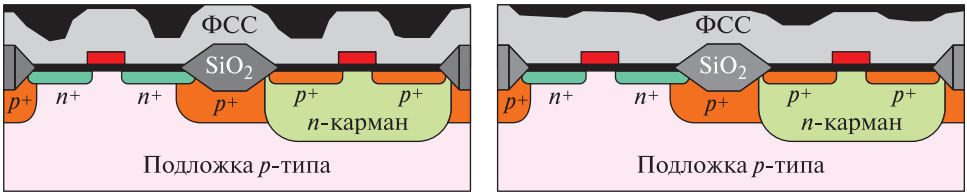
Рис. 1.132. Формирование контактов из силицида титана $TiSi_2$:
а — осаждение титана; *б* — возбуждающий отжиг; *в* — удаление титана

Технологический процесс формирования $TiSi_2$ включает в себя следующие операции:

1) очистка в потоке аргона;
2) нанесение титана на кремний осаждением из газовой фазы;
3) скоростной термический отжиг при температуре около 700 °С;

4) удаление титана с помощью раствора пероксида водорода H_2O_2 и сульфоксиловой кислоты H_2SO_2.

Еще одна термическая операция, которая может быть использована при производстве ИМС, — *повторное оплавление* (рис. 1.133). Оно позволяет сделать поверхность диэлектрика более ровной.



а *б*

Рис. 1.133. Поверхность подложки, покрытая фосфорсиликатным стеклом:
а — до повторного оплавления; *б* — после повторного оплавления

Эта операция используется после пассивации поверхности, при которой подложка покрывается пассивирующим диэлектриком. В качестве такого диэлектрика может применяться нелегированное кремниевое стекло (SiO_2), однако оно размягчается при очень высокой температуре — более 1500 °С и может оплавиться вследствие поверхностного натяжения. При этом фосфорсиликатное стекло (ФСС) и борофосфорсиликатное стекло (БФСС) размягчаются при значительно более низкой температуре (менее 1100 °С, вплоть до 850 °С). Кроме того, фосфор также может присоединить натрий (рассосать объемный заряд на границе раздела SiO_2–Si). В результате в качестве пассивирующего диэлектрика обычно используют ФСС и БФСС.

Повторное оплавление проводят, как правило, в среде азота. Иногда также используют выпаривание воды, которое помогает заполнить поры непрокисленных участков оксидом.

1.9.3. НАНЕСЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

С уменьшением минимального размера элемента до 0,8...1,2 мкм и тем более до 0,5...0,7 мкм рельеф металлизации на поверхности кристалла значительно усложняется. Отношение высоты рельефа к ширине зазора в ряде случаев возрастает до двух и более. При стандартных способах нанесения металлических и диэлектрических слоев на дне и стенках углублений рельефа толщина слоев получается очень неоднородной, вплоть до возникновения обрыва.

Основные способы планаризации рельефа металлизации основаны на заполнении зазоров между проводниками и диэлектриком с последующим устранением диэлектрических выступов над проводниками специальными методами обратного травления или химико-механическим полированием.

Однако при широко распространенных вакуумных и газофазных методах нанесения диэлектрических пленок в узких и глубоких зазорах могут образоваться пустоты, которые в процессе планаризации открываются, создавая щелевой рельеф на поверхности кристалла.

Плазменные методы нанесения диэлектрических пленок при наличии электрического смещения на подложке, в частности с использованием высокоплотной плазмы, позволяют решить проблему при наличии регулярного рельефа. Однако в реальных схемах на поверхности кристалла еще до нанесения диэлектрической пленки могут возникать узкие глубокие щели в силу различных технологических отклонений, например вследствие несовмещения рельефа различных слоев, а также отклонений при локальном травлении (изменение размера элемента, формирование отрицательного клина травления). Непредсказуемость места расположения и формы таких щелей не дают возможности подобрать режим нанесения диэлектрической пленки с контролируемой (одинаковой на дне щели и на открытой части кристалла) скоростью осаждения (рис. 1.134).

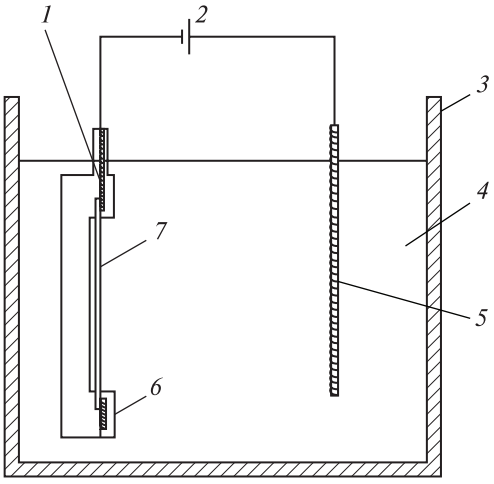


Рис. 1.134. Нанесение пленок из жидкой фазы:

1 — электрическое соединение; *2* — разность потенциалов; *3* — контейнер; *4* — электролит; *5* — второй электрод; *6* — держатели подложки; *7* — подложка

По мнению специалистов компании Applied Materials Inc. (США), этот метод используется при формировании ИМС с минимальными размерами элементов — 0,35 мкм. При использовании жидкофазного золь–гель-способа нанесения пленки все щели на поверхности кристалла гарантированно заполняются пленкообразующим раствором с последующим образованием сплошной диэлектрической пленки. В зарубежной литературе метод формирования диэлектрических слоев из растворов на центрифуге называется Spin on Glass (SOG). Однако при этом методе нельзя достичь полной планаризации, т. е. плоской поверхности кристалла.

При минимальных размерах элементов (менее 0,4...0,5 мкм), для того чтобы обеспечить необходимую разрешающую способность оптической литографии, нужно совмещать SOG-планаризацию с химико-механической планаризацией, которая позволяет создать практически плоскую поверхность кристалла.

Область размеров 0,5...0,7 мкм является переходной, когда желательно, но не обязательно использовать ХМП. По заявлению специалистов компании Applied Materials Inc., в области размеров 0,5...0,7 мкм примерно

половина производителей микросхем использует ХМП, а половина обходится только применением SOG. Сглаживание и планаризация рельефа поверхности кристалла методом SOG в настоящее время широко используется многими ведущими компаниями — изготовителями кремниевых микросхем.

В 2000-е гг. появились работы, показывающие значительные достижения в области нанесения диэлектрических пленок из жидкой фазы. Найдены материалы и способы формирования слоев с существенно более низкими значениями диэлектрической постоянной (до 1,5–2,0, при том что стандартные материалы и способы нанесения диэлектрических слоев позволяют уменьшить это значение только до 3,8–4,0). Необходимость уменьшения диэлектрической постоянной изолирующей пленки диктуется тем, что при размерах компонентов менее 1,0 мкм время задержки сигнала в большей степени начинает зависеть от параметров соединений (*RC*). Процесс формирования таких пленок связан с использованием процесса термообработки слоев в атмосфере инертного газа высокого давления. По данным источников, аналогичная термообработка позволяет заполнять алюминием весь объем контактных окон между уровнями металлизации.

Толщина формируемых современными методами диэлектрических пленок из жидкой фазы может достигать 1,0...1,5 мкм без признаков растрескивания. Такие пленки могут обладать значительно меньшими механическими напряжениями, чем пленки, сформированные плазмохимическим или газофазным способом, кроме того, они имеют барьерные свойства против миграции щелочных ионов.

Основные требования к растворам при нанесении диэлектрических пленок из жидкой фазы приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Требования к планаризующим растворам

Параметр	SIL	MEMOSIL	PHEMOSIL
Толщина пленки, нм	100–110	190–210	190–210
Вязкость $\times 10^{-3}$, Па·с	2,8–3,0	2,85–2,95	2,8–2,9
Плотность, г/см^3	0,856–0,858	0,858–0,860	0,860–0,862
Проводимость, Ом·см$^{-1}$	$(2–6)^{-5}$	$(2–6)^{-5}$	$(2–5)^{-5}$
Показатель преломления	1,393–1,395	1,393–1,395	1,397–1,400
pH	2,3–2,8	1,5–2,0	1,8–2,2
Диэлектрическая постоянная пленки	6–7	3–4	4–5

Примечание. Здесь SIL — силикатные растворы, MEMOSIL — метилсилоксановые, PHEMOSIL — фенилсилоксановые.

Время жизни свежеприготовленного планаризирующего раствора при хранении в холодильнике при температуре –4 °С и раствора ФПТ-1-40 при хранении в комнатных условиях в затененных бутылях — более 6 мес.

Требования к планаризующей и пассивирующей пленке:

– толщина планаризующих пленок на плоской пластине может варьироваться в пределах 0,1...0,5 мкм. Неравномерность толщины пленки на плоской поверхности пластин диаметром 150 мм — менее ±5 %;

– сформированные на поверхности структур Al–SiO_2 и Si^*–SiO_2 планаризующие слои не должны растрескиваться и шелушиться;

– коэффициент планаризации рельефа металлизации с шириной зазора 0,5...0,7 мкм — более 0,7, для зазоров шириной 0,8...1,2 мкм — более 0,5;

– планаризующие пленки должны выдерживать нанесение слоев в кислород- или азотсодержащей плазме;

– привнесенная дефектность (дефекты размером более 0,2 мкм) после нанесения планаризующей или пассивирующей пленки — не более 0,05 $см^{-2}$;

– процесс формирования планаризующей и пассивирующей пленок изменяет пороговые напряжения МДП-транзисторов не более чем на ±5 %;

– состав планаризующих слоев: силикатные — SIL (SiO_2, БФСС), органосиликатные — MEMOSIL и фенилсилоксановые —PHEMOSIL.

– толщина пассивирующих пленок 1...2 мкм. В процессе технологической обработки, включая термообработку при температуре 450 К, пленки не растрескиваются и не отслаиваются. Цвет и механические свойства пассивирующей пленки позволяют использовать процесс автоматизированной сборки кристаллов в пластмассовый корпус.

Тесты к лекции 1.9

1. ***С помощью какой операции можно осадить монокристаллический слой кремния на подложку?***

а) эпитаксия;

б) химико-механическая планаризация;

в) отжиг.

2. ***Для чего используется повторное оплавление?***

а) для планаризации пассивационного диэлектрика;

б) для образования переходных соединений;

в) для окисления поверхности.

1.10. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Цель лекции: ознакомление с основами получения диэлектрических пленок на поверхности кремния.

1.10.1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Планарная технология интегральных микросхем на кремнии быстро начала развиваться в начале 1960-х гг. после разработки процесса термического окисления кремния, позволившего реализовать высококачественную границу раздела Si–SiO_2. Этот процесс называется *пассивацией*.

В полупроводниковых микросхемах пассивные пленки SiO_2 выполняют разнообразные сложные как конструктивные, так и технологические функции (рис. 1.135, табл. 1.6).

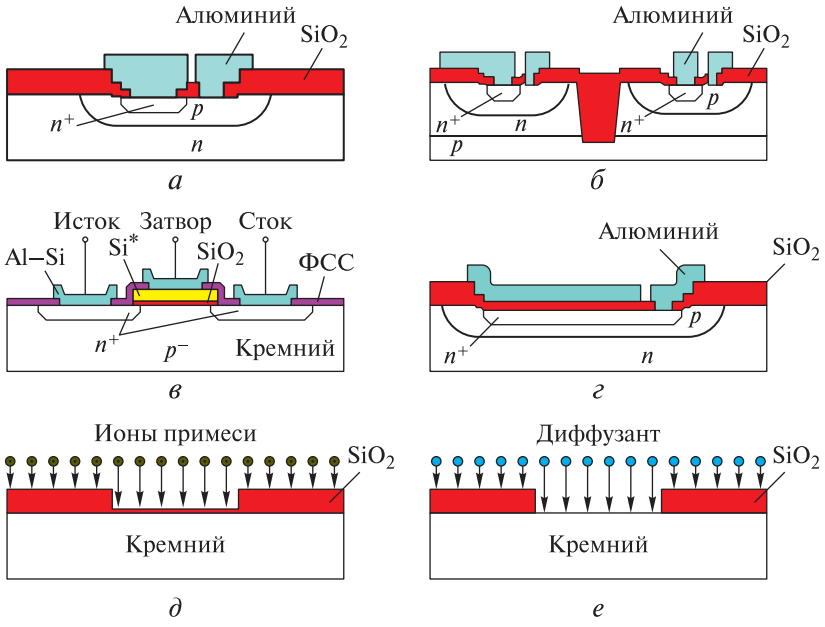


Рис. 1.135. Применение слоев термического SiO_2 в технологии формирования интегральных микросхем:

а — пассивация поверхности структур; *б* — диэлектрическая изоляция элементов друг от друга; *в* — подзатворный диэлектрик; *г* — конденсаторный диэлектрик; *д* — маска и защитное покрытие при ионной имплантации; *е* — маска при диффузии

Конструктивные функции:
– пассивация поверхности полупроводников (рис. 1.135, *а*);
– изоляция отдельных элементов СБИС друг от друга (рис. 1.135, *б*);
– подзатворный диэлектрик (рис. 1.135, *в*);
– изолятор в конденсаторах (рис. 1.135, *г*);
– один из многослойных диэлектриков в производстве элементов памяти;
– изоляция в схемах с многослойной металлизацией.
Технологические функции:
– маска при легировании примесей ионной имплантации (рис. 1.135, *д*);
– маска для диффузии легирующих примесей (рис. 1.135, *е*);
– составная часть шаблона для рентгеновской литографии.

Таблица 1.6

Применение SiO_2

Диоксид кремния	Толщина, нм $\times 10^{-1}$	Применение	Годы
Естественный	15–20	Нежелательно	–
Экранирующий	200	В операции внедрения	Середина 1970-х — настоящее время
Для создания маски	5000	При проведении операции диффузии	1960-е — середина 1970-х
Для полевых транзисторов	3000–5000	В изолирующих областях	1960–1990-е
Под контактной площадкой	100–200	Для регулирования нагрузки на нитрид кремния	1960-е — настоящее время
Жертвенный	<1000	Для устранения дефектов	1970-е — настоящее время
Подзатворный	30–120	Как подзатворный диэлектрик	1960-е — настоящее время
Барьерный	100–200	Для боковой изоляции	1980-е — настоящее время

Требования, предъявляемые к оксидным пленкам:
– высокие электрическая прочность, удельное сопротивление, большая диэлектрическая проницаемость;
– устойчивость по отношению к внешним воздействиям (отсутствие движения ионов при повышенных температурах и в сильных электрических полях);
– высокая адгезия к кремнию;
– плотность и сплошность структуры.

В условиях длительного высокотемпературного нагрева при осуществлении, например, диффузии примеси толщина пленки должна быть достаточно большой, чтобы предотвратить проникновение легирующей примеси к поверхности кремния.

Толщина пленки SiO_2 может составлять 0,4 мкм, если диффузант — бор, при диффузии фосфора пленка должна быть в 2 раза толще — до 1 мкм. При повышенном содержании в пленке пор диффузия атомов примесей облегчается и толщина пленки должна быть увеличена.

Методы получения пленок SiO_2:

– окисление в сухом кислороде;

– окисление во влажном кислороде;

– пиролиз.

Первые попытки описания термического окисления кремния основывались на известных моделях роста SiO_2 на металлах. Предполагалось, что при высоких температурах — процесс окисления является следствием диффузии заряженных частиц — ионов и электронов — через растущую пленку. При этом скорость химической реакции считалась много большей скорости диффузионного процесса.

Основной моделью роста SiO_2 является *модель Дила — Гроува*, в соответствии с которой процесс окисления рассматривается как состоящий из двух этапов: массопереноса окислителя в растущем SiO_2 и химической реакции кремния с окислителем.

В модели выделяют три потока (рис. 1.136):

1) массоперенос окислителя через внешнюю границу растущего слоя SiO_2 из газовой фазы (поток F_1):

$$F_1 = h\left(C^* - C_o\right),$$

где h — коэффициент переноса окисляющих частиц через внешнюю границу SiO_2; C^*, C_o — концентрация окисляющих частиц вне оксида и вблизи поверхности внутри оксида в любой момент времени окисления (значение C_o обычно принимают равным предельной растворимости окислителя в SiO_2);

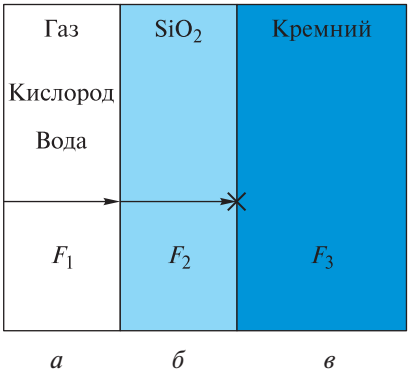


Рис. 1.136. Механизм окисления в соответствии с моделью Дила — Гроува:
а — доставка кислорода к поверхности; *б* — диффузия кислорода через слой сформировавшегося SiO_2 к границе кремния с подложкой; *в* — химическая реакция кислорода с материалом подложки

2) диффузию окисляющих частиц через SiO_2 к границе раздела SiO_2–Si (поток F_2):

$$F_2 = -D\frac{C_o - C_i}{z_o},$$

где D — коэффициент диффузии окисляющих частиц; C_i — концентрация окислителя на границе SiO_2–Si; z_o — толщина оксида;

3) химическую реакцию взаимодействия окислителя с кремнием (поток F_3):

$$F_3 = kC_i,$$

где k — скорость реакции.

В стационарных условиях потоки равны:

$$F_1 = F_2 = F_3 = F.$$

Толщину оксида определяют по формуле

$$z_o \approx \sqrt{\frac{2DC}{N_i}t},$$

где N_i — количество молекул окислителя; t — время окисления.

Рост пленки SiO_2 происходит за счет диффузии кислорода к поверхности кремния. При этом наблюдается выход SiO_2 за границы начального объема (рис. 1.137), занимаемого кремнием, что обусловлено разными значениями их плотности. Рост пленки SiO_2 толщиной d происходит за счет слоя кремния толщиной 0,44d.

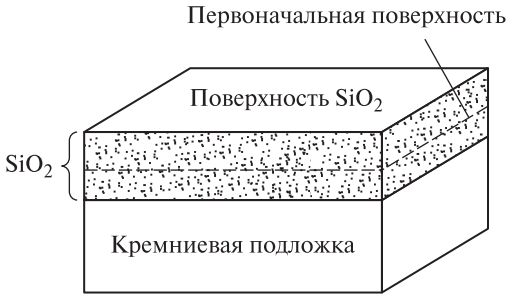


Рис. 1.137. Рост оксидной пленки

Скорость оксидирования зависит от температуры, вида оксидирования, толщины оксида, давления, кристаллографической ориентации подложки (<100> или <111>), примесей в кремнии.

Легирование кремния фосфором увеличивает темп роста, уменьшая толщину пленки и увеличивая скорость травления. Обычно высоколегированные области имеют более высокую скорость роста, чем слаболегированные. Более заметно это проявляется на линейном участке оксидирования (тонкие слои оксида).

Акцепторные примеси (бор) имеют тенденцию переходить в SiO_2, этот процесс называют *истощением примесей* (рис. 1.138, *а*).

Донорные примеси (фосфор, мышьяк, сурьма) лучше растворяются в кремнии, чем в SiO_2, тогда как SiO_2 перемещает их в кремний. В результате возникает эффект *накопления примесей* (рис. 1.138, *б*).

На скорость окисления влияет и кристаллографическая ориентация подложки. Подложка с кристаллографической ориентацией <111> имеет более высокую скорость оксидирования, чем с ориентацией <100>, поскольку в ней больше атомов кремния находится на поверхности.

К установкам для окисления (рис. 1.139) предъявляют следующие требования:

– контролируемая с точностью до 1 град температура подложкодержателя;

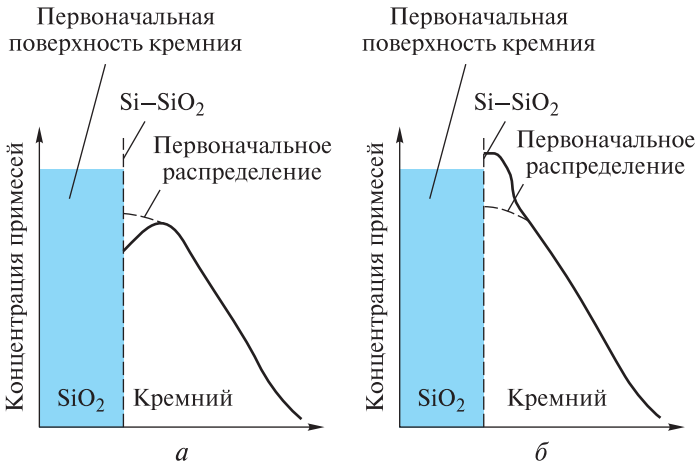


Рис. 1.138. Эффекты накопления и истощения примесей:
а — истощение примесей *n*-типа; *б* — накопление примесей *p*-типа

– обеспечение плавного повышения и понижения температуры в реакторе (двухстадийный нагрев);

– отсутствие посторонних частиц в реакторе (подложкодержатель сначала вводится в трубу реактора, а затем опускается на дно);

– отсутствие посторонних примесей, в частности ионов натрия, на внутренней поверхности реактора (для их удаления проводят предварительную продувку трубы реактора хлором);

– обеспечение введения кремниевых пластин в реактор сразу после их химической очистки.

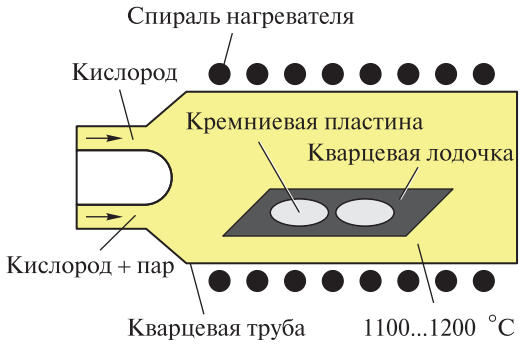


Рис. 1.139. Схема установки для термического окисления

Термически выращенный SiO_2 является аморфным веществом, однако он склонен к кристаллизации, поскольку его атомы имеют поперечную связь, необходимую для образования кристалла. Дефекты и материальные точки на поверхности кремния могут стать центрами кристаллизации, поэтому существует необходимость ее очистки перед оксидированием.

1.10.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В СУХОМ КИСЛОРОДЕ

В случае воздействия сухого кислорода на кремний при повышенной температуре в первые моменты времени адсорбция молекул кислорода кремнием сопровождается химическим взаимодействием и образованием SiO_2 (*хемосорбция*). По мере роста слоя SiO_2 хемосорбция уступает место диффузии молекул кислорода в поверхность кремния. В дальнейшем процесс окисления происходит в три стадии:

1) адсорбция кислорода;
2) диффузия кислорода через слой SiO_2;
3) реакция на границе раздела $Si–SiO_2$.

Сначала наблюдается линейный режим роста оксидной пленки, но с увеличением толщины пленки скорость роста замедляется, поскольку кислороду нужно больше времени t для диффузии к границе раздела $SiO_2–Si$ (рис. 1.140).

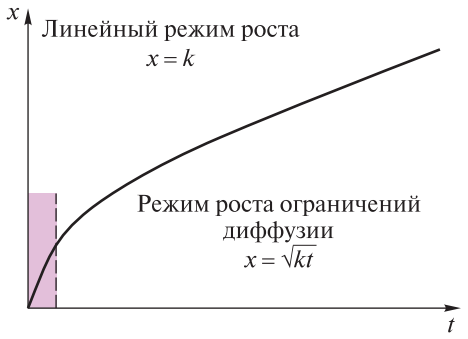


Рис. 1.140. Режимы темпа роста пленки SiO_2

Экспериментальное изучение процесса окисления показывает, что толщина пленки оксида связана с временем окисления параболическим законом:

$$x^2 = kt,$$

где x — толщина пленки оксида, мкм; k — постоянная окисления, зависящая от температуры, окисления и давления кислорода, мкм^2/мин; t — время окисления, мин.

Этот закон не выполняется при малой толщине пленки (до 0,01...0,02 мкм), когда проявляется хемосорбция.

Достоинство процесса сухого окисления — высокое качество пленки, в частности, высокая плотность (2,27 г/см^3). Недостаток процесса — его большая длительность, что объясняется малым коэффициентом диффузии кислорода в SiO_2. При температуре 1000 °С коэффициент диффузии D = 10...14 см^2/с, например, для получения пленки SiO_2 толщиной 1 мкм при температуре 1300 °С требуется 15 ч.

1.10.3. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В ПАРАХ ВОДЫ

Для описания механизма окисления кремния в парах воды (влажного окисления) существует две теории. Согласно первой, сначала образуется несколько монослоев SiO_2 в результате хемосорбции, после чего молекулы воды диффундируют через этот оксид к границе раздела $SiO_2–Si$. На границе протекает химическая реакция

$$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2$$

Согласно второй гипотезе, с кремнием реагирует не вода, а силановая группа $[Si - OH]$:

$$Si + 2H_2O \rightarrow [Si - OH]$$

$$[Si - OH] + Si \rightarrow SiO_2 + 2H_2$$

Окисление кремния в парах воды протекает намного быстрее, чем в сухом кислороде вследствие того, что скорость диффузии молекул воды сквозь оксидную пленку примерно на 3,5 порядка выше скорости диффузии сухого кислорода.

Скорость роста пленки SiO_2 прямо пропорциональна давлению водяного пара. При давлении пара 500 Н/см^2 и температуре 650 °С пленка толщиной 1 мкм получается за 400 мин. При нормальном давлении пара за это же время и при той же температуре образуется пленка толщиной лишь 0,02 мкм.

Достоинством процессов окисления при высоком давлении пара является возможность одновременного снижения температуры и сокращения времени обработки. Однако при давлении менее 1000 Н/см^2 начинается процесс травления кремния парами воды и поверхность пластин становится матовой. Недостаток процесса — необходимость герметичной и прочной металлической камеры вместо простой открытой системы. При высоких значениях давления водяного пара и повышенной температуре происходит интенсивная реакция воды со стенками камеры, что вынуждает прибегать к покрытию внутренних стенок камер инертными материалами, например золотом.

Существует три вида установок для влажного окисления:

1) система типа «Котел» (рис. 1.141);

2) барботер (рис. 1.142);

3) система промывки струей воды (рис. 1.143).

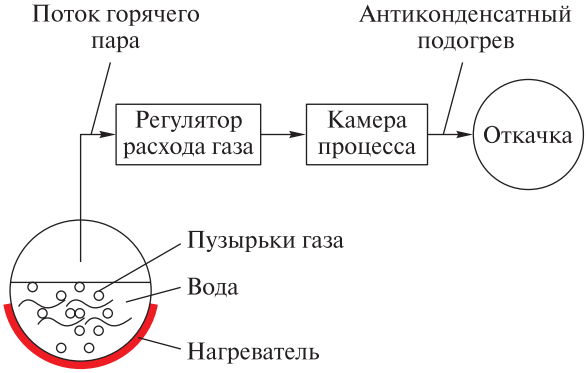


Рис. 1.141. Схема системы для влажного окисления типа «Котел»

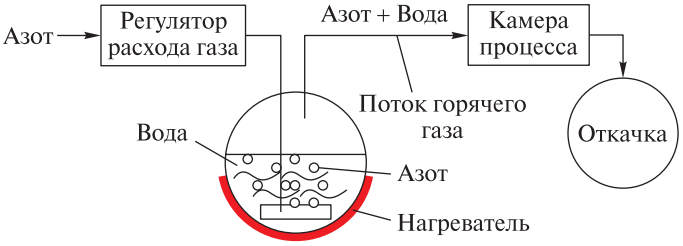


Рис. 1.142. Схема системы для влажного окисления барботер

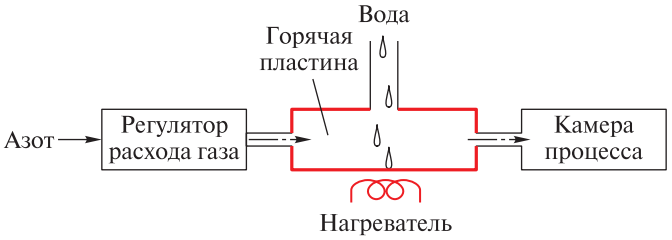


Рис. 1.143. Схема системы для влажного окисления промывкой струей воды

Общим недостатком процессов окисления в атмосфере водяного пара является невысокое качество получаемых пленок и связанное с этим ухудшение маскирующих свойств. Пониженная плотность пленки (около 2 г/см^3) указывает на ее пористость вследствие наличия водорода и гидроксильных групп ОН.

На практике используется чередование окисления кремния во влажном и сухом кислороде при нормальном давлении. Изменяя степень увлажнения, можно менять энергию активации процесса окисления в пределах от 1,33 эВ (для сухого кислорода) до 0,8 эВ (для паров воды) и управлять структурой оксидных пленок и скоростью окисления. При приемлемых скоростях роста достигается плотность пленки 2,18...2,2 г/см^3. При этом пленка толщиной 1 мкм является достаточной для проведения многократной диффузии.

Практика показала, что чередование этапов окисления в сухом и в увлажненном кислороде позволяет получить качественные пленки при удовлетворительной производительности процесса. Это объясняется тем, что пористая пленка, полученная в увлажненном кислороде и обработанная затем сухим кислородом, уплотняется («подсушивается») вследствие удаления гидроксильных групп и десорбции водорода.

Технологический процесс окисления подложек из кремния примерно таков:

1) нагрев рабочей зоны до температуры 1150 °С и выдержка в течение 30 мин;

2) установка кассеты с пластинами в рабочую зону;

3) окисление в сухом кислороде (1050 °С, 15 мин);

4) окисление во влажном кислороде в течение 1 ч 45 мин (температура процесса 1050 °С, температура в увлажнителе 80 °С, расход кислорода 0,5 л/мин, 105 мин);

5) окисление в сухом кислороде (1050 °С, 60 мин).

В отлаженном процессе термического окисления толщина выращенной пленки контролируется временем окисления.

Одной из разновидностей влажного окисления является *пирогенное* окисление. Оно происходит при взаимодействии молекул воды, синтезированных из атомарно чистых кислорода и водорода непосредственно у поверхности кремния, с атомами кремния (рис. 1.144).

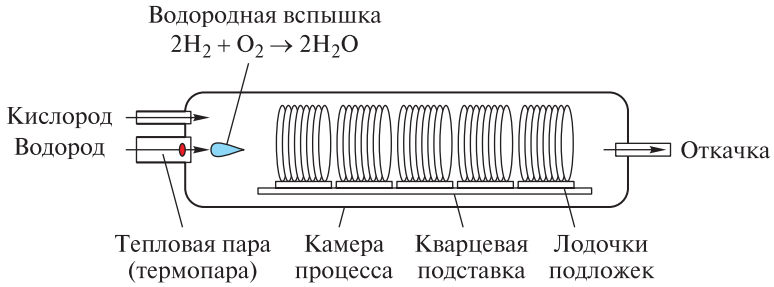


Рис. 1.144. Схема системы пирогенного окисления

Достоинства метода пирогенного окисления:

– все вещества находятся в газовой фазе;

– возможен точный контроль скорости роста пленки.

Недостаток — водород чрезвычайно взрывоопасен.

Для этого процесса типичное соотношение водорода и кислорода — от 1,8:1 до 1,9:1.

1.10.4. СКОРОСТНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Одной из проблем, которая возникает при термическом окислении кремния, является перераспределение примесей вследствие высокой температуры. Использование скоростного термического окисления позволяет значительно уменьшить перераспределение примесей, что особенно актуально для субмикронных ИМС. Так, скоростное термическое окисление используется для формирования подзатворного оксида субмикронных устройств, толщина которого составляет несколько нанометров. При этом необходимо тщательно следить за температурной однородностью.

Увеличить скорость окисления можно либо увеличением температуры, либо увеличением давления.

Окисление при высоком давлении приводит к увеличению скорости роста оксидной пленки (рис. 1.145). Кроме того, можно уменьшать температуру окисления: увеличение давления на 1 атм (98 кПа) позволяет снизить температуру на 30 град. При этом получаемые пленки имеют более высокую диэлектрическая прочность.

Однако метод скоростного термического окисления имеет ряд недостатков:
– сложность системы;
– проблемы безопасности.

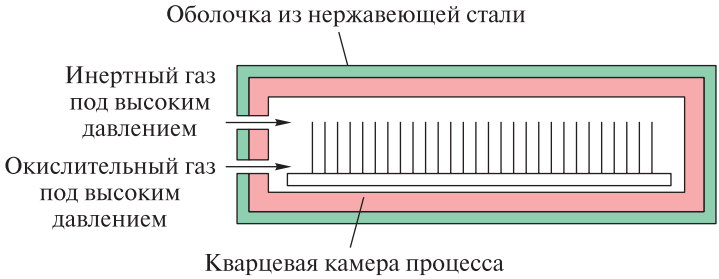


Рис. 1.145. Схема установки для оксидирования под высоким давлением

В результате его редко используют при изготовлении ИМС.

Достоинства методов скоростного термического окисления по сравнению с обычным окислением:
– более высокая скорость повышения температуры (от 75 до 150 °С/с);
– более высокая температура (до 1200 °С);
– бóльшая скорость протекания процесса;
– меньшая боковая диффузия примесей;
– лучше контроль термического режима;
– выше воспроизводимость режимов.

Схема установки для скоростного термического окисления приведена на рис. 1.146.

Лампы сверху и снизу подложки располагаются перпендикулярно друг другу (рис. 1.147).

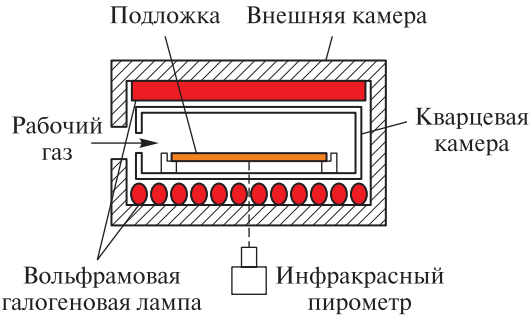


Рис. 1.146. Схема установки для скоростного термического окисления

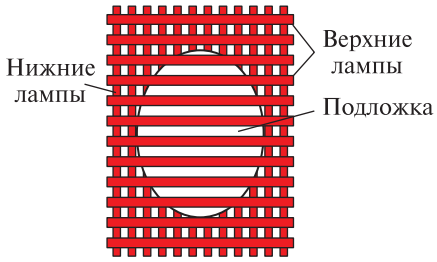


Рис. 1.147. Расположение ламп в установке для скоростного термического окисления

Главным образом этот метод используется для послеимплантационного быстрого термического отжига.

1.10.5. ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

Иногда применение диэлектрических слоев SiO_2 по тем или иным причинам невозможно, например, если отсутствует маскирующая способность слоя, используемого при фотолитографии. Такие примеси, как алюминий, галлий, индий, диффундируют в диоксиде кремния в десятки и сотни раз быстрее, чем в кремнии, поэтому использовать в качестве маски слои из SiO_2 в данном случае нельзя. В связи с этим достаточно широкое распространение получили слои из нитрида кремния Si_3N_4.

Для многих диффузантов проницаемость слоев из Si_3N_4 значительно меньше, чем слоев из SiO_2. Это позволяет выполнять их более тонкими, что повышает разрешающую способность фотолитографии. Использование слоев из нитрида кремния имеет и свои недостатки, в частности, более высокую плотность заряда на границе раздела $Si–Si_3N_4$, чем в системе $Si–SiO_2$. Возникают сложности при травлении рельефа из Si_3N_4. Поэтому часто используют комбинации слоев: $SiO_2–Si_3N_4$ или $SiO_2–Si_3N_4–SiO_2$. Получить слои из нитрида кремния можно и методом прямого нитрирования поверхности кремния азотом, аммиаком или гидразином:

$$3Si + 2N_2 \rightarrow Si_3N_4$$

$$3Si + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 6H_2$$

$$3Si + 42N_2H_4 \rightarrow Si_3N_4 + 4H_2$$

Однако даже при температуре около 1300 °С скорость роста слоев Si_3N_4 очень мала (менее 0,1 нм/мин). По этой причине методы прямого нитрирования не получили применения в технологии.

Хорошие результаты достигаются при использовании следующих реакций:

$$3SiH_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12H_2$$

$$3SiCl_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12HCl$$

Температура процессов составляет 600...1100 °С. Скорость роста слоев Si_3N_4 1...20 нм/мин. Получаются аморфные слои с хорошей маскирующей способностью.

Тесты к лекции 1.10

1. ***Какой из методов оксидирования позволяет быстрее получать оксидную пленку?***

а) влажное оксидирование;

б) сухое оксидирование;

в) скорость окисления от метода не зависит.

2. ***При каком методе оксидирования получают оксидную пленку с лучшими характеристиками?***

а) при сухом оксидировании;

б) при влажном оксидировании;

в) качество оксидной пленки не зависит от метода ее получения.

1.11. ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Цель лекции: ознакомление с принципами формирования покрытий.

1.11.1. МНОГОУРОВНЕВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

В производстве с субмикронными проектными нормами предъявляются жесткие требования к технологическим процессам формирования проводящих и диэлектрических слоев в маршруте создания многоуровневой металлизации, а также используемому для этих процессов технологическому оборудованию. Технология многоуровневой металлизации должна обеспечить решение ряда проблем, характерных для изделий данного уровня:

– заполнение диэлектриком узких, шириной до 0,35...0,70 мкм, зазоров в топологическом рельефе с отношением высоты рельефа поверхности к ширине зазора (Aspect Ratio) AR = 2,0–3,0 без образования пустот и возникновения избыточных локальных механических напряжений;

– получение локально планаризованной поверхности диэлектрика в областях с близким расположением линий разводки, а также недопущение отрицательного угла наклона боковых стенок слоя диэлектрика и эффекта «телесного угла» (top corner overhang) для диэлектрика, осажденного на одиночных линиях;

– формирование (с учетом требований субмикронной фотолитографии по глубине фокуса) глобально планаризованной поверхности диэлектрика методом ХМП;

– предотвращение нарушения сплошности и избыточного утончения проводящих слоев на боковых стенках малоразмерных контактных окон различного функционального назначения (например, адгезионных на основе титана и барьерных на основе нитрида титана TiN), а также обеспечение достаточной толщины адгезионных и барьерных слоев на дне контактных окон с высоким значением AR;

– заполнение малоразмерных контактных окон с AR = 2,0–3,0 низкоомным проводящим материалом (алюминием или вольфрамом) с обеспечением локальной планарности формируемой структуры;

– обеспечение низкого сопротивления контактов в системе металлизации;

– снижение расходования материала подложки при формировании контактов к мелкозалегающим (0,15...0,25 мкм) *p*–*n*-переходам;

– минимизация времени термической обработки при формировании слоев проводников и диэлектриков;

– управление значением и знаком механических напряжений в формируемых слоях для обеспечения минимальной деформации и надежности металлизации;

– выбор материалов, обеспечивающих расширение технологических возможностей изготовления структур металлизации с высокой стойкостью к электромиграции и коррозионной стойкостью, а также материалов, обеспечивающих высокоэффективные барьерные свойства, предотвращение деградации мелкозалегающих p–n-переходов и структур проводящих слоев металлизации;

– изготовление мишеней для систем магнетронного распыления с содержанием отдельных примесей, например тория и урана, на уровне ниже 1 ppb.

Анализ показывает, что для изготовления ИМС с субмикронными размерами с экономической и технологической точек зрения наиболее целесообразным подходом к решению указанных выше проблем является разработка преимущественно интегрированной технологии формирования диэлектрических слоев на базе кластерного оборудования.

Для формирования высококачественных структур металлизации субмикронных СБИС, преимущественно с многослойными проводниками, неизбежно требуется интеграция различных стадий изготовления структур проводящих слоев в технологические микроциклы, реализуемые на высоковакуумном кластерном оборудовании с помощью модифицированных методов физического осаждения из газовой фазы или их комбинации с химическим газофазным осаждением.

Такие технологические микроциклы включают в себя интегрированные процессы сухой очистки поверхности подложек (в том числе in-situ в реакторе для химического газофазного осаждения проводящих слоев) и могут сочетаться с процессами планаризации осажденных слоев обратным травлением (etch back), а также процессами скоростного термического отжига (СТО) в контролируемой технологической среде.

Для решения ключевых проблем формирования проводящих слоев диэлектриков в маршруте многоуровневой металлизации субмикронных СБИС разработаны промышленные технологии, основанные на использовании процессов плазмохимического осаждения, процессов осаждения планаризованных слоев SiO_2, ФСС, БФСС при субатмосферном давлении, процессов осаждения планаризованных слоев SiO_2 в плазме высокой плотности с высоко- и сверхвысокочастотным возбуждением; процессов сглаживания слоев диэлектриков физическим ионным или реактивно-ионным травлением; процессов глобальной планаризации диэлектриков и вольфрама.

Вышеуказанные процессы осаждения слоев могут быть, в частности, реализованы в том или ином сочетании на кластерном оборудовании компании Applied Materials Inc., например, на базе платформ Centura, Endura.

На зарубежном рынке также представлены оборудование и технологические процессы химического осаждения проводящих слоев систем металлизации из газовой фазы.

Компанией Applied Materials Inc., например, предлагается для нужд субмикронной технологии комбинированный процесс создания проводящих слоев системы металлизации, названный Giga-Fill. Этот процесс включает в себя стадии газофазного химического осаждения тонких слоев TiN (из металлоорганического источника) и алюминия в сочетании с физическим осаждением из газовой фазы проводящих слоев других типов (таких как титан и сплав системы Al–Si–Cu) и реализован в кластерной системе на базе платформы Endura.

Данной компанией также разработан интегрированный процесс газофазного химического осаждения сплошного слоя вольфрама с последующим обратным травлением, пригодный для заполнения малоразмерных контактных окон и планаризации поверхности структуры; соответствующие технологические модули могут устанавливаться на платформы Centura и Endura.

В 1998 г. на рынке появился разработанный компанией Applied Materials Inc. технологический процесс химического осаждения из газовой фазы слоев титана и соответствующий ему технологический модуль кластерной системы.

Компанией Materials Research Corp. (США) разработан интегрированный технологический процесс осаждения из газовой фазы слоев титана (плазмохимическое осаждение с одновременным формированием слоя $TiSi_2$ на дне контактных окон к кремнию) и TiN (термическое осаждение из неорганического источника), также на базе кластерного оборудования (MRC Phoenix CVD).

Кроме того, компанией Applied Materials Inc. выпускается оборудование для ХМП (Mirra CMP, mod. 3400), пригодное для глобальной планаризации как диэлектрика, так и вольфрама. Данное оборудование может интегрироваться с модулем двухсторонней химической обработки пластин DSS 200-11A компании On-Trak Systems Inc. (США).

1.11.2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ

При формировании проводящих слоев используются методы физического осаждения из газовой фазы (PVD) (рис. 1.148 и 1.149) и химического осаждения из паровой фазы (CVD) (рис. 1.150). Узловыми моментами формирования многоуровневых соединений СБИС являются этапы создания

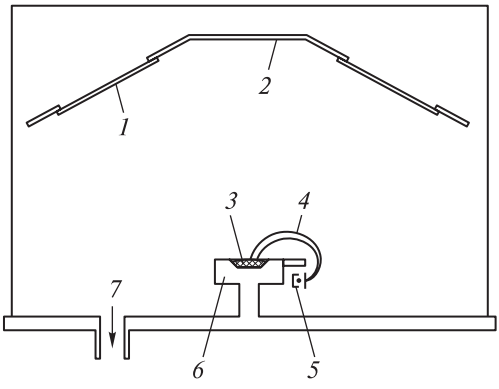


Рис. 1.148. Осаждение из газовой среды с помощью электронно-лучевого распыления:

1 — подложка; *2* — держатель; *3* — материал для испарения; *4* — поток электронов; *5* — термоионная нить; *6* — охлаждаемый тигель; *7* — вакуумный насос

вертикальных контактов к транзисторной структуре и между уровнями проводников. К транзисторной структуре контактное окно обычно заполняется вольфрамом, а между уровнями проводников — алюминием. В обоих случаях необходимо формирование контактов на основе системы Ti–TiN.

Назначение слоя титан в системе Ti–TiN заключается в том, что он реагирует с нижележащим слоем в контактном окне, снижая сопротивление контакта. Для того чтобы достичь этого результата, слой титана должен надежно покрывать дно окна (отверстия). В случае вольфрамовых пробок TiN выполняет роль как промотора адгезии, так и барьера, который предотвращает взаимодействие гексафторида вольфрама WF_6 с нижележащим слоем TiN или алюминия. Минимальная толщина слоя TiN, требуемая для формирования вертикальных контактов вольфрама и алюминия, составляет 5 и 25 нм соответственно.

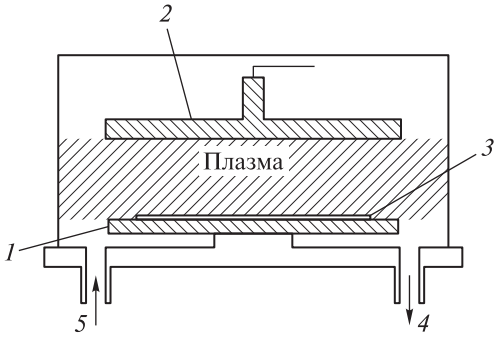


Рис. 1.149. Осаждение газовой среды плазменного распыления:

1 — электрод; *2* — охлаждаемая мишень; *3* — подложки; *4* — откачка газовакуумным насосом; *5* — подача газа

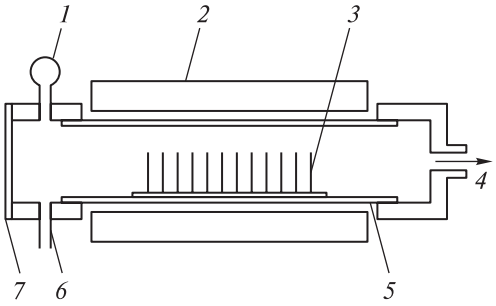


Рис. 1.150. Схема камеры CVD-реактора:

1 — датчик давления; *2* — трехзонная печь; *3* — подложка; *4* — откачка насосом; *5* — реактор (кварцевая трубка); *6* — поступление газа; *7* — загрузочная заслонка

Ниже перечислены методы формирования проводящих слоев в производстве СБИС с проектными нормами субмикронного диапазона, наиболее широко применяемые и (или) исследуемые зарубежными компаниями:

– осаждение при пониженном давлении (LPCVD) сплошных слоев вольфрама для заполнения контактных окон и формирования планаризованных вертикальных соединений (с последующим обратным травлением, etchback);

– плазмохимическое осаждение (PECVD) тонких слоев титана (контактные и адгезионные слои) и TiN (барьерные слои), в том числе осаждение in-situ;

– осаждение при пониженном давлении (LPCVD) тонких слоев TiN (барьерные слои, антиотражающее покрытие (ARC)) на базе неорганических (Inorg LPCVD) и металлоорганических (MOCVD) источников;

– осаждение при пониженном давлении (LPCVD) тонких слоев алюминия (для интеграции с процессом заполнения контактных окон слоем алюминия методом «горячего» PVD);

– избирательное осаждение при пониженном давлении (Selective LPCVD) слоев $TiSi_2$ для формирования самосовмещенных контактов к областям моно- и поликристаллического кремния.

1.11.3. МЕЖУРОВНЕВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ И ПАССИВАЦИЯ

Наиболее часто используются следующие методы получения диэлектрических слоев при производстве СБИС с проектными нормами субмикронного диапазона:

– субатмосферное осаждение из паровой фазы из смеси паров тетраэтоксисилана (ТЭОС) и озона (O_3) — SACVD;

– плазмохимическое осаждение из элементоорганических соединений (PETEOS) и гидридных источников (PECVD), в том числе с использованием плазмы высокой плотности (I-IDPCVD).

По данным зарубежных источников, для заполнения диэлектриком малоразмерных зазоров с высоким значением AR пригодна технология, основанная на использовании процессов конформного осаждения из газовой фазы при субатмосферном давлении (500...700 мм рт. ст.) — SACVD.

В качестве источников кремния и легирующих примесей используются жидкие элементоорганические соединения (например, ТЭОС) и озон O_3 — в качестве окислителя.

Составным элементом технологии SACVD является предварительное плазмохимическое осаждение тонкого барьерного слоя диэлектрика (SiO_2, SiO_xNe, Si_3N_4 или их комбинация) и герметизация слоя SACVD одним из указанных видов слоев и (или) слоем ФСС, БФСС; плазмохимическое осаждение слоев на базе SiO_2 может проводиться с использованием вышеназванных элементоорганических источников (PETEOS). Для улучшения конформности осаждения слоев плазмохимических диэлектриков (в частности, исключения отрицательного угла наклона боковых стенок осажденного слоя в структурах с AR > 1,0), с контролем плотности осажденного слоя и уровня механических напряжений применяются процессы с низкочастотной модуляцией высокочастотной плазмы (MF PETEOS CVD, MF PECVD).

Процесс осаждения нелегированного слоя SiO_2 при субатмосферном давлении позволяет заполнять без образования пустот зазоры в топологическом рельефе со значением параметра AR от 1,5–1,8 до 2,3–2,7; для слоев БФСС достигнуто заполнение зазоров с AR до 4,0 (с учетом влияния на значение AR частичного заполнения зазора барьерным слоем плазмохимического диэлектрика достигаются эффект локальной планаризации и низкий уровень механических напряжений в полученной многослойной диэлектрической структуре — с компенсацией напряжений).

Процессы плазмохимического осаждения из гидридных источников отличаются повышенной производительностью и могут применяться для частичного заполнения зазоров, осаждения на сглаженную глобально планаризованную поверхность. Целесообразно осаждение с использованием ТЭОС

и гидридных источников проводить в отдельных реакционных камерах в пределах кластерной системы.

Процессы физического ионного травления могут использоваться на промежуточной стадии заполнения узких зазоров для модификации профиля осажденного слоя диэлектрика (исключение отрицательного угла наклона боковых стенок) и для сглаживания осажденного слоя. Процессы реактивного ионного травления могут применяться в высокопроизводительной технологии сглаживания осажденного слоя и для формирования пристеночных структур (Sidewall Spacer) на боковой поверхности линий разводки (в том числе с отрицательным углом) и в контактных окнах. Целесообразна реализация процессов как физического ионного, так и реактивного ионного травления с использованием одной и той же реакционной камеры, входящей в состав кластерной системы.

Для заполнения слоем нелегированного SiO_2 малоразмерных зазоров (0,5 мкм) в топологическом рельефе с высоким значением AR (3,0–5,0) может быть использована технология газофазного осаждения в плазме высокой плотности (HDP-CVD), полученной с использованием источников различного типа (в том числе сверхвысокочастотных источников электронно-циклотронного резонанса (ECR) и высокочастотных источников с индуктивной связью (ICP)).

Осаждение в плазме высокой плотности характеризуется сочетанием одновременно протекающих процессов осаждения и ионного распыления, проявляющихся, при достаточной толщине осажденного слоя, в эффекте самопланаризации рельефа (в локальных масштабах).

Возможность технологии HDP-CVD управлять по отдельности скоростью осаждения и скоростью распыления позволяет контролировать профиль формируемого слоя непосредственно в процессе осаждения, что дает возможность исключить образование пустот в заполняемой области зазора и управлять планарностью поверхности. Устранение «фасетирования» поверхности диэлектрика, осажденного в плазме высокой плотности, достигается осаждением на поверхность SiO_2 с помощью HDP-CVD достаточно толстого слоя плазмохимического диэлектрика (SiO_2, SiO_xNe, Si_3N_4). Осаждение происходит из гидридных источников в отдельном реакторе кластерной системы с последующим сглаживанием (глобальная планаризация методом ХМП). Встроенный в кластерную систему модуль ионного или реактивно-ионного травления может также использоваться для формирования пристеночных структур на боковых поверхностях линий разводки, аналогично случаю кластерной системы на базе процесса SACVD.

Все рассмотренные выше процессы формирования диэлектрических слоев обеспечивают приемлемый для индивидуальной обработки пластин уровень производительности оборудования и малый термический нагрев, совместимый с формированием металлизации на основе алюминия.

Для достижения низкого уровня загрязнения осаждаемых слоев диэлектриков посторонними примесями и малой плотности привносимых дефектов реакционные камеры для осаждения должны снабжаться средствами in-situ

плазмохимической очистки (предпочтительна очистка после каждой обработки пластины).

При использовании для глобальной планаризации слоев диэлектрика процесса ХМП при производстве СБИС с субмикронными проектными нормами по окончании полирования необходимо проводить жидкостную химическую обработку пластин для удаления механически нарушенного слоя, химических загрязнений (особенно примесей металлов) и частиц полировочной суспензии, а также промывание и сушку пластин.

По условиям работы в чистом помещении целесообразна интеграция в установку ХМП модуля двухсторонней химической обработки (промывание и сушка пластин).

1.11.4. ПРОЦЕСС ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКА

Интегрированный технологический процесс глобальной планаризации диэлектрика методом ХМП, выполняемый на оборудовании модульной конструкции, состоит из двух операций:

1) химико-механического полирования;

2) двусторонней химической обработки пластин.

Диапазон значений толщины диэлектрика, удаляемого в процессе ХМП, — 500...2000 нм. Типовое значение скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП: термического SiO_2 — 100...120 нм/мин, плазмохимического SiO_2 (PETEOS) — 150...250 нм/мин. Неравномерность скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП — не хуже $\pm 15{,}0$ % (измерение в 49 точках, за исключением области шириной 6 мм у края пластины). Воспроизводимость скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП от пластины к пластине в партии из 25 пластин — не хуже $\pm 10{,}0$ % (измерение толщины проводят в центральной точке пластины).

Высота остаточного рельефа диэлектрика в областях с близким расположением линий разводки (расстояние между соседними линиями 0,5...2,0 мкм) — не более 300 нм. Общая высота остаточного рельефа диэлектрика на пластине — не более 700 нм.

Операции, выполняемые в ХМП-модуле жидкостной обработки пластин, интегрированном в единую установку:

– удаление механически нарушенного слоя диэлектрика жидкостным травлением;

– двухсторонняя химическая и гидромеханическая обработка пластин для удаления остатков полировочной суспензии и следов поверхностных загрязнений;

– сушка обработанных пластин.

Уровень загрязнения поверхности диэлектрика примесями тяжелых металлов после операций ХМП и химической обработки — не более $5 \cdot 10^{10} см^{-2}$.

Производительность обработки пластин кремния диаметром 150...200 мм — не менее 30 шт./ч (для установки ХМП с тремя позициями обработки и последующей химической обработкой).

Уровень привносимой дефектности — не более 0,05 $см^{-2}$ (для частиц размером более 0,20 мкм после химической обработки пластин, прошедших операцию ХМП).

1.11.5. ЭПИТАКСИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЙ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Определение и виды эпитаксии были рассмотрены в п. 1.9.2 (см. с. 121–125).

При легировании одновременно с атомами кремния в росте пленки участвуют и легирующие элементы. При эпитаксии можно получать как разнотипные p–n-переходы (например, n-пленку на p-подложке и наоборот), так и изотипные (n^+–n и p^+–p).

Различают эпитаксию из газовой, жидкой и твердой фаз.

Промышленное применение нашла эпитаксия из *газовой* фазы.

Атомы кремния выделяются на пластине в результате химической реакции из соединений кремния и легирующего элемента. При этом характер химической реакции должен быть гетерогенным, т. е. выделение атомов кремния должно происходить на поверхности пластины, а не в газовой фазе. Побочные продукты реакции должны легко удаляться с поверхности пластины.

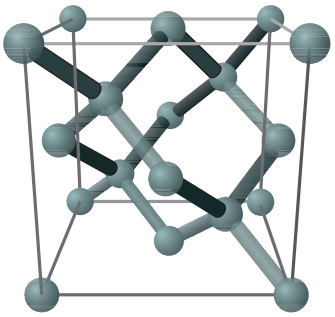


Рис. 1.151. Кристаллическая решетка кремния

Кристаллическая решетка кремния — гранецентрированная кубическая (рис. 1.151).

При эпитаксии дислокации и дефекты упаковки наследуются растущим слоем.

Условия, обеспечивающие совершенство структуры эпитаксиального слоя:

– химическая реакция выделения атомов кремния и легирующей примеси должна быть гетерогенной и исключать образование агломератов (т. е. скорость осаждения должна быть ограниченной);

– необходимы высокая температура пластины и ограниченная скорость осаждения атомов, для того чтобы обеспечить высокую подвижность адсорбированных на пластине атомов;

– с поверхности пластины должны быть удалены механические повреждения и различного рода загрязнения.

Для выделения кремния используют два типа химических реакций:

1) восстановление из тетрахлорида (хлоридный метод);

2) пиролитическое разложение моносилана SiH_4 (гидридный метод).

Моносилан SiH_4 взрывоопасен на воздухе и способен воспламеняться. Поэтому при эпитаксии реакторы предварительно тщательно очищают от следов кислорода и воды. Наличие водорода предохраняет моносилан от разложения в газовой фазе.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

В гетерогенной реакции, протекающей на границе газообразной и твердой фаз, можно условно выделить следующие стадии:

1) перенос веществ, участвующих в реакции, к поверхности пластины;
2) адсорбция поверхностью реагирующих веществ;
3) реакция на поверхности пластины;
4) десорбция молекул побочных продуктов;
5) перенос побочных продуктов в основной поток газа;
6) занятие атомами кремния узлов кристаллической решетки.

Такая схема реализуется в установках с непрерывной подачей рабочей смеси через реактор.

Цикл работы:

1) загрузка пластин и герметизация реактора;
2) продувка реактора азотом, а затем водородом (для вытеснения атмосферного воздуха);
3) нагрев реактора до температуры 1200 °С и выдержка в водороде (для восстановления оксидов);
4) газовое травление в HCl на глубину 1...2 мкм (удаление нарушенных и загрязненных слоев), по окончании — продувка в водороде;
5) снижение температуры до рабочего значения и подача смеси водорода, $SiCl_4$ и BBr_3 (наращивание слоя), по окончании — продувка в водороде;
6) подача смеси CO_2, H_2, $SiCl_4$ и осаждение оксидной пленки SiO_2;
7) охлаждение в потоке водорода;
8) продувка реактора азотом, охлаждение, разгерметизация реактора и выгрузка пластин.

1.11.6. ОСАЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Осаждение диэлектрических пленок взамен SiO_2 при термическом окислении позволяет:

– уменьшить температурное воздействие на пластину;
– использовать широкий круг материалов, обладающих в конкретных условиях применения наилучшими защитными или электрическими характеристиками.

Методом осаждения можно получать относительно толстые пленки. При этом температура процесса осаждения и разность значений температурного коэффициента линейного расширения пленки и пластины не вызывают значительных внутренних напряжений.

Основные требования к процессу осаждения:

– процесс не должен быть сложным, желательно иметь проточную систему;
– температура пластин в процессе осаждения должна быть невысокой;
– скорость осаждения должна быть высокой (продолжительность обработки — минимальной);

– в рабочей зоне не должно быть веществ, реагирующих с кремнием;

– реакция должна быть гетерогенной, обусловленной слабой зависимостью результатов осаждения от числа пластин и их расположения в рабочей зоне.

Тесты к лекции 1.11

1. ***Какой метод используется для осаждения монокристаллического кремния?***

а) эпитаксия;

б) химико-механическая планаризация;

в) осаждение из паровой фазы (CVD).

2. ***Какой метод используется для планаризации диэлектрика?***

а) химико-механическая планаризация;

б) осаждение из паровой фазы (CVD);

в) эпитаксия.

1.12. ТРАВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Цель лекции: ознакомление с принципами травления покрытий.

1.12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процессы плазмохимического травления (ПХТ) занимают особое место в технологии современных СБИС. Это связано как с трудоемкостью технологического цикла, так и с проблемами, возникающими при реализации проектных норм менее 0,8 мкм. Не случайно эта область технологии наиболее динамично развивается в последние годы. Результаты исследований воплощаются прежде всего в совершенствовании оборудования, которое определяет современный уровень технологии ПХТ (рис. 1.152).

В настоящее время выпускаемое оборудование для ПХТ можно подразделить на несколько групп:

– для травления поликремния, монокремния, полицидов тугоплавких металлов и нитрида кремния;

– для травления металлов, прежде всего алюминия, и различных сплавов;

– для травления оксидов кремния, включая диоксид кремния, и ФСС;

– для травления фоторезистивной маски.

В качестве химических реагентов используют газовые смеси:

– $HCl–Cl_2–N_2$ (возможно в сочетании с антиотражающими покрытиями);

– $Cl_2–HBr–He–O_2$ (для травления поликремния);

– $Cl_2–HBr–SF_6–O_2$ (для травления полицидов);

– NF_3 (для изотропного травления оксидов).

Для работы с данными газами необходима особая конструкция реакторов и вакуумных систем.

1.12.2. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Механизмы плазмохимического травления материалов интересовали многих ученых и технологов, но до недавнего времени исследование этих механизмов состояло в изучении зависимости скоростей травления материалов от состава и внешних параметров плазмы. Развитие методов диагностики параметров плазмы (зонды, спектроскопия, в том числе и лазерная), а также применение современных методов анализа поверхности — рентгеноэлектронная спектроскопия, электронная микроскопия, спектроскопия вторичных

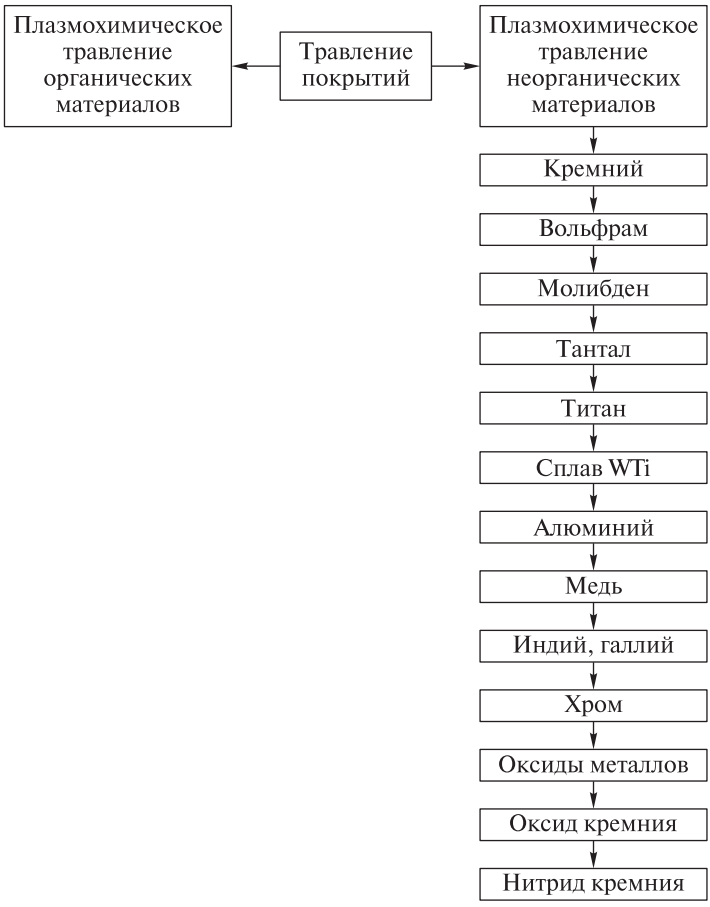


Рис. 1.152. Классификация методов травления покрытий

ионов — позволило подойти как к исследованию механизмов химических реакций в плазме галогенсодержащих газов с целью определения потоков нейтральных частиц на поверхность травимого материала, так и к разработке количественных методов исследования механизмов травления материалов. По существу, появилась возможность количественной характеристики состава и энергии частиц плазмы, бомбардирующих поверхность материалов, скоростей химических реакций травления и состава продуктов в газовой фазе и твердом теле.

Существенную помощь оказали результаты исследования химических реакций в модельных системах — при взаимодействии нейтральных атомов и молекул с поверхностью материалов, при ионном травлении, ионно-стимулированном травлении материалов галогенами. Эти исследования выявили основные стадии процессов: образование активных частиц — в первую очередь атомов галогенов, кислорода и галогенсодержащих радикалов в плазме; адсорбцию их на поверхности материала; диффузию вглубь материала

под поверхностный слой атомов; химические реакции в твердом теле с образованием летучих галогенидов, оксигалогенидов материалов и оксидов (в случае травления полимеров); десорбцию летучих продуктов с поверхности материала и распыление нелетучих продуктов.

Так, количественные данные о концентрациях атомарного фтора в плазме различных разрядов позволили установить факты как значительного увеличения скорости травления кремния и металлов, так и заметного ее снижения по сравнению со скоростями травления в послесвечении разрядов, т. е. при отсутствии бомбардировки заряженными частицами и одинаковых потоках атомов фтора на поверхность. Для кремния, например, увеличение скорости травления достигает более двух порядков; снижение скорости травления наблюдается при высоких концентрациях атомов фтора, больших потоках и энергиях заряженных частиц и варьируется от нескольких десятков процентов до нескольких раз.

Увеличение скорости травления в плазме связано с влиянием потока заряженных частиц на поверхность (как это наблюдается при ионно-стимулированном травлении, когда поверхность бомбардируется одновременно ионами и нейтральными атомами и молекулами фтора), а также возможным вкладом в травление насыщенных радикалов. Детальные исследования в плазме подтвердили эти выводы. Более того, наблюдалось дополнительное влияние электрического потенциала поверхности относительно потенциала плазмы. Увеличение ионного потока в результате наложения на поверхность кремния масок из SiO_2 и алюминия не влияет на скорость травления при прочих равных условиях. Вместе с тем увеличение отрицательного потенциала поверхности относительно потенциала плазмы приводит к увеличению скорости травления даже при сравнительно высоких значениях давления газа (20...80 Па). При уменьшении давления эффект становится более ярко выраженным и увеличивается также в результате увеличения энергии падающих ионов вследствие ускорения их в приповерхностном слое плазмы. Эффект поля объясняется его непосредственным влиянием на адсорбцию нейтральных частиц поверхностью. Аналогичные эффекты поля наблюдаются, например, при гетерогенном катализе химических реакций.

На увеличение скорости травления кремния во фторсодержащей плазме может влиять очистка его поверхности вследствие ионного распыления поверхностного слоя нелетучих продуктов, образующихся, например, при окислении поверхности кислородом, добавляемым в рабочий газ для улучшения некоторых характеристик процесса или являющимся малой примесью основного плазмообразующего газа.

Уменьшение скорости травления в плазме по сравнению со скоростью травления в послесвечении разряда (при бомбардировке только атомами фтора) связано с различными факторами, приводящими к пассивации поверхности вследствие бомбардировки травимой поверхности ненасыщенными радикалами. Это приводит к осаждению полимерного слоя, препятствующего травлению, вследствие переосаждения нелетучих продуктов, распыляемых при ионной бомбардировке поверхности стенок реакторов и электродов, что

вызывает зависимость скорости травления от времени. Детальные исследования состава поверхности образцов после травления позволили обнаружить в этом случае нелетучие продукты распыления материалов стенок реактора — фториды щелочных металлов.

Подтверждение сильного влияния материала поверхности на скорость и вероятность травления материалов в плазме получено при изменении материалов электродов, на которых, как правило, располагаются обрабатываемые образцы. Вероятность травления кремния в послесвечении разряда с электродами, покрытыми кремнием, составляет $5 \cdot 10^{-4}$ и уменьшается при покрытии электродов алюминием, оксидом алюминия Al_2O_3 и тефлоном. В плазме разряда вероятность травления увеличивается в 140–540 раз. Вероятность травления на алюминиевых электродах увеличивается при одновременной бомбардировке поверхности образца атомами фтора и ионами, однако остается минимальной. При покрытии из оксидов железа наблюдается монотонный спад вероятности травления с увеличением времени экспозиции.

В обоих случаях при этом на поверхности образцов после травления обнаружены атомы материала покрытия электродов — алюминия и железа.

Поверхность образцов оказалась абсолютно чистой после травления в плазме с электродами, покрытыми кремнием и вольфрамом. Их фториды летучи и не переосаждаются на образцах. Более того, поверхность электродов является в этом случае геттером, абсорбирующим все примеси, способные пассивировать поверхность травимых материалов, сводя к минимуму их влияние. Вероятность травления в этих случаях максимальна и превышает максимальное значение, полученное в послесвечении СВЧ-разряда при давлении менее 10 Па, при котором окисления образцов кислородом практически не зарегистрировано. Эти результаты подтверждают роль окисления в пассивации поверхностей травимых материалов. Аналогичное увеличение вероятности травления (в 10 раз) наблюдалось и для сплава WTi (5:1) при покрытии алюминиевых электродов вольфрамом.

Более сложное влияние, различное для разных материалов, оказывает одновременная бомбардировка поверхности заряженными и различными нейтральными частицами. Одновременная бомбардировка, например, атомами фтора и кислорода поверхности кремния и тантала приводит к снижению вероятности травления вследствие окисления поверхности, регистрируемого после экспозиции образцов в плазме. В то же время в случае применения вольфрама вероятность травления при малом отношении потоков атомов кислорода и фтора также снижается, но при увеличении этого отношения вновь увеличивается. Это объясняется тем, что образующиеся оксифториды вольфрама являются летучими соединениями, так же как и фториды, и не пассивируют поверхность, а, десорбируясь, ускоряют травление.

Травление кремния. Основные частицы, активные при травлении кремния, — атомы фтора и радикалы фторида серы SF_5 (вклад последних в скорость травления составляет около 30 %). Скорость травления при всех условиях и составах плазмы прямо пропорциональна концентрации атомов фтора при прочих равных условиях и увеличивается с ростом потока ионов

и увеличением разности потенциалов поверхности и плазмы при одинаковой концентрации атомов. При низких значениях давления и частоты поля, когда потенциал смещения образца относительно плазмы велик и велика энергия ионов (около 100 эВ), скорость травления пропорциональна потоку ионов, как это отмечалось и при ионно-стимулированном травлении. Однако в плазме этот эффект вуалируется переосаждением распыляемых ионами материалов электродов и стенок на поверхность образцов, пассивирующих ее и снижающих скорость травления. Такое же влияние оказывает окисление поверхности кремния атомами, образующимися вследствие диссоциации молекул кислорода (из-за небольшого количества неконтролируемой примеси в плазмообразующем газе, натекания атмосферы или введения контролируемых добавок). Основные продукты травления в газовой фазе — фториды кремния: SiF_4 (насыщенный фторид), испаряющийся с поверхности, и SiF_2, имеющий повышенную энергию и десорбирующийся вследствие ионной бомбардировки. Пассивация поверхности за счет перечисленных выше частиц, а также атомов хлора в хлорсодержащей плазме, обеспечивает анизотропию травления вследствие ионной бомбардировки, увеличивающуюся по мере увеличения энергии ионов (низкое давление, низкая частота поля, наложение дополнительного смещения потенциалов от независимого источника или самосмещение). Однако по мере увеличения анизотропии увеличивается и опасность ухудшения качества поверхности после травления (нарушенная структура, состав, встроенный поверхностный заряд и др.).

Вследствие высокой летучести SiF_4 толщина фторированного слоя на поверхности травления мала (около 1 нм) и он состоит из ненасыщенных фторидов кремния SiF_x ($x = 1–3$), что свидетельствует о последовательном протекании реакций фторирования за счет присоединения атомов фтора.

Скорость травления увеличивается по мере увеличения давления газа и мощности разряда. При большой площади поверхности экспонируемых образцов наблюдается изменение состава плазмы вследствие значительных потоков продуктов, а также обеднения плазмы активными частицами. Это приводит к *эффекту большой загрузки* — снижению скорости травления с увеличением площади поверхности образцов.

В хлорсодержащей плазме, как и при ионно-стимулированном травлении, травление происходит только вследствие ионной бомбардировки и наблюдается высокая анизотропия при низких скоростях травления. При использовании фторхлорсодержащей плазмы анизотропия вследствие пассивации хлором сохраняется, а скорость травления увеличивается в результате бомбардировки атомарным фтором. Скорость травления легированного кремния зависит также от степени и типа его легирования.

Травление вольфрама. Закономерности травления вольфрама аналогичны описанным выше для кремния, что обусловлено высокой летучестью насыщенного фторида вольфрама WF_6 при комнатной температуре. Однако влияние окисления проявляется аналогично только при малой концентрации кислорода в плазме. При этом возможна анизотропия травления, но она выражена слабее. При повышении концентрации кислорода вероятность

травления возрастает, что обусловлено летучестью окситетрафторида вольфрама WOF_4, анизотропия исчезает.

Травление молибдена. Механизмы травления молибдена в основном аналогичны механизмам травления кремния. Отличия связаны с более высокой температурой кипения насыщенного фторида молибдена MoF_6, что приводит к более низкой вероятности травления при комнатной температуре. С повышением температуры поверхности образцов вероятность травления увеличивается и различия уменьшаются.

Травление тантала. Насыщенный фторид тантала TaF_5 плавится и кипит при температуре значительно превышающей комнатную, поэтому вероятность и скорость травления его во фторсодержащей плазме при комнатной температуре значительно ниже, чем кремния. При этом на поверхности образуется достаточно толстая пленка TaF_5, а скорость травления существенно зависит от температуры и интенсивности ионного потока (пропорциональна последней, как при ионно-стимулированных процессах). Атомы кислорода пассивируют поверхность, однако этот эффект проявляется слабее, чем для кремния. Указанная особенность может быть связана с более высокой летучестью оксифторида тантала Ta_2O_5, хотя прямых данных об этом нет, или, скорее всего, это кажущийся эффект, связанный с другим механизмом десорбции продуктов — преимущественно ионным распылением.

Травление титана. Во фторсодержащей плазме скорость травления мала вследствие малой летучести продуктов и ограничивается чисто ионным распылением образующейся пленки фторидов. Электронная бомбардировка ускоряет фторирование. Соответственно, велика анизотропия травления. Плазмохимическое травление титана наблюдается в хлорсодержащей плазме вследствие более высокой летучести тетрахлорида титана $TiCl_4$ (низкая температура травления). Однако в этом случае насыщенного хлорида титана в газовой фазе не обнаружено. По-видимому, летучими являются продукты TiF_yCl_x. На поверхности наблюдается большая концентрация фтора, связанная с взаимодействием фторсодержащих радикалов. Активными частицами в процессе травления являются не только атомы, но и молекулы хлора и, возможно, интергалогена FCl.

При высокой температуре (более 450 K) ионная бомбардировка не ускоряет травление, при низкой (менее 325 K) — наблюдается явное стимулирование травления ионами, а электроны ускоряют рост фторидной пленки. При высокой температуре это проявляется в повышении скорости травления.

Травление сплава WTi. Механизм травления этого сплава интересен тем, что один из его компонентов имеет нелетучие фториды или хлориды при низкой температуре. Во фторсодержащей плазме активными частицами в процессе травления являются радикалы SF_5 и атомы фтора. Вследствие зависимости скорости травления фтором компонентов сплава от температуры наблюдается излом при температуре около 350 K. Эта температура ниже температуры плавления TiF_4, но выше соответствующей температуры плавления WF_6. Но фторид преобладающего компонента (вольфрама) вовлекает в травление и титан, так как при температуре выше этой сплав травится как

единый материал. В то же время при температуре менее 350 K увеличивается энергия активации и соответственно снижается скорость травления.

Во фторхлорсодержащей плазме скорость травления сплава WTi повышается, но остается существенно ниже, чем скорость травления титана и сплава во фторсодержащей плазме, хотя при низкой температуре (менее 320 K) эти скорости примерно одинаковы.

Травление алюминия. Алюминий — один из основных металлов, используемых для металлизации при изготовлении БИС и СБИС. Алюминий не имеет летучих галогенидов при комнатной температуре, за исключением димера Al_2Cl_6, температура возгонки которого составляет 297 K. В связи с этим травление пленок алюминия осуществляют в плазме хлорсодержащих газов и их смесей: Cl_2, CCl_4, BCl_3, $Cl_2–CCl_4$, $Cl_2–BCl_3$. Активными частицами, взаимодействующими с чистой поверхностью алюминия, являются атомы и молекулы хлора. Вероятности их реакций при комнатной температуре одинаковы, они не ускоряются и при ионной бомбардировке. Скорость травления не зависит от разности потенциалов между плазмой и поверхностью, мощности разряда. Основной продукт реакции — Al_2Cl_6. Травление изотропно. Однако поверхность пленок алюминия легко окисляется атмосферным воздухом, поэтому в технологии, как правило, травят окисленные пленки, преимущественно атомами хлора. Анизотропия травления достигается за счет добавок газов (CCl_4, BCl_3), генерирующих в плазме хлоруглеродные и борхлорные радикалы (CCl_x, $x = 1–3$; BCl_x, $x = 1–2$). Они осаждаются на поверхности, пассивируя ее, и удаляются, так же как и окисленные слои, под действием ионной бомбардировки.

Продукты травления переосаждаются на поверхности стенок реактора и частично на поверхности травимых образцов. Вследствие гигроскопичности хлоридов алюминия пары воды адсорбируются, вступая с ними в реакцию с образованием гидроксида алюминия AlH_3O_3. Это приводит к невоспроизводимости результатов и изменению свойств изделий вплоть до полного стравливания оставшихся участков пленки в БИС и СБИС в процессе хранения при атмосферных условиях, даже под защитным покрытием. По этой причине необходимы строгий контроль за примесью паров воды, а также меры по очистке и пассивированию поверхности после травления и защите изделий, чтобы исключить последующий контакт алюминиевых слоев с атмосферой.

Травление меди. Медные пленки травят в хлорсодержащей плазме, поскольку хлориды более летучи, чем фториды. Частицами, активно взаимодействующими с поверхностью меди с кристаллографической ориентацией <100>, служат атомы и молекулы хлора, причем вероятность взаимодействия частиц обоих видов практически одинакова даже при комнатной температуре. Ионная бомбардировка не влияет на скорость процесса.

В результате взаимодействия на поверхности образуется слой хлорида меди CuCl, толщина которого при комнатной температуре пропорциональна времени экспозиции. Единственным летучим продуктом является тример Cu_3Cl_3, температура сублимации которого составляет 423 °C. В связи с этим возможны два варианта организации процесса:

1) экспозиция поверхности при комнатной температуре с последующим нагревом до температуры выше температуры начала сублимации тримера до полного удаления хлорированного слоя;

2) экспозиция поверхности при температуре, превышающей температуру сублимации. В этом случае скорость травления может изменяться в широких пределах вследствие изменения температуры.

В обоих вариантах организации процесса травление изотропно.

Травление индия и галлия. Другие металлы III группы Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева (индий, галлий) и их соединения с элементами V группы (фосфором, мышьяком) также травят в хлорсодержащей плазме. Набор плазмообразующих газов в этом случае существенно больше: Cl_2, CCl_4, BCl_3, Cl_2–BCl_3, Br_2, $COCl_2$, CCl_2F_2, PCl_3, HCl, CCl_2F_2–O_2–Ar, CCl_4–O_2. Анизотропия травления достигается использованием фтора и кислорода, поскольку фториды и оксиды этих элементов нелетучи и удаляются ионным распылением.

Травление хрома. Плазмохимическое травление пленок хрома осуществляется в плазме смесей хлорсодержащих газов с кислородом. Поскольку галогениды хрома нелетучи, единственным возможным продуктом травления в газовой фазе является летучий оксихлорид хрома CrO_2Cl_2. Оксиды хрома травятся в хлорсодержащей плазме Cl_2 + Ar, CCl_4 + Ar со значительно большей скоростью, чем хром, вследствие содержащегося в пленке кислорода, связанного с хромом. Это приводит к высокой селективности травления оксида относительно хрома.

Травление оксидов металлов. Плазмохимическое травление оксидов металлов осуществляется только в тех случаях, когда образуются летучие оксифториды или оксихлориды ($MoOF_4$, $MoOCl_x$ (x = 3–4), MoO_2Cl_2, WOF_4, $WOCl_4$, ReO_2F_2, $ReOF_4$). При плазмохимическом травлении вследствие взаимодействия с нейтральными частицами травление изотропно, но может достигаться высокая селективность по отношению к металлам.

Травление других оксидов в плазме происходит в результате ионного распыления, поэтому осуществляется при низком давлении (менее 10 Па) и больших потенциалах поверхности относительно потенциала плазмы (низкая частота электромагнитного поля — f < 100 кГц, автоматическое смещение или подача электрического потенциала от дополнительного источника). При этом возможно достижение анизотропии травления, но селективность снижается вследствие слабой зависимости вероятности травления ионами от массы.

Травление оксидов кремния. Травление диоксида кремния SiO_2 осуществляется во фторсодержащей плазме атомами фтора и фторсодержащими радикалами (CF_x, SF_5 и др.). При этом продуктами в газовой фазе являются SiF_4 и молекулы CO, SO, образующиеся при окислении CF_x- и SF_5-радикалов кислородом, содержащимся в материале. Адсорбции радикалов и пассивирования поверхности не происходит.

Скорость травления SiO_2 во фторсодержащей плазме меньше скорости травления непассивированного кремния, поэтому, как правило, наблюдается высокая селективность травления кремния по отношению к травлению

SiO_2. В случае пассивации поверхности кремния за счет осаждения полимерной пленки (например, в плазме C_2F_4, C_3F_4, C_4F_8, C_3F_8) возможна полная остановка травления кремния. Тогда может быть достигнута абсолютная обратная селективность — травления SiO_2 к кремнию, так как пленка на поверхности SiO_2 не образуется. Повышение селективности травления SiO_2 к кремнию возможно и при пассивации кислородом, поскольку в этом случае атомарный кислород окисляет поверхность кремния до SiO, скорость травления которого по крайней мере на порядок меньше, чем SiO_2, и селективность травления SiO_2 и кремния составляет 20–30. При высокой селективности травления SiO_2 травление становится анизотропным, так как ионная бомбардировка ускоряет травление SiO_2.

Монооксид кремния SiO и кристаллический кварц можно травить путем ионной бомбардировки — при больших потоках и энергиях падающих ионов в режиме реактивно-ионного травления.

Травление нитрида кремния. Пленки нитрида кремния Si_3N_4 используются при изготовлении БИС и СБИС в качестве защитных слоев, в том числе и для защиты от радиационных повреждений. Они, так же как и SiO_2, травятся во фторсодержащей плазме атомами, фторсодержащими радикалами с выделением SiF_4 и азота в газовую фазу. Скорость травления, как правило, меньше, чем кремния, и селективность травления Si_3N_4 и кремния составляет 8–10. Положительное влияние на скорость травления Si_3N_4 оказывают добавки в плазмообразующий газ (CF_4, C_2F_6, C_3F_8) водорода и углеводородов (CH_4, C_2H_2, C_2H_4), приводящие к ускоренному образованию легколетучего продукта NH_3. При этом скорость травления нитрида резко увеличивается, а кремния — уменьшается вследствие образования полимерных пленок. В результате наблюдается обратная селективность травления Si_3N_4 и кремния — 35–100.

1.12.3. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерные пленки широко применяются в производстве изделий микроэлектроники в качестве фоторезистов и резистивных слоев для электронной и рентгеновской литографии, в качестве защитных покрытий готовых микросхем, а также как вспомогательные слои — для планаризации рельефной поверхности перед нанесением металлических слоев и др. Плазмохимическое травление полимерных пленок представляет собой весьма важный элемент технологии.

Как правило, органические материалы травят в кислородсодержащей плазме. Основными активными частицами являются атомы кислорода, а десорбируемыми продуктами деструкции — оксиды углерода (CO, CO_2), водород, вода и радикалы OH (при комнатной температуре), которые, взаимодействуя с водородом в объеме плазмы или вблизи поверхности, превращаются в пары воды. Для широкого круга полимерных фоторезистов скорость травления в кислородсодержащей плазме при одинаковых условиях изменяется в пределах нескольких десятков процентов. Энергия активации травления

в большинстве случаев варьируется от 4 до 15 ккал/моль (от 17 до 63 кДж/моль) и зависит от параметров плазмы, а также от состава и структуры полимера.

Фторсодержащие и полностью фторированные полимеры травят со скоростью на порядок меньшей, чем углеводородные, и используют для повышения стойкости масок. Предварительная термообработка или ионная бомбардировка полимерных резистов может приводить к сшивкам полимерных цепей, что увеличивает стойкость полимеров в кислородсодержащей плазме. Этот эффект используется для создания негативных фоторезистов. В некоторых случаях предварительное облучение полимеров может приводить к структурным изменениям (обрывам цепей, боковых групп, образованию сшивок и т. п.), увеличивающим скорость травления, и используется для создания позитивных резистов.

Скорость травления почти всех исследованных полимеров увеличивается при введении в кислородсодержащую плазму фторуглеродных газов, в первую очередь вследствие повышения скорости генерации атомов кислорода. В то же премя генерация атомарного фтора и фторирование углеродных атомов, в особенности боковых групп, приводят к дополнительному их отрыву. Остающиеся на поверхности свободные связи начинают быстрее взаимодействовать с атомарным кислородом.

1.12.4. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ И ЕЕ РОЛЬ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ ТРАВЛЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Как было указано в предыдущем подразделе, плазмохимическая полимеризация на поверхности экспонируемых образцов играет важную роль в создании высокоселективных и высокоанизотропных процессов травления. Для оптимизации этих процессов необходимо знать механизмы плазмохимической полимеризации и согласовать ее роль с ролью активных частиц в травлении материалов. Для процессов травления важны механизмы полимеризации в галогенсодержащей, и в частности во фторсодержащей, плазме.

Значительный прогресс в изучении механизмов полимеризации во фторуглеродной плазме достигнут в результате разработки методов контроля потоков и энергий частиц, падающих на поверхность образцов.

Для регистрации потоков заряженных частиц используются различные варианты зондовых методов: тонкого зонда Ленгмюра, не возмущающего плазму; плоского зонда и их комбинации. Для регистрации нейтральных частиц — атомов и радикалов — используют спектроскопические методы, наиболее детально разработанные для галогенуглеродной плазмы. Привлекаются данные о механизмах и скоростях газофазных реакций для определения потоков различных частиц на поверхности растущих полимерных пленок.

Скорость роста полимерной пленки во всех исследованных случаях существенно зависит от потока ионов при неизменных прочих потоках частиц (радикалов, УФ-квантов, стабильных ненасыщенных соединений). Встраивание ионов, как правило, не дает значительного вклада в рост пленки. В случае фторорганических соединений (перфторциклобутан) скорость роста

полимера увеличивается при усилении электронной бомбардировки поверхности. Однако для роста полимера необходима бомбардировка нейтральными частицами, а именно различными и, особенно, тяжелыми ненасыщенными радикалами. Наиболее приемлемой для объяснения процессов в углеводородной и фторуглеродной плазме оказалась *активационно-рекомбинационная модель*. Согласно этой модели, ионная бомбардировка поверхности или ион-электронная рекомбинация на поверхности приводит к созданию на ней свободных центров роста — ненасыщенных валентностей, к которым присоединяются радикалы, имеющие от одной до нескольких свободных валентностей. Гибель свободных центров может происходить в результате присоединения атомов водорода или галогена, в частности фтора, а также вследствие взаимной рекомбинации центров.

Экспериментально показано, что скорость полимеризации во всех исследованных случаях значительно снижается по мере увеличения температуры поверхности. Объяснение этого факта в рамках активационно-рекомбинационной модели вызывает наибольшие затруднения. Привлекаются соображения о сложной структуре поверхности, в результате чего с повышением температуры увеличивается скорость взаимной рекомбинации свободных центров, а также об ускорении с возрастанием температуры взаимной рекомбинации поверхности центров и десорбции пришедших радикалов до их полной термолизации после присоединения к центрам роста. Кроме того, эксперименты показали, что ионная бомбардировка приводит не только к ускорению роста полимера. В случае галогенуглеродов при большой энергии ионов в бедных смесях фторуглеродов с инертными газами наблюдается травление полимера в результате ионной бомбардировки, приводящее к прекращению роста и даже уменьшению массы полученного ранее полимера. Этот процесс также зависит от температуры поверхности. Скорости отдельных элементарных актов сложного процесса, каким является плазмохимическая полимеризация, зависят от температуры поверхности и ее электрического потенциала.

Релаксационные исследования подтвердили активационно-рекомбинационную модель для ряда углеводородных и галогенуглеродных газов. Показано, что время жизни активных центров на поверхности достигает нескольких секунд. Первоначально предполагалось, что образование активных центров является результатом выделения энергии только при рекомбинации ионов на поверхности. Однако в дальнейшем было установлено, что скорость их образования в галогенсодержащей плазме зависит от кинетической энергии ионов.

Активационно-рекомбинационная модель полимеризации подтверждена математическим моделированием газофазных и гетерофазных реакций в плазме смесей метана с инертными газами, а также в галогенуглеродной плазме (C_2F_4, C_3F_6, C_4F_8). Использование результатов детального экспериментального исследования механизмов газофазных реакций и закономерностей процесса полимеризации в плазме C_4F_8, а также математического моделирования этих процессов показало, что первичный распад фторуглеродов происходит в результате однократных столкновений электронов

с молекулами по ряду параллельных каналов, включающих образование стабильных ненасыщенных молекул, моно- и бирадикалов и атомарного фтора. Атомарный фтор вступает в быстрые реакции диспропорционирования с ненасыщенными фторуглеродами, разлагая их на более легкие радикалы, что значительно снижает его концентрацию и гибель свободных центров на поверхности.

Вторичные реакции радикалов (рекомбинация, диспропорционирование с участием бирадикалов) приводят к образованию более тяжелых ненасыщенных стабильных продуктов, концентрация которых проходит через максимум в зависимости от времени пребывания газа в плазме вследствие диссоциации в результате электронного удара и диспропорционирования. Вторичные реакции монорадикалов приводят к образованию насыщенных не участвующих в полимеризации фторуглеродов, концентрация которых растет пропорционально времени пребывания частиц в плазме (t_p). Вследствие вторичных реакций с участием радикалов в плазме синтезируются более тяжелые молекулы и радикалы (C_nF_m, $n = 5–11$), чем исходные молекулы. Основной вклад в скорость роста полимерной пленки при $t_p > 50$ мс на поверхности вносит встраивание нейтральных тяжелых радикалов $C_4–C_8$ в активные поверхностные центры. Вклад более легких радикалов увеличивается по мере уменьшения времени пребывания частиц в плазме ($t_p < 20$ мс). Активные центры на поверхности образуются вследствие ионной и электронной бомбардировки поверхности и гибнут при присоединении атомов фтора и монорадикалов. Процесс полимеризации продолжается и при прекращении разряда (при импульсной модуляции тока), что обеспечивается вкладом бирадикалов. Наличие бирадикалов, в первую очередь CF_2 и C_2F_4, в модулированной плазме приводит к резкому изменению структуры и состава полимерных пленок, которые по составу и структуре приближаются к тефлону. Этому способствует и отсутствие ионной бомбардировки поверхности между импульсами тока. При большом времени пребывания в стационарной плазме, используемой при травлении материалов, полимер является сильно сшитым, а соотношение атомов углерода и водорода составляет от 1,0:1,2 до 1,0:1,8.

Описанные выше закономерности и механизм полимеризации во фторсодержащей плазме в общих чертах аналогичны описанным ранее для углеводородной плазмы. Основываясь на аналогиях в поведении углеводородов и фторуглеродов, можно считать, что они будут проявляться и в хлоруглеродной плазме.

Во всех случаях травления материалов в плазме фтор- и хлоруглеродных газов и их смесей с углеводородами представленные закономерности и механизмы полимеризации можно использовать для оптимизации процессов травления, в частности, для достижения анизотропии травления.

Состав плазмы нужно выбирать из тех соображений, чтобы скорости осаждения полимерных пленок на травимых материалах превышали скорости их травления в условиях плазмы при отсутствии ионной бомбардировки, но были меньше скорости ионно-стимулированного травления осаждаемого полимера. В этом случае на боковых поверхностях рельефа, не

подверженных ионной бомбардировке, будет осаждаться полимерная пленка, пассивирующая поверхность и блокирующая травление материала подложки. На поверхностях, бомбардируемых ионами (дно рельефа), которые падают по линиям электрического поля — перпендикулярно поверхности образцов, осаждения пленки нет и скорость травления, соответственно, выше. Таким образом, будет осуществляться травление поверхности в направлении, перпендикулярном ей, при отсутствии бокового подтрава материала под маску, т. е. высокоанизотропное травление.

После достижения требуемой геометрии рельефа в случае анизотропного плазмохимического травления в полимеризующейся плазме необходимо вводить операцию изотропного травления полимерной пленки для удаления ее с боковых поверхностей и точного воспроизведения размеров и поверхностных свойств материалов.

Необходимо отметить, что общей особенностью протекания процессов травления неорганических соединений в плазме является образование на поверхности травимых материалов слоев нелетучих продуктов (пассивация) в результате взаимодействия с углеродсодержащими радикалами (полимеризация) и с кислородом, а также в результате переосаждения на поверхность травимых материалов продуктов распыления материалов стенок и электродов ионной бомбардировкой. Эти нелетучие продукты удаляются только при последующей ионной бомбардировке пассивированной поверхности, что и составляет основу для разработки анизотропных (направленных) процессов травления и создания элементов рельефа с отвесными стенками. Используется тот факт, что потоки ионов падают на поверхность по силовым линиям электромагнитных полей и при бомбардировке удаляют пассивирующие слои с горизонтальных участков поверхности, оставляя их там, куда бомбардирующие ионы не попадают.

Кроме того, выявлено, что различные материалы травятся неодинаково разными частицами, что составляет основу для изменения селективности травления разных слоев материалов по отношению друг к другу с целью направленного формирования необходимых структур на поверхности. Ионная бомбардировка оказывает многостороннее воздействие на поверхность, ускоряя диффузию галогенов и кислорода вглубь материала, разрывая связи и ускоряя реакции в теле, распыляя нелетучие продукты. Результат существенно зависит от конкретной системы.

В большинстве случаев травления неорганических материалов в плазме, особенно при анизотропном и селективном травлении, требуются дополнительные операции очистки поверхности, удаления дефектов структуры, вносимых в материалы в результате бомбардировки различными частицами плазмы (в том числе удаление встроенных зарядов, нарушенных слоев, внесенных примесей и т. д.). Эти операции осуществляются различными способами, например путем отжига материалов нагревом до высокой температуры (до 1000 °С) в вакууме и в атмосфере различных газов.

В заключение необходимо отметить, что плазмохимические методы травления материалов в сочетании со стимулированными плазмой процессами

осаждения различных слоев позволили разработать полностью замкнутые сухие методы создания сложных изделий микроэлектроники — СБИС и сверхбыстродействующих схем. Этот комплекс методов используется и в других областях техники, в частности, при создании миниатюрных сенсоров — чувствительных приборов обнаружения примесей в газах и других средах, датчиков, микродвигателей, а также в электронике, электротехнике, микроинженерии. Области применения этих методов непрерывно расширяются, и этот процесс в ближайшее время будет протекать с ускорением.

1.12.5. ЖИДКОСТНОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Травление используется для селективной (химической) прорисовки диффузионных масок, формирования изолирующих или проводящих областей, в процессе которого вещество в области, подвергаемой травлению, химически преобразуется в растворимое или летучее соединение. В литографии травление применяется в основном для формирования диффузионных масок в слое термически окисленного кремния или для удаления материала через окна в диэлектрике при изготовлении металлических контактов. Металлическую разводку формируют путем селективного удаления промежутков (обращения изображения); фотошаблоны также изготовляют травлением металлических пленок.

Задача инженера-технолога состоит в том, чтобы обеспечить перенос изображения с маски фоторезиста на подложку с минимальным отклонением размера E и допуском ΔT (рис. 1.153). Из рисунка следует, что суммарное изменение размера E при литографии обусловлено искажением изображения в резистной маске (±0,1 мкм), уходом размера в резисте (±0,5 мкм)

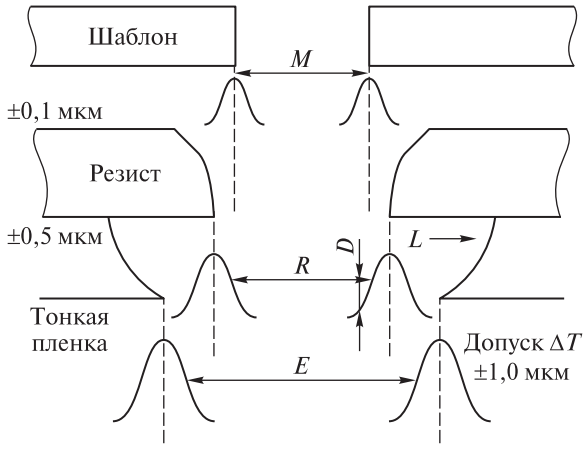


Рис. 1.153. Изменение размеров при переносе изображения из резиста в подложку с помощью изотропного травления:

M — ширина элемента на шаблоне; D — толщина пленки; L — ширина бокового подтравливания; R — размер, получаемый в резисте; E — суммарное изменение размера при литографии

и уходом окончательного размера в процессе травления (±1,0 мкм) с допуском $\Delta T = 1{,}0$ мкм.

В зависимости от кристалличности пленки и целостности резиста (отсутствие отслоений при жидкостном и эрозии при плазменном травлении) уход размера может достигать толщины пленки D и даже превышать ее. Изотропное жидкостное травление (рис. 1.154), для которого характерна большая ширина бокового подтравливания L, пришлось заменить газофазным анизотропным травлением (рис. 1.155).

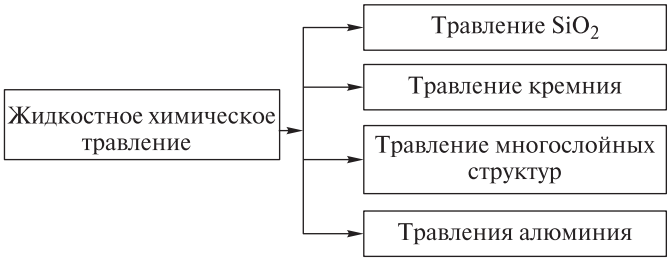


Рис. 1.154. Виды жидкостного химического травления

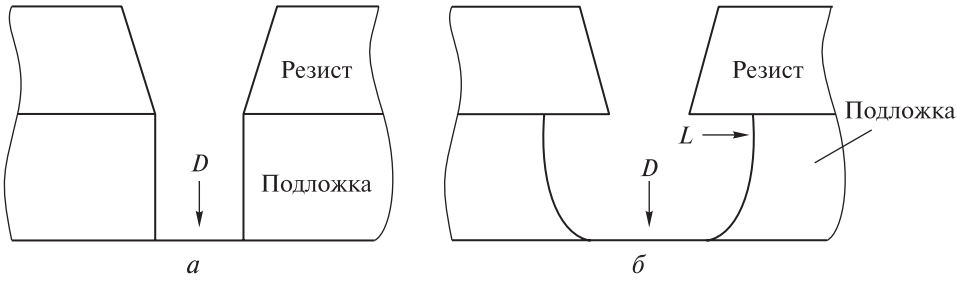


Рис. 1.155. Схема жидкостного химического травления:
а — анизотропного; *б* — изотропного

Изотропное травление происходит неупорядоченно, с одинаковой скоростью по всем пространственным направлениям — L и D. Анизотропное травление проявляется при некоторых отклонениях от изотропного процесса. Желательно, чтобы глубина травления D была много больше ширины бокового подтравливания L. Поскольку травление в вертикальном направлении при достижении глубины D прекращается, перетравливание определяется только скоростью удаления материала в боковом направлении. Степень анизотропии можно определить как отношение L/D, ее значение зависит от многих физических параметров. Жидкостное травление определяется в основном статическими характеристиками типа адгезии и степени задубленности резиста, состава травителя и т. п. При сухом травлении степень анизотропии во многом обусловлена такими динамическими параметрами, как мощность разряда, давление и скорость эрозии резиста. Ширина бокового

подтравливания в случае жидкостного травления зависит от предшествующих стадий обработки — подготовки поверхности и термозадубливания.

Используя жидкостное травление или недавно разработанный и более предпочтительный метод плазменного сухого травления, в пленках можно формировать различные профили. Жидкие травители позволяют получить изотропные или скошенные профили. Скошенный профиль края более других пригоден для последующего нанесения на него металла.

Для компенсации подтравливания при изотропном жидкостном травлении размеры элемента на фотошаблоне следует уменьшать. На рис. 1.156 показана компенсация размера окон в шаблоне для разных степеней анизотропии травления. Для обычного изотропного травления $D/L = 1$ (без разрушения резиста и при хорошей адгезии).

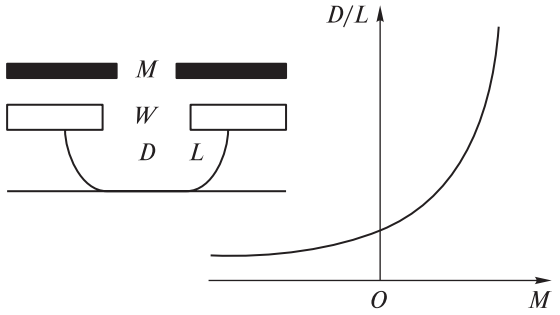


Рис. 1.156. Связь компенсации (уменьшения размеров окон в маске), необходимой при изотропном и анизотропном ($D/L > 2$) травлении:

M — ширина линии в скомпенсированной маске; *W* — размер, полученный на пленке

Для получения линии шириной 1 мкм при умеренно анизотропном травлении ($D/L = 3$) изображение в резисте следует выполнять на 0,2 мкм меньше, а ширина элемента на шаблоне (*M*) должна быть увеличена примерно на 0,05...0,10 мкм для компенсации изменения размера при формировании резистной маски. Если $D/L = 10$, то полоса шириной 1 мкм может быть подтравлена через резистное окно шириной 0,7 мкм. Различие в характеристиках компенсации размера изображения в резисте для плазменного и жидкостного травления Si_3N_4 представлено на рис. 1.157.

В обоих случаях травление производится через маску Si_3N_4 толщиной 0,25 мкм.

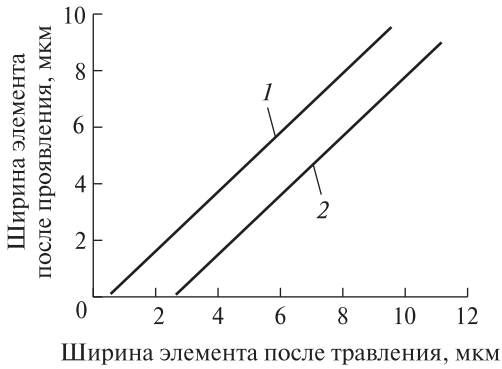


Рис. 1.157. Травление Si_3N_4:

1 — плазменное; *2* — жидкостное

1.12.6. ТЕРМОДИНАМИКА ТРАВЛЕНИЯ

С точки зрения химии процесс травления можно представить схемой твердая фаза + травитель, при этом к твердой фазе относят кремний, его оксиды и нитриды и многие металлы. Для соединений внутри кристалла обычно применяют алюминий и его сплавы с кремнием и медью, причем основным материалом для первого уровня металлизации является алюминий.

Слои оксидов кремния можно выращивать термически, наносить химическим способом или распылением, можно также легировать их фосфором или бором. Металлы используются в виде чистых или пассивированных пленок, сплавов, многослойных структур и интерметаллидов. Поскольку кремний существует в виде моно- или поликристаллических пленок, его структура, как и структура других кристаллических материалов, имеет ближний и дальний порядок. Травление переводит упорядоченные структуры в неупорядоченные, поэтому при описании термодинамического поведения свободной энергии F системы следует учитывать изменение как энтропии $+\Delta S$, так и энтальпии H (теплоты растворения или испарения):

$$F = H - TS.$$

Реакция травления, например, аморфного оксида кремния является эндотермической (энтальпия $H = +11$ ккал/моль или 46 Дж/моль):

$$SiO_2 \text{ (тв.)} + 6HF \text{ (ж.)} = H_2SiF_6 + 2H_2O$$

Материалы полупроводниковой электроники перечислены ниже:

– проводники (серебро, алюминий, золото, хром, медь, молибден, никель, свинец, платина, тантал, титан, вольфрам);

– полупроводники (кремний, германий, GaAs);

– диэлектрики (SiO_2, Si_3N_4, резист, полиимид).

Преодоление короткодействующих сил в амфорном твердом теле сопровождается возрастанием энтропии. Небольшие дефекты, такие как напряжение, деформация, примесные уровни, также оказывают влияние на скорость травления. В кристаллическом кремнии скорость травления плоскостей с малыми индексами Миллера определяется числом свободных связей и кристаллографической ориентацией (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Влияние кристаллографической ориентации на травление кремния

Кристаллографическая плоскость	Относительное число свободных связей	Относительная скорость травления
<111>	0,58	0,62
<110>	0,71	0,89
<100>	1,00	1,00

Переход металла или кремния в растворимое состояние включает в себя ионизацию металла (определяемую потенциалом ионизации) и перенос электрона к восстановителю с высоким сродством к электрону:

$$\text{M (тв.)} \rightarrow \text{M}^{n+}\text{ (ж.)} + n_{e^-}.$$

Эта реакция трехстадийная:

$$\text{M (тв.)} \rightarrow \text{M (газ)} — \text{сублимация};$$

$$\text{M (газ)} \rightarrow \text{M}^{n+}\text{ (газ)} + n_{e^-} — \text{ионизация};$$

$$\text{M}^{n+}\text{ (газ)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{M}^{n+}\text{ (ж.)} — \text{гидратация}.$$

Изменение энтальпии при сублимации и ионизации положительно (эндотермические реакции), но гидратация экзотермична (отрицательное значение энтальпии H). При газофазном травлении для распыления металла путем его сублимации кинетическая энергия частиц травителя (энергия травления) должна передаваться металлу из газовой фазы. При погружении металлического образца в раствор, содержащий его собственные ионы, ионы металла переходят в раствор (рис. 1.158) и образец приобретает отрицательный заряд. Металл создает, таким образом, свой собственный анод, и ионы M^{n+}

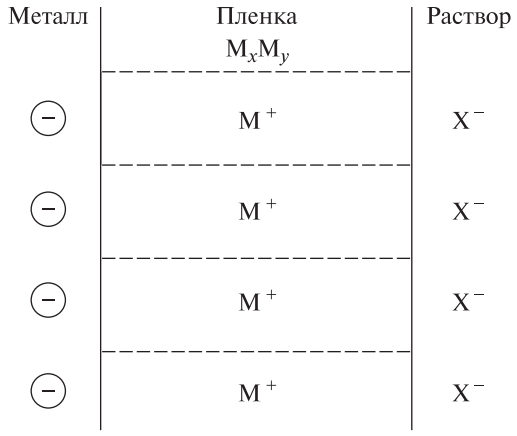


Рис. 1.158. Двойной слой Гельмгольца на границе металла в равновесии с ионами металла в жидкой фазе (M^+) и с анионами (X^-)

притягиваются к нему, формируя двойной электрический слой (слой Гельмгольца). Разность потенциалов в нем называется абсолютным электродным потенциалом. Стандартные окислительные и восстановительные потенциалы можно найти в учебниках электрохимии. На катоде происходит

уравновешивающее окисление, и катодную реакцию в растворе можно выразить следующим образом:

$$n_{e^-} + X^n \rightarrow X_n.$$

Итоговое приращение свободной энергии ΔF составляет:

$$\Delta F = -n\Phi\Delta E,$$

где n — кратность ионизации; Ф — число Фарадея; ΔE — разность анодного и катодного потенциалов.

Изменение свободной энергии зависит от следующих факторов:

– чистоты металла, его кристаллической структуры, наличия напряжений, метода осаждения и состава примесей;

– активности ионов металла в растворе;

– ионной силы электролита;

– температуры растворителя;

– состава растворителя.

При травлении диэлектриков переноса электронов не происходит, и в этом случае реакции имеют кислотно-основный характер:

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$$

$$SiO_2 + CF_4(\text{газ}) \rightarrow SiF_4 + CO_2$$

Связь Si–O заменяется связью Si–F. Поскольку энергии связей Si–O и Si–F близки, знак изменения энтропии определяет, пройдет реакция или нет.

1.12.7. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КИНЕТИКИ ТРАВЛЕНИЯ

Гетерогенные твердофазные реакции затрагивают различные разделы химии, механики и физики. Типичный процесс включает в себя такую последовательность реакций:

1) перенос реагента;

2) адсорбция реагента;

3) реакция на поверхности;

4) десорбция продуктов;

5) перенос продуктов.

Самым медленным этапом определяется скорость реакции.

При выборе той или иной реакции травления стараются остановиться на процессе с наименьшим числом параметров и преимущественно линейными скоростями травления. Желательно также иметь возможность изменения анизотропии регулированием физических параметров и высокую селективность процесса (т. е. отсутствие воздействия травителя на резист или слой, находящийся под стравливаемой пленкой). В реакциях нулевого порядка слабое обеднение травителя несущественно. Однако в реакциях первого

порядка нет достаточного избытка травителя, и он может сильно истощиться при загрузке 10 или более пластин. В них зависимость толщины (или логарифма толщины) стравленной пленки от времени линейная, поэтому окончание реакции можно контролировать и точно определять экстраполяцией.

Рассмотрим механизм переноса для двух основных типов реакций — диффузионно-контролируемых и ограниченных скоростью реакции. Следует отметить, что в процесс травления могут быть вовлечены все три агрегатных состояния вещества:

1) твердая фаза — скрытая химическая энергия и физическая структура пленки;

2) жидкая фаза — перенос ионов в жидком диэлектрике, обладающем высокой вязкостью;

3) газообразная фаза — хемосорбция, рекомбинация, ионизация и средний свободный пробег газовых частиц при пониженном давлении.

Переход от твердой фазы к жидкой или газообразной зависит от диффузии взаимодействующих веществ:

$$SiO_2 \text{ (тв.)} + 6HF \text{ (ж.)} \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$$

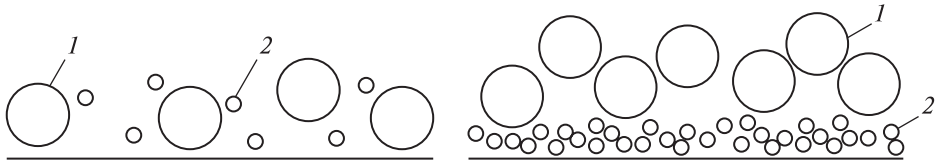
$$SiO_2 + CF_4 \rightarrow SiF_4 + CO_2$$

Пусть r — соотношение молярных объемов:

$$r = \frac{m/d}{M/D},$$

где m, M — молекулярные массы продукта и травителя; d, D — соответствующие плотности.

Тогда, если $r > 1$ (как при травлении стекла), продукт реакции не покрывает полностью твердую поверхность и реагент имеет к ней доступ (рис. 1.159, *а*). Поскольку продукт не препятствует проникновению травителя, скорость травления определяется скоростью реакции травителя с твердой поверхностью. Энергии активации при этом составляют около 7...20 ккал/моль. В случае $r < 1$ травитель не имеет свободного доступа к поверхности и должен диффундировать сквозь барьерный слой (рис. 1.159, *б*) и слой Гельмгольца. В этом случае необходимо учитывать также присутствие электрического поля.



а *б*

Рис. 1.159. Случаи травления:

а — с доступом реагента к поверхности; *б* — без доступа реагента к поверхности; *1* — реагент; *2* — продукт

Основные диффузионные модели были разработаны немецким физиком А. Фиком. Фундаментальным является предположение о том, что процессы диффузии и теплопроводности описываются уравнениями одного и того же типа. У травимой поверхности твердого тела существует градиент концентрации (рис. 1.160). Растворенные молекулы диффундируют сквозь насыщенный слой в область с меньшей концентрацией.

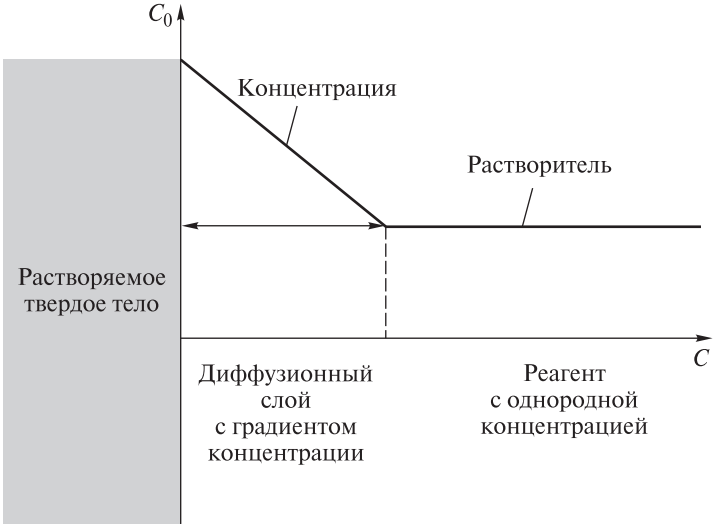


Рис. 1.160. Растворение твердого тела в жидком травителе

Предполагается, что площадь поверхности не изменяется в процессе травления. При жидкостном травлении, однако, обычно происходит отрыв резиста, что ведет к увеличению площади травления. При ионно-плазменном или реактивно-ионном травлении может происходить эрозия резиста.

1.12.8. РЕАКЦИИ ПРИ ЖИДКОСТНОМ ТРАВЛЕНИИ

При жидкостном травлении металлов происходят окислительно-восстановительные реакции, а в случае неорганических оксидов — реакции замещения (кислотно-основные).

ТРАВЛЕНИЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Амфорный, или плавленый кварц — материал, в котором каждый атом кремния окружен четырьмя атомами кислорода. В стеклообразных материалах могут сосуществовать как кристаллическая, так и аморфная фазы. Напыленный кварц представляет собой аморфный SiO_2, состоящий из тетраэдров SiO_4. В процессе реакции травления элементарный фтор может легко замещать атом кислорода в SiO_2, так как фтор обладает меньшим ионным

радиусом (0,14 нм), чем связь Si–O (16 нм). Энергия связи Si–F в 1,5 раза превышает энергию связи Si–O.

Ниже перечислены основные достоинства аморфных пленок SiO_2, применяемых в полупроводниковой электронике:

– хорошая диэлектрическая изоляция;
– барьер для диффузии и ионной имплантации;
– низкие внутренние напряжения;
– высокая степень структурного совершенства и однородность пленки;
– использование в качестве конформных покрытий, включая покрытия ступенек;
– высокая чистота, однородная плотность, отсутствие сквозных пор.

Вследствие внутренних напряжений оксиды, осажденные разными способами, имеют различия в структуре, которые влияют на скорость травления.

Скорости травления SiO_2 в буферном растворе (7:1) плавиковой кислоты HF в зависимости от метода получения оксида приведены ниже:

Метод получения SiO_2	Относительная скорость травления, мкм/мин
Термоокисление в парах воды	1,0
Анодный рост	8,5
Пиролитическое осаждение	3–10
Распыление	0,5
Легирование оксида	3–5

Травление SiO_2 в водном растворе HF через фоторезистивную маску протекает изотропно благодаря эффекту подтравливания, который усиливается частичным отслаиванием резиста. Почти анизотропные вертикальные профили могут быть получены при использовании твердой и свободной от напряжений маски из Si_3N_4 (рис. 1.161). Косые кромки получают при использовании раствора 30:1 (по массе) фторида аммония NH_4F в HF. Ухудшение адгезии резиста или, наоборот, его хорошее сцепление (Si_3N_4) с поверхностью SiO_2 может привести к возникновению двух различных профилей травления.

Химия травления SiO_2 включает нуклеофильное воздействие фторидных групп на связи Si–O. В буферном растворе HF (семь частей 40%-ного NH_4F к одной части концентрированной HF) доминируют два типа частиц.

При травлении через маску из Si_3N_4 получают профиль, представленный на рис. 1.161, *а*.

В случае, представленном на рис. 1.161, *б*, травление в смеси NH_4F и HF (30:1) проводилось через маску фоторезиста.

Основной частицей в буферном растворе HF является ион HF_2^-. Эта система чувствительна к перемешиванию и, скорее всего, является диффузионно-контролируемой. На

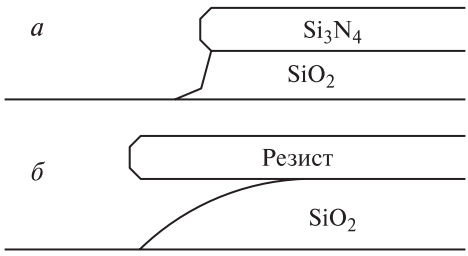


Рис. 1.161. Профили, полученные при использовании жидкостного травителя NH_4:HF (6:1) с различными масками:
а — маска из Si_3N_4; *б* — фоторезистивная маска

рис. 1.162 представлена линейная зависимость скорости растворения SiO_2 от соотношения HF_2^- и HF. Таким образом, скорость уменьшения толщины SiO_2

$$\frac{d(SiO_2)}{dt} = A(HF) + B(HF_2^-) + C,$$

где A, B, C — постоянные, при температуре 25 °C равные 2,0; 5,0 и 9,7 соответственно.

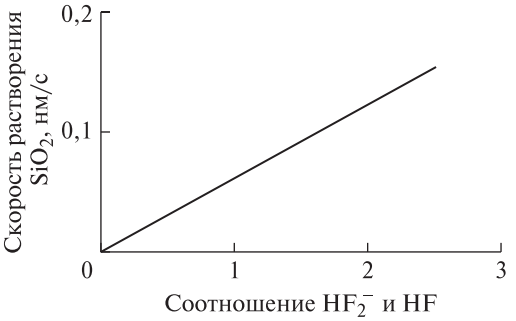
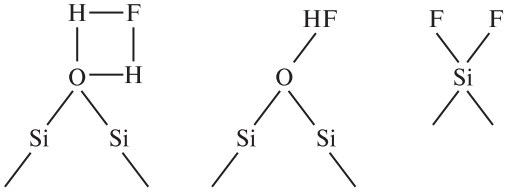


Рис. 1.162. Линейность скорости растворения SiO_2 при температуре 25 °C

Скорость травления в неразбавленном растворе HF примерно в 4 раза меньше, чем в разбавленном, и составляет 0,925 мкм/мин. Помимо этого, неразбавленный раствор HF является хорошо проникающим веществом, поэтому он легко диффундирует сквозь резистную пленку, создавая в ней каналы и случайные отслоения от подложки.

Можно представить, что атака ионом HF_2^- поверхности SiO_2 включает промежуточное состояние.

Во взаимодействии HF с SiO_2 участвуют, вероятно, поверхностные состояния:



В итоге фтор замещает кислород. Атомы водорода присоединяются к атому кислорода на поверхности SiO_2, а в координационную сферу SiF_4 включается два или более ионов фтора, так что в растворе образуется ион SiF_6^{2-}. Окончательно реакция травления может быть представлена так:

$$6HF + SiO_2 = H_2SiF_6 + 2H_2O$$

Обнаружено, что при добавлении фторида аммония NH_4F и синильной кислоты H_2F_6 к буферному раствору плавиковой кислоты HF скорость травления увеличивается благодаря образованию иона HF_2^-. При этом

накапливание фторкремниевой кислоты H_2SiF_6 конкурирует с процессом образования осадка $(NH_4)_2SiF_6$:

$$H_2SiF_6 + NH_4F = (NH_4)_2SiF_6 + HF$$

Добавление более сильных нуклеофильных веществ (NH_4Cl, Br^-, I^-) ведет к увеличению скорости травления SiO_2, что свидетельствует о развитии процесса через нуклеофильное смещение.

Влияние галогенов на скорость травления SiO_2 показано ниже:

Буферный ион	Скорость травления, нм/с
F^-	1,0
Cl^-	2,0
Br^-	2,3
I^-	3,3

ТРАВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Травление кремния включает стадию окисления:

$$Si + [O]\ SiO_2 + 14\ \text{ккал/моль},$$

и последующее травление SiO_2:

$$6HF + SiO_2 = H_2SiF_6 + H_2O — 11\ \text{ккал/моль}.$$

В травителе $HF–HNO_3$ происходит реакция

$$Si + 2HNO_3 + 6HF = H_2SiF_6 + 2HNO_3 + 2H_2O + 125\ \text{ккал/моль}.$$

Для растворения каждого атома кремния требуется две молекулы азотной кислоты HNO_3 и шесть молекул плавиковой кислоты HF. Если реакция контролируется диффузией, то максимальная скорость травления должна достигаться при молярном соотношении HNO_3 и HF, равном 1:3. При анализе зависимости Аррениуса для травления кремния в $HF–HNO_3$ обнаруживается излом (рис. 1.163), соответствующий изменению вида процесса: переходу от диффузионно-контролируемого к контролируемому скоростью реакции. Энергия активации диффузионно-контролируемого травления (6 ккал/моль) определяется диффузией HF через слой продуктов реакции. Значение этой энергии при травлении, контролируемом скоростью реакции (4 ккал/моль), определяется окислением кремния. Для управления вязкостью добавляют ледяную уксусную кислоту CH_3COOH (рис. 1.164).

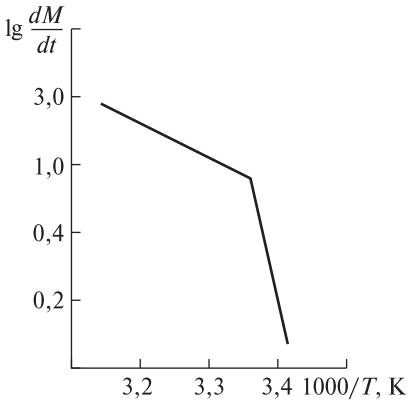


Рис. 1.163. Зависимость скорости травления dM/dt — от значения $1000/T$ при травлении кремния в $HNO_3–HF$

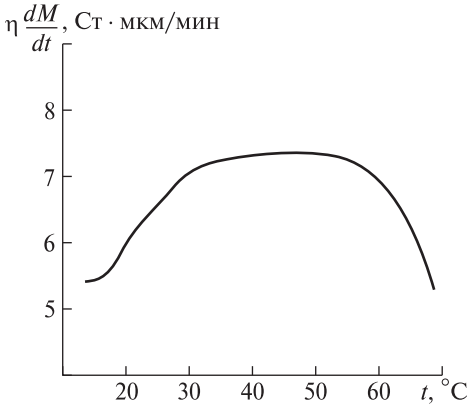


Рис. 1.164. Зависимость произведения вязкости и скорости травления $(\eta \cdot dM/dt)$ кремния от температуры при использовании в качестве загустителя ледяной уксусной кислоты CH_3COOH

При изотропном травлении кремния применяют маски из нетравящихся металлов, Si_3N_4 или SiO_2 (иногда для неглубокого травления). Резист используют редко, так как HF и HNO_3 быстро проникают через пленку. Для травления кремния применяют также щелочные травители:

$$Si + 2OH^- + H_2O = SiO_2 + 2H_2$$

Этилендиамин, гидразин и ион OH^- действуют как окислители, а пирокатехин и спирты — как комплексообразующие агенты для иона SiO_3^+. Кроме того, водород может замедлить травление поликремния. Для удаления водорода с поверхности добавляют поверхностно-активные вещества.

Щелочные реагенты являются в основном анизотропными травителями с преимущественным воздействием на кристаллографические плоскости с малыми индексами Миллера. Плотность свободных связей (дефектов, обусловленных свободными незавершенными связями граничной кристаллической плоскости) для этих плоскостей находится в соотношении 1,00 : 0,71 : 0,58. Причина выбора <100>-ориентированного среза кремния для анизотропного травления заключается в том, что <100> — единственная из основных плоскостей, в которой плоскости <110>, <111>, <100> и <211> пересекаются с регулярной симметрией. В связи с этим ориентация <100> наиболее предпочтительна при травлении глубоких канавок в кремнии.

Следует отметить, что геометрия поверхности, создаваемой изотропным травлением, зависит от геометрии первоначальной поверхности, так как выпуклые поверхности ограничивают быстро травящиеся плоскости, а медленно травящиеся плоскости останавливаются на вогнутой поверхности. В направлении <100> скорость травления в 100 раз выше, чем в направлении <111>. На рис. 1.165 показан пример преимущественного травления канавки (54,7°) на пересечении плоскостей <110>, <100>, <111> смесью гидроксида калия KOH и изопропанола при температуре 85 °C; KOH и изопропанол являются травителями с соотношением скоростей травления 55 : 1 для направлений <100> и <111>.

При добавлении к травителю спиртов, которые адсорбируются преимущественно на плоскости <111>, можно осуществить анизотропное травление в других направлениях. Скорость травления лимитируется диффузией с энергией активации 4 ккал/моль, так как щелочь должна диффундировать сквозь барьер из комплексов кремния (рис. 1.166, табл. 1.8).

Другой травитель для моно- и поликристаллического кремния состоит из этилендиамина и пирокатехина и имеет энергию активации 8 ккал/моль:

$$2NH_2(CH_2)_2NH_2 + Si + 3(OH)_2 = 2H_2 + Si(O_2)_3 + 2NH_2(CH_2)_3NH_3$$

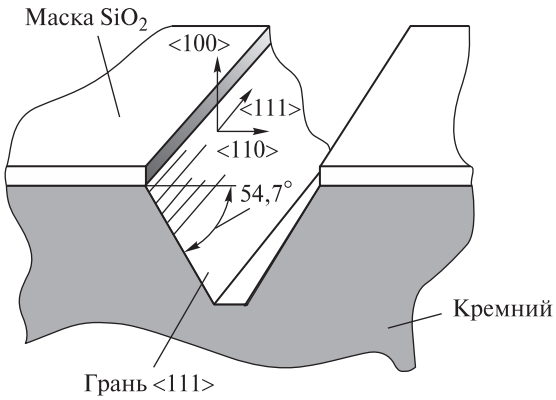


Рис. 1.165. Схема преимущественного травления кремния вдоль кристаллографических направлений <100> и <110>

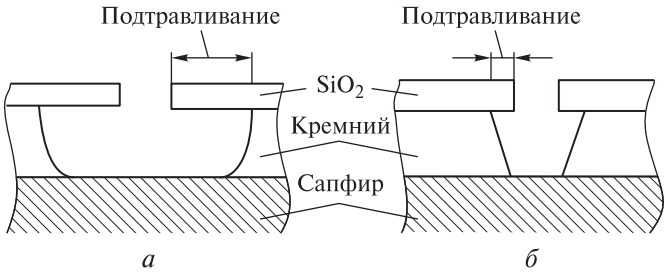


Рис. 1.166. Схема жидкостного травления эпитаксиального кремния:
а — анизотропное; *б* — изотропное

Таблица 1.8

Изотропное и анизотропное травление кремния

Травитель	Скорость травления, мкм/мин			Подтравливание, мкм на сторону		
	Поликремний	Эпитаксиальный кремний	Монокремний	Поликремний	Эпитаксиальный кремний	Монокремний
Изотропный[1]	3	4	4	1,5d[4]	1,5d	1,5d
Изотропный[2]	0,8	0,6	0,5	1,0d	1,0d	1,0d
Анизотропный[3]	0,7	0,9	1,1	(0,1–1,0)d	$<$0,1d	$<$0,1d

[1] HNO_3 (65 %)–HF (40 %)–$NaNO_2$.
[2] HNO_3 (65 %)–H_2O–HF (40 %).
[3] KOH–H_2O–*n*-пропанол.
[4] d — глубина травления.

При добавлении к реагентам 1000 ppm (лат. parts per million — частей на миллион) ароматического пиразина достигалось увеличение энергии активации до 11 ккал/моль и селективности травления плоскостей <100> и <111> с 10 до 20. Травление кремния применяют также с диагностическими целями для выявления точечных проколов SiO_2. Кремний, легированный бором, травится медленнее нелегированного кремния.

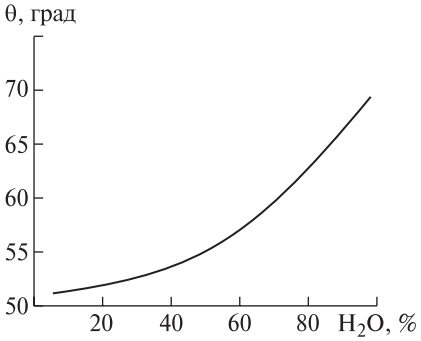


Рис. 1.167. Зависимость угла θ травления поликремния от содержания воды в травителе KOH–спирт–H_2O

Эффективность сглаживания поверхности поликремния в смеси KOH и спирта зависит от содержания воды в травителе. В безводных спиртах получают изотропные профили. Степень анизотропии определяется содержанием воды в травителе (рис. 1.167).

Краткие сведения об анизотропных травителях для кремния приведены ниже:

Травитель	Применение
HF, HNO_3, CH_3COOH	Травление всех разновидностей кремния
HF, HNO_3, CH_3COOH	Травление низкоомного кремния
HF, $KMnO_4$, CH_3COOH	Травление эпитаксиального кремния
HF, HNO_3, H_2O_2+NH_4OH	Удаление примесей меди
HF, HNO_3, CH_3COOH	Травление *p*–*n*–*p*-многослойных структур
HF, HNO_3	То же
NH_4F, H_2O_2	Минимальное подтравливание
HF, HNO_3, I_2	Общее травление
HF, HNO_3, CH_3COOH	Подтравливание плоскости <100>
HNO_3, HBF_4, NH_4BF_4	Травление маски из фоторезиста AZ-1350
NH_4F, H_2O_2, NH_4HPO_4	Травление при соотношении скоростей травления Si / ФСС=2 / 1
KOH + спирт	Травление поликристаллического кремния
Этилендиамин, пирокатехин, H_2O	Травление кремния с кристаллической решеткой <100>
KOH, высшие жирные спирты	То же
KOH, изопропиловый спирт, H_2O	<<
R_3N + OH, изопропиловый спирт, H_2O	<<
Гидразин, изопропиловый спирт, H_2O	То же и травление маски из алюминия
Этилендиамин, пирокатехин	Травление SiO_2, Si_3N_4, выявление точечных проколов
KOH, этиленгликоль	Текстурирование элементов солнечных батарей
Диамины, KOH, изопропиловый спирт	Травление без разрушения алюминия
R_3N + OH	Устранение ионов Na^+ из травителя
R_3N + OH (поверхностно-активное вещество)	Удаление водорода с поверхности
H_3PO_4 + следы As_2O_3	Травление кремния с примесью легирования *n*-типа
CuF_2 (маска из фоторезиста AZ-1350)	Электролитическое травление

ТРАВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР И НАНОКОМПОЗИТОВ

Травление различных слоев многослойной структуры проводят в одном травителе простого или сложного состава. Желательно пользоваться однокомпонентным травителем. Проблема заключается в выборе травителя, обеспечивающего одинаковую скорость травления всех слоев, что предотвращает образование «елочного» профиля. Наиболее интенсивно изучалось травление «сэндвича» Si_3N_4–SiO_2, равенство скоростей травления его слоев требуется для получения окон с гладкими наклонными стенками. Пленки Si_3N_4 травятся лишь в HF или в кипящей ортофосфорной кислоте H_3PO_4 при 180 °C. Столь жестких условий ни один из органических резистов не выдерживает. Травление Si_3N_4 в HF происходит по тому же закону, который определил Дж. Джадж для травления SiO_2:

$$\text{скорость травления} = A(\text{HF}) + B(\text{HF}_2^-) + C,$$

где A, B, C — константы.

В. Керн и Ч. Декерт всесторонне рассмотрели травление Si_3N_4. В HF можно получить равные, но небольшие — около 10 нм/мин — скорости травления Si_3N_4 и SiO_2 подбором температуры или подбором соотношения концентраций HF и HF_2^-.

Скорость травления SiO_2 можно снизить до 10 нм/мин, разбавляя 10%-ную плавиковую кислоту HF. При низкой концентрации HF растворение SiO_2 лимитируется не скоростью реакции, а диффузией (4 ккал/моль или 16 кДж/моль). Подбирая температуру смеси фосфорной H_3PO_4 или тетрафторборной $H[BF_4]$ кислот, можно довести скорости травления SiO_2 и Si_3N_4 до 10 нм/мин. Фосфорная кислота, однако, разрушает нижележащие слои кремния и алюминия. Степень разрушения может быть уменьшена добавлением серной кислоты H_2SO_4. Добавка диолефинов также предотвращает разрушение нижележащего слоя алюминия.

Более высокие, но равные скорости травления были получены в результате изменения вязкости травителя при добавлении глицерина или других вязких спиртов (массовая доля до 50 %), замещающих воду. Для смягчения действия HF добавляют также NH_4F. Типичные края профилей травления в Si_3N_4 и SiO_2 показаны на рис. 1.168.

При другом подходе, включающем в себя обратное травление, используется слой вольфрама, нанесенный поверх SiO_2 или Si_3N_4 и прорисованный через резистную маску. Сначала подтравливают слой SiO_2, затем удаляют вольфрам,

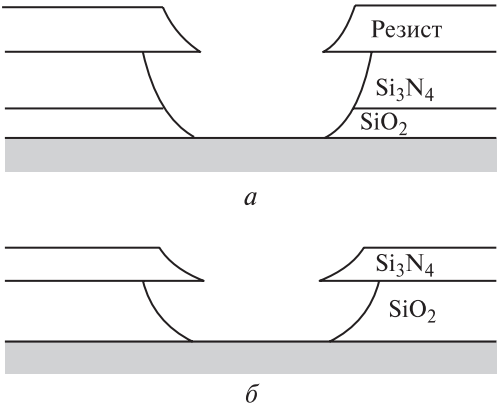


Рис. 1.168. Схема травления «сэндвича» Si_3N_4–SiO_2:

а — бóльшая скорость травления SiO_2;
б — изотропное травление слоев с одинаковыми скоростями

и слой Si_3N_4 профилируют через оксидную маску с требуемой топологией. Компромиссным составом для травления «сэндвича» из резиста, Si_3N_4 и боросиликатного стекла является смесь 70 % H_3PO_4, 29 % глицерина и 1 % $H[BF_4]$ при температуре 103 °С. При более высоких концентрациях $H[BF_4]$ наблюдается быстрая эрозия резистов KTFR и AZ-1350.

ТРАВЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ

Жидкостное травление металлов включает в себя многие электрохимические процессы. Химическая реакция вызывает протекание тока, причем металл является анодом:

$$M \rightarrow M^{n+} + n_{e^-},$$

где e^- — количество электронов.

Большинство металлов покрыто естественным оксидом. Для удаления этого пассивирующего слоя добавляют вспомогательный травитель.

Известно большое число различных неорганических окислителей. Наиболее простые содержат ион H^+. Основная задача химика-технолога заключается в выборе подходящего окислителя, удовлетворяющего требованиям термодинамики:

$$F = -n\Phi E,$$

где F — свободная энергия; n — степень ионизации; E — разность потенциалов окисления и восстановления (табл. 1.9).

Таблица 1.9

Металлы и окислители

Металл	Окислитель	Металл	Окислитель
Алюминий	F_2	Олово	Br_2
Цинк	H_2O_2	Медь	HNO_3
Хром	MnO_4^-	Серебро	Fe^{2+}
Никель	$Cr_2O_7^{2-}$	Золото	I_2

Жидкостное травление алюминия изотропно и сопровождается уходом края профиля травления на 1...2 мкм. Воспроизводимость размеров при травлении партии пластин составляет 1 мкм. Структуры обычно перетравлены, так как металлические пленки содержат дефекты (зерна, преципитаты), а также подвержены напряжениям.

При контакте металлов их электрохимический потенциал изменяется (гальванический эффект), что ускоряет их собственное травление и ведет к сильному подтравливанию нижележащего металлического слоя. Так, слой алюминия в гидроксиде натрия NaOH стравливается сам по себе за 7 мин. При контакте с платиной и золотом его травление оканчивается через 1 мин.

Травление алюминия проводится в щелочной или кислотной среде. Широко применяется травитель, состоящий из концентрированной ортофосфорной кислоты H_3PO_4 (76 %), ледяной уксусной кислоты CH_3COOH (15 %), концентрированной азотной кислоты HNO_3 (3 %) и воды (5 %) по объему. Согласно исследованиям, процесс состоит из двух стадий — формирования иона Al^{3+} и образования фосфата алюминия $AlPO_4$.

Вода в H_3PO_4 препятствует растворению Al_2O_3, но она способствует растворению вторичного продукта $AlPO_4$. Сила тока пропорциональна скорости травления. Если ток приложен к алюминию, то отмечается анизотропия травления.

Энергия активации травления алюминия в $H_3PO_4 + HNO_3$ равна 13,2 ккал/моль, что предполагает ограничение процесса скоростью растворения Al_2O_3 в H_3PO_4. Выделяемый газ есть смесь водорода, оксида NO и диоксида NO_2 азота. Адсорбция газов на поверхности алюминия является постоянной проблемой при использовании вязких травителей. Пузырьки способны замедлять травление, поскольку под ними образуются островки недотравленного металла, которые могут замыкать близко расположенные проводники.

Преимущественная адсорбция газообразных продуктов на боковой стенке ограничивает боковое подтравливание. Неожиданным оказалось применение адсорбции пузырьков для сглаживания краев профиля при травлении железоникелевых пленок в HNO_3 (рис. 1.169). Как только начинается процесс травления, пузырьки NO собираются вдоль боковой кромки. Адсорбированный промежуточный продукт NO_2 действует как сильный окислитель при травлении металла, и травление в боковом направлении ускоряется. Адсорбция газов на боковой стенке использовалась также для снижения бокового подтравливания алюминия при его травлении в H_3PO_4. Снижение давления в камере травления с 10^5 до 10^3 Па приводило к уменьшению подтравливания с 0,8 до 0,4 мкм. На боковой стенке образовывался эффективный диффузионный барьер в результате адсорбции на ней мелких пузырьков водорода.

Для снижения бокового подтравливания алюминия с 1,00 до 0,25 мкм было предложено несколько травителей (табл. 1.10), содержащих добавки сахарозы (полиспирта) и поверхностно-активных веществ.

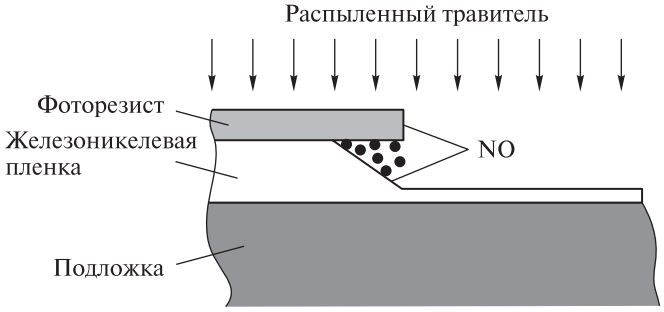


Рис. 1.169. Схема образования пузырьков в процессе жидкостного травления пленки железоникелевого сплава

Таблица 1.10

Травители для алюминия

Травитель	Резист*	Применение
Na_3PO_4, Na_2CO_3, K_3FeCN_6	ДХН, АК	Уменьшение подтравливания до 0,5 мкм
K_3FeCN_6	АК	Минимизация количества пузырьков
H_3PO_4, $HCLO_4$, H_2O, ПАВ	ДХН, АК	Уменьшение подтравливания
H_3PO_4, HNO_3, ПАВ, сахароза	АК	Боковое подтравливание 0,25 мкм
HCl	АК	Травление всех гальванически осажденных металлов, включая алюминий; травление распылением электролита, устранение подтравливания
HCl, HNO_3, $Cu(NO_3)_2$		Устранение неоднородности травления алюминия и меди
Щелочь, изопропанол		Универсальный травитель
ДНХ-проявитель		Разрушение алюминия при достаточной концентрации проявителя

* ДХН — новолак с хинондиазидами, фоторезисты типа AZ-1350; АК — циклокаучук с азидами, фоторезисты типа KTFR.

Некачественное травление алюминия вызывают несколько факторов:

– недопроявленность резиста;

– неравномерность толщины;

– напряжения в пленках поверх ступенек;

– гальваническое ускорение травления вследствие наличия преципитатов алюминия и меди;

– неравномерность толщины оксида;

– нестабильность температуры (более ±1 °С).

Эти факторы приводят к перетравливанию металла и закорачиванию контактов.

Хром является вторым после алюминия металлом, наиболее часто подвергающимся травлению. Он широко применяется при изготовлении фотошаблонов. В качестве травителя используется сульфат церия $Ce(SO_4)_2$ + HNO_3.

Вследствие индукционного эффекта (формирования верхнего слоя оксида хрома Cr_2O_3) травление пленки нелинейно, поэтому момент окончания травления не может быть определен по ее начальной толщине.

1.12.9. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОСТНОГО ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Практическое применение жидкостного химического травления связано со статическими и динамическими характеристиками этого процесса, а также с его конечными результатами (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Характеристики процесса жидкостного химического травления

Параметр	Влияние	Результаты
Однородность пленки	Разбрызгивание травителя	Подтравливание
Состав пленки	Перемешивание травителя	Проколы
Молярность травителя	Скорость травления	Закорачивание и разрывы контактов
Состав травителя	Эрозия резиста	Изменение допуска на размеры
Размер изображения в резисте	Ослабление адгезии	Селективность травления
Температура	Прекращение травления	Наклон стенок
Объем травителя	Истощение травителя	Изменение размеров

К трем основным переменным процесса жидкостного химического травления относятся толщина травимого слоя, температура и время обработки. Перемешивание реагента не играет существенной роли в случае ограничения скорости на стадии химической реакции. Скорость большинства процессов жидкостного травления (HF) ограничена скоростью химической реакции. Типичные флюктуации перечисленных переменных могут привести к перетравливанию. Перетравливание или неполное стравливание фатально не столько вследствие большого ухода размеров, сколько из-за того, что оно затрудняет проведение последующих технологических операций, например диффузии. Чем толще удаляемая пленка, тем больше уход размеров вследствие подтравливания и тем больше допуск на этот уход.

Проколы уменьшают выход годных, причем это уменьшение определяется чувствительностью конкретной схемы к размерам, местоположению и плотности дефектов. При травлении точечный дефект в фоторезисте переводится в рисунок на подложке. Если максимальный размер проколов сравним с изменением размеров при жидкостном химическим травлении (0,4...1,0 мкм), то резко возрастает вероятность образования разрывов в сплошных линиях.

Тесты к лекции 1.12

1. ***При каком виде жидкостного химического травления ширина бокового подтравливания под маску минимальна?***

а) анизотропном;

б) изотропном;

в) плазмохимическом.

2. ***Какие процессы происходят при плазмохимическом травлении?***

а) физические и химические;

б) только физические;

в) только химические.

1.13. ТЕРМИЧЕСКАЯ ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСИ

Цель лекции: ознакомление с принципами термической диффузии примеси.

1.13.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Диффузия — процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объему. В микроэлектронике термическая диффузия используется в основном для внедрения атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника, что приводит к образованию области с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости (рис. 1.170). При этом вновь образованная область оказывается ограниченной *p*–*n*-переходом.

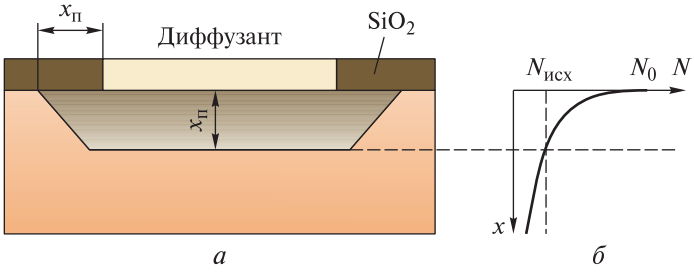


Рис. 1.170. Диффузия легирующей примеси с противоположным по отношению к исходному материалу типом проводимости:

а — образование *p*–*n*-перехода и боковая диффузия; *б* — профиль распределения примеси

Количество введенной примеси должно быть достаточным для компенсации влияния примеси в исходном материале; *p*–*n*-переход образуется на глубине $x_п$, где концентрация введенной примеси оказывается равной концентрации исходной примеси $N_{исх}$ (рис. 1.170, *б*).

Вводимое вещество, называемое диффузантом, должно иметь скорость диффузии в кремнии на несколько порядков выше, чем его скорость диффузии в SiO_2.

Вследствие того что диффузия происходит во всех направлениях (не только вглубь подложки, но и вбок), боковые стенки *p*–*n*-перехода всегда

расположены под слоем SiO_2, а размеры диффузионной области больше размеров окна по всему периметру (рис. 1.170, *а*). Это обстоятельство учитывают при проектировании фотошаблонов, формирующих рисунок в оксидной маске. При этом по глубине примесь распределяется неравномерно, наибольшая концентрация внедренной примеси N_0 будет наблюдаться на поверхности.

Существует несколько механизмов диффузии:

– вакансионный;
– межузельный;
– эстафетный;
– краудионный;
– диссоциативный.

При термической диффузии в кремний донорных и акцепторных примесей реализуется диффузия по *вакансионному* механизму, при котором подвижный атом (примесный или собственный) мигрирует на место вакансии, освобождая свое место в узле кристаллической решетки (рис. 1.171).

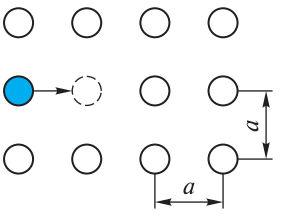


Рис. 1.171. Вакансионный механизм диффузии:
● — подвижный атом;
○ — вакансия

Атом примеси, проникший вглубь кристалла, способен генерировать свободный носитель заряда (электрон или дырку) только в том случае, если он займет место в узле кристаллической решетки. По этой причине высокая плотность вакансий в кремнии является обязательным условием получения высоколегированных диффузионных областей. Концентрация вакансий в исходном материале при температуре 20 °С чрезвычайно мала и составляет около 10^7 см$^{-3}$. Плотность упаковки атомов кремния $5 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$, т. е. на каждые $5 \cdot 10^{15}$ атомов кремния приходится одна вакансия.

При температуре 900...1200 °С средняя энергия атомов возрастает, и, соответственно, повышается концентрация вакансий, достигая значений примерно 10^{21} см$^{-3}$, т. е. одна вакансия приходится на 50 узлов кристаллической решетки.

Согласно современным представлениям о кристаллической структуре вещества, кристаллическая решетка полупроводникового материала не идеальна и содержит дефекты двух видов: дефекты по Шоттки и дефекты по Френкелю.

Дефекты по Шоттки — это вакансии, возникающие в результате поверхностного испарения атомов кремния и приводящие к образованию пустых узлов, которые диффундируют вглубь структуры вследствие встречной самодиффузии атомов кремния (рис. 1.172, *а*).

Дефекты по Френкелю — это вакансии, возникающие вследствие смещения атомов кремния в междоузлия в результате теплового движения и образования пары вакансия–атом в междоузлии (рис. 1.172, *б*).

При проведении процесса диффузии в качестве легирующих примесей выбирают элементы, имеющие достаточно высокую скорость диффузии и хорошую растворимость в полупроводнике при температуре диффузии.

Для получения областей *p*-типа (дырочная проводимость) используют элементы III группы Периодической таблицы Д.И. Менделеева — B, Ga, In, во внешней электронной оболочке которых недостает одного валентного

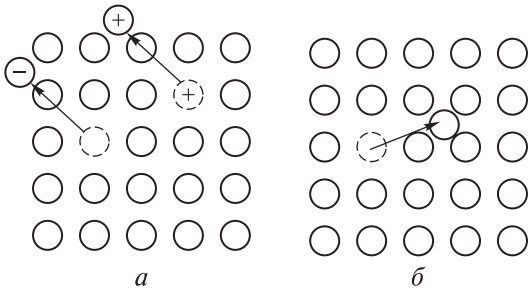


Рис. 1.172. Дефекты:
а — по Шоттки; *б* — по Френкелю

электрона для создания ковалентной связи с атомом четырехвалентного кремния. Эти элементы называют *акцепторными примесями*.

Для получения областей *n*-типа (электронная проводимость) используют элементы V группы Периодической таблицы Д.И. Менделеева — P, As, Sb, имеющие избыточный валентный электрон по сравнению с кремнием. Эти элементы называют *донорными примесями*.

1.13.2. ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ ФИКА

Процессы диффузии описываются законами Фика.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ФИКА

Этот закон устанавливает связь между плотностью потока атомов и градиентом концентрации легирующего вещества. В одномерном приближении (в направлении оси x):

$$j = -D\frac{dN}{dx},$$

где j — плотность потока атомов примеси; D — коэффициент диффузии; N — концентрация атомов примеси.

Знак минус в формуле указывает на то, что движение вещества происходит в направлении уменьшения его концентрации.

Коэффициент диффузии D численно равен количеству примесных атомов, проходящих через площадь поверхности 1 см^2 за 1 с при градиенте концентрации, равном 1 см$^{-4}$.

Этот коэффициент зависит от температуры и определяется уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 \mathrm{e}^{-\frac{E_0}{kT}},$$

где D_0 — коэффициент, зависящий от рода полупроводника, типа диффундирующей примеси, кристаллографического направления и концентрации примеси в исходном материале; E_0 — энергия активации примеси

(для бора — 3,7 эВ, для фосфора — 4,4 эВ); k — постоянная Больцмана, $k = 8{,}86 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; T — абсолютная температура.

При диффузии в беспримесном кремнии для бора $D_0 = 14$, для фосфора $D_0 = 1500$.

ДИФФУЗИОННЫЙ ПРОФИЛЬ И ВТОРОЙ ЗАКОН ФИКА

Рассмотрим площадку в 1 см^2 толщиной dx. Очевидно, что изменение числа атомов примеси в элементарном объеме за время dt должно быть равно изменению плотности потока на интервале dx за то же самое время, т. е.

$$dNdx = -djdt.$$

Используя первый закон Фика, получим выражение для второго закона Фика:

$$\frac{dN}{dt} = D\frac{d^2N}{dx^2}.$$

В случае *диффузии из неограниченного источника* (поверхностная концентрация примеси $N_0 = \text{const}$ при любом времени t) решение дифференциального уравнения имеет вид

$$N = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = N_0\left(1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right),$$

где $\Phi(V)$ — функция ошибок (V — изменяемый параметр); $\operatorname{erfc}(V) = 1 - \Phi(V)$ — дополнительная функция ошибок;

$$\operatorname{erfc}(V) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{V^2} e^{-V^2}\, dV.$$

Нас будет интересовать доза легирования Q, т. е. число атомов примеси, введенных через поверхность площадью 1 см^2 за все время процесса диффузии. Значение Q можно получить на основании первого закона Фика:

$$Q = \int_0^t Jdt = 2N_0\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \approx 1{,}13N_0\sqrt{Dt}.$$

Диффузию из неограниченного источника называют также *загонкой*. График распределения примесей по глубине при разных значениях времени для данного случая диффузии показан на рис. 1.173.

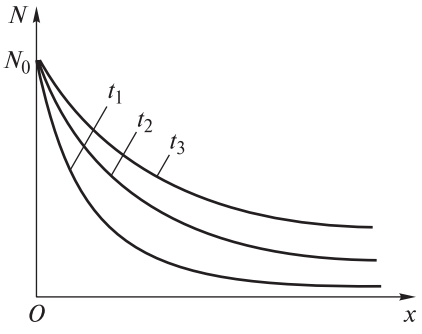


Рис. 1.173. График распределения примесей по глубине при диффузии из неограниченного источника ($t_1 < t_2 < t_3$)

В случае *диффузии из ограниченного источника* для решения дифференциального уравнения второго закона Фика граничное условие будет записано как $Q = \text{const}$, а решение уравнения примет вид

$$N = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2}.$$

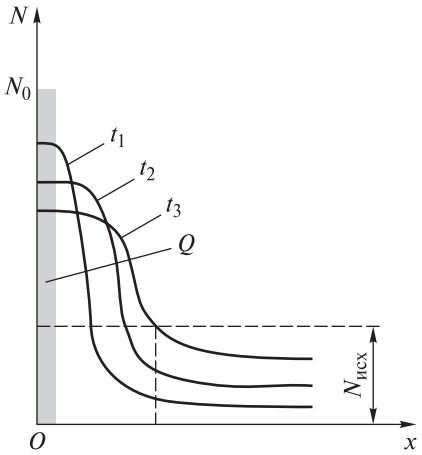


Рис. 1.174. График распределения примесей по глубине при диффузии из ограниченного источника ($t_1 < t_2 < t_3$)

Этот тип диффузии также называют *разгонкой*. График распределения примесей по глубине при разных значениях времени для данного случая диффузии показан на рис. 1.174.

Загонку и разгонку примеси используют при двустадийной диффузии для формирования глубоких p–n-переходов. На первой стадии в результате загонки образуется тонкий приповерхностный слой, насыщенный примесью с требуемой дозой легирования Q. Разгонку используют на второй стадии для окончательного формирования диффузионного профиля, в результате чего примесь перераспределяется, а глубина залегания p–n-перехода x_{p-n} становится больше.

1.13.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ

Использовать чистые атомарные бор, фосфор, мышьяк трудно: бор имеет высокую температуру плавления, фосфор — легко воспламеняется, мышьяк — токсичен. В связи с этим в качестве источников примеси при диффузии используют *диффузанты* — химические соединения этих элементов (ангидриды, галогениды, гидриды, обладающие достаточной летучестью).

Различают твердые, жидкие и газообразные диффузанты.

В зону диффузии диффузанты вводят в газообразном или парообразном (для жидких и твердых диффузантов) состоянии.

Недостатками твердых диффузантов (оксиды бора B_2O_3, фосфора P_2O_5) являются трудность регулирования давления их паров и, как следствие, низкая воспроизводимость результатов диффузии.

У жидких диффузантов (бориды бора BBr_3 и фосфора PBr_3) — пара обладает высокой упругостью при невысокой температуре, что позволяет применять более простые однозонные печи. Для транспортировки паров этих диффузантов используют другие газы, не взаимодействующие с кремнием и не диффундирующие в него (аргон, азот).

Наиболее технологичны газообразные диффузанты — диборан B_2H_6 и фосфин PH_3. Источником служат баллоны со сжатым газом. Использование этих диффузантов приводит к высокой воспроизводимости процесса. Недостаток — высокая токсичность. Предельная концентрация: для B_2H_6 — 0,5 мг/м^3, для PH_3 — 0,1 мг/м^3, для SbH_3 (стибин) — 0,05 мг/м^3.

Схема рабочей камеры диффузионной печи приведена на рис. 1.175.

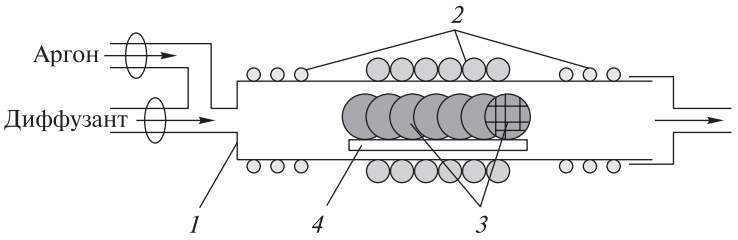


Рис. 1.75. Схема рабочей камеры диффузионной печи:
1 — кварцевая или керамическая труба; *2* — резистивные нагреватели (три секции с независимым регулированием температуры); *3* — обрабатываемые пластины; *4* — кварцевый или керамический держатель

При выполнении загонки примеси или одностадийного процесса диффузии в камеру из внешнего источника непрерывно подается диффузант, представляющий собой смесь легирующей примеси (акцептор бор или донор фосфор) с транспортирующим газом (аргон). В зоне реакции образуется оксид легирующего элемента, а на поверхности кремниевых пластин выделяется элементарная примесь.

Рабочую камеру и держатель подложек выполняют из тугоплавкого материала. При диффузии в открытой трубе легко управлять составом парогазовой смеси, скоростью потока газа, а также обеспечить требуемый профиль распределения примесей. Воспроизводимость параметров диффузии от пластины к пластине и по площади каждой пластины зависит от распределения температуры в рабочей зоне печи, числа пластин, их расположения относительно газового потока, типа диффузанта, чистоты проведения процесса.

1.13.4. ОПЕРАЦИОННЫЙ ЦИКЛ

В операционном цикле канал настроен на определенный температурный режим, поэтому нет необходимости регулировать температуру.

Операции цикла:

1) «промывка» реактора аргоном с расходом до 150 дм^3/ч;

2) загрузка (через бокс) кассеты с пластинами в печь и их прогрев в течение 10 мин с подачей аргона для удаления газов, адсорбированных поверхностью пластин;

3) подача аргона с парогазовой смесью (диффузант + кислород);

4) выдержка при постоянной температуре в течение контролируемого времени (собственно процесс диффузии);

5) в конце процесса — подача кислорода для окисления поверхности пластины (10...15 мин);

6) прекращение подачи смеси, продувка канала аргоном и извлечение кассеты с пластинами.

Процесс диффузии проводят в помещениях второго или третьего класса чистоты. Каждый канал используют для проведения строго определенного процесса (например, только диффузии базы или эмиттера). Процессы нельзя смешивать.

Важную роль в диффузионном процессе играет окисляющая среда. Растущая в процессе диффузии пленка SiO_2 предохраняет поверхность кремния от эрозии и нежелательных химических реакций, что существенно повышает воспроизводимость параметров диффузионных областей.

Окислительный процесс при использовании жидких и газообразных диффузантов состоит из следующих стадий.

1. Взаимодействие диффузанта с кислородом в газовой фазе с выделением ангидрида легирующего элемента:

а) жидкие диффузанты

$$BBr_3 + O_2 \rightarrow B_2O_3 + Br_2$$

$$POCl_3 + O_2 \rightarrow P_2O_5 + Cl_2$$

Поскольку хлороксид фосфора $POCl_3$ испаряется при температуре 2...40 °С, вместо него можно использовать трибромид фосфора PBr_3 (испаряется при 170 °С и применяется в атмосфере без кислорода) или трихлорид фосфора PCl_3;

б) газообразные диффузанты

$$B_2H_6 + O_2 \rightarrow B_2O_3 + H_2O$$

$$PH_3 + O_2 \rightarrow P_2O_5 + H_2O$$

2. Диффузия ангидрида через растущий оксид к границе раздела $Si–SiO_2$.

3. Взаимодействие молекул ангидрида с кремнием и выделение атомов примеси:

$$2P_2O_5 + 5Si = 5SiO_2 + 4P$$

$$2B_2O_3 + 3Si = 3SiO_2 + 4B$$

4. Диффузия атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку кремния.

Образующиеся в процессе загонки SiO_2 с примесью P_2O_5 и B_2O_3 представляют собой соответственно фосфорсиликатное и боросиликатное стекла. При разгонке они могут служить источником примеси и потому подлежат стравливанию вместе с оксидной маской по всей поверхности. Разгонку проводят также в окислительной среде.

1.13.5. ТВЕРДЫЕ ПЛАНАРНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Перспективной технологией представляется диффузия из твердых планарных источников (ТПИ). Достоинством использования чистых реактивов являются малые утечки, что удобно для мелкосерийного производства.

Примером ТПИ может служить нитрид бора BN, поверхность которого предварительно обработана в сухом кислороде при температуре 1200 °С, в результате чего образуется борный ангидрид B_2O_3, который испаряется:

$$4BN + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3 + 2N_2$$

Еще один пример донорного ТПИ — пластины метафосфата алюминия $Al(PO_3)_3$, который при температуре 750...1200 °С разлагается по реакции

$$Al(PO_3)_3 \rightarrow AlPO_4 + P_2O_5$$

Периодически ТПИ подлежат регенерации. Долговечны пористые стеклокерамические ТПИ следующего состава: SiO_2 — 15,7 %, Al_2O_3 — 28,7 %, B_2O_3 — 14,3 %, MgO — 14,3 %. Диффузию из ТПИ осуществляют в однозонных диффузионных печах в потоке защитного газа (аргон, азот).

1.13.6. НЕДОСТАТКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ

Термическая диффузия имеет ряд недостатков, которые ограничивают ее применение. К ним относятся:

– высокая температура процесса, что приводит к перераспределению примеси в ранее сформированных областях и смещению *p–n*-переходов;

– боковая диффузия, увеличивающая площадь легированных областей и снижающая точность процесса диффузии;

– зависимость коэффициента диффузии и растворимости примеси от температуры, что исключает возможность использования многих полупроводниковых материалов и легирующих примесей, перспективных для микроэлектроники;

– значительная продолжительность процесса диффузии;

– предельная растворимость примесей в кремнии.

Значения предельной растворимости примеси в кремнии при температуре 1100 °С приведены ниже:

Примесь	Предельная растворимость, ат./см^3
Мышьяк	$1{,}7 \cdot 10^{21}$
Фосфор	$1{,}1 \cdot 10^{21}$
Бор	$2{,}2 \cdot 10^{20}$
Сурьма	$5{,}0 \cdot 10^{19}$
Алюминий	$1{,}8 \cdot 10^{19}$

Указанные недостатки существенно ограничивают использование термической диффузии в современной микроэлектронике, где ее заменяет ионная имплантация.

Тесты к лекции 1.13

1. ***Какое из указанных веществ может быть использовано в качестве акцепторной примеси?***

а) бор;

б) фосфор;

в) медь.

2. ***При каких значениях температуры проводится диффузия примесей в кремний?***

а) 900...1200 °С;

б) 1300...1500 °С;

в) 300...500 °С.

1.14. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Цель лекции: ознакомление с принципами ионной имплантации.

1.14.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА

Начало и середина 1970-х гг. стали эрой конкуренции различных технологических методов и широкого экспериментирования. В результате метод диффузии был дополнен методом ионного легирования, в котором примесные ионы под действием высокого ускоряющего потенциала ударялись о поверхность кремния и внедрялись в него. Метод появился в середине 1960-х гг. и в течение следующего десятилетия достиг уровня промышленного производства.

Ионная имплантация (ионное легирование, ионное внедрение) — технология, используемая в основном для внедрения в кристаллическую решетку кремния донорных и акцепторных примесей.

При ионной имплантации энергия, необходимая для проникновения вглубь кристаллической решетки, сообщается электрическим полем напряжением до нескольких сотен киловольт.

Легирующие примеси предварительно ионизируют, а пластины могут находиться при комнатной или чуть более высокой температуре, недостаточной для активации процесса диффузии или перераспределения примеси. Ионы направляют на подложку, где предварительно сформирована защитная маска из SiO_2 (рис. 1.176).

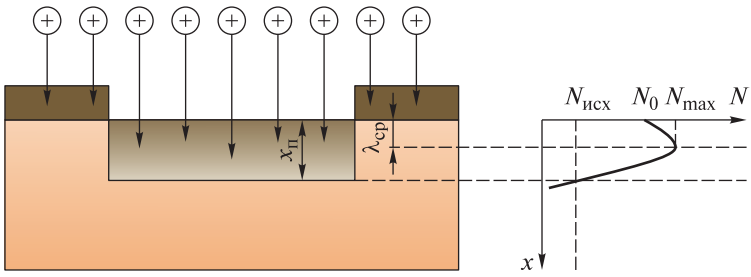


Рис. 1.176. Внедрение примеси с помощью ионной имплантации:
а — легирование не защищенной маской области; *б* — профиль распределения внедренной примеси

Защитная маска достаточно толстая для того, чтобы ионы примеси застревали в ней, поэтому, если направлять поток ионов перпендикулярно подложке, размеры легированной области будут точно совпадать с размерами окна в оксиде (рис. 1.176, *а*). Ионы при вхождении в кремний испытывают многократные столкновения с ядрами и кулоновское взаимодействие с электронами атомов кремния. Это приводит к постепенному торможению ионов вплоть до полной остановки. Путь, пройденный отдельным ионом в кристалле кремния (длина пробега), является величиной случайной и для совокупности ионов, внедренных в кристалл, оценивается средним значением пробега $\lambda_{ср}$. При этом максимальная концентрация примеси будет не на поверхности, как при диффузии, а на глубине $\lambda_{ср}$, которая зависит от энергии E ионного пучка и массы ионов (рис. 1.176, *б*).

Ионная имплантация может осуществляться сканированием либо поверхности пластины остросфокусированным ионным пучком, либо предварительно маскированной поверхности пластины широким ионным пучком.

При ионной имплантации областей стока и истока для МОП-транзисторов происходит одновременное легирование поликремния, используемого в качестве затвора (рис. 1.177).

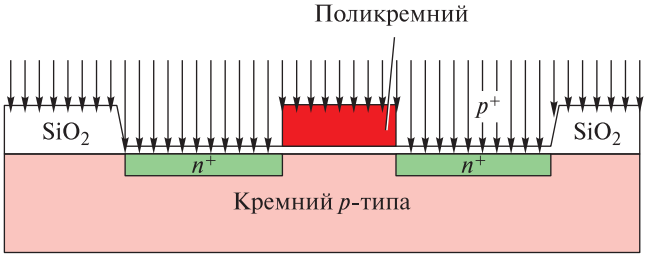


Рис. 1.177. Схема ионной имплантации примеси в области стока и истока для МОП-транзисторов

Метод ионной имплантации позволяет:

– проводить внедрение примеси в более широком диапазоне концентраций, чем диффузией;

– более точно и воспроизводимо дозировать внедряемую примесь вследствие контроля тока пучка и времени облучения, чем при диффузии. Градиент концентрации примеси в области p–n-перехода при этом существенно больше, чем у диффузионного профиля;

– получать высокую точность глубины залегания p–n-переходов;

– осуществлять процесс при низких значениях температуры, что позволяет сохранить заданный профиль распределения концентрации примеси в структурах и их электрофизические параметры;

– легировать кремний и другие полупроводники любыми примесями в различных количествах вплоть до достижения предельной растворимости;

– получать ионы примеси высокой чистоты в результате сепарирования магнитным полем;

– осуществлять процесс быстро (за несколько минут) с высокой производительностью при групповой загрузке установки;

– создавать практически любые профили распределения примеси благодаря ступенчатому легированию, т. е. изменению энергии и (или) рода легирующего элемента;

– формировать скрытые легированные слои;

– совмещать процесс в единой технологической установке с другими элионными процессами (ионно-плазменным осаждением, ионным травлением и т. д.).

При ионной имплантации отсутствует влияние окружающей среды, так как процесс проводится в вакууме.

Недостатки и ограничения ионной имплантации:

– необходим послеимплантационный отжиг пластин при температуре 700...800 °С для восстановления нарушенной структуры и перевода примеси в электрически активное состояние;

– трудно формировать глубокие легированные области, поскольку при постоянной энергии ионов невозможно получить глубоко залегающий *p–n*-переход, одновременно обеспечив присутствие примеси на поверхности;

– оборудование ионно-лучевых установок сложное, что обусловлено необходимостью применять высокий вакуум и высокие напряжения, а также устройства препарирования примеси (испарители, ионизаторы, сепараторы);

– необходимо защищать персонал, работающий с установками ионного легирования, от действия рентгеновского излучения;

– обработка пластин больших диаметров затруднена вследствие расфокусировки пучка при больших углах отклонения.

Ионная имлантация может также использоваться для некоторых других операций:

– имплантация кислорода для получения структуры «кремний на изоляторе» (КНИ);

– бесструктурная имплантация кремния в титановую пленку для лучшего отжига;

– бесструктурная имплантация германия в кремниевую подложку для контроля профиля распределения примеси.

1.14.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

Проникая в кристаллическую решетку полупроводника, ионизированный атом примеси постепенно теряет энергию, что в основном обусловлено взаимодействием с электронами (электронное торможение) и упругим соударением с атомами полупроводника и примеси (ядерное торможение). Во втором случае атом примеси может резко изменить направление движения. Кроме того, при торможении ионов возникает рентгеновское излучение (рис. 1.178).

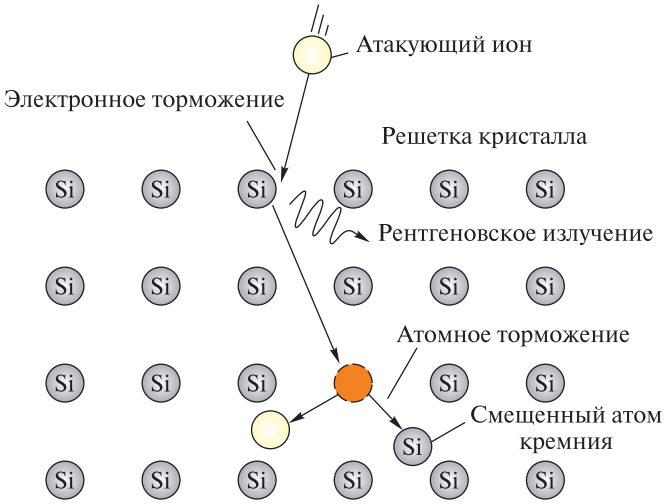


Рис. 1.178. Взаимодействие иона с подложкой

Суммарную силу торможения иона определяют по формуле

$$S_\Sigma = S_я + S_e,$$

где $S_я$ — ядерное (атомное) торможение; S_e — электронное торможение.

При низкой энергии иона преобладает ядерное торможение, при высокой — электронное торможение.

Совокупная траектория атома примеси вплоть до полного торможения представляет собой ломаную линию (рис. 1.179). Практическое значение имеет, однако, проекция этой линии на направление первичного ионного пучка, так как она характеризует глубину проникновения атома примеси в кристалл. Поскольку эта проекция — случайная величина, ее распределение можно охарактеризовать средней длиной пробега $\lambda_{ср}$ (математическое ожидание) и средним квадратическим отклонением σ.

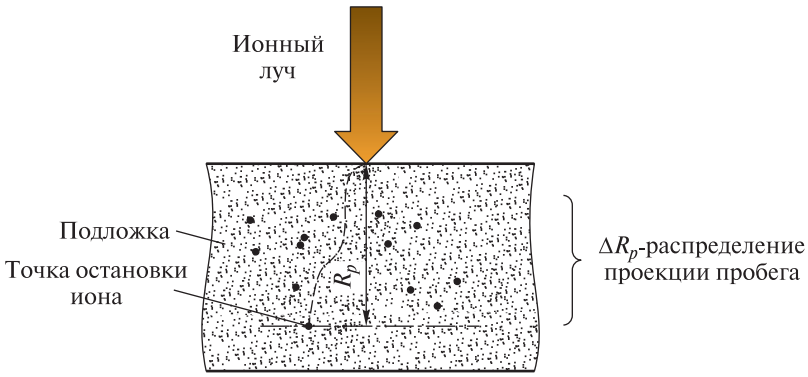


Рис. 1.179. Траектория ионов и глубина легирования

С увеличением начальной энергии E средняя длина свободного пробега ионов в кристалле увеличивается, при этом возрастает и дисперсия пробегов. С увеличением массы иона (порядкового номера элемента) увеличивается вероятность его столкновения с ядрами материала мишени и длина пробега сокращается.

Распределение примеси по глубине (рис. 1.180) подчиняется закону Гаусса:

$$N = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-\lambda_{ср}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}.$$

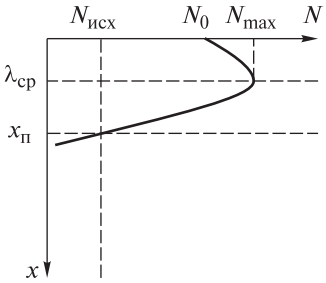


Рис. 1.180. Профиль распределения концентрации примеси по глубине при ионной имплантации

В результате столкновения с атомом, расположенным в узле кристаллической решетки, ион примеси способен сместить его в междоузлие с образованием дефекта по Френкелю (вакансия и атом в междоузлии). Смещенный атом, в свою очередь, может вызвать каскад смещений, создавая разупорядоченные зоны. Поскольку пороговая энергия смещения атомов в междоузлие составляет около 14 эВ, одиночный ион примеси с энергией в несколько десятков килоэлектрон-вольт может создать на своем пути несколько тысяч подобных дефектов. Таким образом, на пути движения возникают области с нарушенной структурой — кластеры — размером 5...10 нм. При больших дозах легирования кластеры могут смыкаться, образуя обширные аморфные области (рис. 1.181, *а*). Такие области в кремнии рекристаллизируются при температуре 600...700 °С и выше (рис. 1.181, *б*). С увеличением дозы и массы внедренных ионов температура, необходимая для отжига, возрастает.

Минимальная доза легирования, при которой возникает аморфный слой, называется *дозой аморфизации*. Она зависит от атомного номера легирующего элемента и возрастает с повышением температуры мишени.

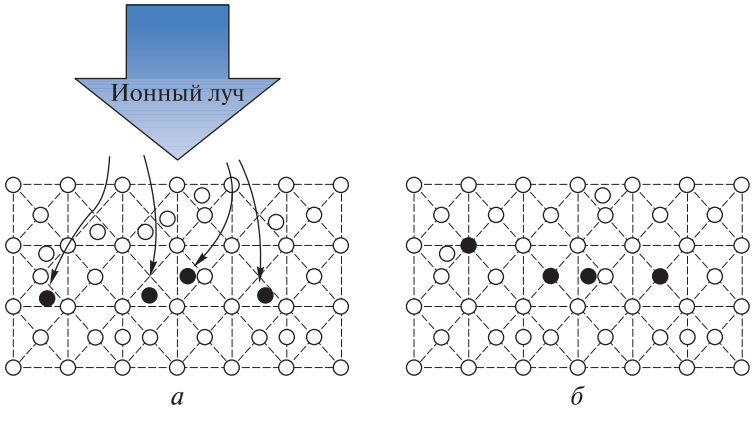


Рис. 1.181. Изменение кристаллической решетки:
а — нарушение после ионной имплантации; *б* — восстановление после отжига

В результате торможения внедренный атом может оказаться либо в узле кристаллической решетки, либо в междоузлии. Вероятность попадания в узел решетки убывает с повышением дозы легирования (степени аморфизации). Соответственно убывает и доля электрически активных атомов примеси.

Переход атомов примеси из междоузлий в вакантные узлы возможен только в процессе упорядочения структуры. С помощью отжига внедренную примесь можно перевести в активное состояние и одновременно осуществить рекристаллизацию материала, повышающую подвижность носителей заряда.

При нагреве пластины повышается энергия как атомов примеси, так и атомов полупроводника, поэтому при отжиге протекают два конкурирующих процесса: диффузия атомов примеси к вакансиям и самодиффузия атомов полупроводника, также завершающаяся заполнением узлов кристаллической решетки. Поскольку при облучении ионами в кристалле возникают радиационные дефекты, плотность которых высока, перевод примеси в активное состояние облегчается. Время, необходимое для отжига, составляет 15...20 мин, что не приводит к заметному перераспределению внедренной примеси.

При создании субмикронных микросхем чаще используют скоростной термический отжиг (СТО), который длится менее минуты и делает диффузию примеси минимальной. Нагрев при этом осуществляется или инфракрасными лампами, формируя импульсы с большой скважностью, или сканированием лазером.

В монокристаллах существуют такие направления, где имеются свободные от атомов каналы. В них ионы испытывают малое торможение, в результате чего может возникнуть эффект *каналирования* (рис. 1.182).

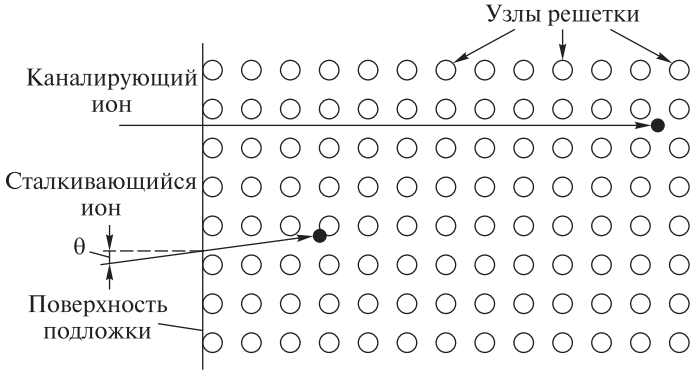


Рис. 1.182. Эффект каналирования

При каналировании ион может пройти большое расстояние без столкновений с узлами кристаллической решетки, а потеря энергии ионов происходит в основном вследствие взаимодействия с электронами. Это обусловливает неконтролируемость профиля распределения примеси. Эффект каналирования полностью исключается при разориентации на угол $\theta = 7...8°$. Однако и при этом возможно каналирование ионов, возникающее в результате случайных соударений (рис. 1.183).

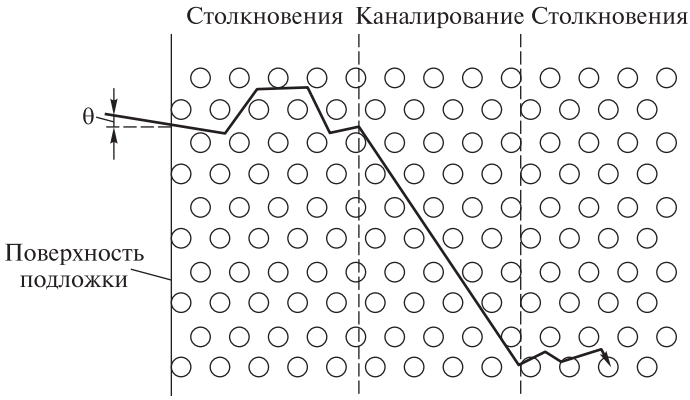


Рис. 1.183. Каналирование после соударений

Для сведения каналирования к минимуму подложку при облучении ионами размещают под углом (обычно 7°). В этом случае при легировании защитная маска создает теневой эффект, при котором некоторая область кремния экранируется защитной маской или поликремнием (рис. 1.184). Однако во время послеимплантационного отжига примесь перераспределяется вследствие диффузии, в результате чего размеры легированной области увеличиваются (рис. 1.185).

При энергии ионов до 200 кэВ средняя глубина внедрения примеси не превышает десятых долей микрометра.

Для получения p–n-переходов на глубине в единицы микрометров ионную имплантацию применяют в качестве первого этапа легирования для точного дозирования вводимой примеси. Для разгонки примеси пластины подвергают высокотемпературному нагреву, чем одновременно обеспечивается и отжиг.

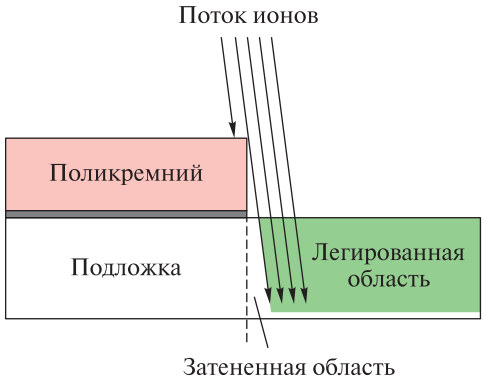


Рис. 1.184. Теневой эффект

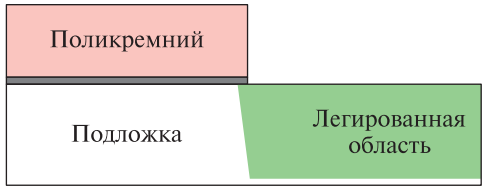


Рис. 1.185. Легированная область после отжига

1.14.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Метод ионной имплантации состоит в бомбардировке полупроводников пучками ускоренных ионов с энергией от 10 кэВ до 1 МэВ для изменения их свойств и структуры.

При данном методе ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее противодействие положительных зарядов атомных ядер. Глубина проникновения ионов возрастает с увеличением их энергии. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг (нагрев).

В процессе отжига происходят распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой с электрической проводимостью *p*- или *n*-типа.

Метод применяется для образования в приповерхностном слое полупроводника областей с содержанием донорных или акцепторных примесей с целью создания *p*–*n*-переходов и гетеропереходов, а также низкоомных контактов.

Различают следующие источники ионов:

– с поверхностной термической ионизацией — на нагреватель (вольфрамовая лента) насыпают соль металла KJ, NaCl, $CaCl_2$ и получают ионы Na^+, K^+, Li^+, Cs^+, Rb^+, J^-, F^-, Br^-, Cl^-;

– с ионизацией электронным ударом — электроны создаются термоэмиссией или в газовом разряде, ускоряются электростатическим или высокочастотным полем и направляются для столкновения с молекулами газа или пара рабочего вещества, ионизируя их;

– высокочастотные — плазма высокочастотного разряда;

– на основе дугового разряда при низких значениях давления.

Метод ионной имплантации обладает следующими возможностями:

– введения (имплантирования) любой примеси, любого элемента Периодической таблицы Д.И. Менделеева;

– легирования любого материала;

– введения примеси в любой концентрации независимо от ее растворимости в материале подложки;

– введения примеси при любой температуре подложки, от гелиевых температур до температуры плавления включительно;

– работаты с легирующими веществами технической чистоты и даже с их химическими соединениями (также любой чистоты);

– легирования не только исключительно данным элементом, но и исключительно данным изотопом этого элемента вследствие изотопной чистоты легирующего ионного пучка;

– легкого локального легирования (с помощью хотя бы элементарного механического маскирования);

– получения легированного слоя малой толщины (менее микрона);

– достижения больших градиентов концентрации примеси по глубине слоя, что невозможно при традиционных методах с неизбежным диффузионным размыванием границы;

– контроля и полной автоматизации технологического процесса;

– совмещения с планарной технологией микроэлектроники.

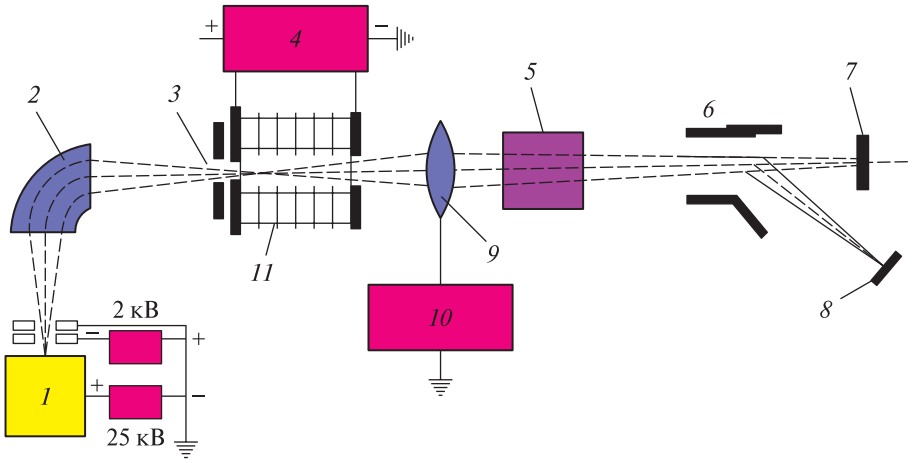


Рис. 1.186. Схема установки для ионной имплантации:

1 — источник ионов; *2* — масс-спектрометр; *3* — диафрагма; *4* — источник высокого напряжения; *5* — система отклонения луча по вертикали и система отключения луча; *6* — система отклонения луча по горизонтали; *7* — мишень для поглощения нейтральных частиц; *8* — подложка; *9* — линзы; *10* — источник питания линз; *11* — ускоряющая трубка

В источнике ионов *1* (рис. 1.186) происходит ионизация паров или газа, содержащих атомы примеси. Помимо газов, которые используются в качестве источника внедряемой примеси, в установке для очистки подложки и камеры, а также для калибровки потока ионов применяется аргон. Для ионизации газов используется высоковольтная установка. Для ускорения ионов и уменьшения числа их столкновений необходим глубокий вакуум (10^{-5}...10^{-7} Па). Его создают два насоса: турбонасос (механический) и криогенный.

В состав источника ионов (рис. 1.187) входит система электродов. Между анодом и катодом происходит электрический заряд. Магнитное поле перпендикулярно электрическому, поэтому электроны движутся по сложным траекториям. Встречая нейтральный атом, электрон ионизирует его, выбивая из него вторичный электрон. В свою очередь, вторичные электроны ионизируют другие атомы. Сформировавшиеся положительно заряженные ионы экстрагируются из камеры через щель в катоде с помощью экстрагирующего электрода (рис. 1.188), который ускоряет их до энергии 50 кэВ.

Высокая энергия необходима для работы магнитного масс-спектрометра *2* (см. рис. 1.186), который предназначен для отделения ненужных ионов от легирующих ионов. Ионы, проходя через магнитное поле, разделяются в зависимости от соотношения атомарной массы m и заряда q (рис. 1.189).

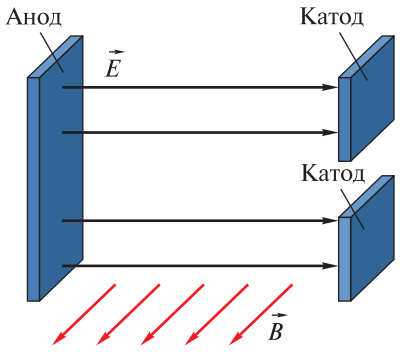


Рис. 1.187. Схема источника ионов

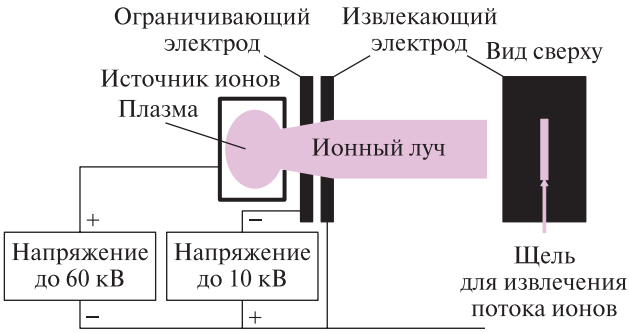


Рис. 1.188. Схема экстрагирования ионов из ионной камеры

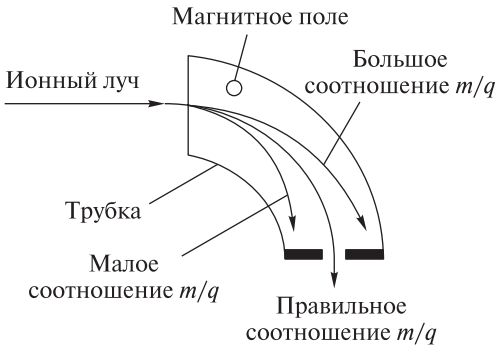


Рис. 1.189. Схема работы магнитного масс-спектрометра

Пройдя через диафрагму *3* (см. рис. 1.186), ионы ускоряются в трубке *11*. Для этого используются электроды с постоянным напряжением (рис. 1.190). На выходе трубки ионы разогнаны до энергии, необходимой для внедрения на заданную глубину. Далее ионный пучок фокусируется электромагнитной линзой *9* (см. рис. 1.186) и проходит через отклоняющие системы *5* и *6*,

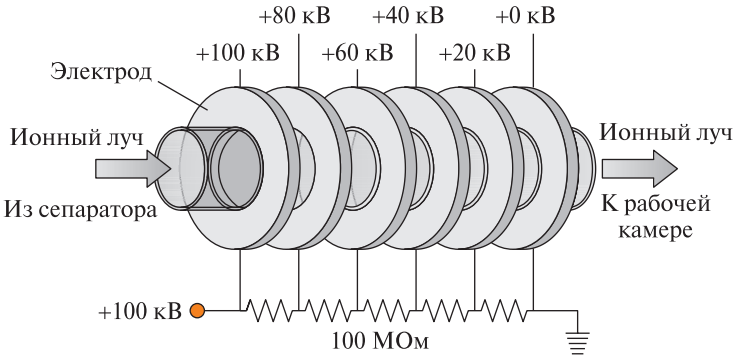


Рис. 1.190. Схема ускоряющей трубки

попадая на подложку *8*. Для поглощения нейтральных атомов, которые не отклоняются отклоняющей системой, существует специальная мишень *7*.

Поток ионов, проходя через диафрагму *3* и ускоряясь в трубке *11*, фокусируется электромагнитной линзой *9* и проходит через отклоняющие системы *5* и *6*, попадая на подложку *8*.

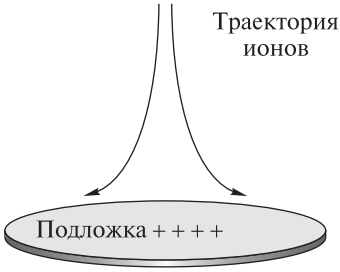


Рис. 1.191. Влияние эффекта зарядки на траекторию ионов

Имплантированные ионы заряжают подложку положительно, в результате чего возникает эффект зарядки, который может привести к искажению траектории ионов (рис. 1.191), что обусловливает неправильное распределение примеси. Кроме того, заряд подложки может вызвать образование дефектов на ней и пробой оксидной пленки. Для минимизации эффекта зарядки необходимо использовать вторичные электроны (рис. 1.192), для чего в установках для ионной имплантации применяется система наполнения плазмой (рис. 1.193) или система «электронный душ» (рис. 1.194).

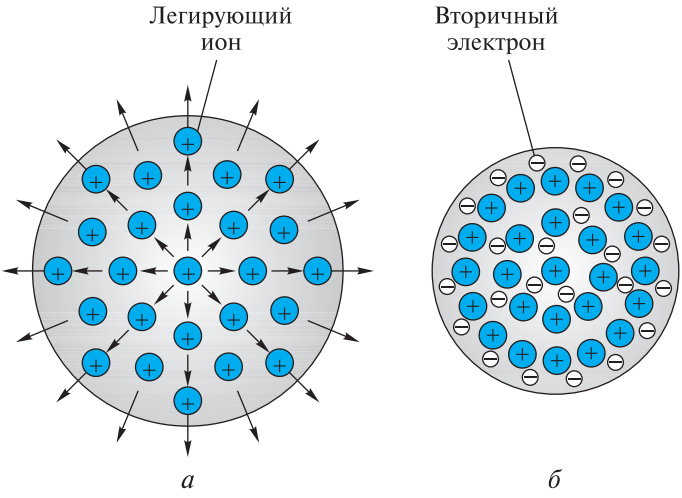


Рис. 1.192. Сечение ионного луча:
а — без нейтрализации; *б* — с нейтрализацией

Подложки в установке для ионного легирования располагаются на вращающемся диске (рис. 1.195), что обеспечивает механическое сканирование подложки ионным пучком. Отклоняющая система обеспечивает электростатическое сканирование подложки ионным лучом по двум осям (рис. 1.196).

Для остановки потока ионов используется специальное устройство (рис. 1.197) — охлаждаемая водой металлическая пластина, которая адсорбирует энергию ионов, забирает теплоту и блокирует радиационное излучение. На пластине располагается детектор заряда, который используется для калибровки потока, энергии и профиля распределения примеси.

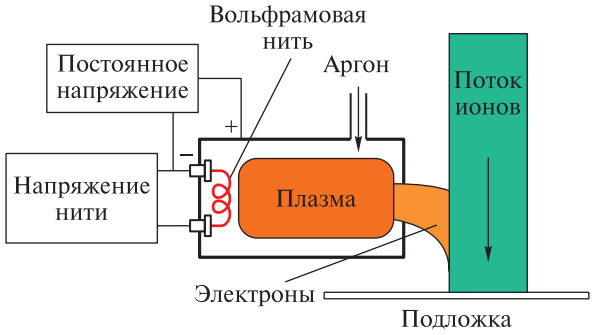


Рис. 1.193. Система наполнения плазмой

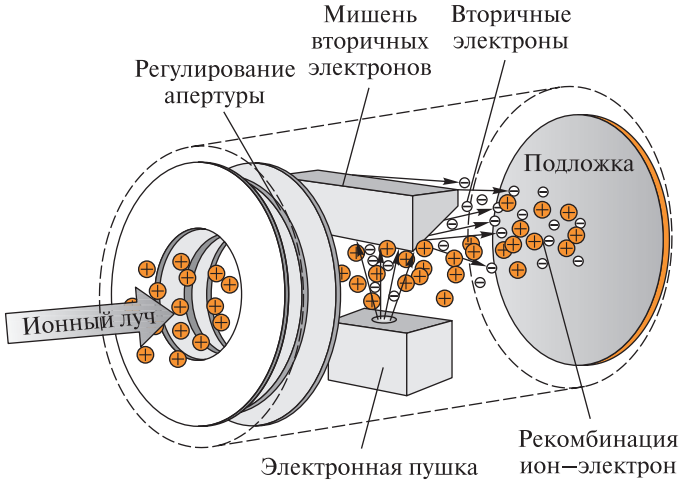


Рис. 1.194. Система «электронный душ»

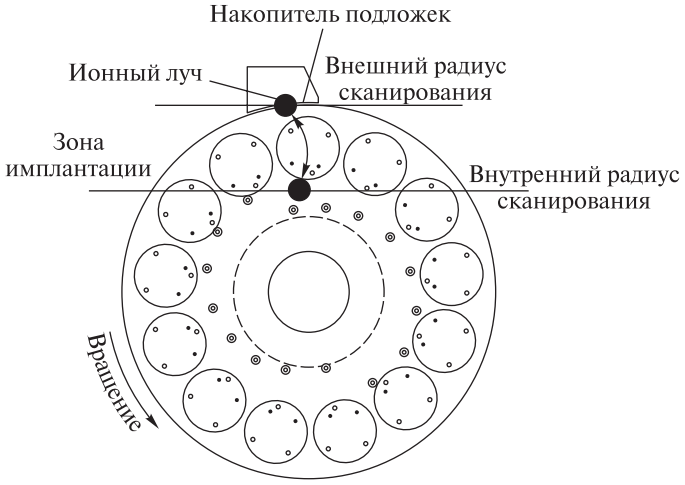


Рис. 1.195. Механическое сканирование подложки ионным пучком

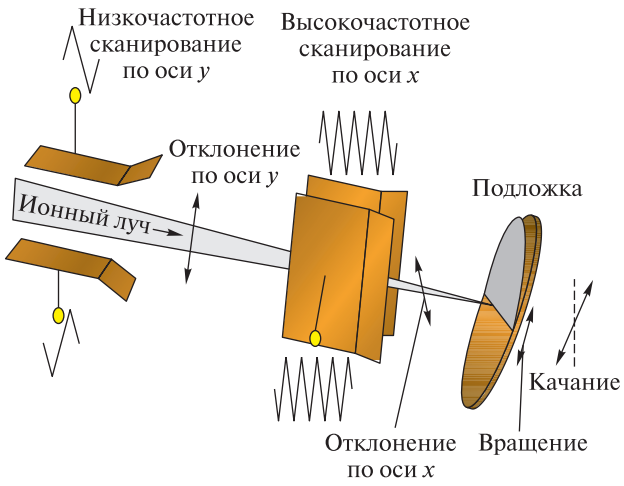


Рис. 1.196. Электростатическое сканирование подложки ионным пучком

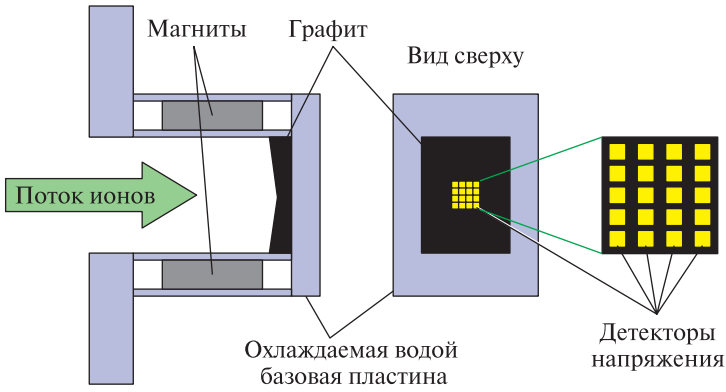


Рис. 1.197. Система остановки потока ионов

Для использования технологии ионной имплантации в производстве ИМС ставятся задачи создания диффузионных областей карманов с точным поддержанием поверхностной концентрации и мелкозалегающих областей исток–сток, точной подгонки порогового напряжения и т. п. При этом разрабатываемые имплантационные процессы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

– равномерность легирования по площади пластин;
– воспроизводимость процессов по партиям пластин;
– низкий уровень загрязнения металлическими примесями.

При переходе на субмикронные размеры возникает ряд проблем, связанных с конструктивными ограничениями элементов ИМС:

– ограничения плотности упаковки вследствие эффекта «защелки» и возникновения токов утечки между элементами;

– эффект «короткого канала»;
– формирование сверхтонких стоков–истоков областей;
– проблемы «горячих электронов» (высокая напряженность электрического поля вблизи области стока).

Решение указанных проблем, а также необходимость высокой прецизионности и чистоты процессов требуют использования соответствующего ионно-лучевого оборудования, отвечающего следующим основным требованиям:
– высокая производительность при обработке пластин диаметром 150...200 мм (в том числе при значениях энергии 3...10 кэВ);
– высокая равномерность и повторяемость набора дозы ($\sigma < 0{,}5$ %);
– привносимая дефектность менее 0,18 см$^{-2}$;
– легирование под углом до 60°;
– легирование с энергией до 500...750 кэВ;
– загрязнение примесями тяжелых металлов менее $6 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$;
– по возможности полная автоматизация.

1.14.4. СОЗДАНИЕ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ» ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ КИСЛОРОДА

Метод ионной имплантации легирующих примесей может применяться для создания подложек, используемых при формировании структуры «кремний на изоляторе».

Процесс происходит в два этапа:
1) имплантирование тяжелого кислорода (рис. 1.198, *а*);
2) высокотемпературный отжиг (рис. 1.198, *б*).

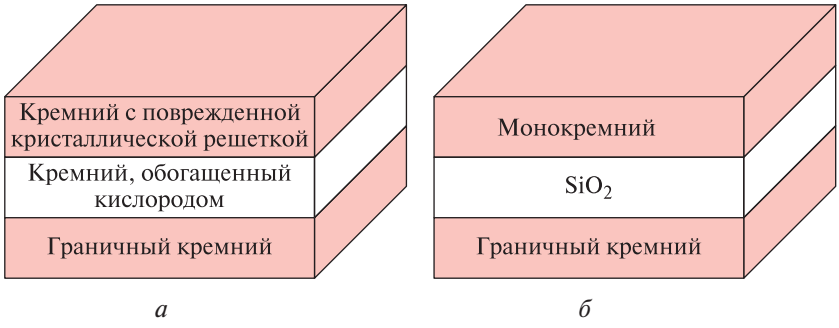


Рис. 1.198. Формирование подложки для структуры «кремний на изоляторе» ионной имплантацией:
а — структура после ионной имплантации кислорода; *б* — структура после отжига

На первом этапе ионы кислорода, разгоняемые до высоких энергий, проникают вглубь кремния. Затем идет высокотемпературный отжиг, в процессе которого происходит не только окисление кремния на глубине с образованием SiO_2, но и возвращение кремния к монокристаллической структуре.

Тесты к лекции 1.14

1. ***Как избежать эффекта каналирования при ионной имплантации?***
а) повернуть подложку на угол 7...8°;
б) уменьшить энергию ионов;
в) нагреть подложку.
2. ***Зачем нужна система «электронный душ»?***
а) для нейтрализации положительного заряда подложки;
б) для уменьшения разброса значений энергии ионов;
в) для ускорения ионов.

1.15. РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ

Цель лекции: ознакомление с принципами разделения пластин на кристаллы.

1.15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

После выполнения всех технологических операций на подложке сформированы ряды кристаллов, на которые ее следует разделить (рис. 1.199). Для этого между кристаллами оставляют пространство, называемое *скрайберной дорожкой* (рис. 1.200). Именно по скрайберным дорожкам будет происходить разделение пластины на кристаллы.

Пластины можно разделить на кристаллы двумя способами:

1) ломкой проскрайбированных пластин;

2) сквозным разделением пластин.

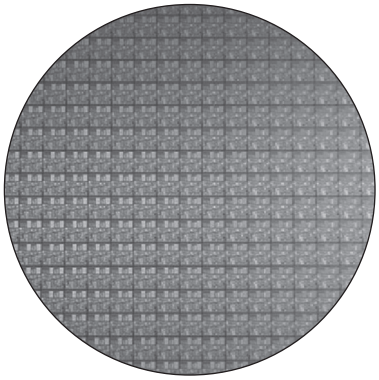


Рис. 1.199. Подложка с кристаллами интегральной микросхемы

При скрайбировании на поверхность пластины между готовыми микросхемами наносят в двух взаимно перпендикулярных направлениях неглубокие риски. В дальнейшем они играют роль концентраторов механических напряжений. По рискам пластину разламывают на прямоугольные или квадратные кристаллы. При втором способе пластину прорезают режущим инструментом насквозь.

Существуют следующие способы разделения пластин на кристаллы:

– резка диском с алмазной режущей кромкой или с применением абразива;

– резка стальными полотнами и проволокой с применением абразива;

– ультразвуковая резка;

– травление.

Если используется скрайбирование пластин, то возможны следующие методы:

– алмазное скрайбирование;

– лазерное скрайбирование;

– электронно-лучевое скрайбирование.

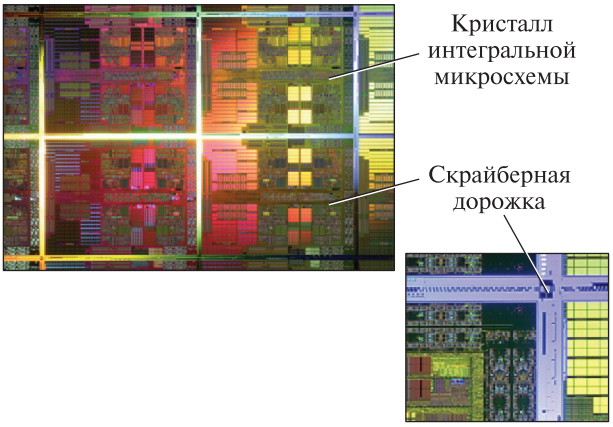


Рис. 1.200. Скрайберные дорожки на подложке

Подложки тонкопленочных схем из керамики с высоким содержанием оксида алюминия Al_2O_3 являются слишком твердыми для обычного скрайбирования и разламывания. Для резки керамических подложек применяют распиливание алмазным диском.

Рассмотрим основные методы разделения пластин, которые используются в микроэлектронике.

1.15.2. РЕЗКА ПЛАСТИН ДИСКОМ С АЛМАЗНОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Одним из методов разделения пластин на подложки является разрезание их диском с алмазной режущей кромкой (ДАР). Схема установки приведена на рис. 1.201.

Диск *2* крепится на установке с помощью фланца *1*. Подложка *3* закрепляется на основании *6* с помощью специальной мастики *5*.

Каждое алмазное зерно представляет собой микрорезец, который снимает мельчайшие стружки с обрабатываемой поверхности полупроводникового материала. Резка производится при высоких скоростях (около 5000 об/мин) и одновременном участии в процессе большого количества алмазных зерен, в результате чего достигается высокая производительность обработки. При резке выделяется много теплоты, поэтому ДАР необходимо охлаждать водой или специальной охлаждающей жидкостью (рис. 1.202).

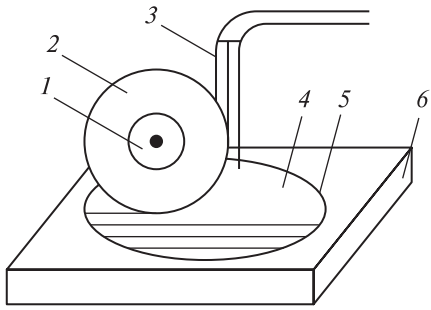


Рис. 1.201. Схема установки для разрезания подложки с использованием диска с алмазной режущей кромкой:
1 — фланцы; *2* — диск; *3* — устройство подачи жидкости для охлаждения; *4* — подложка; *5* — клеящая мастика; *6* — основание

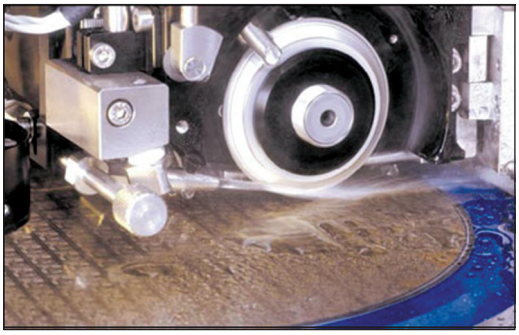


Рис. 1.202. Резка подложки с использованием диска с алмазной режущей кромкой

Для увеличения производительности на шпинделе станка через прокладку размещают несколько ДАР (в среднем до 200). Толщину прокладок выбирают в зависимости от требуемых размеров обработки.

Достоинства метода:

– простота;

– легкость осуществления в производстве;

– высокая режущая способность алмазной кромки диска.

Главным недостатком метода является невысокая жесткость ДАР, зависящая в основном от соотношения его толщины и внешнего диаметра.

Существует несколько способов увеличения жесткости ДАР:

– увеличение скорости вращения ДАР, но при большом числе оборотов (свыше 10 000 об/мин) возникают вибрации станка и режущего инструмента;

– уменьшение разности внешнего диаметра ДАР и диаметров прижимных фланцев или прокладок (рис. 1.203); режущая кромка должна выступать за края прокладок не более чем на 1,5 толщины разрезаемого материала;

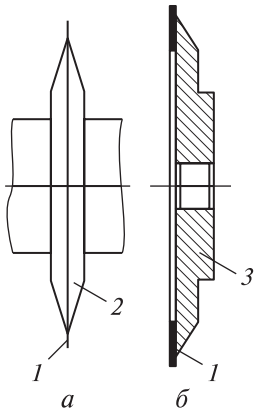


Рис. 1.203. Конструкция современных дисков с алмазной режущей кромкой:

а — резиноидный или спрессованный; *б* — полученный методом гальваностегии; *1* — алмазное лезвие; *2* — обкладка; *3* — корпус диска

– применение ДАР с более толстой основой, но получаемая в результате большая ширина пропила ведет к увеличению потери полупроводникового материала.

1.15.3. АЛМАЗНОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ

Для алмазного скрайбирования применяют алмазные скрайберы (рис. 1.204).

Метод основан на нанесении рисок с использованием алмазного резца (рис. 1.205). Применяются резцы в форме трехгранной или усеченной четырехгранной пирамиды, режущие элементы — ребра. Ширина риски не превышает 10...20 мкм, глубина — 5...10 мкм. Скорость движения резца составляет 50...75 мм/с, нагрузка на резце 1,2...1,4 Н.

Качество скрайбирования и последующей ломки в значительной степени зависят от состояния рабочей части алмазного резца. Работа резцом с изношенным режущим ребром или изношенной вершиной приводит к сколам при скрайбировании и некачественной ломке.

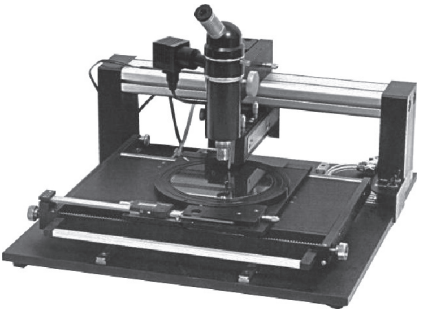


Рис. 1.204. Алмазный скрайбер

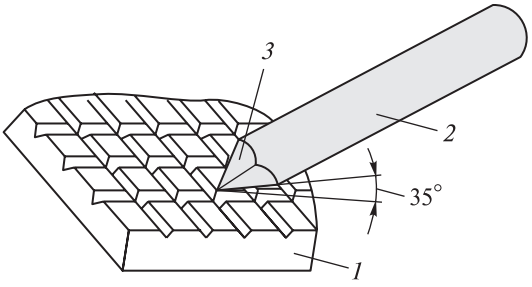


Рис. 1.205. Схема скрайбирования алмазным резцом:
1 — полупроводниковая пластина; *2* — резец; *3* — режущая грань

Можно использовать резцы двух видов. Чаще всего используют резцы из *натурального алмаза*. Их достоинство — меньшее изнашивание, однако их стоимость высока. Можно использовать также более дешевые резцы из *синтетического алмаза*.

Достоинства метода:

– высокая культура производства;
– малая ширина прорези;
– отсутствие потерь полупроводникового материала.

1.15.4. ЛАЗЕРНОЕ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ СКРАЙБИРОВАНИЕ

При *лазерном скрайбировании* разделительные риски между готовыми структурами создают испарением узкой полосы полупроводникового материала с поверхности пластины во время ее перемещения относительно

сфокусированного лазерного луча (рис. 1.206). Канавка при этом получается узкой (до 25...40 мкм) и глубокой (до 50...100 мкм).

В качестве оборудования используется импульсный оптический квантовый генератор. Частота следования импульсов 5...50 кГц, длительность импульса 0,5 мс.

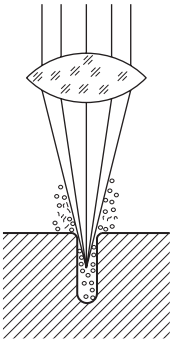


Рис. 1.206. Схема лазерного скрайбирования

Достоинства метода:

– получение глубоких разделительных канавок;

– высокая производительность (100...200 мм/с);

– отсутствие на полупроводниковой пластине микротрещин и сколов;

– значительно бóльшая точность обработки и разделения пластин на элементы;

– отсутствие изнашивания инструмента;

– возможность получения надрезов с ровными и чистыми краями без загрязнения микросхем отходами резки;

– малая область воздействия и минимальная зона термического влияния;

– возможность нанесения более глубоких, по сравнению с механическими методами, надрезов без приложения усилий к разделяемому материалу;

– экологичность процесса;

– 100%-ная повторяемость.

Недостатком метода лазерного скрайбирования является разбрызгивание продуктов обработки — частиц испаряемого и расплавленного полупроводникового материала, вследствие чего необходима зашита рабочей поверхности пластины.

Существует еще один схожий метод — *электронно-лучевое скрайбирование*, только вместо лазера используется остросфокусированный электронный луч, который производит микрорасплавление локального участка поверхности пластины. Процесс нагрева и охлаждения локальных областей (бороздок) пластины происходит в течение короткого промежутка времени, что вызывает возникновение термомеханических напряжений в области созданных электронным лучом бороздок.

1.15.5. РАЗДЕЛЕНИЕ СКРАЙБИРОВАННЫХ ПЛАСТИН

После того как пластина была скрайбирована, ее разделяют на кристаллы по рискам, которые служат концентраторами механических напряжений.

Существует несколько способов разделения скрайбированных пластин. Можно использовать валик, который должен двигаться *параллельно* направлению скрайбирования, иначе ломка будет происходить не по рискам (рис. 1.207). Брак может проявиться также в том случае, если полоски или отдельные кристаллы в процессе ломки смещаются относительно друг

друга. По этой причине перед ломкой пластины покрывают тонкой эластичной полиэтиленовой пленкой *2*, что позволяет сохранить ориентацию кристаллов в процессе ломки и избежать произвольного разламывания пластины и взаимного царапания кристаллов. Смещения кристаллов можно избежать, поместив пластину перед разламыванием в герметичный полиэтиленовый пакет и откачав из него воздух. Пластина изгибается и разламывается по рискам вначале на полоски, а после поворота на угол 90° — на кристаллы.

Можно разламывать пластину *прокатыванием* между двумя валиками (рис. 1.208) верхним упругим (резиновым) *1* и нижним стальным *5*. Для сохранения первоначальной ориентации кристаллов пластину закрепляют на термопластичной или адгезионной пленке-носителе *4* и защищают ее рабочую поверхность полиэтиленовой или лавсановой пленкой *3*. Расстояние между валиками, определяемое толщиной пластины, устанавливают, перемещая один из них.

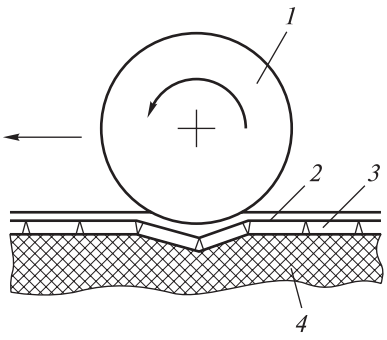


Рис. 1.207. Схема ломки скрайбированных пластин с помощью валика:

1 — валик; *2* — защитная пленка; *3* — кристалл; *4* — опора

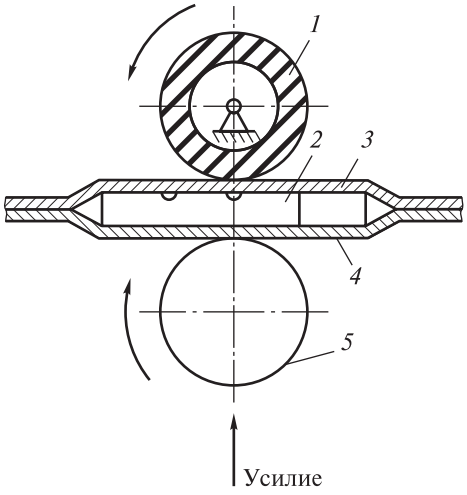


Рис. 1.208. Схема разламывания полупроводниковой пластины прокатыванием между валиками:

1 — упругий валик; *2* — пластина; *3* — защитная пленка; *4* — пленка-носитель; *5* — стальной валик

При прокатке более упругий валик в зависимости от толщины пластины деформируется и к пластине прикладывается нагрузка, пропорциональная площади ее поперечного сечения или длине скрайберной риски. При этом обеспечивается нагрузка, пропорциональная длине скрайберной риски.

Еще один метод — *разламывание* пластины на сферической опоре (рис. 1.209). Пластина *3*, зафиксированная тонкой пленкой *2*, размещается на упругой диафрагме *1*. Пневмоническим или гидравлическим способами диафрагма сжимается и прижимает пластину к сферической опоре *4*.

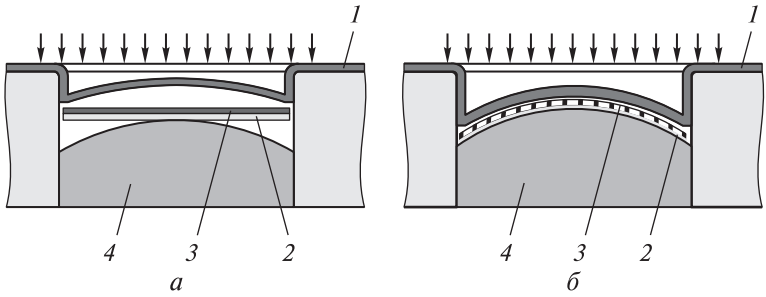


Рис. 1.209. Схема разламывания пластин на сферической опоре:
а — исходное состояние; *б* — прижатие пластины к сферической опоре диафрагмой; *1* — упругая диафрагма; *2* — тонкая пленка; *3* — полупроводниковая пластина; *4* — сферическая опора

Достоинствами метода являются простота, высокая производительность (ломка занимает не более 1,0...1,5 мин) и одностадийность, а также достаточно высокое качество процесса, так как кристаллы не смещаются относительно друг друга.

Тесты к лекции 1.15

1. ***В чем состоит недостаток лазерного скрайбирования?***

а) необходимость защиты подложки от осаждения на нее испаренного вещества;

б) возникновение микротрещин и сколов;

в) возможность перегрева подложки вследствие термического влияния.

2. ***Для чего увеличивают скорость диска с алмазной режущей кромкой?***

а) для повышения жесткости тонкого диска;

б) для увеличения производительности процесса;

в) для снижения механических напряжений в разрезаемой подложке.

1.16. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лекции: ознакомление с принципами защиты объектов приборостроения от механических повреждений и воздействия окружающей среды благодаря использованию различных методов герметизации.

1.16.1. БЕСКОРПУСНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ

Большинство полупроводниковых приборов и ИМС, используемых в бытовой и электронно-вычислительной аппаратуре, выполняют в пластмассовых корпусах. По сравнению с другими методами процесс герметизации пластмассами характеризуется высокой производительностью, относительно низкой стоимостью и простотой. Различают *корпусную* (с использованием полых или монолитных конструкций) и *бескорпусную* герметизацию.

Для герметизации ИМС используют различные полимеры с добавками, влияющими на пластичность, текучесть, цвет, скорость отверждения пластмасс. *Текучесть* характеризуется временем, в течение которого герметизирующий состав находится в вязком состоянии при заданной температуре окружающей среды. *Скоростью отверждения* называют скорость перехода пластмасс в состояние полной полимеризации.

В зависимости от поведения при нагревании пластмассы подразделяют на термопласты и реактопласты. *Термопласты* сохраняют свои свойства при многократном нагреве. *Реактопласты* под действием повышенной температуры переходят в необратимое состояние. В качестве герметизирующих материалов используют *компаунды* (механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей) и *пресс-порошки* на основе эпоксидных, кремнийорганических, полиэфирных смол.

Приведем характеристики смол.

Эпоксидные смолы: плотность $\gamma = 2{,}5...3{,}0$ г/см^3, термостойкость 150...230 °С, коэффициент диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4–5$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}01$.

Кремнийорганические смолы: плотность $\gamma = 1...5$ г/см^3, термостойкость –60...+300 °С, коэффициент диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2{,}8–3{,}6$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}003–0{,}005$.

Полиэфирные смолы: плотность $\gamma = 0{,}7...0{,}8$ г/см^3, термостойкость 150 °С, коэффициент диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 2{,}8–5{,}2$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta = 0{,}005$.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МЕТОДОМ ОБВОЛАКИВАНИЯ

При герметизации обволакиванием вокруг ИМС создается тонкая пленка полимерного материала. Для обеспечения механической прочности и герметичности полупроводниковых приборов и ИМС наносят несколько слоев герметизирующего состава с предварительным подсушиванием каждого предшествующего слоя.

Метод герметизации обволакиванием характеризуется устойчивостью защищаемых приборов к воздействию влажной атмосферы, простотой процесса, малым расходом герметизирующего материала, возможностью применения групповых методов обработки.

Технологический процесс обволакивания состоит из следующих основных операций:

1) закрепление арматуры (выводов) и полупроводниковой структуры в приспособлении;

2) силанирование (нанесение гидрофобного защитного покрытия на основе кремнийорганических полимеров);

3) нанесение защитного закрепляющего состава;

4) нанесение и полимеризация герметизирующего состава;

5) контроль качества герметизирующего покрытия.

Способ нанесения герметизирующего состава зависит от габаритных размеров защищаемого изделия. На дискретные полупроводниковые приборы герметизирующий состав наносят в виде капли (рис. 1.210). Полупроводниковые ИМС, гибридно-пленочные схемы и микросборки герметизируют окунанием или нанесением компаундов распылением.

К недостаткам метода обволакивания ИМС относятся трудность нанесения равномерного по толщине покрытия, длительность процесса сушки на воздухе, необходимость последующего отверждения при повышенной температуре, сложность механизации процесса.

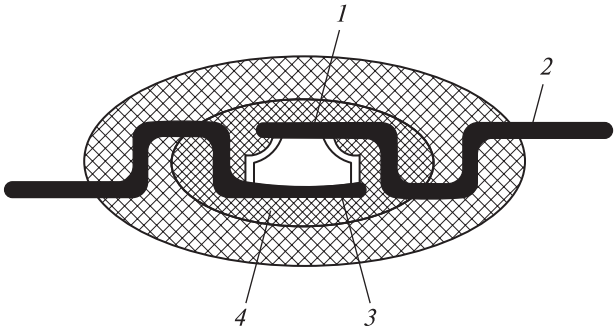


Рис. 1.210. Схема герметизации полупроводниковых структур методом обволакивания:

1 — полупроводниковая структура; *2* — вывод; *3* — силановая пленка; *4* — защитный закрепляющий слой

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ СВОБОДНОЙ ЗАЛИВКИ

Сущность метода герметизации ИМС методом свободной заливки состоит в заполнении жидким герметизирующим компаундом специальных форм или заранее изготовленных из пластмассы или металла корпусов, в которых размещают ИМС с выводами. Свободная заливка компаунда без давления уменьшает вероятность обрыва проволочных перемычек ИМС.

Применяют два метода свободной заливки: во вспомогательные разъемные формы и в предварительно изготовленные корпуса.

Герметизацию микросхем заливкой *во вспомогательные разъемные формы* относят к бескорпусной, поскольку для такой герметизации не требуется специально изготовленных деталей корпусов. Однако она обеспечивает производство ИМС со строго фиксированными габаритными размерами, размерами выводов, шага между выводами и т. д. В связи с этим в литературе принято называть такой метод заливки ИМС *герметизацией в пластмассовые корпуса*, которые иногда называют полимерными или металлополимерными.

В зависимости от конструкции прибора или ИМС применяют два способа заливки во вспомогательные формы — с *предварительным подогревом* и *без подогрева* разъемных форм.

При герметизации по первому способу многоместные разъемные формы, изготовленные из материалов с плохой адгезией по отношению к пластмассе, заполняют жидким компаундом с помощью дозатора. Собранные на ленте полупроводниковые структуры погружают в заполненные компаундом полости формы, после чего проводят полимеризацию компаунда (рис. 1. 211, *б*). После полимеризации приборы извлекают из формы и с помощью специальных штампов отделяют друг от друга (рис. 1. 211, *в* и *г*).

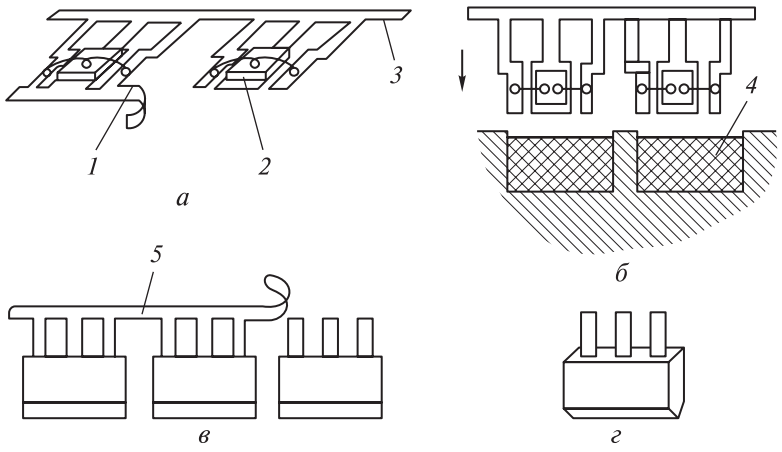


Рис. 1.211. Герметизация микросхем методом свободной заливки в формы без подогрева: *а* — монтаж полупроводниковой структуры на перфорированную ленту; *б* — герметизация групповым методом; *в* — удаление второй технологической перемычки; *г* — общий вид загерметизированного прибора; *1* — первая технологическая перемычка; *2* — полупроводниковая структура; *3* — перфорированная лента с кристаллами; *4* — полости формы, заполненные компаундом; *5* — вторая технологическая перемычка

При герметизации по второму способу (без подогрева разъемных форм) собранные на ленте полупроводниковые структуры помещают в рабочие гнезда нижней матрицы многоместной заливочной формы и плотно прижимают верхней матрицей. В верхней части формы предусмотрены специальные отверстия, а между гнездами внутри формы — система каналов для подачи герметизирующего компаунда. Нагретую форму заполняют компаундом. Нагрев формы необходим для повышения текучести компаунда. После предварительного отверждения компаунда заливочные формы охлаждают и извлекают ленты с загерметизированными приборами. Приборы на металлических лентах проходят термообработку до полной полимеризации. После полимеризации снимают облой и ленту разделяют на фрагменты, удаляя вторую технологическую перемычку. Полученные изделия представляют собой готовые загерметизированные приборы.

При герметизации заливкой *в предварительно изготовленные корпуса* полупроводниковые структуры сначала закрепляют на перфорированной ленте, состоящей из объединенных между собой фрагментов плоских выводов. Контакт между плоскими выводами перфорированной ленты и контактными площадками полупроводниковой структуры создают проволочными перемычками (рис. 1. 211, *а*).

Герметизация ИМС заливкой в предварительно изготовленные корпуса отличается простотой, так как в этом случае не требуется изготовление дорогостоящих заливочных форм. Корпуса представляют собой пластмассовую оболочку, изготовленную горячим прессованием, или металлическую капсулу, изготовленную штамповкой. Они имеют разнообразные геометрическую форму и типоразмеры.

Заливку в корпуса-оболочки осуществляют в основном теми же герметизирующими составами, что и заливку в формы. После полимеризации герметизирующего компаунда эти корпуса остаются частью ИМС (рис. 1.212).

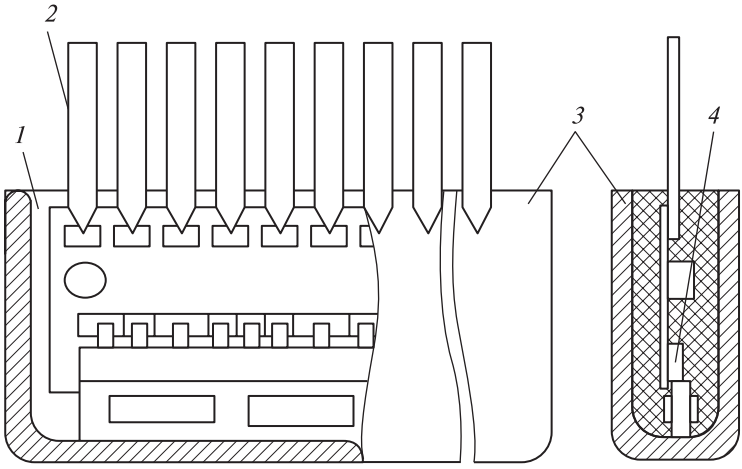


Рис. 1.212. Герметизация микросхем методом заливки в корпуса:

1 — плата с навесными компонентами; *2* — вывод; *3* — корпус; *4* — заливочный компаунд

Герметизацию полупроводниковых структур методом свободной заливки применяют в мелкосерийном производстве изделий со сложной арматурой.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПРЕССОВАНИЕМ

Герметизация ИМС методом прессования пластмасс основана на особенности некоторых полимерных материалов плавиться и течь под действием температуры и давления, заполняя полость металлической формы с изделиями. В этом случае используют полимеры в виде пресс-порошков и таблеток, свойства которых не изменяются в течение длительного времени, что исключает операцию приготовления герметизирующих компаундов. В качестве герметизирующих материалов применяют термореактивные полимеры, прессующиеся при низких значениях давления, что позволяет герметизировать ИМС с гибким проволочным монтажом.

В микроэлектронике используют в основном два способа герметизации ИМС прессованием: компрессионное и литьевое (трансферное).

При *компрессионном* прессовании собранную с арматурой полупроводниковую структуру и порошкообразный или таблетированный материал загружают непосредственно в пресс-форму (рис. 1.213, *а* и *б*). Под действием теплоты и давления герметизирующий материал переходит в пластичное состояние и заполняет формующую полость. После окончания выдержки спрессованные изделия извлекают из пресс-формы (рис. 1.213, *в*).

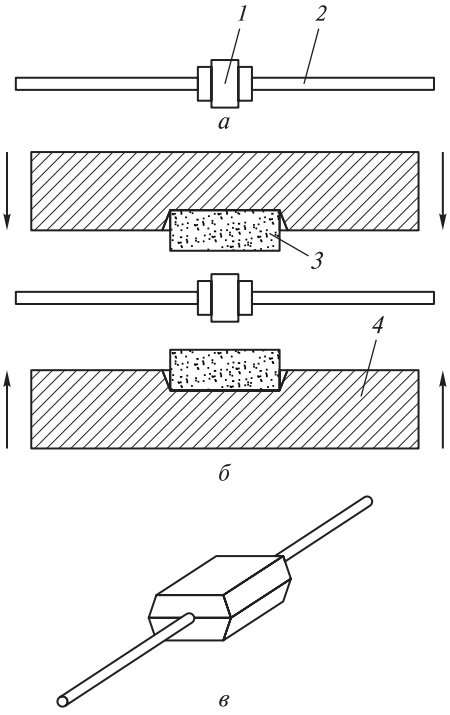


Рис. 1.213. Герметизация интегральных микросхем методом компрессионного прессования:

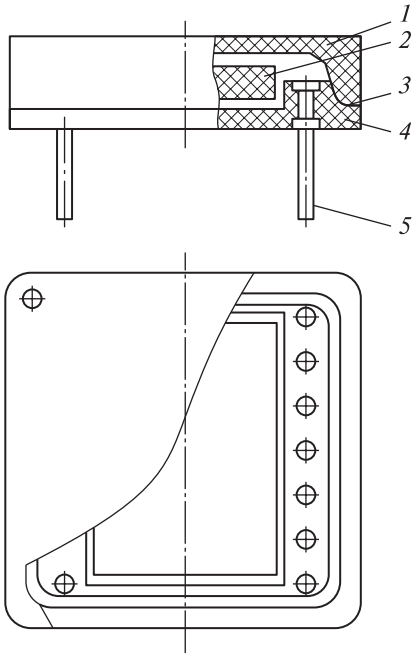
а — арматура с полупроводниковой структурой; *б* — загрузка арматуры с полупроводниковой структурой и пресс-порошком; *в* — загерметизированный прибор; *1* — полупроводниковая структура; *2* — выводы; *3* — пресс-порошок; *4* — пресс-форма

При *литьевом* (*трансферном*) прессовании загрузочная камера пресс-формы отделена от формующей полости. Кассету или перфорированную ленту с несколькими смонтированными полупроводниковыми структурами помещают в формующие полости пресс-формы. Пресс-форму нагревают до температуры плавления пластмассы нагревателями, вмонтированными непосредственно в пресс-форму. Расплавившаяся пластмасса под давлением опускающегося пуансона (трансфера) заполняет формующие полости пресс-формы. После частичной полимеризации кассету или

перфорированную ленту с полупроводниковыми структурами извлекают из пресс-формы и окончательно полимеризуют. Загерметизированные полупроводниковые структуры извлекают из кассеты и отделяют друг от друга.

К недостаткам метода свободной заливки в формы относятся сравнительно невысокая производительность и необходимость готовить заливочные смеси в небольших количествах, так как их вязкость очень быстро изменяется со временем.

ШОВНО-КЛЕЕВАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ



При шовно-клеевой герметизации используют пластмассовые корпуса с армированными выводами (рис. 1.214). Клеющий состав наносят по периметру основания корпуса после установки на него кристалла ИМС. На основание корпуса устанавливают пластмассовую крышку.

Сборку фиксируют в приспособлении и сушат на воздухе или в термошкафу. Достоинствами шовно-клеевой герметизации являются высокая технологичность процесса и низкая стоимость изделий.

Рис. 1.214. Шовно-клеевая герметизация интегральных микросхем:
1 — крышка; *2* — подложка с микросхемой; *3* — место склеивания; *4* — основание корпуса; *5* — армированный вывод

1.16.2. КОРПУСНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Полимерные материалы не обеспечивают полной защиты ИМС от влаги. Это связано с тем, что влагопроницаемость пластмасс во много раз выше аналогичного показателя для металлов. Значения температурного коэффициента линейного расширения пластмасс и металлических выводов ИМС отличаются примерно на порядок, поэтому трудно создать герметичное соединение между пластмассой и металлом. Надежным методом герметизации полупроводниковых приборов, ИМС и гибридно-пленочных микросборок является *вакуум-плотная корпусная герметизация*.

Корпуса ИМС представляют собой композитные конструкции, которые характеризуются тем, что механические напряжения в них возникают даже при равномерном изменении температуры и концентрируются

в местах сопряжения материалов с различными термомеханическими свойствами.

Корпуса ИМС и микросборок должны защищать их от воздействия окружающей среды и механических повреждений; обеспечивать удобство монтажа кристаллов и подложек и герметизацию корпуса без изменения параметров кристалла и навесных компонентов; выдерживать механические воздействия и термоциклирование; отводить теплоту в процессе сборки и эксплуатации изделий; обеспечивать надежность сборки и эксплуатации прибора; защищать кристалл и навесные компоненты от пыли, газообразных химических загрязнений, солей и паров воды; быть дешевыми и технологичными в изготовлении; при монтаже на печатную плату обеспечивать удобство и надежность монтажа и коррозионную стойкость; обеспечивать контроль ИМС до и после монтажа; обладать коррозионной стойкостью, высокой надежностью, технологичностью и низкой себестоимостью.

В зависимости от используемых материалов вакуум-плотные корпуса микросхем и микросборок подразделяют на стеклянные, металлостеклянные, металлокерамические, керамические, пластмассовые и металлопластмассовые.

Для изготовления оснований, крышек и выводов ИМС и микросборок применяют различные металлы и сплавы, основные свойства которых приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Характеристики металлов и сплавов, применяемых для изготовления оснований, крышек и выводов интегральных микросхем и микросборок

Параметр	Медь	Никель	Сталь 10	Ковар	Платинит
Плотность, г/см^3	8,96	8,90	7,86	8,35	8,90
Температура плавления, °С	1083	1452	1535	1450	–
Коэффициент температурного расширения, 10^{-7}/град	165	133	125	43–54	80–100
Теплопроводность, Вт/(м·К)	386	84	73	20	170
Удельное сопротивление, Ом·м	0,017	0,068	0,096	0,490	0,057
Твердость НВ, Н/м^2:					
в неотожженном состоянии	1170	1960	1170	2440	–
в отожженном состоянии	490	880	880	1570	–
Предел прочности, Н/м^2:					
в неотожженном состоянии	480	980	607	614	–
в отожженном состоянии	244	536	272	50	–
Относительное удлинение, %:					
в неотожженном состоянии	4,2	2,0	7,5	–	18,0
в отожженном состоянии	50	35	40	50	–
Сопротивление срезу, Н/м^2:					
в неотожженном состоянии	255	460	284	510	–
в отожженном состоянии	176	344	–	–	–

Для повышения коррозионной стойкости, создания технологических пленок для последующей герметизации, получения высокой чистоты поверхностей и улучшения внешнего вида корпусов применяют различные покрытия, которые наносят гальваническим или химическим способом. Твердость защитных и технологических покрытий влияет на жесткость режимов при герметизации корпусов электроконтактными видами сварки. Основные виды покрытий, применяемых для корпусов ИМС, и их твердость приведены ниже:

Вид покрытия	Твердость НВ
Золочение	185
Серебрение	250
Палладирование	660
Никелирование	850

Металлические детали корпусов изготовляют чаще всего холодной штамповкой; фланцы и крышки корпусов — вытяжкой, вырубкой и объемной штамповкой; перфоленты и рамки — на вырубных штампах; штырьковые выводы корпусов получают резкой проволоки на отрезки определенной длины на автоматах различных конструкций.

В *металлостеклянных корпусах* ИМС со штырьковыми или планарными выводами в качестве электроизоляционного материала используют стекло. Для изготовления стеклянных деталей и элементов, содержащих спаи стекла с металлом, используют стеклянные трубки (стеклокапилляры), стеклопорошки и стеклотаблетки. Стеклокапилляры нарезают на бусы алмазным диском с наружной режущей кромкой. Перед резкой стеклокапилляр наклеивают на стеклянную подложку, которую затем закрепляют на столе станка.

Керамические безвыводные корпуса (микрокорпуса) состоят из трех слоев: один с проводниками, другой — с контактными площадками, третий — защитный нижний слой. К достоинствам безвыводных микрокорпусов следует отнести высокую герметичность, высокую плотность размещения их на печатных платах, совместимость с керамическими подложками гибридных микросборок. Помимо безвыводных микрокорпусов, промышленность выпускает микрокорпуса с матрицами выводов.

Металлокерамические корпуса ИМС являются наиболее трудоемкими и дорогими. В качестве изоляционного материала в них применяют алюмооксидную или корундовую керамику с высоким содержанием оксида алюминия Al_2O_3. Такая керамика обладает хорошей вакуумной плотностью (в 10^7 раз плотнее меди); высокой непроницаемостью как для гелия, так и для водорода; высокой прочностью, термо- и радиационной стойкостью; надежностью при эксплуатации в тропических условиях; высоким электрическим сопротивлением; относительно хорошей теплопроводностью; низкими диэлектрическими потерями при недорогом исходном материале; хрупкостью и твердостью, что позволяет обрабатывать ее только алмазным инструментом и шлифованием. Коэффициент температурного расширения алюмооксидной керамики в 2 раза выше, чем у кремния, поэтому при монтаже кристаллов

с размерами более 3×3 мм на основание корпуса с использованием эвтектики золото–кремний возникают проблемы, связанные с несогласованностью значений коэффициента температурного расширения кремния и керамики.

Металлокерамические корпуса изготовляют из трех слоев керамической ленты. Верхний и средний слои ленты имеют форму рамки. На верхнюю поверхность средней ленты с помощью трафарета молибденовой пастой наносят рисунок, который связывает контактные площадки корпуса с выводной рамкой.

На нижней ленте выполняют рисунок посадочной площадки и ее соединение с шиной земли выводной рамки. На верхнюю ленту, внутренние размеры которой на 1 мм больше размеров средней рамки, наносят рисунок кольца для крышки. Молибденовую пасту вжигают при температуре 1350 °С в течение 40 мин в водороде. Затем к корпусу твердым припоем ПСр-72 в сухом воздухе припаивают выводную рамку из никеля и рамку для герметизации. Плоский металлокерамический корпус с планарными выводами представлен на рис. 1.215.

Пластмассовые микрокорпуса изготовляют из полимеризующейся при термообработке пластмассы. Выводы под пластмассовым основанием микрокорпуса имеют изгиб, благодаря чему монтаж можно осуществлять непосредственно на поверхности печатной платы. Пластмассовые микрокорпуса более устойчивы к термоударам и дешевле, чем керамические.

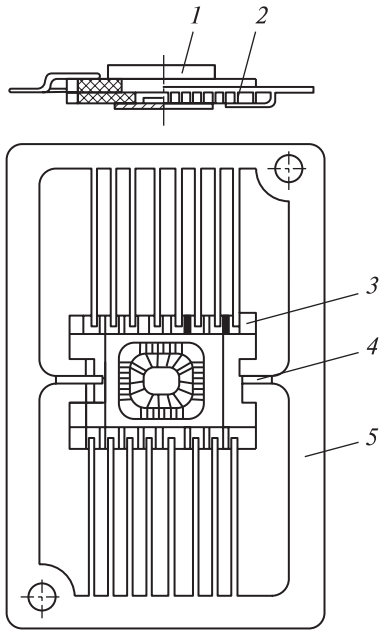


Рис. 1.215. Плоский металлокерамический корпус с планарными выводами:

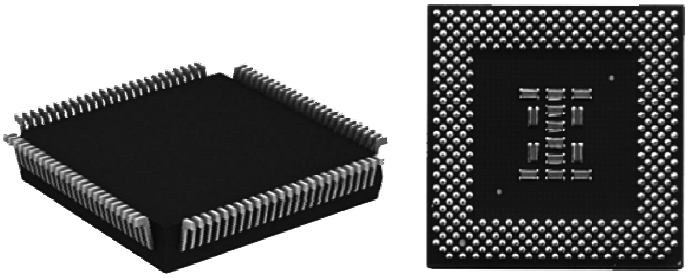
1 — крышка корпуса; *2* — теплоотвод; *3* — основание корпуса; *4* — выводная рамка; *5* — технологический вывод

ТИПЫ КОРПУСОВ

Корпуса интегральных микросхем прошли длинный эволюционный путь, но далеко не все корпуса используются в настоящее время.

По способу расположения выводов все корпуса можно разделить на две группы: с *периферийными* выводами и с *матричными* выводами. При периферийном расположении выводы размещены по краям (на периферии) кристалла или корпуса микросхемы (рис. 1.216, *а*), при матричном расположении — на плоской поверхности корпуса (рис. 1.216, *б*).

Число компонентов с периферийным расположением выводов обычно не превышает 150–200. Шаг периферийных выводов ограничен значением 0,3 мм (практически — 0,4 мм), что позволяет размещать на микросхемах с корпусами больших размеров большое число выводов.



а *б*

Рис. 1.216. Корпуса с расположением выводов:
а — периферийным; *б* — матричным

В настоящее время используются следующие типы корпусов с периферийным расположением выводов:

– DIP;
– QFP;
– PLCC;
– CLSS;
– планарные корпуса с двухрядным расположением выводов (SOIC, SOP, SOJ).

Конфигурация планарных выводов ИМС, используемых для пайки по технологии поверхностного монтажа, представлена на рис. 1.217.

Корпуса DIP — это корпуса с двухрядным расположением выводов, предназначенные для штыревого монтажа. Они представляют собой

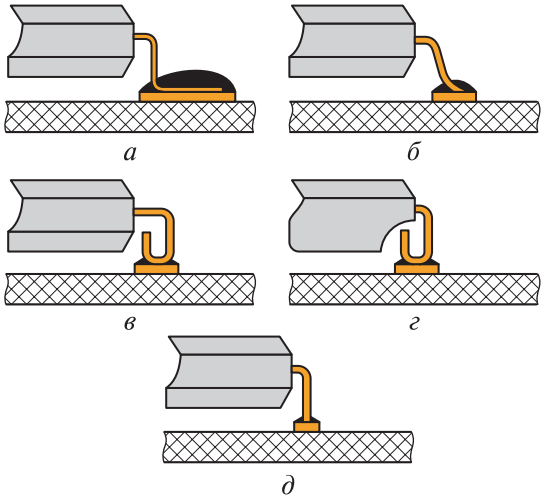
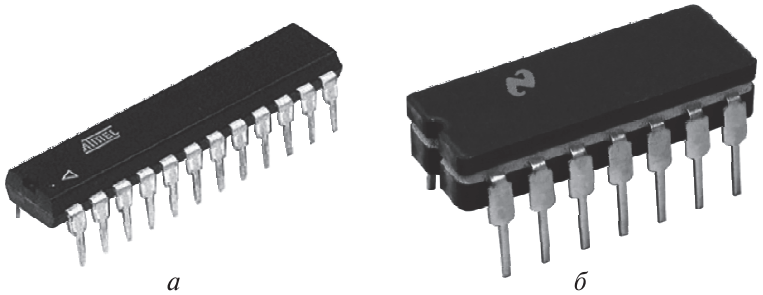


Рис. 1.217. Конфигурация планарных выводов интегральных микросхем:
а — «крыло альбатроса»; *б* — «крыло чайки»; *в*, *г* — J-образный открытый и закрытый (с пайкой под корпус); *д* — I-образный (для пайки встык)

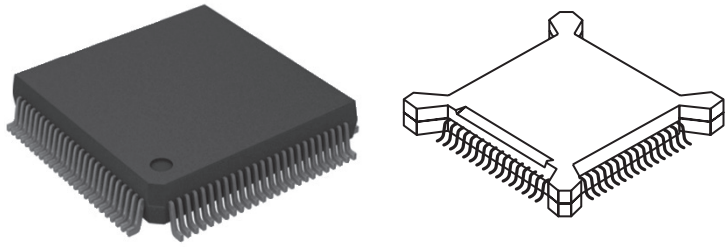
прямоугольный корпус с расположенными на длинных сторонах контактами. В зависимости от материала корпуса выделяют два варианта исполнения: PDIP, имеющие пластиковый корпус (рис. 1.218, *а*), и CDIP, имеющие керамический корпус (рис. 1.218, *б*).



а *б*

Рис. 1.218. Интегральные микросхемы с корпусом:
а — PDIP; *б* — CDIP

Корпуса QFP — семейство корпусов микросхем, имеющих планарные выводы по всем четырем сторонам (рис. 1.219). Микросхемы в таких корпусах предназначены только для поверхностного монтажа; установка в разъем и монтаж в отверстия штатно не предусмотрены, хотя переходные коммутационные устройства существуют. Число выводов QFP-микросхем обычно не превышает 200, шаг выводов — 0,4...1,0 мм. Корпус начали широко применять в Европе и США в 1990-х гг. Однако еще в 1970-х гг. QFP-корпуса использовались в японской бытовой электронике.



а *б*

Рис. 1.219. Интегральные микросхемы с корпусом:
а — QFP; *б* — BQFP

Форма основания микросхемы — прямоугольная, но может быть и квадратной. Корпуса обычно различаются только числом выводов, шагом, размерами и используемыми материалами. Выводы в форме крыла чайки равномерно распределены по четырем сторонам. Шаг выводов довольно мал — всего 0,3...0,5 мм, что позволяет создавать корпуса с общим числом выводов до 440.

Существуют разновидности корпуса OFP: SQFP-R в форме прямоугольника и BQFP с расширениями («ушками») основания по углам микросхемы, предназначенными для защиты выводов от механических повреждений до запайки.

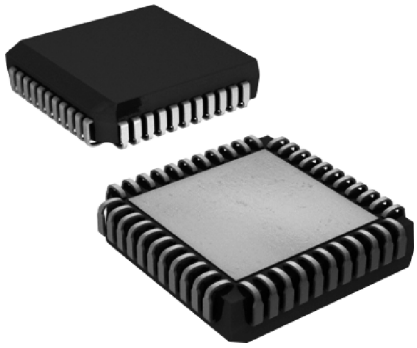


Рис. 1.220. Интегральная микросхема с PLCC-корпусом

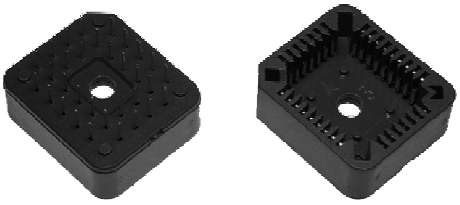


Рис. 1.221. Панель для установки интегральной микросхемы с PLCC-корпусом

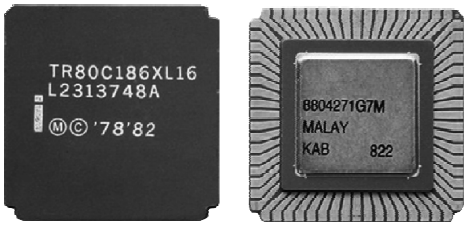


Рис. 1.222. Интегральная микросхема с CLCC-корпусом

Корпус PLCC — квадратный пластиковый корпус с расположенными по краям контактами (рис. 1.220), который предназначен для установки в специальную панель, часто называемую «кроваткой» (рис. 1.221). В настоящее время широкое распространение получили микросхемы флеш-памяти в корпусе PLCC, используемые в качестве микросхемы BIOS на системных платах.

Корпус CLCC — низкопрофильный квадратный керамический корпус с расположенными на его нижней части контактами, предназначенный для поверхностного монтажа (рис. 1.222).

Существуют также корпуса планарных микросхем с двухрядным расположением выводов (рис. 1.223). К ним относятся корпуса SOIC (рис. 1.223, *а*) и SOP (рис. 1.223, *б*) с выводами в форме крыла чайки. Шаг выводов у этого типа корпусов составляет 1,27 мм, число выводов — 6...42.

Дальнейшим развитием корпусов подобного типа явилось создание корпуса SSOIC с уменьшенным до 0,635 мм расстоянием между выводами при максимальном их числе 64 (рис. 1.223, *в*) и корпуса TSOP с уменьшенной до 1,27 мм его высотой и уменьшенным до 0,3...0,4 мм расстоянием между выводами (рис. 1.223, *г*). Существуют и другие разновидности корпусов этого типа: SSOP, TSSOP, MSOP.

Для уменьшения монтажной площади были разработаны корпуса SOJ с двухсторонним расположением выводов J-образной формы, загнутых под корпус (рис. 1.224). Шаг выводов — 1,27 мм, общее их число — 14–44.

Если число выводов ИМС превышает 150–200, предпочтительнее использовать матричную систему выводов, так как она делает возможным

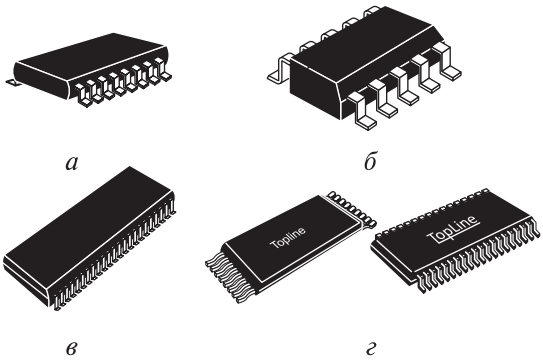


Рис. 1.223. Разновидности планарных микросхем с двухрядным расположением выводов:
а — корпус SOIC; *б* — корпус SOP; *в* — корпус типа SSOIC; *г* — корпус TSOP

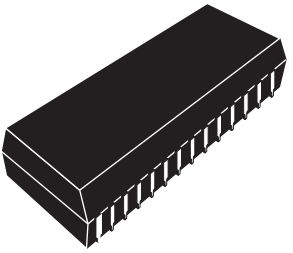


Рис. 1.224. Корпус SOJ

размещение большого числа выводов на ограниченной площади. Существуют следующие корпуса с матричным расположением выводов:

– PGA;
– BGA;
– CGA;
– CSP.

Корпус PGA представляет собой квадратный или прямоугольный корпус с расположенными в нижней части штырьковыми контактами. В современных процессорах контакты расположены в шахматном порядке. В зависимости от материала корпуса выделяют три варианта исполнения:

– PPGA — пластиковый корпус (рис. 1.225, *а*);
– CPGA — керамический корпус (рис. 1.225, *б*);
– OPGA — корпус из органического материала (рис. 1.225, *в*).

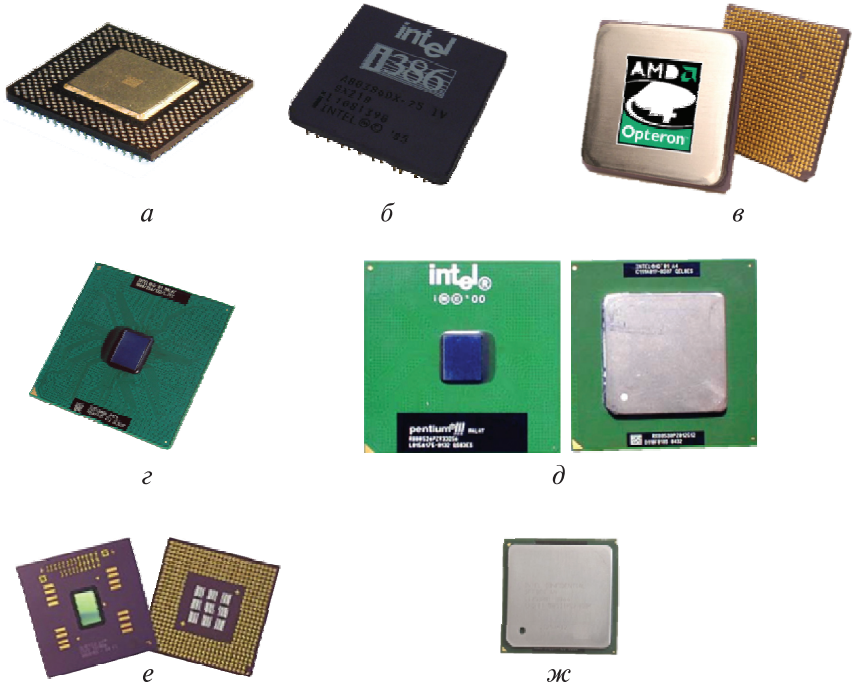
Существуют следующие модификации корпуса PGA:

– FCPGA — открытый кристалл процессора расположен на верхней части корпуса (рис. 1.225, *г*);
– FCPGA2 — отличается от FCPGA наличием теплораспределителя, закрывающего кристалл процессора (рис. 1.225, *д*);
– μFCPGA — компактный вариант корпуса FCPGA (рис. 1.225, *е*);
– μPGA — компактный вариант корпуса FCPGA2 (рис. 1.225, *ж*).

Для обозначения корпусов с контактами, расположенными в шахматном порядке, иногда используют аббревиатуру SPGA.

Корпус BGA представляет собой корпус PGA, в котором штырьковые контакты заменены на шарики припоя (рис. 1.226). Такие корпуса предназначены для поверхностного монтажа. Чаще всего корпуса BGA используются в мобильных процессорах, материнских платах и современных графических процессорах.

Существует несколько разновидностей BGA-корпусов:
– PBGA — пластмассовые корпуса с матрицей шариковых выводов;
– CBGA — керамические корпуса с матрицей шариковых выводов.



а *б* *в* *г* *д* *е* *ж*

Рис. 1.225. Разновидности PGA-корпусов:
а — PPGA; *б* — CPGA; *в* — OPGA; *г* — FCPGA; *д* — FCPGA2; *е* — μFCPGA; *ж* — μPGA

Выделяют следующие модификации корпуса BGA:
– FCBGA — в данном корпусе открытый кристалл процессора расположен на верхней части корпуса, изготовленного из органического материала (рис. 1.227);

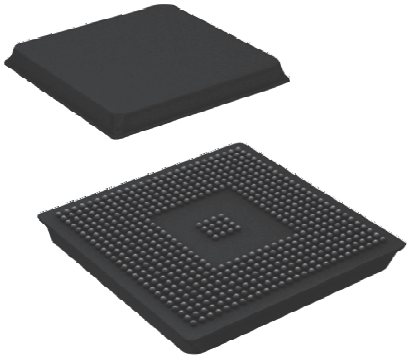


Рис. 1.226. Интегральная схема в корпусе BGA



Рис. 1.227. Интегральная микросхема в корпусе FCBGA

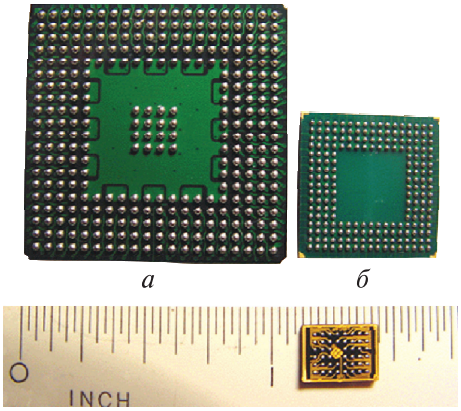


Рис. 1.228. Сравнение интегральных микросхем в корпусах:
а — BGA; *б* — μBGA

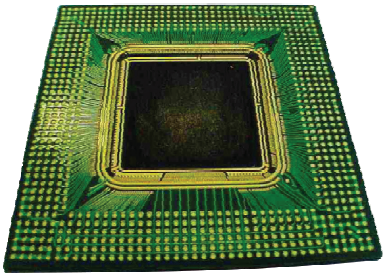


Рис. 1.229. Интегральная микросхема в корпусе HSBGA

– μBGA (рис. 1.228) и μFCBGA — компактные варианты корпуса;
– HSBGA (рис. 1.229).

Корпус CCGA представляет собой керамический корпус с матрицей столбиковых выводов (рис. 1.230). Иногда данный корпус обозначается CGA.

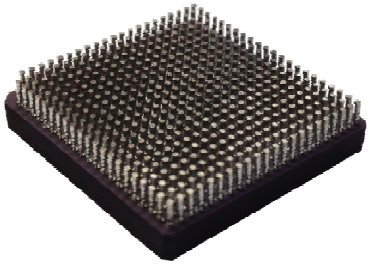


Рис. 1.230. Интегральная микросхема в корпусе CCGA

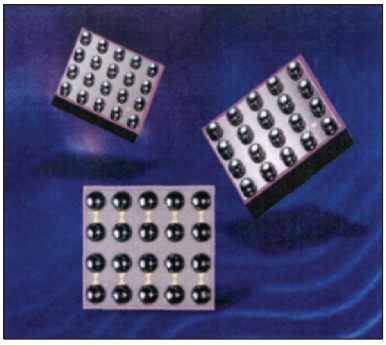


Рис. 1.231. Интегральная микросхема в корпусе CSP

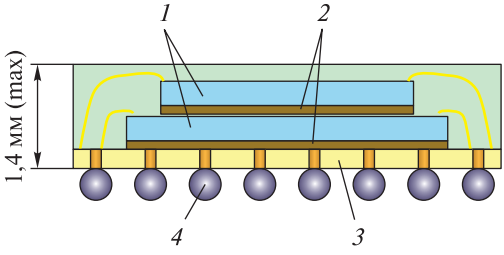


Рис. 1.232. Конструкция интегральной микросхемы в корпусе CSP:
1 — верхний и нижний кристаллы;
2 — слой электропроводящей пасты;
3 — диэлектрик; *4* — шариковый вывод припоя

Развитие технологии изготовления корпусов BGA привело к созданию корпусов CSP, содержащих два и более кристаллов. Пример такого корпуса показан на рис. 1.231, конструкция ИМС в корпусе CSP — на рис. 1.232.

Достоинства матричной системы выводов по сравнению с периферийным размещением выводов:

– минимальная площадь монтажного поля подложки;

– наличие свободных мест для размещения элементов теплоотвода на подложку;

– лучшие условия обеспечения функциональной производительности электронных модулей вследствие меньших паразитных эффектов на быстродействующих операциях;

– упрощение технологии поверхностного монтажа на печатную плату вследствие использования процессов оплавления припоя при групповом нагреве;

– больший выход готовой продукции.

Недостатки матричной системы выводов:

– необходимость в дополнительных капиталовложениях для обеспечения позиционирования выводов на плате и тестирования паек, не доступных для контроля визуальным методом;

– ограниченность длины выводов, не обеспечивающая демпфирование для компенсации рассогласования температурных расширений материалов в иерархии межсоединений и необходимую для особых условий устойчивость к механическим воздействиям, связанным с деформацией подложек; в силу этого ограниченность перечня материалов для использования в указанной системе межсоединений и, кроме того, высокая стоимость этих материалов по сравнению с обычными.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ КЛЕЕМ

Приклеивание крышки к основанию корпуса применяют при герметизации приборов в корпусах больших габаритов, к которым предъявляются невысокие требования по герметичности, или для наклеивания оптических окон (стекло, германий и т. д.) на металлическую рамку, используемую в качестве крышки корпуса.

Для приклеивания крышек корпусов применяют различные клеевые составы с высокой вязкостью в жидком состоянии, а для приклеивания оптических окон — порошковые клеевые составы, состоящие из смеси эпоксидного мономера, ангидридного отвердителя, пластифицирующего модификатора и мелкодисперсного неорганического наполнителя.

На площадь склеивания до 0,5 мм^2 клей наносят напрессовкой, при большей площади поверхности клей сначала протирают сквозь проволочный трафарет, затем оплавляют при температуре 140...150 °С с образованием формополимера. Крышки помещают в специальные кассеты клеем вверх, на него укладывают основания корпусов и помещают в термошкаф. Процесс

склеивания состоит из процесса желирования (при температуре 155...160 °С в течение 10...20 ч) и процесса отверждения (155...160 °С, 24 ч).

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ПАЙКОЙ

Пайку применяют для герметизации приборов с большими габаритными размерами в плоских корпусах. Процесс герметизации пайкой состоит в соединении металлических или металлизированных деталей корпусов с помощью припоя, который, расплавляясь, заполняет капиллярный зазор между деталями.

Для герметизации корпусов пайкой используют мягкие припои на основе олова и свинца типа ПОС-61 (температура пайки — около 240 °С) и свинцово-серебряный припой ПСр-2,5 (температура пайки — около 340 °С). Низкотемпературную пайку ведут в печах при нагреве конвекцией и струей горячего газа.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ХОЛОДНОЙ СВАРКОЙ

Герметизацию корпусов полупроводниковых приборов холодной сваркой осуществляют по замкнутому контуру корпуса без нагрева. Вакуум-плотное сварное соединение образуется вследствие деформирования свариваемых деталей с помощью гидравлических, пневматических, пневмогидравлических и механических прессов, обеспечивающих необходимое усилие сжатия. Детали корпусов, которые герметизируют холодной сваркой, изготовляют из

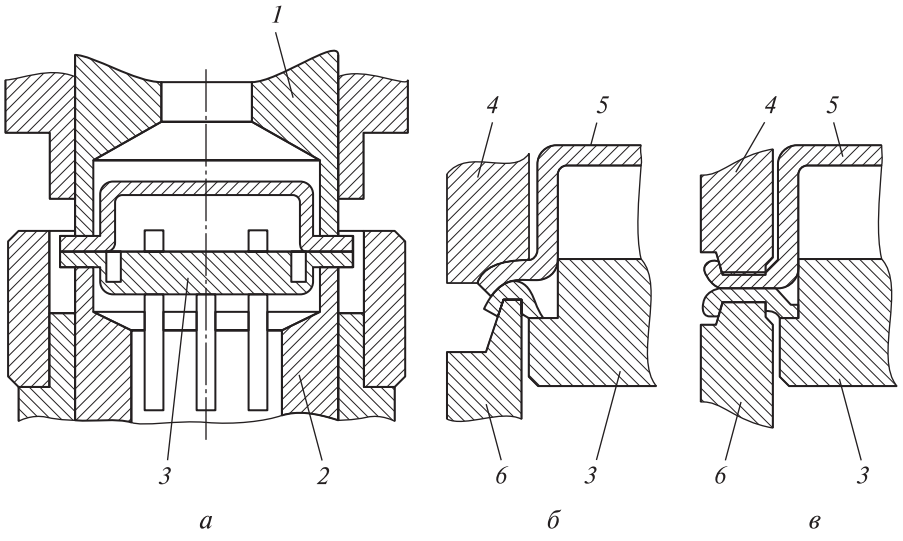


Рис. 1.233. Схема холодной сварки:

а — положение корпуса в установке для сварки с предварительным сдавливанием; *б* — односторонняя сварка; *в* — двухсторонняя сварка; *1* — пуансон предварительного сдавливания; *2* — матрица предварительного сдавливания; *3* — основание корпуса; *4* — сварочный пуансон; *5* — крышка (баллон); *6* — матрица

пар металлов медь–медь, медь–сталь, медь–ковар. Основанием корпуса служит фланец, который содержит выводы, изолированные от него стеклом или керамикой. Крышку корпуса выполняют в виде баллона с отбортовкой (рис. 1.233, *а*).

Различают одностороннюю и двухстороннюю холодную сварку. При односторонней сварке (рис. 1.233, *б*) в основном деформируется по замкнутому контуру только одна из свариваемых деталей. Эта сварка предпочтительна для герметизации корпусов, детали которых изготовляют из разнородных металлов. В этом случае устраняется опасность образования сильно подрезанного участка шва с наружной стороны детали из более пластичного металла и, следовательно, нарушение герметичности в процессе эксплуатации прибора. При двухсторонней холодной сварке (рис. 1.233, *в*) по замкнутому контуру деформируются обе свариваемые детали.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ АРГОННО-ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

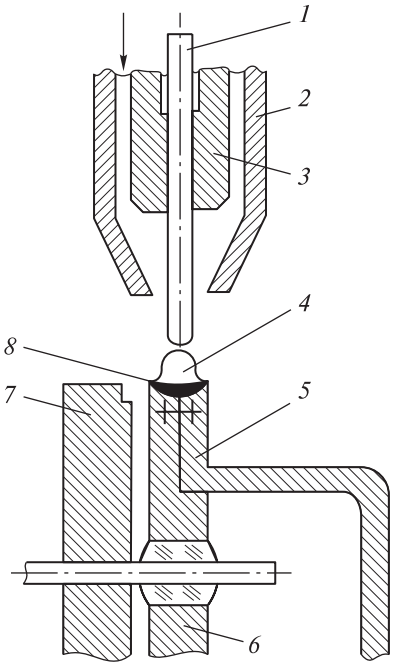


Рис. 1.234. Схема образования сварного соединения при герметизации корпусов аргонно-дуговой сваркой:

1 — вольфрамовый электрод; *2* — сопло; *3* — цанга; *4* — дуга; *5* — крышка корпуса; *6* — основание корпуса; *7* — приспособление для крепления корпуса; *8* — сварное соединение

Аргонно-дуговую сварку выполняют в среде инертного газа (аргона) плавящимися или неплавящимися электродами в специальных камерах (скафандрах), заполненных инертным газом, или при подаче инертного газа непосредственно в зону сварки. Для поддержания непрерывного горения дуги в процессе герметизации при переходе от одного корпуса к другому иногда используют дополнительную дугу, мощность которой составляет 10...15 % мощности основной дуги.

Основными параметрами аргонно-дуговой сварки являются сварочный ток, скорость сварки, длительность импульса, частота следования импульсов, длительность паузы, давление защитного газа в рабочей камере.

Схема образования сварного соединения при герметизации корпусов аргонно-дуговой сваркой представлена на рис. 1.234.

Достоинствами аргонно-дуговой сварки являются возможность регулирования длительности нагрева и охлаждения в зоне соединения, простота управления процессами диффузии и дегазации жидкого металла.

К недостаткам аргонно-дуговой сварки следует отнести нестабильность горения дуги, высокие требования к изготовлению деталей корпусов (ограничение свариваемых пар материалов, минимальные отклонения

их по толщине, плоскостности, ширине и смещению) и оснастки, влияние покрытий на качество сварных соединений, необходимость применения эффективного теплоотвода, исключающего нагрев выше допустимой температуры.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

Герметизация лазерной сваркой предусматривает формирование непрерывного сварного шва с помощью перекрывающихся сварных точек, которые образуются в результате превращения импульсов световой энергии в тепловую при воздействии сфокусированного лазерного излучения (рис. 1.235). Коэффициент перекрытия сварных точек для герметичных швов должен составлять 0,3–0,8, для вакуум-плотных швов — не менее 0,5.

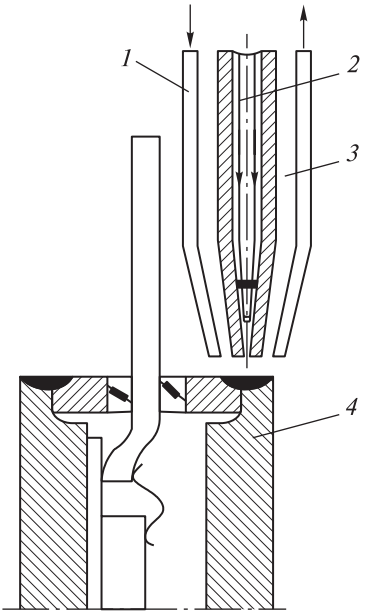


Рис. 1.235. Схема герметизации лазерным лучом:

1 — подача инертного газа; *2* — лазерный луч; *3* — отсос продуктов горения; *4* — верхняя крышка

Основными параметрами лазерной сварки являются энергия лазерного излучения, длительность и частота следования импульсов, диаметр фокального пятна на свариваемой поверхности.

К достоинствам лазерной сварки относят возможность сварки трудносвариваемых или не поддающихся сварке другими методами металлов практически в любых средах при минимальной деформации свариваемых деталей. Малые размеры зоны термического влияния и небольшие структурные изменения позволяют с помощью лазерной сварки выполнять сварные швы в непосредственной близости от металлостеклянных спаев с высоким процентом выхода годных изделий по герметичности (до 99 %).

К недостаткам лазерной сварки следует отнести незначительную глубину проплавления соединяемых металлов при средней мощности излучения; выплески испаряемого металла при использовании мощных лазеров; необходимость удаления образующихся ядовитых газов и ионизированных паров свариваемых металлов; высокие требования к точности изготовления деталей корпусов; низкую производительность.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ШОВНОЙ КОНТАКТНОЙ (РОЛИКОВОЙ) СВАРКОЙ

Односторонняя шовная контактная (роликовая) сварка — наиболее распространенный способ герметизации микросхем в металлостеклянных и металлокерамических корпусах прямоугольной и квадратной форм.

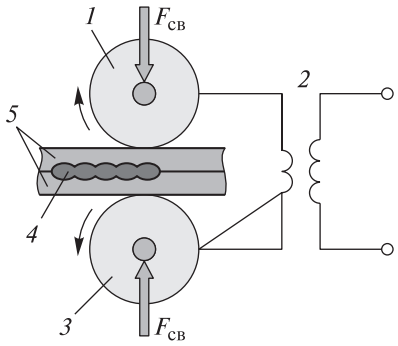


Рис. 1.236. Схема контактной (роликовой) сварки:

1, *3* — дисковые электроды; *2* — источник тока; *4* — шов из перекрывающих друг друга точек; *5* — свариваемые детали; $F_{св}$ — сила прижатия электродов к свариваемой детали

Процесс сварки происходит при перемещении двух конических роликов, свободно вращающихся на полуосях по противоположным кромкам крышки (рис. 1.236). Ролики с определенным усилием прижимаются к кромкам крышки и вращаются под действием сил трения. При подаче сварочных импульсов от источника питания выделяется теплота в зоне контакта сварочных роликов с кромкой крышки. Сварное соединение осуществляется расплавлением покрытий крышки и основания корпуса с образованием наплыва, т. е. расплавленного металла, выдавленного в зоне стыка деталей. При этом сварной шов получают в результате перекрытия сварных точек, образующихся при контакте сварных роликов с крышкой корпуса. Для получения герметичных сварных швов коэффициент перекрытия сварных точек должен составлять 0,5–0,8.

Основными параметрами шовной контактной (роликовой) сварки являются амплитуда сварочного напряжения, длительность сварочного импульса, частота следования импульсов, усилие на сварочных роликах.

К достоинствам герметизации шовной контактной (роликовой) сварки относят высокую прочность и надежность сварного шва, высокую герметичность, большой процент выхода годных изделий (до 99 %); незначительный разогрев корпуса, высокую производительность.

К недостаткам шовной контактной (роликовой) сварки следует отнести низкую стойкость электродов; высокие механические напряжения в зоне контакта роликов с крышкой; нестабильность размеров сварного шва, приводящую к непровару или перегреву корпуса; возможность возникновения начального выплеска при сварке, приводящего к быстрому износу сварочных роликов и браку приборов.

1.16.3. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Качество герметизации корпусов оценивают по наличию *дефектов* визуально и по наличию *течей*. В качестве единицы измерения используют течь, при которой за 1 с в объеме 1 л, где создан вакуум, давление возрастает на 1 мкм рт. ст. (ГОСТ Р 59286–2020 «Контроль неразрушающий. Течеискание. Термины и определения»). Загерметизированные приборы контролируют на наличие малых и больших течей.

Для контроля герметичности по малым течам чаще всего применяют масс-спектрометрический метод и метод с использованием электроотрицательного газа. *Масс-спектрометрический метод* контроля герметичности ИМС широко распространен, так как обладает высокой чувствительностью и надежностью. Метод основан на разделении молекул сложной парогазовой

смеси по массам и измерении ионного тока ионизированных молекул определенной массы. В качестве контрольного газа обычно используют гелий, обладающий высокой проникающей способностью. Кроме того, его малое содержание в атмосфере дает незначительный фоновый уровень при измерениях; масс-спектрометрический пик гелия резко отличается от пиков газов, содержащихся в атмосфере; при попадании в прибор гелий не оказывает влияния на структуру и работоспособность устройства. Контролируемые ИМС спрессовывают в камере опрессовки в атмосфере гелия под давлением 400 кПа в течение 4...6 ч. Затем их помещают в камеру, где создается вакуум. Если в процессе опрессовки гелий проник через течи в корпус, то его утечка в вакууме обнаруживается течеискателем и прибор отбраковывается.

К недостаткам масс-спектрометрического метода контроля герметичности следует отнести низкую производительность; сложность обслуживания оборудования; необходимость создания высокого вакуума; высокую квалификацию специалистов; невозможность контролировать большие течи, так как при наличии в корпусе больших течей гелий выходит через них до проведения контроля герметичности.

Для контроля герметичности по большим течам чаще всего используют вакуумно-жидкостной и пузырьковый методы. *Вакуумно-жидкостной метод* основан на визуальном наблюдении выходящих через течи пузырьков воздуха. В этом случае ИМС помещают в специальную жидкость (уайт-спирит), над которой создают вакуум. Вследствие перепада давления воздух из негерметичного корпуса ИМС будет выходить через течи в виде непрерывной цепочки пузырей.

При контроле герметичности по большим течам *пузырьковым методом* контролируемые ИМС помещают в жидкость (этиленгликоль), нагретую до температуры около 120...140 °С. Течь определяют также по наличию непрерывной цепочки пузырей.

1.16.4. МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ В КОРПУС

Для обеспечения электрического контакта с корпусом ИМС на кристаллах выполняют контактные площадки, которые представляют собой расширенные области коммутационных проводников (рис. 1.237). Размеры контактных площадок определяются конструкцией выводов. Контактные площадки выносят на периферийную часть кристалла за пределы активной зоны и располагают на толстом слое SiO_2 для уменьшения паразитной емкости выводов, повышения надежности и увеличения выхода годных микросхем в процессе производства.

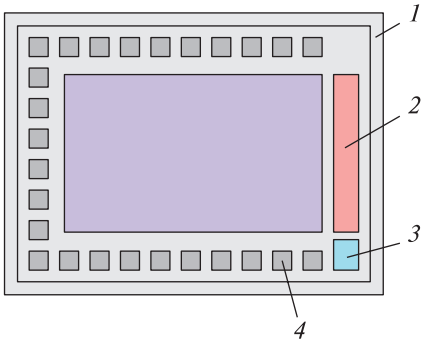


Рис. 1.237. Схема кристалла интегральной микросхемы:

1 — скрайберная дорожка; *2* — область для тестовых элементов; *3* — область знаков совмещения; *4* — контактная площадка

В микросхемах повышенной надежности под контактными площадками формируют *n*-области, изолированные *p*–*n*-переходом или пленочным диэлектриком.

Для обеспечения электрического контакта между контактными площадками кристалла и выводами микросхемы могут использоваться следующие выводы:

– проволочные;
– паучковые;
– балочные;
– шариковые;
– столбиковые.

Монтаж с использованием *проволочных* выводов показан на рис. 1.238. Полупроводниковый кристалл *2* приклеивают на подложку *1*. Проволочные выводы *4* разваривают к контактным площадкам *3* кристалла и подложки *5*.

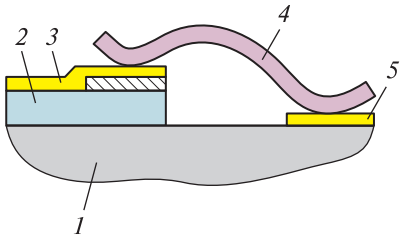


Рис. 1.238. Схема монтажа кристалла интегральной микросхемы с помощью проволочных выводов:

1 — подложка; *2* — полупроводниковый кристалл; *3* — контактная площадка полупроводникового кристалла; *4* — проволочный вывод; *5* — контактная площадка подложки

Проволочные выводы изготовляют из золотой или алюминиевой проволоки диаметром 25...50 мкм. Золотая проволока позволяет получать высококачественные электрические соединения методом термокомпрессии или пайки. Для присоединения алюминиевых проволочек к контактным площадкам используют ультразвуковую сварку, при которой сварное соединение характеризуется пониженной механической прочностью.

Недостатки проволочного монтажа:

– сложность;
– высокая стоимость;
– низкая надежность;
– трудность автоматизации проволочного монтажа, поскольку требуется тщательное и очень кропотливое совмещение вывода, контактной площадки и рабочей поверхности инструмента при выполнении каждого монтажного соединения.

Для облегчения автоматизации монтажа применяют *паучковые* выводы (рис. 1.239). Их выполняют, как правило, из меди. Паучковые выводы кристалла присоединяют групповой пайкой или сваркой к консольным выводам рамки корпуса микросхемы. На сборку поступают кристаллы с паучковыми выводами, закрепленные на перфорированной ленте-носителе из полиимидной пленки толщиной около 35 мкм. Для контроля параметров микросхемы на ленте-носителе предусмотрены контактные площадки. Для предварительной защиты кристалла от воздействия внешней среды на него наносят каплю эпоксидного компаунда.

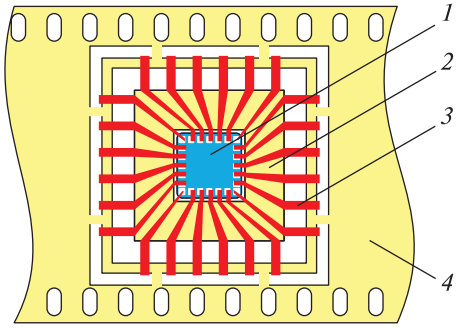


Рис. 1.239. Ленточный носитель кристалла интегральной микросхемы:

1 — кристалл ИМС; *2* — кадр ленточного носителя; *3* — контактная площадка для монтажа носителя к подложке; *4* — транспортная лента для автоматизации установки кристалла на монтажную подложку

Монтаж с использованием *балочных* выводов показан на рис. 1.240. При этом кристалл может располагаться или монтажной стороной вниз (рис. 1.240, *а*), или монтажной стороной вверх (рис. 1.240, *б*).

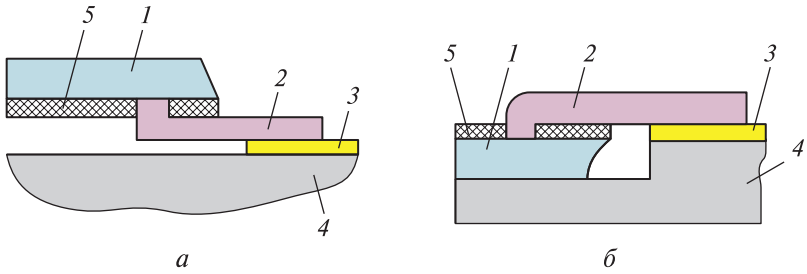


Рис. 1.240. Монтаж кристалла интегральной микросхемы с помощью балочных выводов:

а — монтажной стороной кристалла вниз; *б* — монтажной стороной кристалла вверх; *1* — полупроводниковый кристалл; *2* — балочный вывод; *3* — контактная площадка подложки; *4* — подложка; *5* — слой SiO_2

Монтаж кристалла с использованием *шариковых* выводов показан на рис. 1.241. Структура жестких объемных выводов, формируемых на кристалле, приведена на рис. 1.242.

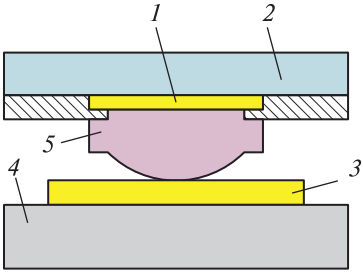


Рис. 1.241. Монтаж кристалла интегральной микросхемы с помощью шариковых выводов:

1 — контактная площадка полупроводникового кристалла; *2* — полупроводниковый кристалл; *3* — контактная площадка подложки; *4* — подложка; *5* — шариковый вывод

В настоящее время при монтаже ИМС в корпус используют метод перевернутого кристалла, также известный как Flip-Chip. Сущность данного метода заключается в установке полупроводникового кристалла ИМС на подложку активной стороной вниз (рис. 1.243). Выводы кристалла могут быть

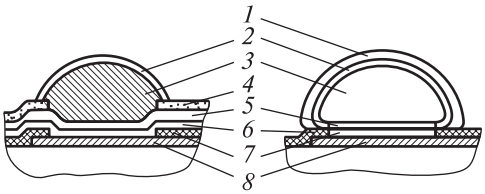


Рис. 1.242. Структура жестких объемных выводов на кристалле интегральной микросхемы:

1 — припой; *2* — серебро; *3* — гальваническая медь; *4* — фотомаска; *5* — тонкая медь; *6* — ванадий; *7* — SiO_2; *8* — алюминий

выполнены из проводящего полимера, а также представлять собой шарики из металла или столбики из золота, меди, а также припоя или металлические контактные площадки. Методы присоединения кристаллов по технологии Flip-Chip включают ультразвуковую и термозвуковую сварку, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайку оплавлением. Затем кристалл герметизируют с помощью эпоксидного компаунда.

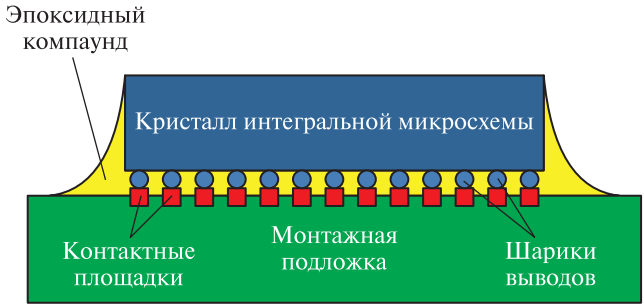


Рис. 1.243. Схема метода перевернутого кристалла (Flip-Chip)

Основными преимуществами технологии сборки методом перевернутого кристалла являются возможность матричного расположения контактных площадок и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму их паразитную индуктивность и, кроме того, увеличивает компактность ИМС.

Основные недостатки этого метода — худшие, по сравнению с кристаллом, присоединенным обычным способом, тепловые характеристики и трудность герметизации матрицы контактных площадок.

1.16.5. МОНТАЖ КРИСТАЛЛА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ПЛАТУ

В случае если есть возможность отказаться от использования корпуса и монтировать кристалл ИМС непосредственно на плату, можно значительно уменьшить массогабаритные характеристики получаемого устройства. Подобная экономия особенно выгодна для аппаратуры, которая эксплуатируется в авиационной или космической технике. Однако при этом нужна общая герметизация устройства, чтобы избежать контакта кристалла с окружающей средой.

Существует три технологии монтажа кристаллов непосредственно на плате:
– «кристалл на плате» — COB;
– «кристалл на полимере» — COF;
– «кристалл на стекле» — COG.

При технологии «кристалл на плате» (COB, рис. 1.244) кристалл приклеивают к печатной плате, после чего выполняют разварку проволочных выводов к контактным площадкам на плате. Герметизацию осуществляют заливкой кристалла кампаундом.

Достоинства технологии «кристалл на плате»:
– низкая стоимость;
– разнообразие вариантов разводки платы;
– малый период производства;
– широкий температурный диапазон и высокая механическая прочность конструкции.

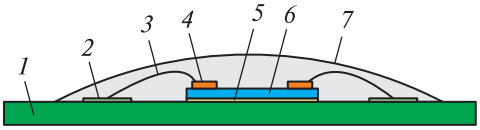


Рис. 1.244. Монтаж кристалла интегральной микросхемы на плату:

1 — печатная плата; *2* — контактная площадка на плате; *3* — проводник; *4* — контактная площадка на кристалле; *5* — клей; *6* — кристалл; *7* — герметизирующий компаунд

Присоединение контактных площадок кристалла к контактным площадкам на плате может осуществляться и методами, которые используются для создания печатных плат (рис. 1.245 и 1.246).

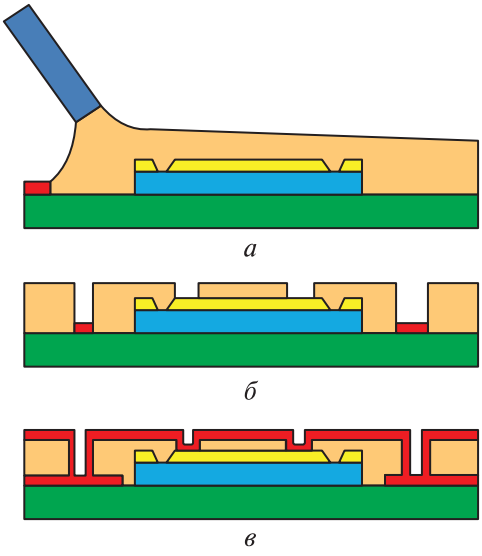


Рис. 1.245. Формирование межсоединений кристалла с платой аддитивным методом:

а — заливка фоторезистом; *б* — проявление фоторезиста; *в* — аддитивная металлизация

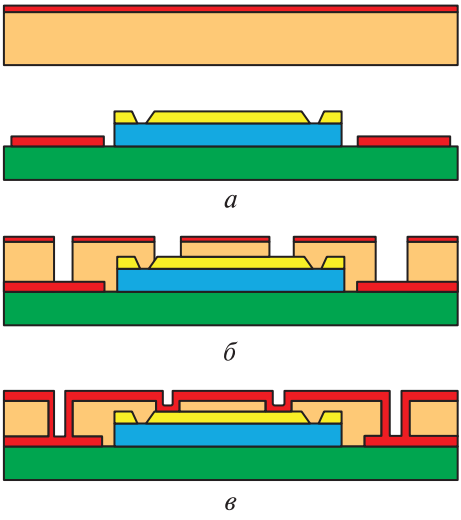


Рис. 1.246. Формирование межсоединений кристалла с платой субтрактивным методом:

а — наслоение фольгированной пленки; *б* — лазерное сверление отверстий; *в* — металлизация и травление рисунка

Технология «кристалл на полимере» (COF) представляет собой способ компоновки, при котором кристалл микросхемы, пассивные и активные компоненты располагаются на тонкой полиимидной пленке.

Достоинством технологии являются очень малые толщина и масса готового изделия, что важно при использовании такой сборки в компактных устройствах (например, в сотовых телефонах).

Основные недостатки технологии:

– сравнительно высокая стоимость;

– низкая механическая прочность.

Технология «кристалл на стекле» (COG) используется при производстве дисплеев, когда управляющую микросхему, пассивные компоненты, схему температурной компенсации и ПЗУ знакогенератора располагают непосредственно на подложке дисплея, что уменьшает габариты и стоимость модуля. Дисплеи, изготовленные по технологии COG, широко применяются в портативных приборах.

Недостатком этой технологии является необходимость в дополнительных элементах конструкций для защиты от электромагнитных помех и инфракрасного излучения.

1.16.6. МНОГОКРИСТАЛЬНЫЕ МОДУЛИ

В настоящее время широко используется технология создания многокристальных модулей — MCM (Multi-Chip-Module), при которой несколько кристаллов объединяют в одном устройстве под одним корпусом. Это связано с дальнейшим уменьшением проектных норм ИМС, которое может оказаться слишком дорогостоящим решением и не принести экономической выгоды. При этом технология MCM позволяет, размещая в одном корпусе несколько кристаллов, экономить монтажную площадь.

Для создания многокристальных модулей чаще всего используют *стапелирование* — кристаллы размещаются один над другим (рис. 1.247). Самой

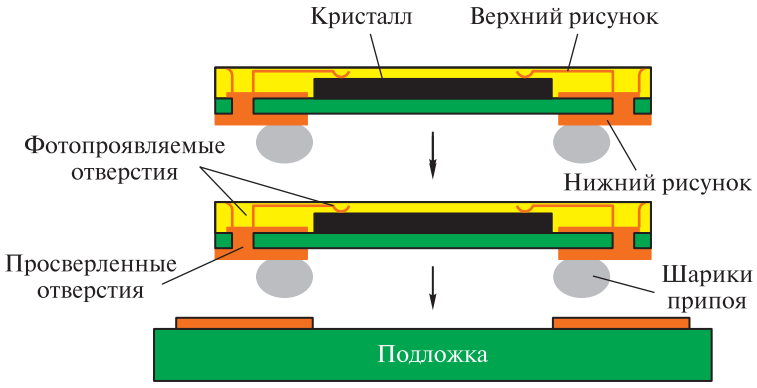


Рис. 1.247. Стапелирование двух кристаллов

дорогой частью многокристального модуля является монтажное основание (рис. 1.248). Самым дешевым из них является MCM-L.

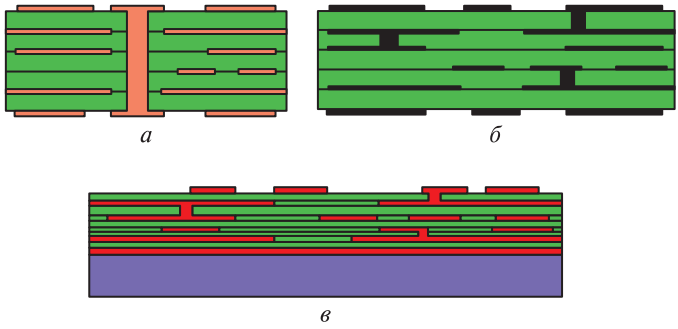


Рис. 1.248. Варианты исполнения монтажных оснований многокристального модуля:
а — MCM-L; *б* — MCM-C; *в* — MCM-D

Можно также использовать MCM на гибкой монтажной подложке (рис. 1.249).

Эту подложку затем сворачивают в компактный объем.



Рис. 1.249. Стапелирование многокристального модуля на гибкой монтажной подложке

Тесты к лекции 1.16

1. ***Какой из указанных типов корпусов относится к корпусам с матричной системой выводов?***

а) BGA;
б) DIP;
в) CLCC.

2. ***Какие выводы могут использоваться в технологии Flip-Chip?***

а) шариковые;
б) проволочные;
в) паучковые.

1.17. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лекции: ознакомление с основными элементами полупроводниковых интегральных микросхем.

1.17.1. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Основной структурой, используемой при производстве ИМС, является транзисторная. На ее основе могут выполняться и другие компоненты: диоды, резисторы, конденсаторы.

В классических структурах изоляция компонентов осуществляется обратно смещенным *p*–*n*-переходом. Самой первой структурой, используемой для создания биполярных транзисторов, была *диффузионно-планарная* (рис. 1.250).

Заготовкой для создания *n*–*p*–*n*-транзистора служит подложка, легированная кремнием *p*-типа. С помощью диффузии либо ионного легирования последовательно получают коллекторную, базовую и эмиттерную области. Одновременно с эмиттерной областью формируют легированную область под эмиттерный контакт. Концентрация примеси в этой области выше, чем в коллекторе, что уменьшает сопротивление тела коллектора. Затем выполняют металлизацию.

Такая структура имеет ряд недостатков. Контакты эмиттера, коллектора и базы транзистора лежат в одной плоскости, поэтому коллекторный ток

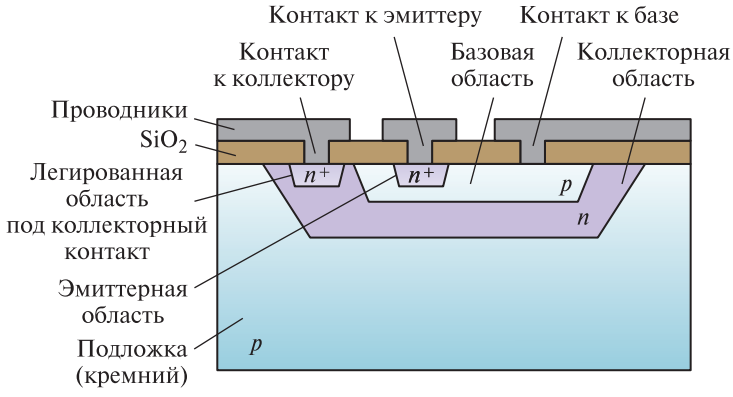


Рис. 1.250. Структура диффузионно-планарного биполярного транзистора

протекает по большому горизонтальному участку под дном базы, причем сечение этого участка невелико, а концентрация примеси там минимальна. Это увеличивает время переключения транзистора. Кроме того, неравномерное распределение примеси по областям, максимально приближенным к поверхности, также ухудшает параметры транзистора (например, повышает напряжение насыщения).

После открытия операции эпитаксии диффузионно-планарную структуру заменила *эпитаксиально-планарная* (рис. 1.251). Для создания *n*–*p*–*n*-транзистора берут подложку, легированную кремнием *p*-типа, на ней с помощью операции эпитаксии при одновременном равномерном легировании примеси *n*-типа формируют n^+- и *n*-области. Затем с помощью диффузии или ионной имплантации примеси p^+ по контуру коллектора создают разделительную область. В коллекторной области диффузией формируют базовую и эмиттерную области, а также легированную область под коллекторный контакт. После этого выполняют металлизацию.

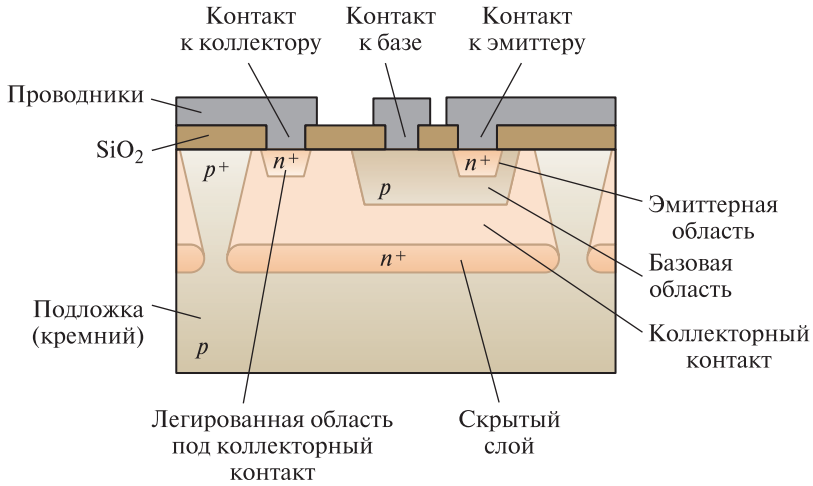


Рис. 1.251. Структура эпитаксиально-планарного биполярного транзистора

Примесь в коллекторной области равномерно распределена по глубине, что улучшает параметры транзистора. Область n^+, образующаяся в донной части коллектора, называется *скрытым слоем*. Ее наличие позволяет снизить концентрацию примеси в коллекторной области и уменьшить напряжение пробоя.

Изоляция обратно смещенным *p*–*n*-переходом не обеспечивает хороших изоляционных характеристик, так как возникают заметные токи утечки. Для их уменьшения приходится увеличивать расстояние между элементами. Кроме того, *p*–*n*-переход имеет паразитную емкость, что приводит к уменьшению быстродействия.

Для того чтобы избежать указанных недостатков, используют структуру *с диэлектрической изоляцией*. В ней элементы располагаются в своеобразном

диэлектрическом «кармане», который представляет собой область монокремния, ограниченную слоем SiO_2 (рис. 1.252).

Для создания n–p–n-транзистора берут подложку, легированную кремнием n-типа, на поверхности которой сформирован n^+-слой. По контуру будущих элементов проводят вертикальное анизотропное травление кремния, после чего поверхность окисляют. Затем проводят осаждение поликремния, который в дальнейшем служит подложкой. Излишки монокремния шлифуют и полируют. Получают базовую и эмиттерную области, а также легированную область под коллекторный контакт. Затем выполняют металлизацию.

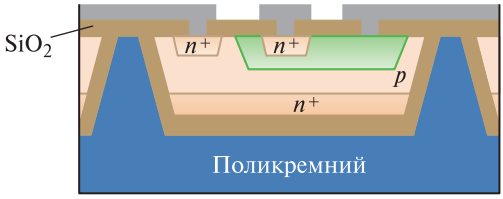


Рис. 1.252. Структура биполярного транзистора с диэлектрической изоляцией

Наличие изоляции диэлектриком позволяет уменьшить расстояние между компонентами. Кроме того, отсутствуют паразитные емкости, что увеличивает скорость переключения транзистора. Однако указанная структура имеет ряд недостатков. К ним относится высокая трудоемкость шлифования и полирования подложек. Кроме того, поликремний и монокремний имеют разные характеристики, что выражается в значительных внутренних механических напряжениях. Части недостатков лишены комбинированные методы изоляции.

Один из таких методов используется в *изопланарной структуре* (рис. 1.253). Для создания n–p–n-транзистора берут подложку, легированную кремнием p-типа, на которой с помощью операции эпитаксии при одновременном равномерном легировании примеси n-типа формируют n^+- и n-области. Удаляют с поверхности оксидную маску и формируют маску из нитрида кремния Si_3N_4. В ней вытравливают линии по контуру транзисторов, после чего проводят глубокое окисление кремния до подложки, в результате формируются

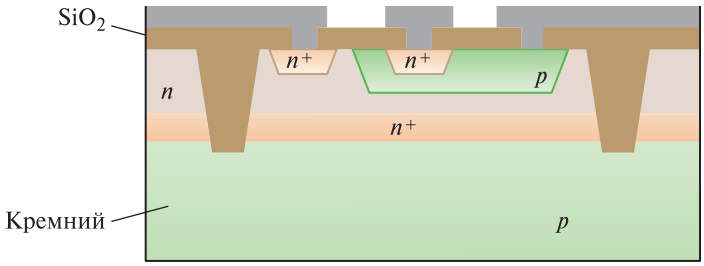


Рис. 1.253. Изопланарная структура

разделительные области. Затем нитридную маску убирают и окисляют поверхность, после чего формируют оставшиеся области и выполняют металлизацию.

Главным недостатком изопланарной структуры является большая длительность окисления кремния для получения разделительных областей.

Еще одной структурой с комбинированной изоляцией является *полипланарная структура* (рис. 1.254). В ней вместо глубокого окисления проводят анизотропное травление кремния по контуру будущих компонентов. Поверхность кремния окисляют, после этого сверху осаждают поликремний. Затем излишки поликремния сошлифовывают, поверхность полируют и окисляют. После этого формируют оставшиеся области и выполняют металлизацию.

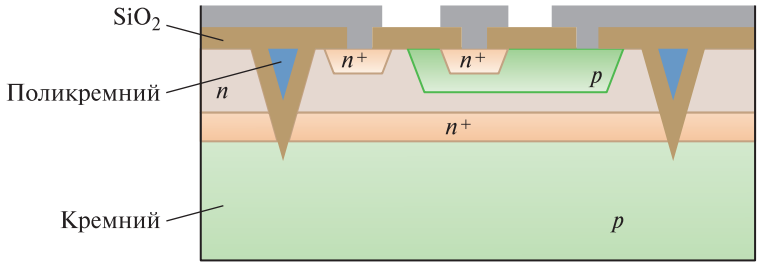


Рис. 1.254. Полипланарная структура

Для этой структуры можно применять только пластины с кристаллографической ориентацией <100>, в которых получают транзисторы, имеющие не самые лучшие электрические характеристики, что является одним из недостатков указанной структуры. Кроме того, присутствуют трудоемкие операции шлифования и полирования, хотя и не в таких масштабах, как в структуре с диэлектрической изоляцией.

Общими недостатками структур с изоляцией диэлектриком являются их бóльшая сложность и более высокая стоимость, чем у структур с изоляцией *p*–*n*-переходом.

1.17.2. ДИОДЫ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Диоды в интегральном исполнении формируют на основе биполярных транзисторов, при этом используют один из *p*–*n*-переходов (рис. 1.255).

Существует пять схем преобразования транзистора в диод на основе использования:

1) перехода эмиттер–база при короткозамкнутом переходе база–коллектор (рис. 1.255, *а*);

2) перехода эмиттер–база при разомкнутой коллекторной цепи (рис. 1.255, *б*);

3) перехода коллектор–база при отсутствии эмиттерной области (рис. 1.255, *в*);

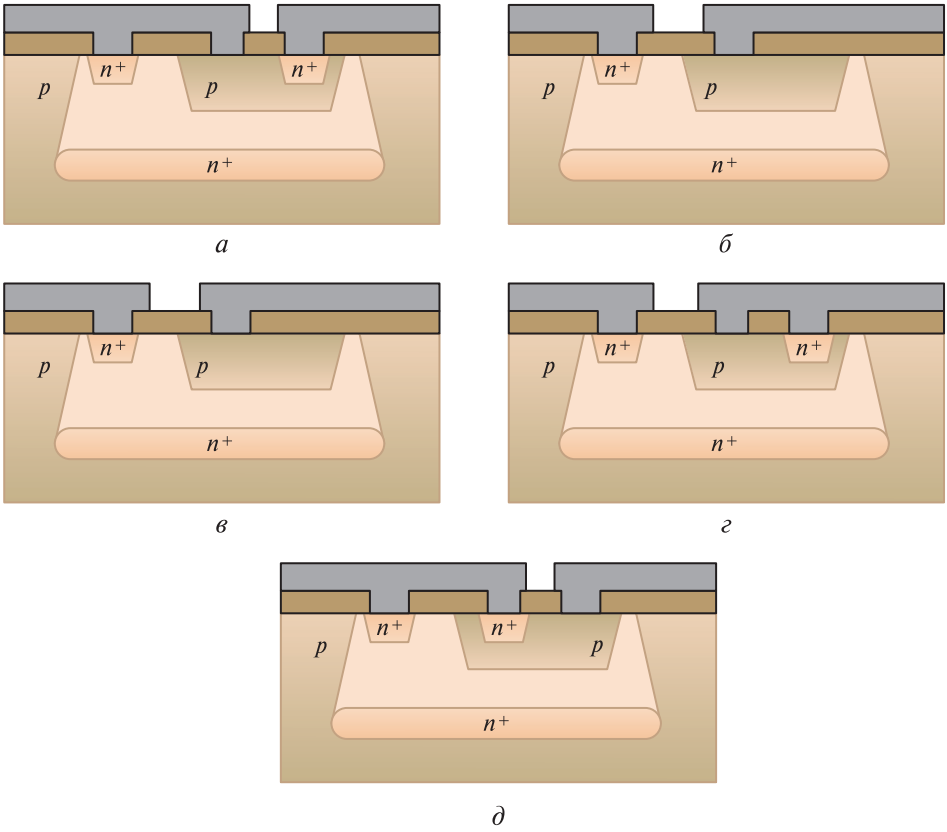


Рис. 1.255. Диоды в интегральном исполнении:

а — использование перехода эмиттер–база при короткозамкнутом переходе база–коллектор; *б* — использование перехода эмиттер–база при разомкнутой коллекторной цепи; *в* — использование перехода коллектор–база при отсутствии эмиттерной области; *г* — использование перехода база–коллектор при короткозамкнутом переходе эмиттер–база; *д* — использование двух диодов с переходами эмиттер–база и база–коллектор

4) перехода база–коллектор при короткозамкнутом переходе эмиттер–база (рис. 1.255, *г*);

5) замкнутых коллектора и эмиттера, в результате чего получается два диода (эмиттер–база и база–коллектор) (рис. 1.255, *д*).

1.17.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Полупроводниковые резисторы обычно формируют в базовом слое (рис. 1.256), иногда — в эмиттерном слое, но такие резисторы имеют бóльшие размеры и высокий температурный коэффициент сопротивления.

Некоторые сложности возникают при проектировании высокоомных резисторов. Поскольку резисторы выполняют в едином технологическом цикле с транзисторами, невозможно использовать концентрацию примеси,

отличную от концентрации примеси базовой области транзистора. В результате в высокоомном резисторе расстояние между контактами может быть достаточно большим. Для того чтобы его уменьшить, можно либо спроектировать резистор в форме меандра (рис. 1.257), либо использовать пинч-резистор

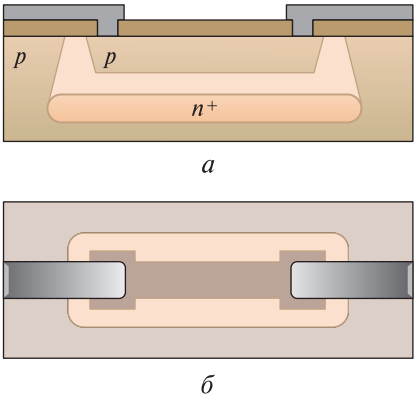


Рис. 1.256. Полупроводниковый резистор:
а — структура; *б* — топология

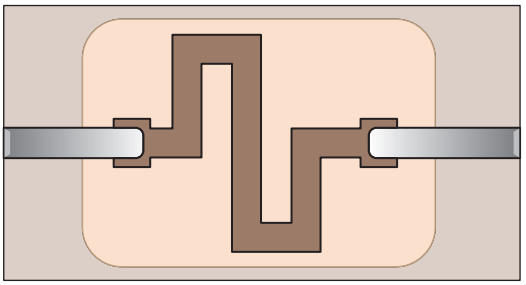


Рис. 1.257. Полупроводниковый резистор в форме меандра

(рис. 1.258). В нем параллельно с получением эмиттерных областей транзисторов формируют область, которая замыкается с коллектором.

В результате пинч-резистор имеет более высокое сопротивление, чем обычный полупроводниковый резистор тех же топологических размеров, поскольку электрический ток течет по более узкой области базы.

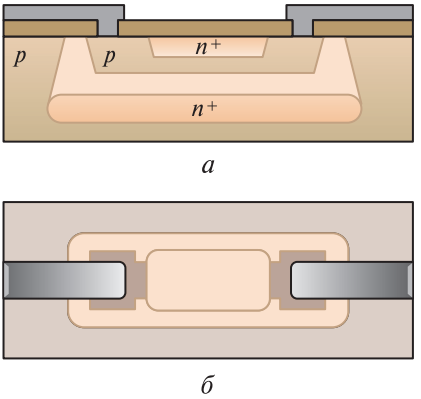


Рис. 1.258. Пинч-резистор:
а — структура; *б* — топология

1.17.4. КОНДЕНСАТОРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМАХ

Конденсатор в полупроводниковых микросхемах можно получить, используя паразитную емкость *p*–*n*-перехода (рис. 1.259). При этом значение емкости определяется диффузионной и барьерной составляющими. Однако данные конденсаторы имеют ряд существенных недостатков: большую площадь, малую добротность, зависимость от емкости приложенного напряжения, полярность — и в настоящее время не используются.

Наибольшее распространение получили МОП-конденсаторы (рис. 1.260). Роль верхней обкладки выполняет металлический проводник (алюминий или поликремний), роль нижней — высоколегированная область. Такие

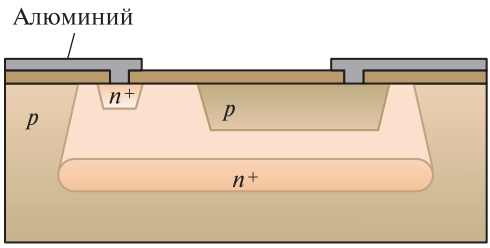


Рис. 1.259. Конденсатор на основе *p*–*n*-перехода

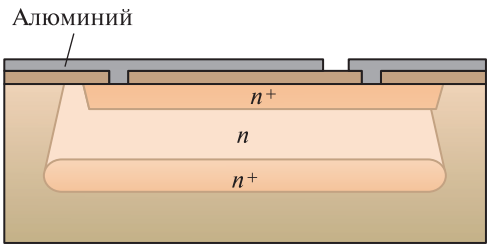


Рис. 1.260. МОП-конденсатор

конденсаторы гораздо проще в изготовлении, имеют лучшие характеристики и не являются полярными.

В настоящее время используются также щелевые конденсаторы (рис. 1.261).

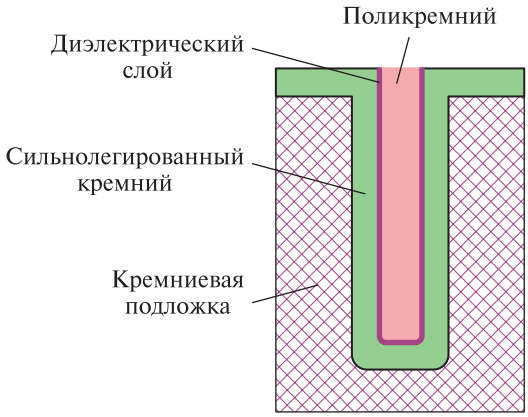


Рис. 1.261. Щелевой конденсатор

В них роль одной обкладки выполняет высоколегированный кремний, роль второй — поликремний, осажденный в вытравленную в кремнии область, покрытую слоем оксида. Щелевой конденсатор имеет меньшую площадь, чем МОП-конденсатор, но сложнее в изготовлении.

1.17.5. МОП-ТРАНЗИСТОР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Основой современной цифровой электроники являются микросхемы на базе полевых транзисторов. Из нескольких разновидностей полевых транзисторов в микросхемах используется одна — полевой транзистор *с изолированным затвором*. В этих транзисторах канал отделен от затвора тонким слоем диэлектрика (чаще всего SiO_2). Из-за используемых материалов данные элементы называют или МОП-транзисторами (металл–оксид–полупроводник), или МДП-транзисторами (металл–диэлектрик–полупроводник). В англоязычной литературе их соответственно обозначают MOSFET и MISFET.

В свою очередь, МОП-транзисторы подразделяют на два типа:

1) транзистор со встроенным (собственным) каналом (транзистор обедненного типа), в котором и до подачи напряжения на затвор имеется канал, соединяющий исток и сток;

2) транзистор с индуцированным каналом (транзистор обогащенного типа), в котором канал до подачи напряжения на затвор отсутствует.

В микросхемах наибольшее распространение получили МОП-транзисторы с индуцированным каналом (рис. 1.262).

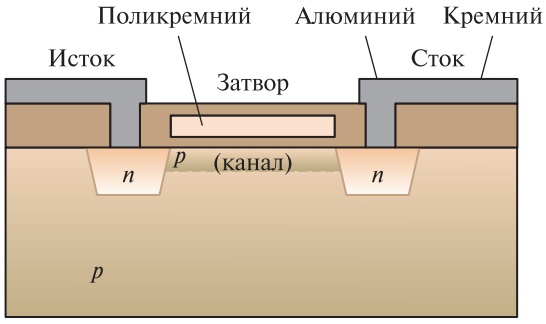


Рис. 1.262. МОП-транзистор с индуцированным каналом

В современных цифровых интегральных микросхемах используется структура, которая содержит одновременно *p*- и *n*-канальные полевые транзисторы. Она называется структурой на дополняющих транзисторах или *комплементарной* МОП-структурой (КМОП). Ее использование позволяет на два-три порядка, по сравнению со структурами биполярных транзисторов, снизить рассеиваемую мощность в статическом режиме, поскольку одномоментно работает только один транзистор, а энергия тратится лишь на переключение транзистора между открытым и закрытым состояниями.

Кроме того, структуры КМОП имеют меньшую занимаемую площадь, чем структуры на биполярных транзисторах. Еще одним достоинством таких структур является легкость масштабирования: при пропорциональном уменьшении всех размеров в 2 раза быстродействие увеличивается в 2 раза, напряжение питания уменьшается в 2 раза, а потребление энергии уменьшается в 8 раз. Структуры на биполярных транзисторах масштабировать гораздо сложнее.

Поскольку изоляция в КМОП-структуре изначально выполнялась обратно смещенным *p*–*n*-переходом, для увеличения пробивного напряжения транзисторы окружали защитными кольцами (рис. 1.263, *а*). Однако снижение рабочих напряжений в цифровых схемах привело к тому, что защитные кольца стали не нужны (рис. 1.263, *б*).

Последовательность изготовления КМОП-структуры следующая. В качестве заготовки используют подложку из кремния, легированного примесью *n*-типа. Поскольку необходимо сформировать два разных МОП-транзистора (*n*- и *p*-канальные), вначале формируют p^--карман, в котором будет размещаться *n*-канальный транзистор. Затем по контуру будущих транзисторов

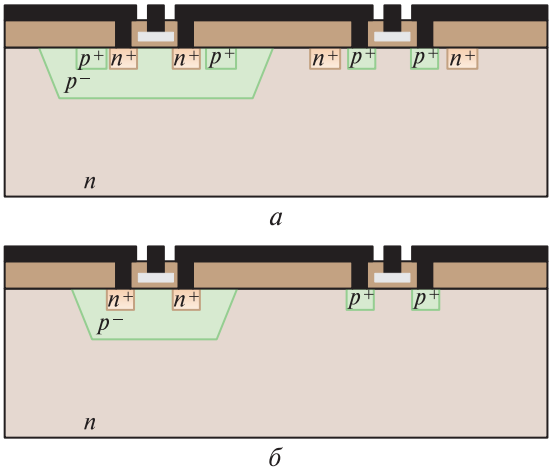


Рис. 1.263. КМОП-структура:
а — с защитными кольцами; *б* — без защитных колец

вытравливают диэлектрик, после чего окислением получают тонкий слой диэлектрика. Осаждают поликремний, который будет выполнять роль затвора. Далее последовательно проводят ионную имплантацию n^+ и p^+-примесей для формирования стока и истока соответственно в *n*- и *p*-канальном транзисторах. Одновременно легируют и поликремниевый затвор. Слой диэлектрика в открытых областях довольно тонкий, поэтому ионы примеси в нем не застревают. Проведя послеимплантационный отжиг, кремний подвергают окислению, а затем формируют металлизацию.

Серьезная проблема проектирования КМОП-схем заключается в том, чтобы избежать состояния, называемого *защелкиванием*. В этом состоянии в результате регенеративного срабатывания паразитных биполярных транзисторных структур, возникающих между источником питания и шиной земли схемы, образуется фиксированная низкоомная проводящая цепь. Особенно важно избегать защелкивания в КМОП-структурах с элементами малых геометрических размеров, предназначенными для создания СБИС с высокой плотностью упаковки.

Для решения этой проблемы стали использовать изоляцию *n*- и *p*-канальных транзисторов. Была разработана LOCOS-изоляция (рис. 1.264). По сравнению с общим защитным слоем она обеспечивает лучшую изоляцию и меньшую крутизну боковой стены. Кроме того, защитный слой оксида углубляется примерно наполовину относительно поверхности кремния, что делает ее более планарной. Однако у такой изоляции есть и ряд недостатков:

– неравномерность поверхности;
– наличие дефектов типа «птичий клюв».

Кроме того, LOCOS-изоляцию невозможно использовать для проектных норм менее 0,8 мкм.

Для проектных норм менее 0,8 мкм вместо LOCOS-изоляции используют STI-изоляцию (рис. 1.265). В этой технологии сначала вытравливают кремний

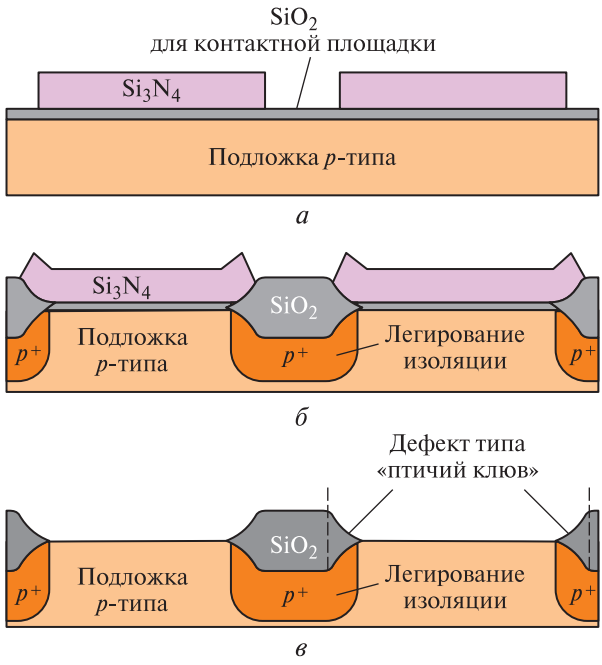


Рис. 1.264. Формирование LOCOS-изоляции:

а — оксидирование контактной площадки, осаждение нитрида кремния Si_3N_4 и формирование рисунка; *б* — LOCOS-оксидирование; *в* — удаление защитного слоя Si_3N_4 и SiO_2 с контактной площадки

в областях, где будет формироваться изоляция, затем проводят LPCVD SiO_2. После этого последовательно формируют *p*- и *n*-карманы, в которых в дальнейшем формируют *n*- и *p*-канальные транзисторы. Поликремниевые затворы сбоку защищают так называемым *спейсером* — это специальная область из Si_3N_4, выполняющая роль боковой изоляции.

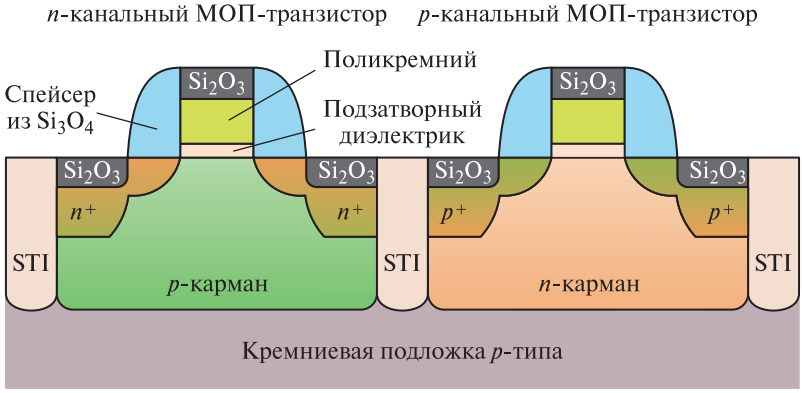


Рис. 1.265. КМОП-структура с STI-изоляцией

С уменьшением проектных норм увеличиваются токи утечки, что связано в том числе с квантовыми эффектами. При уменьшении, например, толщины подзатворного диэлектрика возникает туннелирование электронов. Для того чтобы снизить токи утечки вследствие туннелирования для проектной нормы 45 нм, пришлось в качестве подзатворного диэлектрика использовать оксинитрид кремния SiO_xN_y, применявшийся с проектной нормы 90 нм, вместо оксинитрида кремния-гафния HfSiON, имеющего более высокий коэффициент диэлектрической проницаемости (k = 20–40). Это позволило увеличить толщину диэлектрика в несколько раз и значительно снизить токи утечки. Однако пришлось заменить материал затвора — вместо поликремния начали использовать металлический затвор, причем для n- и p-канальных транзисторов он разный. Эти транзисторы получили название HKMG (High-K [dielectric and] Metal Gate — изолятор с высокой диэлектрической проницаемостью и металлическим затвором).

Другой причиной возникновения токов утечки является наличие обедненного слоя, который возникает, когда полем затвора в канале формируется обращенный слой (рис. 1.266). Подложка, даже если она заземлена, вытягивает часть носителей заряда в обедненный слой.

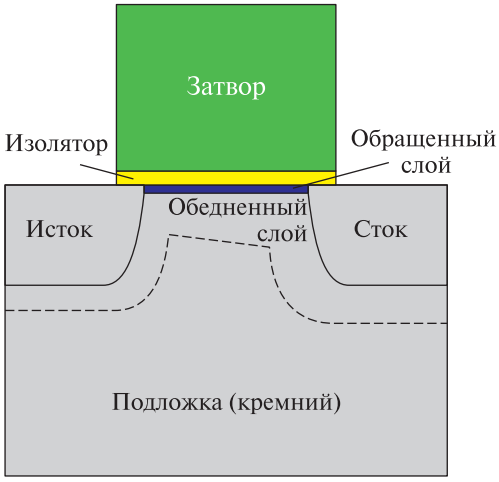


Рис. 1.266. Обедненный слой в КМОП-структуре

Для того чтобы избежать его образования и, соответственно, токов утечки, можно размещать транзисторы на непроводящем основании. Одной из первых таких структур была «кремний на сапфире» (КНС) — кремниевые транзисторы в виде островков размещали на подложке из сапфира (рис. 1.267).

Сапфир кристаллографически хорошо сопрягается с кремнием, внутренние механические напряжения малы. Изоляция в данном случае осуществляется не p–n-переходом, а диэлектриком, что устраняет токи утечки и повышает устойчивость к температурным и радиационным воздействиям.

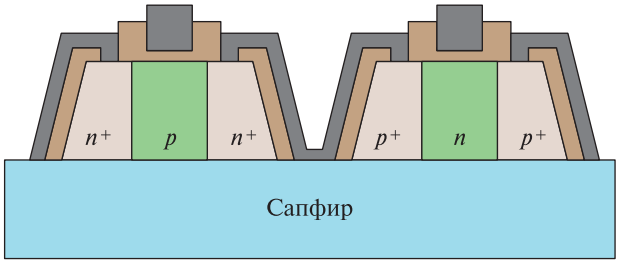


Рис. 1.267. Структура КНС-транзистора

Кроме того, отсутствуют паразитные емкости. Такие транзисторы использовались для создания радиационно-стойких микросхем. Однако данная технология сложна и очень дорогостояща.

Подобный принцип изоляции используется в технологии «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI). В ней имеется многослойная подложка, в которой транзисторы располагаются на слое SiO_2 (рис. 1.268). Так же как и в технологии КНС, подобная изоляция делает ее устойчивой к температурным и радиационным воздействиям, устраняет токи утечки и повышает быстродействие. При этом КНИ-транзисторы используются не только для создания радиационно-стойких микросхем, но и в бытовой технике. Несмотря на высокую стоимость подложек, технология FDSOI (рис. 1.269) с проектными нормами КНИ-транзисторов 28, 22, 20 нм активно рекламируется как платформа для микросхем «интернета вещей», поскольку потребление электроэнергии для них сокращается во много раз.

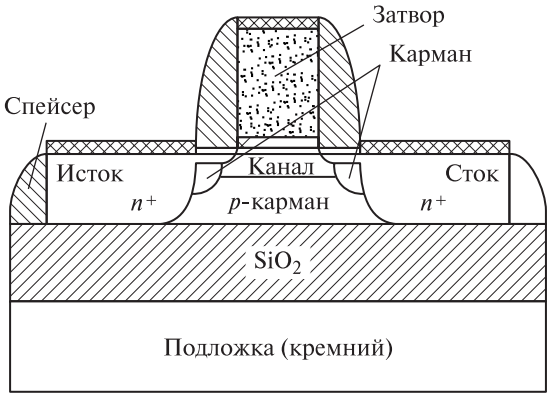


Рис. 1.268. Структура КНИ-транзистора

Уменьшать транзисторы до бесконечности невозможно, поскольку начинают проявляться короткоканальные эффекты, возникающие, когда на контролируемую затвором область канала начинают влиять линии электрического поля от истока и стока. В результате, если канал окажется слишком коротким, транзистор будет работать как резистор. Длина канала классического полевого транзистора не может быть менее 20...25 нм.

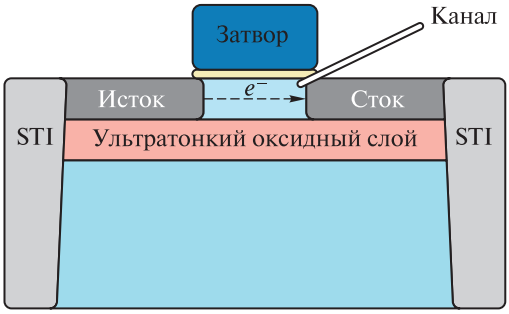


Рис. 1.269. Структура FDSOI-транзистора

Для того чтобы бороться с токами утечки и продолжать уменьшать размеры транзисторов, компания Intel при переходе на проектную норму 22 нм применила другой тип транзисторов — FinFET. В русскоязычной литературе этот тип транзисторов обычно называют англоязычным термином, хотя встречаются и названия «транзистор с каналом-плавником», «ребристый полевой транзистор».

В FinFET-транзисторах канал не плоский и находящийся прямо под поверхностью подложки, как у обычного планарного (плоского) МОП-транзистора, а образует вертикальный плавник (Fin), выступающий над поверхностью и с трех сторон окруженный затвором (рис. 1.270). Таким образом, все пространство между стоком и истоком контролируется затвором и статические утечки очень значительно уменьшаются.

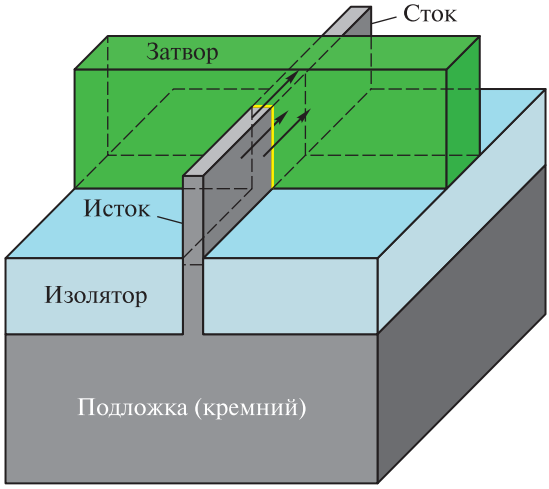


Рис. 1.270. Структура FinFET-транзистора

Вертикальность канала в FinFET-транзисторах, помимо всего прочего, позволяет экономить занимаемую транзистором площадь, потому что FinFET-транзистор с широким каналом довольно узок в проекции. У транзисторов

компании Intel, изготовленных по проектной норме 14 нм, ширина плавника составляет всего 8 нм при длине канала 42 нм.

При этом FinFET-транзисторы имеют и недостатки. Для того чтобы управлять большим током и быстрее включать и выключать транзистор, необходимо регулировать геометрию канала. В планарных транзисторах этого добиваются, изменяя ширину канала, однако в FinFET-транзисторах ввиду особенностей технологии изменять высоту плавника невозможно.

В настоящее время разработчики микросхем решают эту проблему, создавая отдельные транзисторы с несколькими плавниками (рис. 1.271), что позволяет увеличить ток, протекающий через транзистор, и уменьшить сопротивление канала в транзисторе. Кроме того, дополнительного улучшения характеристик транзисторов удалось достигнуть, изменив полупроводниковый материал канала транзистора. Подложка микросхемы, изготовленная из кремния, теперь выступает только в качестве конструкционного материала, на нем выращивается кристалл SiGe, носители заряда в котором обладают большей подвижностью.

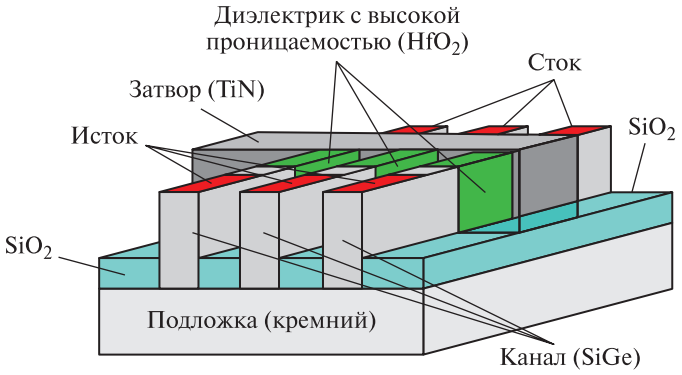


Рис. 1.271. Упрощенная конструкция трехзатворного FinFET-транзистора

Недостатком FinFET-транзистора является то, что прямоугольный кремниевый «плавник» окружает его затвор только с трех сторон, оставляя нижнюю сторону соединенной с корпусом транзистора. Это создает токи утечки, когда транзистор выключен. Многие исследователи полагали, что для получения полного контроля над областью канала затвор должен окружать его полностью. В результате к 2003 г. появились транзисторы GAAFET, в которых область канала превращена в узкую нанопроволоку, соединяющую исток и сток и окруженную затвором со всех сторон (рис. 1.272, *а*). Но узкий канал лишь минимизирует токи утечки, когда транзистор выключен. При этом остается недостаточно места для потока электронов при включенном транзисторе, что ограничивает максимальный ток и замедляет переключение транзистора.

В 2006 г. была продемонстрирована более совершенная технология, в которой для соединения истока и стока вместо нанопроволоки использовалась

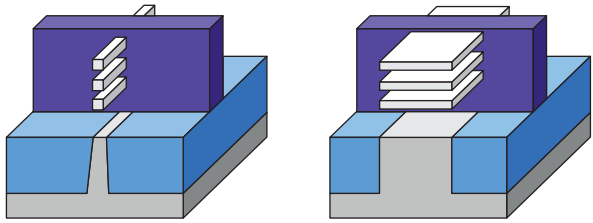


Рис. 1.272. Эволюция FinFET-транзисторов:
а — GAAFET (с нанопроволокой); *б* — MBCFET (нанолистовой)

стопка тонких листов кремния. Эти транзисторы получили название MBCFET (рис. 1.272, *б*). В итоге при небольших размерах транзистора увеличивается ширина канала, а токи утечки жестко контролируются. При этом нанолистовой дизайн восстанавливает гибкость формы транзистора, потерянную при переходе на FinFET: листы можно выполнить широкими, чтобы увеличить ток, или узкими, чтобы ограничить энергопотребление. В настоящее время многие компании применяют транзисторы данного типа.

1.17.6. СОВМЕЩЕННЫЕ МИКРОСХЕМЫ

В обычных полупроводниковых микросхемах пассивные компоненты выполняют на основе транзисторной структуры (рис. 1.273). Одна из проблем, возникающих при проектировании ИМС, — большая площадь, которую занимают пассивные компоненты. Решением может стать использование совмещенных микросхем. Основная идея заключается в том, что активные компоненты выполняют в приповерхностном слое методами планарной технологии. Пассивные компоненты реализуют с использованием тонкопленочной технологии (рис. 1.274).

Использование совмещенных микросхем усложняет изготовление устройств и увеличивает их стоимость, однако они обладают лучшими

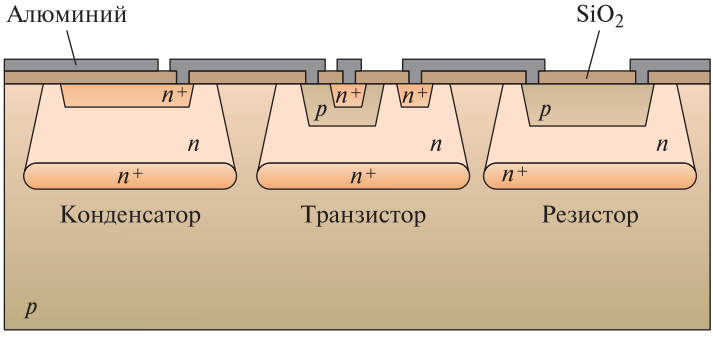


Рис. 1.723. Планарно-диффузионная микросхема

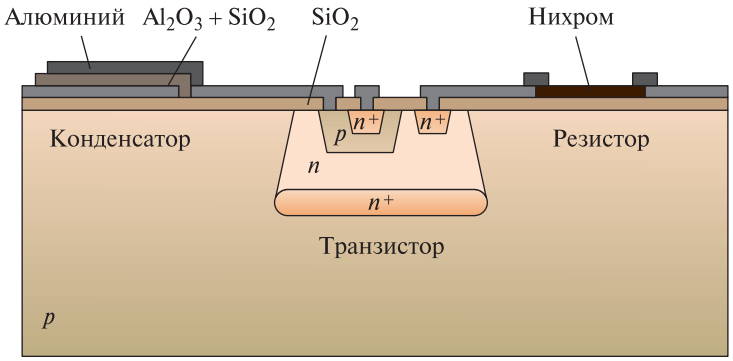


Рис. 1.274. Совмещенная микросхема

параметрами. Кроме того, пассивные элементы, выполненные по пленочной технологии, имеют больший диапазон номинальных параметров и более высокую температурную стабильность, чем выполненные по полупроводниковой технологии.

1.17.7. ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Межсоединения являются важной частью конструкции микросхем, обеспечивая электрический контакт между элементами. В качестве материала проводников в течение долгого времени использовался алюминий.

Межсоединения с *алюминиевыми проводниками* формируют в несколько этапов. Сначала в слое диэлектрической изоляции выполняют контактные окна. Далее на поверхность диэлектрика наносят сплошную алюминиевую пленку (либо напылением, либо осаждением, из паровой фазы — CVD). Затем в пленке с помощью фотолитографии формируют рисунок межсоединений. Травление алюминия чаще всего проводят плазмохимическим методом. В случае если нужно нанести еще один или несколько слоев металлизации, поверх первого слоя с использованием CVD осаждают диэлектрик, после чего цикл повторяют.

Увеличение сложности микросхем приводило к увеличению тепловыделения. Одной из причин было относительно высокое удельное сопротивление алюминия. Решением проблемы могла стать замена алюминиевых проводников на медные, поскольку медь имеет более низкое удельное сопротивление. Однако внедрение этого материала в производство микросхем растянулось на многие годы. Основная причина заключалась в том, что после осаждения меди при дальнейших процессах нагрева она диффундирует в нижележащие слои, особенно в кремний (это явление получило название «медное отравление»).

Задача внедрения *медных проводников* была решена компанией IBM в 1997 г. Вследствие химической стойкости меди ее нельзя протравить плазмой сквозь окна в фоторезисте, не удалив маскирующую часть резиста, как это делается для алюминия. Была разработана технология, получившая

название «двойной дамасский процесс» (dual damascene process) по причине сходства с известным со средних веков методом получения дамасской стали.

Последовательность изготовления медных проводников следующая. Сначала в изоляторе, осажденном на подложку или на предыдущий слой металлизации (рис. 1.275, *а*) протравливаются канавки для дорожек (рис. 1.275, *б*). Травление проводят в два этапа: сначала вытравливают окно для контактов с нижним слоем металлизации или подложки, затем — область для проводников. Всю поверхность выстилают барьерным материалом (чаще всего — нитридом титана TiN или вольфрамом), не допускающим диффузии, но пропускающим ток (рис. 1.275, *в*). Толщина этого слоя должна быть небольшой, так как его сопротивление меньше, чем даже у алюминия. Далее на всю поверхность осаждают толстый слой меди, переполняющий канавки (рис. 1.275, *г*), для чего используют одну из разновидностей метода CVD.

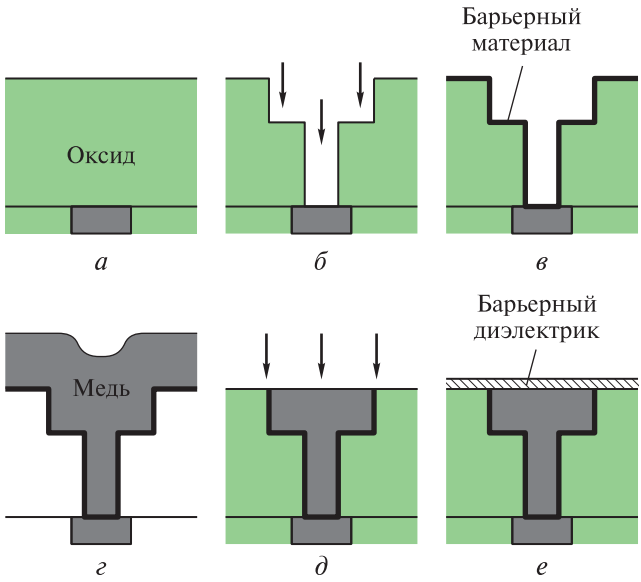


Рис. 1.275. Двойной дамасский процесс:
а — нанесение оксидной пленки; *б* — двухэтапное травление оксидной пленки; *в* — осаждение барьерного материала; *г* — осаждение меди; *д* — удаление излишков меди; *е* — осаждение барьерного диэлектрика

Для удаления излишков меди применяют химико-механическую планаризацию. Процесс останавливают после удаления барьерного материала на границе диэлектрика (рис. 1.275, *д*). Затем осаждают барьерный диэлектрик (рис. 1.275, *е*), чтобы исключить диффузию меди. Если необходим еще один слой металлизации, процесс повторяют.

В результате на кристалле остается очень плоский слой с внедренными медными дорожками, не выходящими по высоте за пределы окружающего

изолятора. Медные проводники оказываются замурованными в слой барьерного материала. В результате использования этой технологии исключен контакт меди с кремнием. В современных микросхемах контакт с подложкой обычно выполняют из вольфрама.

Тесты к лекции 1.17

1. ***В какой области биполярного транзистора обычно формируют полупроводниковый резистор?***

а) базовой;

б) коллекторной;

в) эмиттерной.

2. ***Какой тип транзистов используется при проектных нормах менее 14 нм?***

а) FinFET;

б) «кремний на сапфире»;

в) «кремний на изоляторе».

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. АНАЛИЗ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель лабораторной работы: приобретение навыков работы с микроскопом; приобретение навыков распознавания элементов топологии полупроводниковой интегральной микросхемы и восстановления принципиальной электрической схемы.

Задание по лабораторной работе

1. Пользуясь микроскопом, выполнить эскиз поверхности кристалла полупроводниковой интегральной схемы. Указать на нем, где на поверхности кристалла находятся транзисторы, диоды, резисторы.

2. Пользуясь эскизом, восстановить принципиальную электрическую схему устройства, реализованного на кристалле.

3. Оформить отчет. Он должен содержать эскиз топологии интегральной микросхемы, а также восстановленную схему.

Теоретическая часть

В настоящее время среди ИМС всех видов широкое распространение получили полупроводниковые ИМС, в наибольшей степени обладающие свойством технологичности и пригодные для организации массового производства.

Предлагаемая для изучения ИМС произведена по EPIC-технологическому процессу с диэлектрической изоляцией ее элементов друг от друга. Последовательность технологических операций представлена на рис. 2.1.

1. В качестве исходного материала используют пластину монокристаллического кремния с проводимостью *n*-типа (рис. 2.1, *а*), на поверхности пластины создают сильно легированный n^+-слой (рис. 2.1, *б*).

2. На поверхности пластины формируют слой диоксида кремния SiO_2 (рис. 2.1, *в*).

3. Слой SiO_2 стравливают со всех участков, лежащих вне выбранных изолированных областей (рис. 2.1, *г*).

4. В пластине вытравливают канавки, окружающие изолированные области (рис. 2.1, *д*).

5. Поверх кремниевой пластины, включая наружную поверхность канавок, вновь формируют слой SiO_2 (рис. 2.1, *е*).

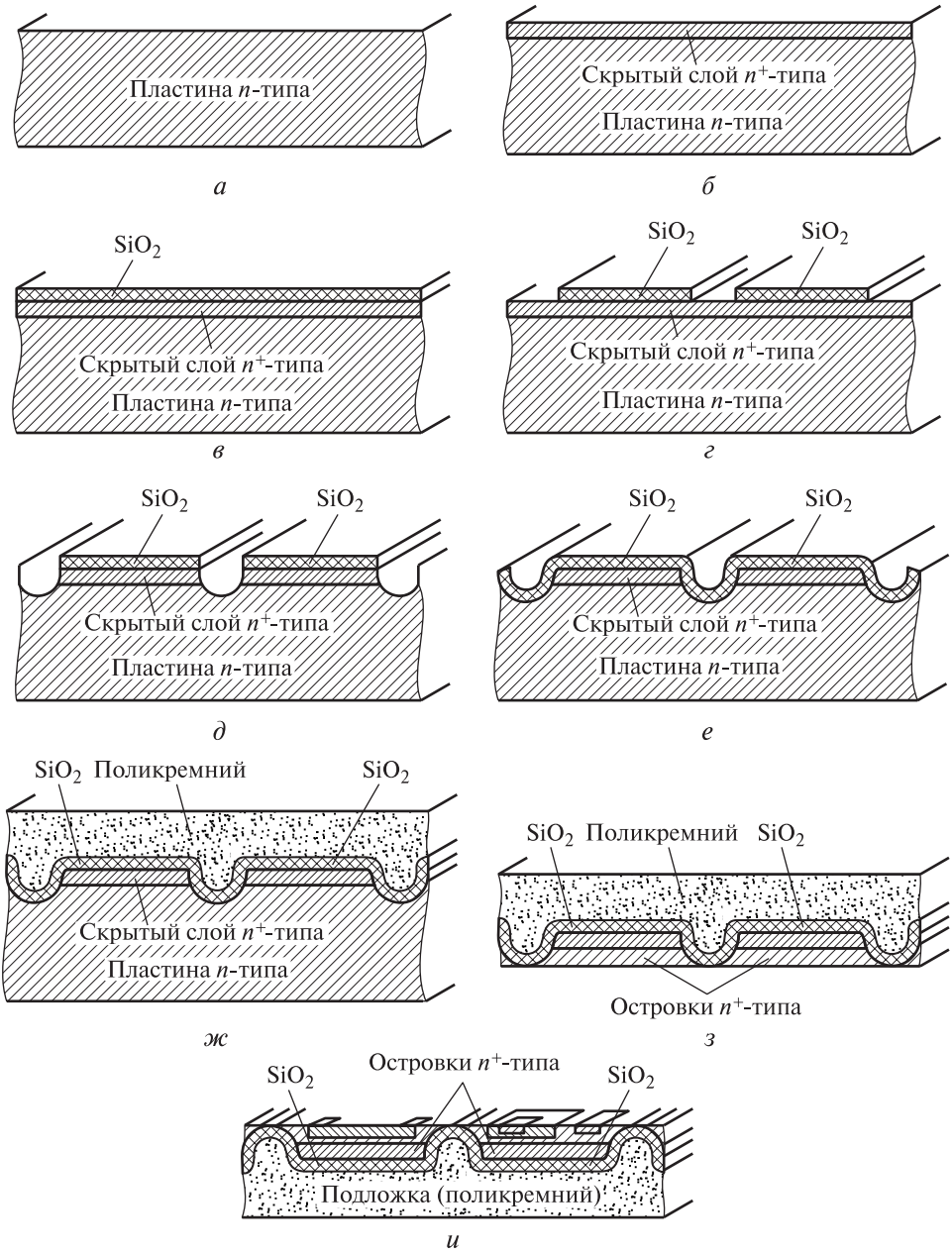


Рис. 2.1. Процесс производства интегральной микросхемы по технологии с диэлектрической изоляцией элементов

6. Поверх слоя SiO_2 формируют слой поликремния толщиной около 150 мкм, который также заполняет канавки. Этот слой обладает необходимой механической прочностью и стабильностью размеров (рис. 2.1, *ж*).

7. Монокристаллический кремний сошлифовывают и стравливают до появления слоя SiO_2. Таким образом удаляют излишний высокоомный материал подложки (рис. 2.1, *з*), в результате чего образуются разделенные слоем SiO_2 островки монокристаллического кремния, в которых в дальнейшем и будут сформированы элементы ИМС.

8. Пластину переворачивают и обрабатывают по обычной планарно-эпитаксиальной технологии, формируя элементы ИМС и межэлементные электрические связи (межсоединения) (рис. 2.1, *и*).

Экспериментальная часть

1. Полученный у преподавателя образец ИМС (в кассете) устанавливают на предметный столик микроскопа. Отрегулировав освещение и резкость, следует добиться четкого изображения межсоединений на поверхности кристалла ИМС.

2. Кассету с образцом ИМС устанавливают на подставку, обеспечивающую наклон плоскости кристалла к плоскости предметного столика микроскопа на угол 30°. В результате регулировки резкости должна контрастно просматриваться зона кристалла с элементами ИС. При перемещении тубуса микроскопа вверх-вниз соответственно перемещается и зона резкости по кристаллу, что позволяет четко различать отдельные области и элементы ИМС в целом.

3. Затем выполняют эскиз топологии кристалла. При этом необходимо определить места расположения металлических контактов в отдельных областях элементов ИМС. На эскизе межсоединений эти контакты можно обозначить точками, указав их назначение (Э, Б, К — для транзисторов; А, К — для диодов).

4. Составляют эскиз соединений между элементами кристалла, включая его периферийные контактные площадки. Проводники (независимо от их ширины) можно изображать простыми линиями. Основываясь на стандартной оцифровке внешних выводов корпуса ИМС, периферийные контактные площадки нумеруют.

5. Составляют эскизы топологии отдельных элементов ИМС (многоэмиттерного транзистора, транзисторов, диода и резисторов).

6. Следующий шаг — восстановление по топологии принципиальной электрической схемы. Затем ее можно сравнить с реальной схемой.

7. Используя принципиальную электрическую схему ИМС, наносят на эскиз топологии кристалла соответствующие обозначения элементов (*VT*1, *VT*2, *VD*1, ... , *R*1, *R*2 ...).

8. На кристалле необходимо найти знаки совмещения. Следует нарисовать их эскиз и указать их принадлежность к тому или иному топологическому слою (коллекторному, базовому и т. д.), определив тем самым последовательность их применения.

9. Оформляют отчет.

Содержание отчета

1. Эскиз топологии кристалла ИМС с указанием межсоединений и контактов, их назначения, а также элементов ИМС в соответствии с ее принципиальной электрической схемой.

2. Эскизы топологий отдельных элементов ИМС (многоэмиттерного транзистора, транзисторов, диода и резисторов) с обозначением областей каждого элемента.

3. Эскизы знаков совмещения с обозначением топологического слоя для каждого знака.

4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите топологические слои изученной ИМС в порядке их формирования.

2. Как осуществляется изоляция межсоединений от поверхности кристалла и элементов друг от друга в поверхностном слое кристалла?

3. Какими факторами ограничены минимальные размеры периферийных контактных площадок?

4. Для чего служат знаки совмещения и в какой последовательности их формируют и используют?

5. Как топологически преобразовать транзистор в диод?

6. С какой целью резисторам в отдельных случаях придают форму меандра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. АНАЛИЗ СОСТАВА И РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА

Цель лабораторной работы: ознакомление с порядком размещения в базовом матричном кристалле элементов различных типов, а также с особенностями структурно-технологического формирования транзисторов *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-типов в едином планарно-эпитаксиальном технологическом процессе с двумя скрытыми слоями.

Задание по лабораторной работе

1. Пользуясь микроскопом, выполнить эскиз одной четвертой площади поверхности кристалла полупроводниковой ИМС и указать на нем, где на этой поверхности находятся транзисторы, диоды и резисторы, распознав их по конфигурации, которую эти элементы имеют на поверхности кристалла.

2. Подсчитать, сколько на кристалле находится транзисторов, сколько из них *n*–*p*–*n*-, а сколько *p*–*n*–*p*-типа, сколько из них представляют собой мощные структуры. Найти на кристалле области, в которых расположены конденсаторы, и определить их число. Определить число контактных площадок кристалла.

3. Оформить отчет.

Теоретическая часть

Базовый матричный кристалл (БМК) содержит универсальный набор нескоммутированных элементов (транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов), изготовленных по одной из интегральных технологий в групповой кремниевой пластине. Путем выбора необходимых элементов и организации между ними электрических связей БМК может быть преобразован в конкретную специализированную ИМС достаточно высокой степени интеграции. Соединения между элементами, при необходимости, создают с помощью двух и более уровней металлизации.

Базовые матричные кристаллы появились в 1970-х гг. и позволили существенно сократить время проектирования и изготовления новых ИМС, а также стоимость их разработки, поскольку для каждой проектируемой микросхемы требовалось изготовить шаблоны только коммутационных слоев. Сокращение времени изготовления новой микросхемы достигалось и вследствие того, что для ее производства можно было воспользоваться кремниевыми пластинами с заранее сформированными в их объеме элементами, но без коммутационных слоев. Для того чтобы получить новую микросхему,

достаточно было сформировать коммутационные слои, а не проводить весь технологический процесс изготовления микросхемы с самого начала.

К недостаткам базовых матричных кристаллов следует отнести низкий процент использования заложенных в них элементов. В лучших специализированных микросхемах, разработанных на основе БМК, этот показатель не превышал 50–70 %.

Размер кристалла — 3,0×2,3 мм. Элементы БМК скомпонованы в матрицы, расположенные симметрично относительно осей кристалла. Транзисторные матрицы содержат транзисторы *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-типов и резисторы различных номиналов. Резисторы, имеющие малые номиналы (30...40 Ом), могут быть использованы для реализации пересечений при трассировке ортогональных проводников, что облегчает создание одноуровневой системы межсоединений.

Контакты к подложке *p*-типа (потенциал смещения) расположены на периферии кристалла, поэтому шина нулевого потенциала должна окружать кристалл полностью или частично. Это дает возможность избежать ее пересечения с трассами положительного потенциала питания.

На периферии кристалла между будущими контактными площадками размещены транзисторы повышенной мощности и МОП-конденсаторы (рис. 2.2), а также высокоомные резисторы, к точности номиналов сопротивления которых не предъявляется повышенных требований. Последние выполнены в виде пинч-резисторов (рис. 2.3).

Анализируемый БМК представляет собой тестовый кристалл, используемый для контроля электрических параметров избирательно легируемых областей, по результатам которого решают вопрос о необходимости коррекции технологических режимов процессов диффузии. Для этого в БМК сформирована шина нулевого потенциала, а у тестируемых транзисторов имеются выводы на периферийные контактные площадки.

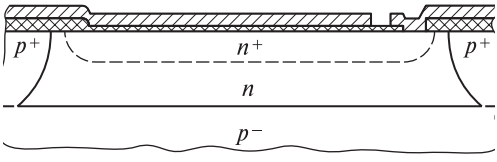


Рис. 2.2. Вертикальный профиль физической структуры МОП-конденсатора

Матрицы транзисторов включают в себя транзисторы с проводимостью как *n*–*p*–*n*-, так и *p*–*n*–*p*-типа (всего БМК содержит 128 транзисторов). В поле резисторов размещены диодные структуры (4 шт.). Необходимо помнить, что любой БМК-транзистор можно преобразовать в диод, задействовав один из его *p*–*n*-переходов и выполнив соответствующую коммутацию его областей.

Исследуемый БМК сформирован на основе планарно-эпитаксиальной технологии с двумя скрытыми слоями и так называемой встречной

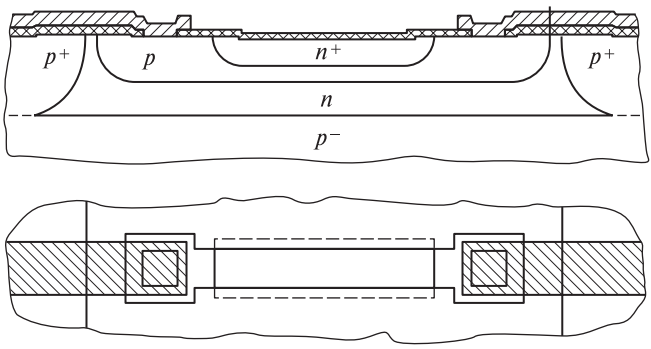


Рис. 2.3. Вертикальный профиль физической структуры пинч-резистора

разделительной диффузией для изоляции элементов друг от друга обратно смещенными *p*–*n*-переходами. Использование встречной разделительной диффузии позволяет повысить плотность упаковки элементов на кристалле благодаря сокращению расстояния от границ активных областей элементов до разделительных областей примерно в 2 раза. Последовательность формирования слоев транзисторных структур поясняет рис. 2.4, в котором цифрами в кружках указаны номера (1–6) этапов технологической обработки кремниевой пластины.

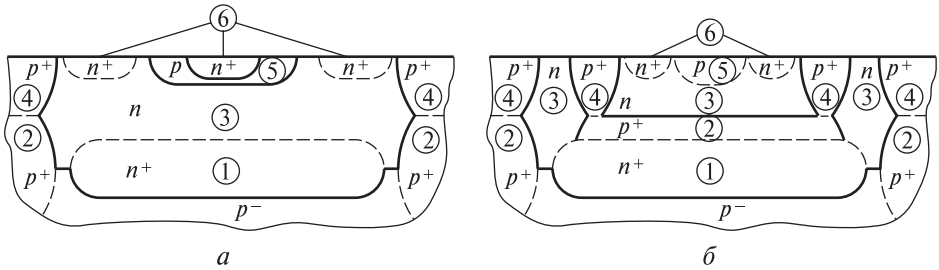


Рис. 2.4. Вертикальный профиль физической структуры:
а — *n*–*p*–*n*-транзисторов; *б* — *p*–*n*–*p*-транзисторов

Рассмотрим эти этапы подробнее.

1. Формирование скрытых n^+-областей с помощью процесса избирательной диффузии сурьмы. Выбор сурьмы в качестве легирующего элемента обусловлен малым значением коэффициента диффузии этой примеси в кремнии, что позволяет уберечь формируемый слой от размывания при последующих высокотемпературных процессах эпитаксиального наращивания и избирательной диффузии.

2. Одновременное формирование скрытых p^+-областей и нижней разделительной p^+-области с помощью процесса избирательной диффузии бора с концентрацией, меньшей, чем концентрация сурьмы на предыдущем этапе (во избежание перекомпенсации n^+-областей в формируемых вертикальных *p*–*n*–*p*-транзисторах).

3. Наращивание сплошного эпитаксиального *n*-слоя.

4. Формирование коллекторов вертикальных *p*–*n*–*p*-транзисторов и изолирующих карманов с помощью процесса избирательной диффузии бора. Смыкание верхней и нижней разделительных областей произойдет в результате последующих высокотемпературных процессов диффузии и окисления.

5. Одновременное формирование областей базы *n*–*p*–*n*-транзисторов и эмиттера *p*–*n*–*p*-транзисторов с помощью процесса избирательной диффузии бора.

6. Одновременное формирование n^+-областей эмиттеров и приконтактных областей коллекторов *n*–*p*–*n*-транзисторов, а также приконтактных областей баз *p*–*n*–*p*-транзисторов с помощью процесса избирательной диффузии фосфора.

7. Формирование контактных окон к областям элементов БМК (этапы 7–9 на рис. 2.4 не показаны) в поверхностном слое SiO_2, покрывающем всю поверхность кремниевой пластины, посредством последовательно выполняемых операций фотолитографии и травления оксида слоя (жидкостного или плазменного).

8. Напыление на поверхность пластины сплошного слоя алюминия и последующее выполнение операции фотолитографии по этому слою с целью создания проводящего рисунка межсоединений.

9. Формирование защитного слоя. В большинстве технологий в качестве материала защитного слоя используется двуокись кремния SiO_2.

Одновременно с транзисторами формируют все прочие типы элементов (диоды, резисторы, конденсаторы), поскольку их физическая структура подобна физической структуре транзисторов.

Экспериментальная часть

1. Полученный у преподавателя образец БМК (в кассете) устанавливают на подставку, обеспечивающую наклон плоскости поверхности кристалла к плоскости поверхности предметного столика микроскопа на угол 30°. Подставку с кассетой устанавливают на предметный столик микроскопа.

2. После регулировки резкости микроскопа положение осветителя регулируют так, чтобы контрастно просматривались границы, разделяющие области с различными уровнями легирования (эффект полного внутреннего отражения).

3. При перемещении тубуса микроскопа вверх-вниз зона резкости перемещается по поверхности кристалла, что позволяет последовательно просматривать всю его площадь, находящуюся в поле зрения объектива микроскопа. Поскольку БМК имеет две оси симметрии, достаточно изучить одну четвертую часть площади поверхности кристалла.

4. На поверхности кристалла определяют положение матриц транзисторов (нужно выделить в их составе *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-транзисторы), области резисторов, периферийных элементов (мощных транзисторов, МОП-конденсаторов, пинч-резисторов, областей под контактные площадки). Затем составляют схему размещения указанных элементов.

5. Создают эскиз топологий типовых элементов БМК, указанных в п. 4.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскиз схемы размещения на поверхности БМК матриц транзисторов, областей резисторов и периферийных элементов.
3. Эскизы вертикального профиля *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-транзисторов с нумерацией слоев в технологической последовательности их формирования.
4. Эскизы топологий типовых элементов БМК.
5. Необходимые пояснения к эскизам.
6. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается выигрыш при проектировании специализированных интегральных микросхем на основе БМК?
2. Какова технологическая последовательность формирования слоев в физической структуре БМК?
3. В чем выражается технологическая совместимость структур *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-транзисторов, а также структур резисторов и конденсаторов со структурами транзисторов?
4. По какому признаку можно различить на кристалле *n*–*p*–*n*- и *p*–*n*–*p*-транзисторы?
5. Почему контакты к областям мощных транзисторов БМК имеют гребенчатую структуру?
6. Какова физическая структура МОП-конденсатора?
7. Какова физическая структура пинч-резистора?
8. За счет чего достигаются большие номиналы сопротивлений в пинч-резисторах и какими причинами обусловлен большой разброс значений их сопротивления?
9. Внимательно рассмотрите физическую структуру элементов БМК. Объясните, почему поверхностный слой SiO_2 в них имеет различную толщину? Каким образом это обстоятельство проявляется на поверхности БМК?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КОМПЛЕКТА ФОТОШАБЛОНОВ

Цель лабораторной работы: ознакомление с системой служебных элементов, сформированных на промежуточном фотошаблоне генератором изображений, которые предназначены для обеспечения взаимной ориентации и совмещения топологических слоев при формировании структур полупроводниковой интегральной микросхемы.

Работа выполняется с комплектом промежуточных фотошаблонов на инструментальном микроскопе, обеспечивающем точность линейных измерений не хуже ± 5 мкм.

Задание по лабораторной работе

1. Для работы студент получает комплект промежуточных фотооригиналов. Пользуясь микроскопом, на каждом стекле (шаблоне) нужно найти зоны, в которых располагаются метки базирования и совмещения. Отчет должен содержать эскиз этих меток. Также необходимо определить их линейные размеры и рассчитать величину угла возможного поворота (рассовмещения) комплекта шаблонов. Внутри поля кристалла необходимо найти метки совмещения, определить их тональности и линейные размеры.
2. Оформить отчет.

Теоретическая часть

В выполняемой лабораторной работе объектом исследования является комплект промежуточных фотошаблонов, которые используются в качестве инструмента при формировании эпитаксиально-планарной структуры полупроводниковой ИМС.

Каждый промежуточный фотошаблон (ПФШ) содержит единичное изображение топологического слоя в увеличенном масштабе (обычно 10:1 или 5:1), которое формируется специализированной установкой, называемой *генератором изображений*.

В случае проекционного литографического процесса ПФШ непосредственно используют для экспонирования расположенного на нем рисунка на кремниевую пластину с помощью установки пошагового проекционного мультиплицирования, обычно называемой *степпером*.

При контактном литографическом процессе ПФШ необходим для получения группового шаблона, который изготовляют на установке, называемой *фотоповторителем*, и в дальнейшем используется в процессе контактной литографии при переносе с него изображения непосредственно на кремниевую пластину.

В случае производства ИМС малой и средней степени интеграции ПФШ может содержать не один, а группу идентичных модулей (два, четыре, шесть и т. д.). При проекционной литографии это позволяет сократить время обработки кремниевой пластины, поскольку одновременно производится экспонирование не одного, а группы идентичных модулей. Число модулей на ПФШ в этом случае ограничено допустимым размером рабочего поля (кадра) установки пошагового проекционного мультиплицирования.

В процессе и проекционной, и контактной литографии требуется совмещение рисунка шаблона с рисунком на кремниевой пластине непосредственно перед выполнением экспонирования. Так, рисунок эмиттерного слоя шаблона должен быть достаточно точно ориентирован относительно рисунка слоя базы, уже сформированного на кремниевой пластине в предыдущем цикле литографического процесса.

Задача совмещения ПФШ с рисунком кремниевой пластины состоит в уменьшении погрешностей Δx, Δy (в плоскости кремниевой пластины) и $\Delta\varphi_z$ (разворота изображений вокруг оси z). Ее решают для каждой пластины в составе партии в каждом цикле литографической обработки начиная со второго цикла, когда на пластине уже сформирован первый топологический слой.

Погрешность $\Delta\varphi_z$ сводится к минимуму в результате того, что оператор прецизионной литографии после первичной ориентации пластины стремится с помощью микроскопа совместить границы двух пар модулей, расположенных на краях пластины и фотошаблона (рис. 2.5). Существует, однако, погрешность $\Delta\varphi'_z$, которая возникает вследствие непараллельности границы модуля на ПФШ направлению движения стола фотоповторителя при мультиплицировании (рис. 2.6). Эта погрешность неустранима при совмещении, и поэтому ее сводят к минимуму при настройке оборудования, т. е. при юстировке положения ПФШ относительно координатного стола фотоповторителя до обработки партии кремниевых пластин. Для юстировки используют специальные знаки, которые формируются генератором изображений в единой системе с топологическим рисунком модуля ПФШ, но на достаточно большом расстоянии от модуля. При последующем мультиплицировании эти знаки оказываются вне рабочего поля объектива фотоповторителя. Используя перекрестие микроскопа, положение которого выверено по направлению движения стола, с помощью юстировочных знаков добиваются значений $\Delta\varphi_z$ в пределах $\pm 10''$ (рис. 2.7), что практически не отражается на качестве последующего совмещения фотошаблона и кремниевой пластины.

Погрешности Δx и Δy сводятся к минимуму вследствие того, что оператор с помощью микроскопа размещает знаки совмещения на фотошаблоне и на пластине один внутрь другого, добиваясь наличия одинакового зазора между знаками по всему контуру (рис. 2.8).

Существуют, однако, не устранимые оператором погрешност $\Delta x'$ и $\Delta y'$, которые возникают вследствие разброса значений шага t перемещения стола при мультиплицировании (рис. 2.9). Эту погрешность сводят к минимуму с помощью прецизионных систем позиционирования на установках мультиплицирования (фотоповторителях). В результате современные фотоповторители обеспечивают точность шага в пределах $\pm 0{,}25$ мкм.

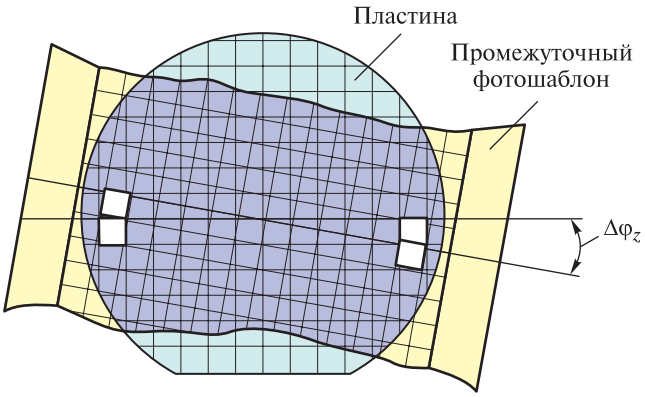


Рис. 2.5. Совмещение пластины и промежуточного фотошаблона по краевым модулям

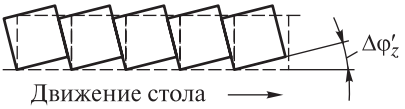


Рис. 2.6. Влияние непараллельности границы модуля на промежуточном фотошаблоне направлению движения стола фотоповторителя

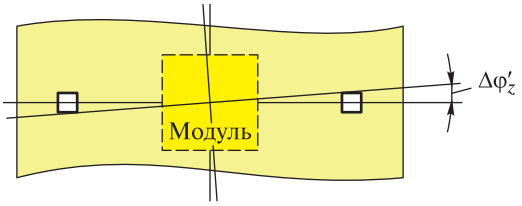


Рис. 2.7. Ориентация промежуточного фотошаблона по юстировочным модулям

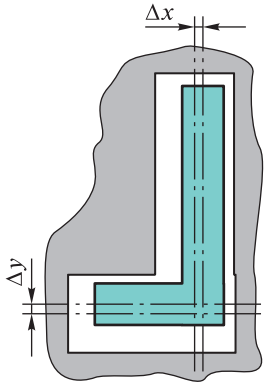


Рис. 2.8. Знаки совмещения на пластине (внутренний) и на шаблоне (внешний)

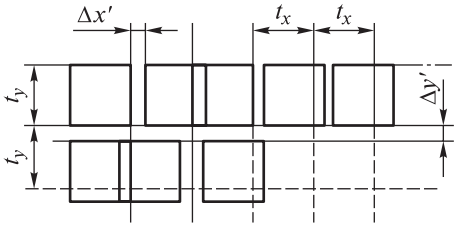


Рис. 2.9. Погрешности, возникающие вследствие разброса значений шага при перемещении стола фотоповторителя

Обычно каждый фотошаблон комплекта (за исключением первого и последнего) содержит два знака совмещения: рабочий (непосредственно используемый для совмещения в данном литографическом цикле) и подготовительный (который переносится на кремниевую пластину и затем используется для совмещения в следующем литографическом цикле).

Физический контур подготовительного знака, перенесенного с фотошаблона на пластину, может быть образован (в зависимости от конечной цели обработки) кромкой оксида, ступенькой оксида, кромкой металла или границами *p*- и *n*-областей. При этом обработка (диффузия, травление) может иметь место либо внутри знака, либо вне его, что зависит от прозрачности или непрозрачности знака на шаблоне, а также от типа нанесенного на пластину фоторезиста (позитивного или негативного).

Таким образом, при боковом подтравливании или боковой диффузии размеры знака на пластине изменяются в ту или другую сторону. Соответственно и зазор между знаками совмещения будет отличаться от того, который может быть вычислен по измерениям на шаблонах.

В ряде случаев тот или иной фотошаблон комплекта может содержать дополнительный (вспомогательный) знак совмещения (например, для предварительного грубого совмещения) или же вместо двух может применяться один знак для совмещения со старым, уже использованным знаком на пластине (когда не требуется высокой точности совмещения).

Экспериментальная часть

1. На любом ПФШ из комплекта необходимо найти котировочные знаки и выполнить их эскиз.

2. Между котировочными знаками измеряют расстояние (с точностью не хуже ±1 мм) и зазоры внутри знаков (с точностью не хуже ±5 мкм).

3. Вычисляют предельную погрешность юстировки ПФШ (в угловых секундах), пренебрегая шириной линий окулярного перекрестия.

4. В соответствии с последовательностью литографических операций находят и зарисовывают знаки совмещения (рабочие и подготовительные).

5. Учитывая конечную цель каждой литографической операции, устанавливают физический смысл контура знаков совмещения, перенесенных с шаблона на кремниевую пластину.

Результаты заносят в таблицу, образец которой представлен ниже:

Номер ПФШ	Наименование слоя	Эскиз рабочего знака	Эскиз подготовительного знака	Чем образован контур подготовительного знака?	Размеры знака на ПФШ (увеличение (+) или уменьшение (–))
1					
2					
...					

6. По указанию преподавателя определяют размеры знаков совмещения для двух смежных ПФШ и зазор между ними.

7. По указанию преподавателя составляют эскиз общей топологии элемента ИС (транзистора или резистора), отметив на эскизе номера шаблонов, формирующих тот или иной его топологический слой.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскизы котировочных знаков и знаков совмещения всех топологических слоев.
3. Таблица, составленная при выполнении п. 5 экспериментальной части.
4. Эскиз общей топологии элемента ИМС, заданного преподавателем.
5. Необходимые пояснения к эскизам.
6. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается принципиальное отличие фотошаблона, предназначенного для контактной печати на кремниевой пластине, от фотошаблона для проекционной печати?
2. Какие погрешности совмещения неустранимы на операции совмещения? Каково их происхождение?
3. Фотошаблон содержит два знака совмещения. Как и когда каждый из них используется?
4. Каковы причины и характер изменения размеров подготовительного знака, перенесенного на кремниевую пластину? Приведите примеры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ–ОКСИД–МЕТАЛЛ, ОБЛАДАЮЩИХ МЕМРИСТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ

Цель лабораторной работы: измерение характеристик многослойных структур металл–оксид–металл, обладающих мемристивным эффектом; проведение электрофизических измерений для оценки наличия эффекта памяти и переключения мемристоров из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким сопротивлением; исследование долговечности образцов при цикличном режиме работы; формулировка рекомендации по применению перспективных методов синтеза мемристорных структур.

Задание по лабораторной работе

1. Оценить характеристики структуры типа $Ag–Al_2O_3–TiO_2–Ag$ с точки зрения обладания мемристивным эффектом; измерить вольт-амперную характеристику (ВАХ) такой структуры; установить, при какой толщине слоев наблюдается мемристивный эффект (Al_2O_3 — около 10 нм, TiO_2 — около 50...60 нм). Следует иметь в виду, что при увеличении толщины функционального слоя мемристивный эффект постепенно исчезает и при толщине слоя TiO_2 более 300 нм мемристивный эффект такой структуры полностью отсутствует.

2. Исследовать ВАХ мемристорных структур, структуры на долговечность работы при цикличном переключении. Изучить элементы библиотеки базовых логических элементов на основе мемристорных структур.

Теоретическая часть

Уникальные свойства мемристора (рис. 2.10) заключаются в том, что сопротивление можно запрограммировать (функция резистора) и затем сохранить (функция памяти). В отличие от других запоминающих устройств современной электроники, мемристоры стабильны и запоминают свое состояние даже в том случае, если питание устройства отключено.

В настоящее время оперативная память большинства компьютеров обладает высокой скоростью передачи информации, но не сохраняет несохраненные данные при потере питания. В то же время флеш-накопители хранят информацию, когда не работают, однако их быстродействие мало. Мемристоры обеспечивают память, которая объединяет в себе и быстроту, и надежность.

Мемристоры требуют меньше энергии и работают быстрее, чем современные твердотельные накопители, кроме того, они могут хранить по

крайней мере в 2 раза больше данных в том же объеме. Помимо этого, мемристоры практически невосприимчивы к излучению, которое может нарушить работу схем, построенных на транзисторных структурах. Они позволяют включать и выключать компьютеры, подобно обычному выключателю света, без необходимости ожидания загрузки или сохранения данных.

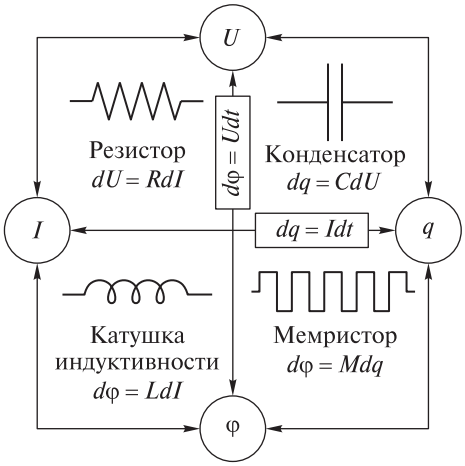


Рис. 2.10. Четыре базовых пассивных элемента электрических цепей (M — мемристивность)

Обратимый эффект изменения проводимости мемристора называют эффектом *резистивного переключения*. В качестве мемристоров и других структур с эффектом резистивного переключения чаще всего используют структуры металл–диэлектрик–металл (МДМ) (рис. 2.11). Эффект резистивного переключения МДМ-структуры заключается в изменении проводимости на несколько порядков под действием электрического поля, созданного в диэлектрике.

Существует несколько общепринятых механизмов резистивного переключения и, соответственно, типов мемристоров. Самым распространенным типом мемристоров является мемристор с резистивным эффектом, который обусловлен реакцией восстановления–окисления (reduction–oxidation) оксида, используемого в качестве диэлектрика МДМ-структуры мемристора. С одной стороны диэлектрического слоя находится легирующая примесь (положительные ионы) в области ширины w (рис. 2.12).

Свойства такого мемристора позволяет продемонстрировать простая модель. Полное сопротивление рассматриваемого устройства можно представить как сумму сопротивлений двух переменных резисторов, соединенных последовательно (см. рис. 2.12). Один из резисторов (легированная область) имеет низкое сопротивление R_{on}, другой — намного более высокое сопротивление R_{off}.

Когда к металлическим контактам прикладывают напряжение, в диэлектрическом слое происходит реакция восстановления–окисления, в результате которой заряженные ионы кислорода и, соответственно, вакансии кислорода начинают дрейфовать по глубине диэлектрического оксидного слоя.

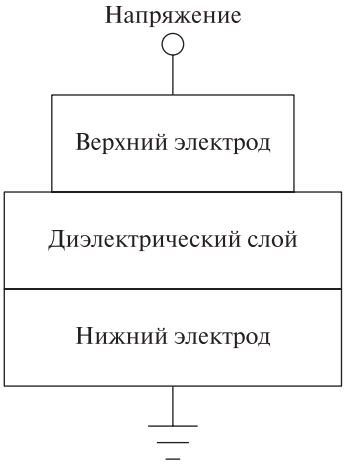


Рис. 2.11. Мемристорная структура металл–диэлектрик–металл

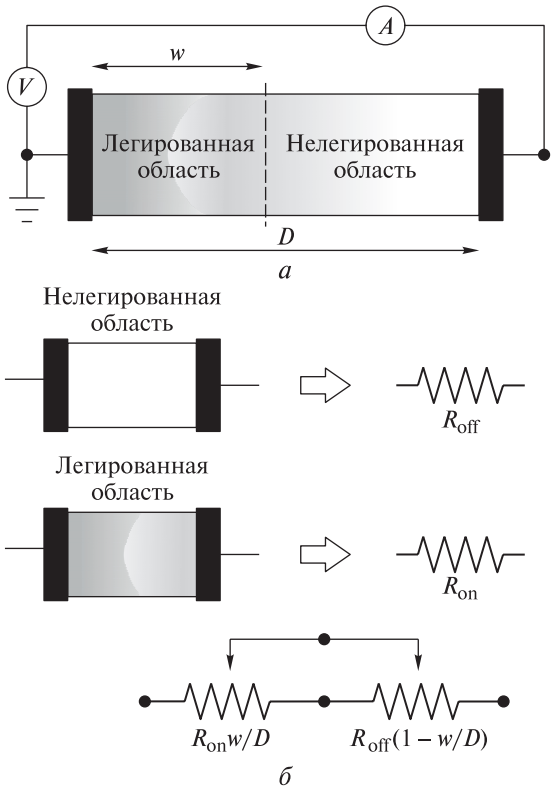


Рис. 2.12. Мемристор:
а — структура; *б* — эквивалентная цепь; *w* — размер легированной области; *D* — толщина оксидного слоя

Вакансии кислорода являются ловушками для электронов, по которым заряд переносится от одного металлического электрода к другому, что ведет к смещению границы между двумя областями. Таким образом, в зависимости от концентрации вакансий кислорода и их распределения в оксиде МДМ-структура может находиться в высокоомном (high resistance state, HRS) или низкоомном (low resistance state, LRS) состоянии.

В рассматриваемой модели зависимость между током и напряжением определяется выражением

$$u(t) = \left(R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \frac{w(t)}{D} \right) i(t). \quad (1)$$

При этом граница смещается по закону

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \left(\frac{R_{on}}{D} \right) i(t),$$

где μ_v — средняя подвижность ионов.

Интегрирование позволяет получить формулу для w:

$$w(t) = \mu_v \left(\frac{R_{on}}{D} \right) q(t). \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) в выражение (2) и учитывая, что $R_{on} < R_{off}$, получаем для мемристивности:

$$M(q) = R_{off} \left[1 - \mu_v \left(\frac{R_{on}}{D^2} \right) \right] q(t). \quad (3)$$

Во-первых, как и предполагалось в модели Л. Чуа, сопротивление мемристора является функцией заряда q, т. е. зависит от суммарного заряда, прошедшего через мемристор. Во-вторых, мемристивность резко увеличивается с уменьшением толщины оксидного слоя D. Для любого материала в наномасштабах значение слагаемого, содержащего D, на порядки выше, чем в микромасштабах.

Таким образом, мемристивность становится наиболее важной характеристикой для понимания процессов в электронных устройств рассматриваемого типа по мере того, как их размеры уменьшаются до нанометровых масштабов. Для достижения стабильного эффекта резистивного переключения необходимо уметь контролировать концентрацию вакансий кислорода в оксидном слое.

Если к мемристору приложено переменное синусоидальное напряжение определенной частоты, его ВАХ принимает вид, напоминающий фигуру Лиссажу с центром в начале координат (рис. 2.13). То есть мемристор, в отличие от резистора, обладает гистерезисом.

С увеличением частоты напряжения кривая гистерезиса вырождается в прямую линию (рис. 2.13, *а*). В реальных системах вследствие сильных электрических полей, присутствующих в наномасштабах, проявляются сильные нелинейные эффекты в транспорте ионов, и вид ВАХ изменяется. Если, например, умножить правую часть выражения (3) на оконную функцию $w(1 - w)/D^2$, позволяющую учесть эффекты нелинейности, то на ВАХ мемристора появляются достаточно резкие фронты, соответствующие переходу от состояния с низкой проводимостью к состоянию с высокой проводимостью и обратно (рис. 2.13, *б*).

Подобное поведение мемристора позволяет использовать его в качестве биполярного переключателя: при подаче напряжения противоположной полярности мемристор замыкает или размыкает проходящую через него цепь. Если рассматривать ситуацию с точки зрения цифровой электроники, можно сказать, что мемристор переходит из состояния 0 в состояние 1 и наоборот. Причем это состояние мемристор «запоминает» и может хранить практически неограниченно долго, — и для этого ему не требуется источник напряжения.

В настоящее время диэлектрические материалы, пригодные для создания многослойных структур, которые проявляют эффект мемристивного

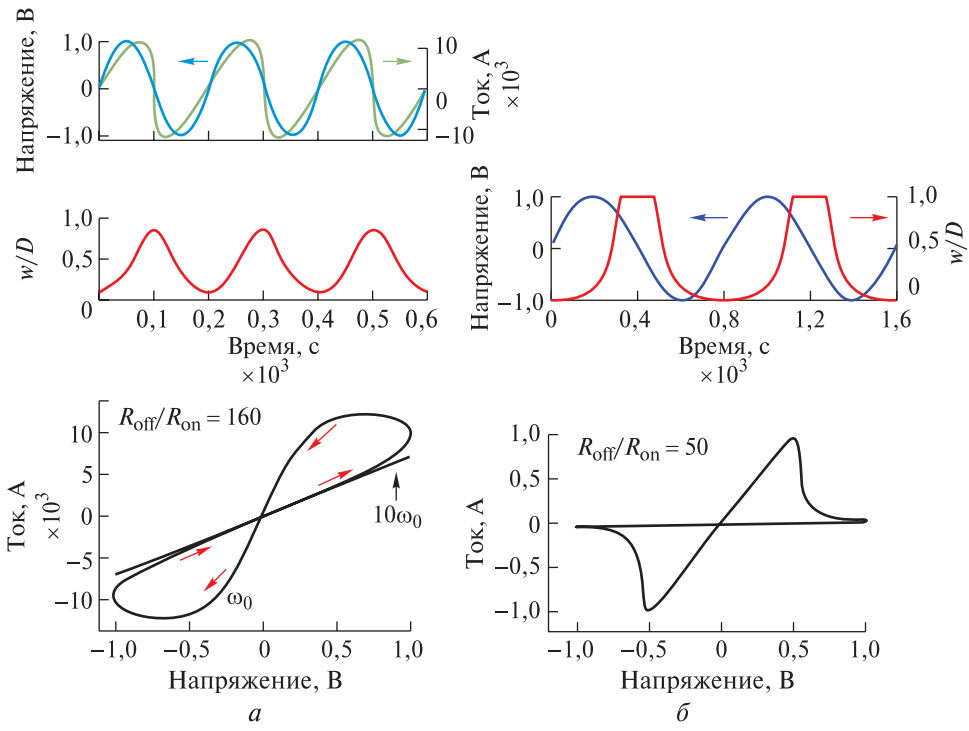


Рис. 2.13. Результаты моделирования поведения мемристора:
а — на основе модели, описываемой уравнением (3); *б* — при умножении правой части уравнения (3) на оконную функцию $w(1-w)/D^2$

переключения, достаточно разнообразны. В основном используются такие оксиды переходных материалов, как TiO_2, HfO_2, ZrO_2, а также сложные соединения: $Ti_aZr_bHf_cO_2(Ti_dZr_eHf_f)_nO_{2n-1}$, VO_2–V_nO_{2n-1}, $VaNb_bTa_cO_2$–$(V_dNb_eTa_f)_nO_{2n-1}$, $Nb_2O_5NbO_2$ и др., легко интегрируемые в кремниевую технологию. Одним из подходов для улучшения функциональных свойств мемристоров на основе оксидов переходных металлов (TiO_2, HfO_2, ZrO_2) является легирование оксидов трехвалентной примесью, например, алюминием.

В лабораторной работе используется структура, которая переключается при напряжении не более 1,6 В, при этом максимальный ток, протекающий через структуру, составляет 0,8 мкА, время переключения из состояния R_{on} в R_{off} и обратно — 10 нс.

Разработанный для анализа ВАХ мемристивных структур стенд позволил исследовать структуры на долговечность работы при цикличном переключении. Установлено, что данная мемристивная структура выдерживает до 10^6 переключений без существенного изменения вида ВАХ (значение площади петли гистерезиса колеблется в пределах 10 %). Затем площадь петли гистерезиса начинает постепенно уменьшаться таким образом, что к моменту достижения числа переключений 10^9 эта площадь уменьшается более чем на 80 %, что свидетельствует о постепенной деградации мемристивной структуры.

На основе проведенных исследований были предложены методы повышения надежности и долговечности работы мемристивных структур, один из которых защищен патентом. Проведены сравнительные исследования различных мемристивных структур, результаты представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики некоторых типов мемристоров

Тип мемристора	Отношение сопротивления R_{on}/R_{off}	Время переключения, нс	Максимальное число циклов переключения
На основе оксидов металлов	2000	10	10^9
Полимерные	100	25	10^8
Сегнетоэлектрические	300	10	10^{14}
Спинтронные	5	10	10^{16}
Халькогенидные	>1000	50	10^8

Как следует из данных табл. 2.1, по соотношению R_{on}/R_{off} наиболее высокие показатели имеют мемристоры на основе оксидов металлов, что делает их весьма привлекательными для создания устройств памяти, имеющих не два состояния: 0 и 1, а несколько. То есть теортически одна мемристорная ячейка памяти может хранить в несколько раз больше информации на той же площади, чем и современные ячейки памяти, реализованные на транзиторных структурах. Мемристоры на основе оксидов металлов имеют наименьшее время переключения из состояния высокого сопротивления в состояние низкого сопротивления. Однако такие мемристоры выдерживают не более 109 циклов переключения, а этого недостаточно. В связи с этим необходимо проводить исследования по подбору материалов и архитектуры таких мемристоров.

Характеристики полимерных мемристоров не самые лучшие, что требует большого объема исследований.

Сегнетоэлектрические мемристоры показывают хорошие характеристики и являются перспективными кандидатами для создания ячеек памяти.

Спинтронные мемристоры в настоящее время обладают одними из лучших характеристик и также пригодны для создания ячеек памяти.

Халькогенидные мемристоры обладают не очень высоким быстродействием, тем не менее они также могут быть использованы для создания ячеек памяти, не требующих высокого быстродействия.

Поскольку мемристоры на основе оксидов обладают рядом наиболее высоких показателей, а технология их изготовления довольно детально отработана, проанализируем материалы для их изготовления.

В зависимости от материала свойства мемристоров могут различаться. К основным свойствам мемристоров относят рабочие токи и напряжения, размеры устройств, термостабильность, уровень шума, свойство изменения

фазы и др. Свойства мемристоров определяют области их применения (табл. 2.2).

Как следует из данных табл. 2.2, наиболее энергоэффективными являются мемристоры на основе SiO_2, NiO и Fe_2O_3. Из них мемристоры на основе Fe_2O_3 больше пригодны для изготовления аналоговых устройств вследствие довольно плавного изменения сопротивления. Мемристоры на основе NiO и TiO_2 больше подходят для цифровых устройств.

Таблица 2.2

Рабочие параметры некоторых мемристоров на основе оксидов

Тип резистивного слоя	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, мА	Мощность, мкВт	Особенности
Диоксид титана TiO_2	2,0	0,2	400,0	Высокое быстродействие, низкий уровень шума $R_{on}/R_{off} \approx 2000$
Диоксид кремния SiO_2	2,0	0,00025	0,5	$R_{on}/R_{off} \approx 10^5$
Оксид железа Fe_2O_3	1,8	10	18,0	Плавное изменение сопротивления. Больше подходит для аналоговых устройств
Оксид никеля NiO	1,5	5	7,5	Больше подходит для цифровых устройств из-за особенностей переключения
Оксид ванадия VO_2	50,0	6	300,0	$R_{on}/R_{off} \approx 10^4$ Подходит для устройств с многоуровневой логикой
Оксид графита (графена) CO	6,0	100	600,0	Высокая термостабильность

В результате исследований отработаны модели неорганических мемристорных структур с учетом минимизации времени переключения из одного состояния в другое, уменьшения деградации, повышения стабильности работы и надежности мемристорной структуры. Это позволило перейти к созданию библиотеки базовых логических элементов на основе мемристивных структур.

Экспериментальная часть

Снятие ВАХ мемристора — сложный и трудоемкий процесс. Для его автоматизации предложена конструкция аппаратно-программного комплекса, который можно использовать для экспериментального исследования мемристорных структур (рис. 2.14).

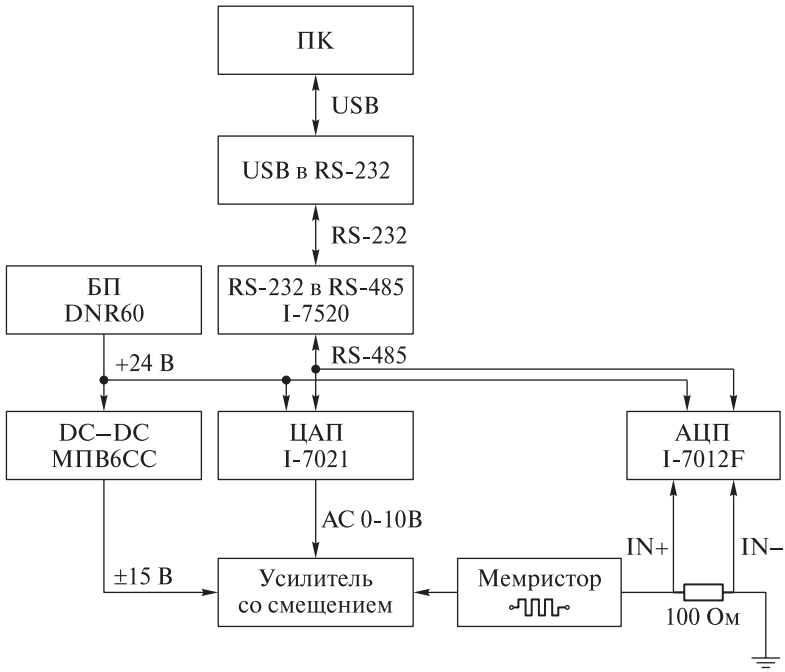


Рис. 2.14. Функциональная схема измерительного комплекса

В состав комплекса входят: персональный компьютер ПК, интерфейсный кабель USB — RS-232, блок питания БП, конвертер интерфейса RS-232 в RS485, цифроаналоговый преобразователь ЦАП, аналого-цифровой преобразователь АЦП, DC–DC-преобразователь, усилитель со смещением, резистор, мемристор.

На персональном компьютере с использованием разработанного программного обеспечения задают необходимые параметры. К одному из COM-портов ПК подключают интерфейсный кабель, который преобразует интерфейс USB в RS-232. Далее установлен преобразователь интерфейса RS-232 в RS-485 для общения модулей АЦП и ЦАП. Блок питания обеспечивает работу ЦАП и АЦП, а также подает напряжение на DC–DC преобразователь, который выдает биполярное питание ±15 В. Цифроаналоговый преобразователь задает сигнал (форму сигнала выбирает пользователь) с амплитудой 0...10 В. Биполярное питание с DC–DC преобразователя и сигнал с ЦАП попадает на усилитель со смещением, который опускает сигнал в биполярную область. Выходной сигнал попадает непосредственно на мемристор. Аналого-цифровой преобразователь преобразует полученную ВАХ мемристора в цифровой сигнал, который через преобразователи интерфейсов попадает на ПК.

Для подключения блоков ЦАП и АЦП необходим интерфейсный кабель с преобразованием интерфейса USB в RS-232. Исходя из необходимых характеристик, был выбран наиболее подходящий по соотношению цены и качества кабель Orient USB 2.0 — COM(RS-232).

Благодаря микросхеме WCH CH340, использованной в данном кабеле-переходнике, происходит синхронизация между двумя соединенными с помощью этого аксессуара устройствами. Переходник не нуждается в дополнительном источнике питания, так как контроллер получает энергию от USB-порта. Провода кабеля защищены от повреждений и внешних воздействий прозрачной полимерной изоляцией, предотвращающей их перегибы, истирание, контакт с влагой.

Для дальнейшего подключения ПК необходим преобразователь интерфейсов RS-232 и RS-485. Выбран конвертер интерфейсов компании ICP DAC (модель I-7520).

Большинство промышленных компьютерных систем имеют стандартные последовательные порты RS-232. Несмотря на широкое распространение, RS-232 имеет ограниченные скорость передачи, диапазон и сетевые возможности. Стандарт RS-485 позволяет преодолевать эти ограничения благодаря использованию линий дифференциального напряжения для сигналов данных и управления.

Конвертер преобразует сигналы RS-232 в изолированный сигнал RS-485 без необходимости изменения какого-либо оборудования или программного обеспечения.

Для преобразования цифрового сигнала с ПК в аналоговый сигнал для подачи на мемристор необходим ЦАП. Для этих целей выбран ЦАП компании ICP DAC (модель I-7021).

Модуль I-7021 — это одноканальный модуль аналогового вывода с 12-битных ЦАП с возможностью обратного считывания данных. Отличительными особенностями данного модуля являются:

– аналоговые выходы с гальванической развязкой 3000 В постоянного тока;

– программируемое значение питания для аналогового выхода;

– программируемая скорость изменения выходного сигнала;

– программная калибровка.

Для обратного преобразования аналогового сигнала в цифровой необходим АЦП. В качестве АЦП выбран модуль компании ICP DAC (модель I-7012F).

I-7012F — одноканальный модуль аналогового ввода с функцией оповещения высокого и низкого уровня. Эти модули могут дистанционно управляться набором команд. Общие черты модулей аналогового ввода представлены следующим образом:

– изолированный аналоговый вход;

– 24-битный сигма-дельта АЦП для обеспечения превосходной точности;

– программная калибровка.

Для обеспечения работоспособности ЦАП и АЦП, а также подачи напряжения для снятия ВАХ мемристора необходим блок питания. Выбран блок питания компании XPPower DNR60. Блоки питания данной компании давно зарекомендовали себя на рынке за счет надежности и соотношения цены и качества.

Для задания биполярного питания необходим DC–DC-преобразователь с выходом ±15 В. Выбран отечественный преобразователь компании ИРБИС (модель МПВ6СС). Данный модуль предназначен для питания напряжением постоянного тока радиоэлектронной аппаратуры. Модуль имеет защиту от перегрузки по току и короткого замыкания по выходу. После снятия перегрузки или короткого замыкания модуль автоматически восстанавливает выходные параметры. Время короткого замыкания не ограничено. Имеется возможность дистанционного выключения внешним сигналом. Конструктивно модуль выполнен в металлическом корпусе, залитом компаундом.

Для снятия ВАХ мемристора необходим биполярный сигнал. Полученный с DC–DC преобразователя биполярный сигнал имеет нижнюю точку амплитуды 0 В. Для снятия показания необходимо сместить сигнал в отрицательную область по напряжению. Для этого спроектирован и изготовлен модуль усилителя тока со смещением (рис. 2.15).

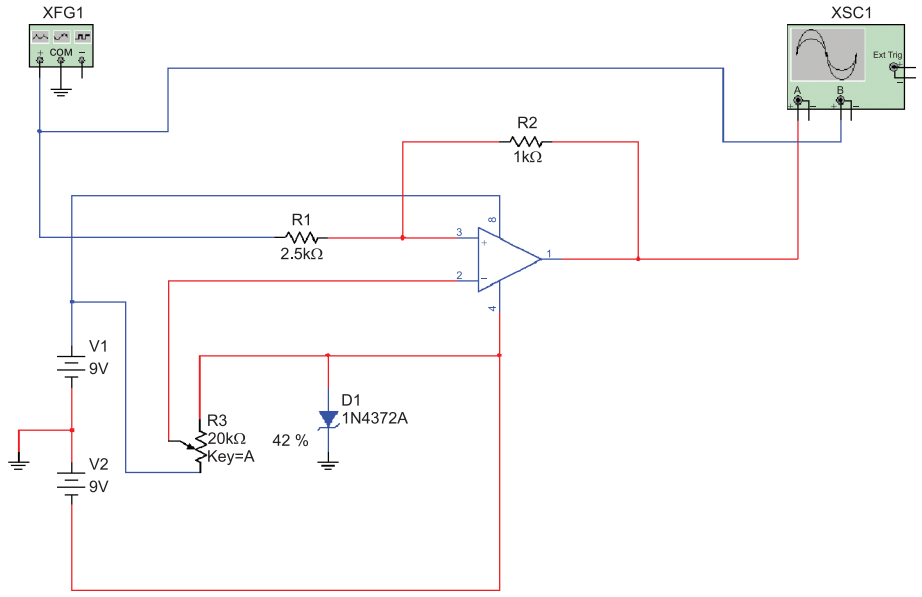


Рис. 2.15. Скриншот принципиальной схемы усилителя со смещением

В качестве усилителя используется операционный усилитель L272M, реализующий выходной ток 700 мА на каждом канале и имеющий максимальное входное напряжение ±14 В. Для задания смещения сигнала по напряжению используется еще один операционный усилитель.

Для снятия ВАХ мемристора собран макет измерительного стенда на основе выбранных компонентов. В качестве биполярного DC–DC преобразователя используется система из двух лабораторных однополярных источников питания. Собранный макет стенда показан на рис. 2.16.

Для подключения собранного стенда к контактным площадкам использовалась зондовая станция Signatone S-1160 (рис. 2.17), для наилучшего

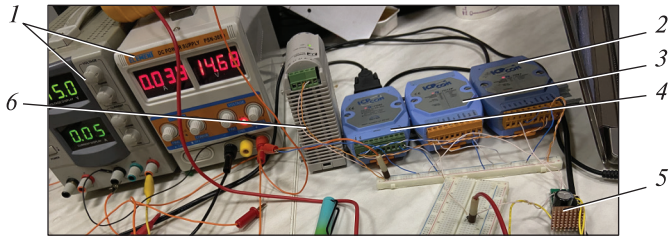


Рис. 2.16. Измерительный стенд:
1 — лабораторный однополярный блок питания; *2* — АЦП; *3* — ЦАП; *4* — преобразователь RS-232 в RS-485; *5* — усилитель со смещением; *6* — блок питания

отображения иглы и контактных площадок мемристора выбрано двукратное увеличение.

Функция вакуумного прижатия пластин к рабочему столу зондовой станции облегчает работу с расположенными под микроскопом объектами (рис. 2.18).

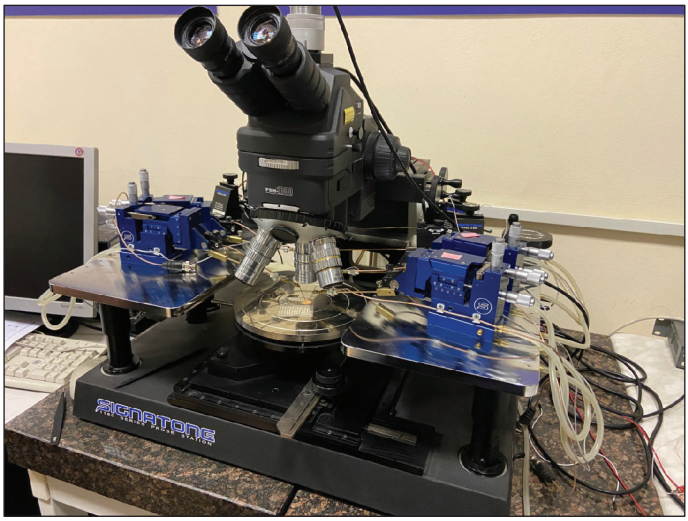


Рис. 2.17. Зондовая станция Signatone S-1160

Зондовая станция Signatone S-1160 имеет игольчатые зонды с возможностью ручной подачи зонда. Эта функция упрощает процесс подачи зондов к контактным площадкам мемристора. Точная регулировка расстояния зонда по осям сводит к минимуму возможность нарушения целостности контактной площадки (рис. 2.19).

Собранный макет измерительного стенда для снятия ВАХ мемристоров выполняет функции, заложенные в нем для получения поставленных задач.

Порядок проведения эксперимента с использованием автоматизированного стенда следующий.

Для снятия временнóй диаграммы и построения ВАХ мемристора необходимо проводить измерения через равные промежутки времени. Это ограничение не позволяет выполнять снятие показаний в ручном режиме. Решить проблему поможет стенд автоматизированного снятия ВАХ. Этапы работы (рис. 2.20):



Рис. 2.18. Расположение пластины с мемристорами на рабочем столе зондовой станции Signatone S-1160

1) открытие программы в среде LabView;

2) проверка коммутации всех кабелей внутри стенда и с зондовой станцией;

3) подключение блока питания DRN60 к измерительным блокам I-7021 и I-7012F, а также к блоку управления I-7520;

4) подключение стенда к компьютеру;

5) определение номера COM-порта в разделе «Порты (COM и LPT)» диспетчера устройств;

6) настройка подаваемого сигнала: задание частоты (рекомендуемая частота 0,001 Гц), амплитуды сигнала (рекомендуемое значение 2...8 В), постоянного сигнала (необходимо выставить значение 5 В), числа пародов (рекомендуется 1–3). Выбор вида сигнала ползунком. Ввод номера COM-порта, полученного на предыдущем этапе, и имени файла, в котором будут сохранены результаты измерений (например, «C:\Users\Kirill\Desktop\Test.txt»);

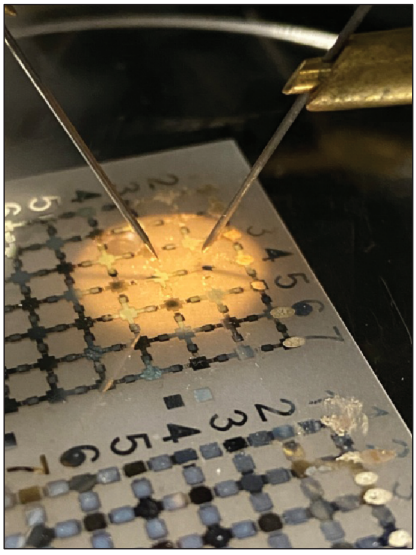


Рис. 2.19. Подача зондов к контактным площадкам мемристора

7) старт программы в верхней докпанели;

8) нажатие кнопки «Начать измерение»;

9) подключение DC–DC преобразователя к блоку питания;

10) подтверждение подключения блока DC–DC нажатием кнопки «Включил усилитель», контроль производимого измерения в окнах «Измерение» и «Номер отсчета». В случае явной ошибки в измерениях существует возможность экстренной остановки измерений нажатием кнопки «Остановить измерения»;

11) появление графиков с данными, полученными в ходе эксперимента, в окнах «ВАХ» и «Измеренный сигнал»;

12) отключение блока DC–DC-преобразователя от блока питания, измерительных блоков от блока питания, стенда от компьютера. Отключение блока питания от сети;

13) составление отчета.



Рис. 2.20. Алгоритм измерения характеристик мемристора с использованием автоматизированного стенда

В случае необходимости повторного измерения следует выполнять действия, описанные в п. 6–11 за исключением п. 7. На рис. 2.21 представлен результат измерения.

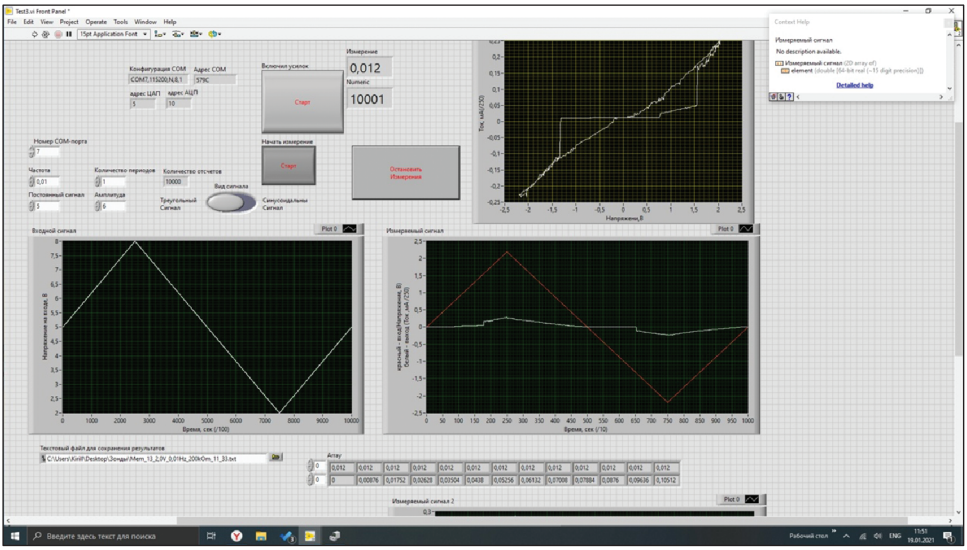


Рис. 2.21. Результаты работы программы комплекса

Следует отметить, что полученные графики представляют предварительные данные и подходят только для оценки корректности измерений. Для получения более точных данных требуется дополнительная обработка содержимого файла измерений в сторонних программах.

После получения результатов измерений была выполнена их последующая обработка в программе Excel, а именно пересчет снятого значения падения напряжения в значение тока, протекающего через образец мемристора. Результаты обработки представлены на рис. 2.22 и 2.23.

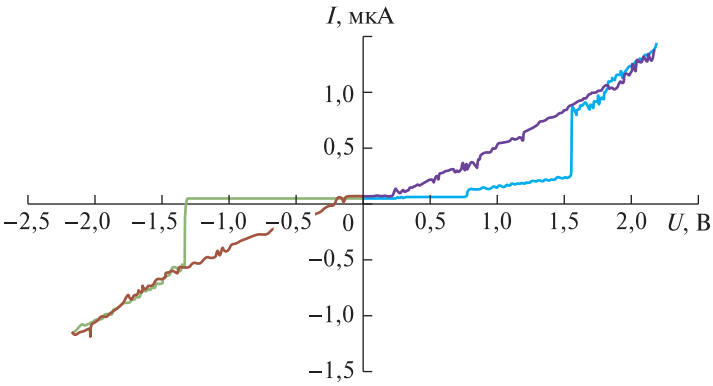


Рис. 2.22. Вольт-амперная характеристика мемристора

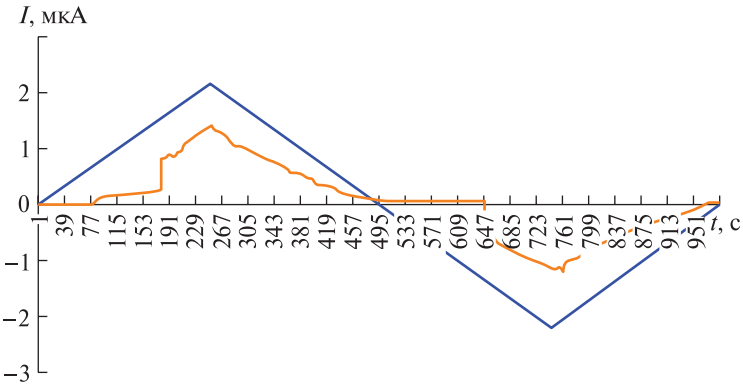


Рис. 2.23. График изменения тока во временно́й области

Как ясно из полученных графиков, измеряемый образец имеет четкий гистерезис, что позволяет судить о присутствии мемристивных свойств. Необходимо отметить, что исследуемые мемристоры имеют униполярное переключение и разрушение мемристивного канала происходит при напряжении ниже порогового. При подаче отрицательного напряжения формируется канал во встречном направлении.

Проведенные измерения позволяют судить о присутствии мемристивных свойств у измеряемых образцов. При подаче положительного напряжения до 0,75 В ток через мемристор составляет 0,06 мкА и мемристор находится в высокоомном состоянии (см. рис. 2.23). При достижении напряжения 0,75 В происходит скачок тока до 0,11 мкА, что обусловлено пробоем тонкого функционального слоя Al_2O_3. В диапазоне значений 0,75...1,6 В мемристор ведет себя как обычный резистор, что подтверждается линейным видом ВАХ на этом участке, и ток через мемристор постепенно учеличивается до 0,4 мкА. Переключение мемристора происходит при напряжении 1,6 В, при этом ток, проходящий через мемристорную структуру, резко увеличивается с 0,4 до 0,8 мкА, что является следствием переключения мемристора в низкоомное состояние. При дальнейшем увеличении напряжения на мемристоре его сопротивление не изменяется, поскольку на этом участке график представляет практически линейную функцию, такую же, как у обычного резистора. При уменьшении прямого напряжения до нуля сопротивление мемристора также практически не изменяется. При смене полярности подключения мемристора, т. е. при обратном напряжении, сопротивление мемристора не изменяется до достижения напряжения −1,3 В. А при напряжении −1,3 В происходит очень быстрое переключение мемристора в состояние высокого сопротивления, и ток, проходящий через мемристор, резко уменьшается до 0,06 мкА. Таким образом, переключение мемристора в низкоомное состояние происходит при положительном напряжении 1,6 В, а переключение обратно в высокоомное состояние — при напряжении 1,3 В. Несимметричность переключения, по-видимому, связана с несимметричностью архитектуры мемристора.

Для того чтобы подробно исследовать во времени изменение тока через мемристор, на него подавали двуполярное пилообразное напряжение и снимали значение тока, проходящего через мемристор. Изменения тока соответствуют токам при переключении мемристора из высокоомного состояния в низкоомное и обратно. Таким образом, экспериментально установлены рабочие напряжения для переключения мемристора: 1,6 В для переключения в низкоомное состояние и –1,3 В для переключения в высокоомное состояние. Ток, проходящий через мемристор в высокоомном состоянии, составляет 0,06 мкА, в низкоомном состоянии — 0,8 мкА.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Структура измерительного стенда.
3. Графики ВАХ образцов.
4. Анализ результатов измерений.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается мемристивный эффект?
2. Каковы особенности вольт-амперной характеристики мемристора?
3. Охарактеризуйте области применения мемристора.
4. Как оценить долговечность мемристора?

3. Методические материалы к выполнению домашних заданий

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 1. РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Цель домашнего задания: спроектировать матрицу тонкопленочных транзисторов заданных номиналов.

Исходные данные:

– номиналы пяти резисторов (как низкоомных, так и высокоомных);

– предельное отклонение сопротивления;

– рассеиваемая каждым резистором мощность.

Методика расчета резисторов описана в лекции 1.6.

Последовательность выполнения задания следующая.

1. На основании заданных значений сопротивления определяют удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки $R_{сл}$.

2. На основании рассчитанного значения $R_{сл}$ выбирают марку материала.

3. Выбирают метод изготовления (трафаретный, фотолитографический или комбинированный).

4. Рассчитывают длину и ширину каждого резистора.

5. Проводят компоновку резисторов на подложке.

6. Рисуют эскиз компоновки резисторов с подробной прорисовкой топологии.

Домашнее задание, сдаваемое преподавателю, должно включать:

– титульный лист;

– исходные данные;

– расчеты топологических размеров резисторов;

– эскиз компоновки резисторов с подробной прорисовкой топологии;

– выводы.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Цель домашнего задания: рассчитать параметры термической диффузии для получения всех областей *n*- и *p*-канального МОП-транзисторов.

Исходные данные:

– концентрация примеси в подложке;

– концентрация примеси *p*-кармана;

– поверхностная концентрация примеси истока и стока *p*-канального транзистора;

– поверхностная концентрация примеси истока и стока *n*-канального транзистора;

– глубина залегания *p*–*n*-перехода для всех областей;

– тип донорной и акцепторной примесей.

Методика расчета приведена в п. 4.2.3. Для *p*-кармана проводится двухстадийная диффузия, для стоков и истоков — одностадийная.

Последовательность выполнения домашнего задания следующая.

1. Определяют необходимую дозу легирования для *p*-кармана.

2. Выбирают температуру диффузии при разгонке примеси для *p*-кармана. Определяют коэффициент диффузии при разгонке примеси для *p*-кармана. Вычисляют время разгонки примеси, после чего оценивают время диффузии, при слишком малом времени температуру диффузии уменьшают и расчет повторяют.

3. Выбирают температуру диффузии и определяют коэффициент диффузии при загонке примеси для *p*-кармана. Вычисляют время загонки примеси, после чего оценивают время диффузии, при слишком малом времени температуру диффузии уменьшают и расчет повторяют.

4. Выбирают температуру диффузии при загонке примеси в истоки и стоки для *p*-канального транзистора. Определяют дозу легирования при загонке примеси для истоков и стоков *p*-канального транзистора. Вычисляют время загонки примеси, после чего оценивают время диффузии, при слишком малом времени температуру диффузии уменьшают и расчет повторяют.

5. Выбирают температуру диффузии при загонке примеси в истоки и стоки для *n*-канального транзистора. Определяют дозу легирования при загонке примеси для истоков и стоков *n*-канального транзистора. Вычисляют время загонки примеси, после чего оценивают время диффузии, при слишком малом времени температуру диффузии уменьшают и расчет повторяют.

Домашнее задание, сдаваемое преподавателю, должно включать:

– титульный лист;

– исходные данные;

– расчеты параметров диффузии;

– выводы.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 3. РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Цель домашнего задания: спроектировать топологию *n*- и *p*-канального МОП-транзисторов.

Исходные данные:

– проектная норма;

– глубина залегания *p*–*n*-перехода для всех областей;

– погрешность совмещения топологических слоев;

– погрешность получения размера на подложке;

– минимальное расстояние между соседними проводниками в слое металлизации;

– проектная норма перекрытия контактного окна слоем металлизации;

– метод легирования примеси (диффузия или ионная имплантация).

Методика расчета приведена в п. 4.2.3.

Последовательность выполнения домашнего задания следующая.

1. Определяют параметры транзисторов:

а) минимальную длину канала l_{min};

б) длину тонкого оксида $l_{т.о}$;

в) длину затвора $l_{з}$;

г) ширину канала Z;

д) ширину тонкого оксида $Z_{т.о}$;

е) ширину затвора $Z_{з}$;

ж) размер проводника над истоком и стоком $l_{пи}$;

з) минимальную длину стока и истока $l_{и}$;

и) ширину стока и истока $Z_{и}$;

к) размер проводника над *p*-карманом $l_{пи}$;

л) длину и ширину *p*-кармана.

2. Рисуют эскиз топологии и структуры (вертикального профиля) рассчитанных транзисторов.

Домашнее задание, сдаваемое преподавателю, должно включать:

– титульный лист;

– исходные данные;

– расчеты топологии транзисторов;

– эскизы топологии и структуры (вертикального профиля) рассчитанных транзисторов с указанием всех размеров;

– выводы.

4. Методические материалы к выполнению курсового проекта

Цель курсового проекта: разработка топологии кристалла цифрового устройства, выполненного по КПОП-технологии, согласно варианту задания.

4.1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

При выполнении данного курсового проекта студенты приобретают базовые навыки конструкторского и топологического проектирования цифровых устройств в виде базовых матричных кристаллов твердотельных интегральных микросхем. При этом в первую очередь используются знания, умения и навыки, приобретенные ими ранее при изучении таких дисциплин, как «Физика», «Физико-химические основы микро- и нанотехнологий», «Материаловедение и материалы электронных средств», «Схемотехническое проектирование электронных схем», «Технологические процессы микроэлектроники» и ряда других.

При выполнении курсового проекта в качестве исходных данных может быть взято цифровое устройство, которое было ранее разработано студентом в рамках курса цифровой схемотехники, иное устройство, выбранное студентом самостоятельно и согласованное с преподавателем, либо устройство по заданию преподавателя.

В структурном отношении курсовой проект делится на два раздела: схемотехническое (этап 1) и топологическое (этапы 2–6) проектирование кристалла микросхемы, и выполняется поэтапно в приведенной ниже последовательности.

Этап 1. Студент анализирует выбранную принципиальную электрическую схему цифрового устройства и определяет набор базовых логических элементов (БЛЭ), необходимых для его реализации в виде полупроводниковой ИМС. Проводит моделирование работы выбранной схемы в любой соответствующей программе моделирования, например PSPICE (DesignLab), строит временны́е диаграммы работы схемы, иллюстрирующие и доказывающие правильность ее работы.

Этап 2. Студент выбирает технологический процесс изготовления ИМС (в качестве типового процесса предлагается КМОП-технология) и определяет основные проектные топологические нормы — ограничения, которым будет удовлетворять проектируемый БМК согласно выбранной технологии его изготовления. Нормы фиксирует в таблице «Проектные топологические нормы».

Выполняет структурно-топологический расчет МОП-транзисторов, на основе которого будут проектироваться базовые логические элементы.

Этап 3. Осуществляет «покрытие» принципиальной электрической схемы выбранным набором БЛЭ, определяет необходимое их число по каждому элементу набора с присвоением БЛЭ порядковых номеров. Этап заканчивается разработкой документа «Схема принципиальная электрическая устройства в базисе основных логических элементов».

Этап 4. Студент разрабатывает топологии БЛЭ из выбранного набора, используя разработанный на этапе 2 документ «Проектные топологические нормы».

Этап 5. Осуществляет общую конструкторско-топологическую компоновку БМК, уделяя внимание размещению шин земли и питания, размеру и расположению контактных площадок.

Спроектированный кристалл, помимо базовых логических вентилей, должен содержать схемы защиты входных узлов БМК от действия статического электричества и умощняющие каскады.

На кристалле необходимо также разместить некоторое число незадействованных вентилей.

Разводка сигнальных цепей выполняется студентом вручную, но может быть использована и любая программа автоматизированной трассировки.

Этап заканчивается выполнением документа «Схема расположения на БМК основных логических элементов», с помощью которой можно установить взаимно однозначное соответствие между пронумерованным БЛЭ на «Схеме принципиальной электрической устройства в базисе основных логических элементов» и его месторасположением на топологии кристалла.

Этап 6. Студент, пользуясь спроектированной им топологией, разрабатывает комплект конструкторской документации для изготовления фотошаблонов, являющихся инструментом изготовления кристалла ИМС, в виде послойных чертежей топологических слоев технологического процесса его производства для позитивного литографического процесса.

4.2. ПОДРОБНОЕ СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

4.2.1. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

На этапе схемотехнического проектирования студенту предоставляется возможность самому разработать принципиальную электрическую схему заданного в техническом задании цифрового устройства и моделированием, например, в среде PSPICE (DesignLab) или Proteus проверить правильность его работы, получив соответствующие временны́е диаграммы. В качестве моделей БЛЭ рекомендуется использовать библиотеку SPICE-моделей КМОП-логических элементов серии 74HC, которые по функциональным параметрам наиболее близки к КМОП-логическим элементам, обычно применяемым в СБИС цифровых устройств.

Для получения временны́х диаграмм следует использовать режим моделирования Transient. Полученные временны́е диаграммы вместе с принципиальной электрической схемой разработанного цифрового устройства необходимо вставить в схемотехническую часть расчетно-пояснительной записки курсового проекта.

На рис. 4.1 представлен пример выполненной в среде Proteus v8.12 временно́й диаграммы, в табл. 4.1 — пример таблицы истинности приоритетного

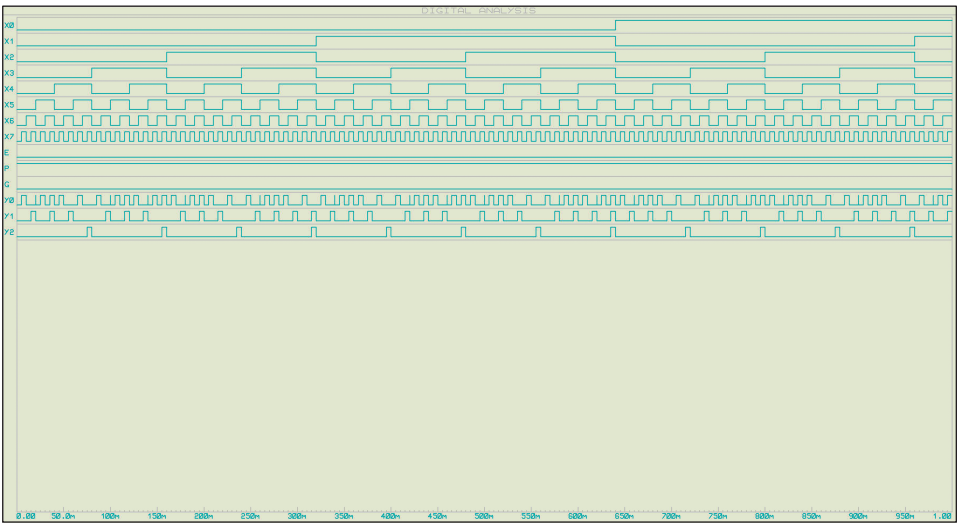


Рис. 4.1. Временна́я диаграмма работы приоритетного шифратора 8×3

шифратора 8×3, имеющего восемь информационных входов $X0–X7$, вход разрешения E и пять выходов — три инверсных выходного кода $Y0$, $Y1$, $Y2$; G — признака подачи входного сигнала и P — переноса. Если на всех информационных входах микросхемы логическая единица, на выходах $Y0$, $Y1$, $Y2$, G — логическая единица, на выходе P — логический ноль. При подаче логического ноля на любой из информационных входов $X0–X7$ на выходах 1, 2, 4 появляется инверсный код, соответствующий номеру входа, на который подан логический ноль, на выходе G — логический ноль, что является признаком подачи входного сигнала, на выходе P — логическая единица, которая запрещает работу других подобных ИМС при их каскадном соединении. Если логический ноль будет подан на несколько информационных входов ИМС, то выходной код будет соответствовать входу с бóльшим номером. Так ИМС работает при подаче на вход E логического ноля, если же на входе E логическая единица (запрет работы), то на всех шести выходах ИС логическая единица.

Таблица 4.1

Таблица истинности приоритетного шифратора 8×3

Выходы									Входы				
E	*X*7	*X*6	*X*5	*X*4	*X*3	*X*2	*X*1	*X*0	*Y*2	*Y*1	*Y*0	*G*	*P*
1	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	0	*X*	1	1	0	0	1
0	1	1	1	1	1	0	*X*	*X*	1	0	1	0	1
0	1	1	1	1	0	*X*	*X*	*X*	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	*X*	*X*	*X*	*X*	0	1	1	0	1
0	1	1	0	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	0	1	0	0	1
0	1	0	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	0	0	1	0	1
0	0	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	*X*	0	0	0	0	0

4.2.2. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При топологическом проектировании ИМС предполагается иерархический переход от простых электронных элементов и приборов (резисторов, диодов, транзисторов) через логические элементы, элементы памяти

и устройства на их основе (сумматоры, дешифраторы, мультиплексоры, запоминающие устройства и т. п.) к законченной системе (подсистеме), реализуемой в одном кристалле.

На любой стадии проектирования основная задача конструктора — обеспечить максимальное быстродействие при одновременной минимизации площади кристалла создаваемой ИМС. На стадии топологического проектирования отдельных электронных элементов конструктор стремится реализовать минимальные размеры при обеспечении рабочих токов, напряжений, заданных номиналов и точности сопротивлений с опорой на электрические характеристики, полученные на этапе схемотехнического проектирования.

На уровне наборов логических элементов для достижения оптимальных результатов проектирования предусматривается минимизация длин связей между отдельными элементами, которая достигается рациональным их размещением (компоновкой) и плотной упаковкой. Одним из подходов, сокращающих время на разработку, заключается в использовании БМК. Такие кристаллы в составе групповой пластины содержат одинаковые наборы БЛЭ, расположенные в виде регулярной матрицы (с постоянным шагом). В этом случае генератор изображений формирует топологию лишь одного набора, а матричное размещение достигается мультиплицированием с помощью фотоповторителя. Коммутация БЛЭ путем создания соответствующих соединений позволяет реализовать на основе одной и той же структуры БМК цифровые устройства различного назначения.

Разработка топологии ИМС может осуществляться методом полного проектирования, начиная с электронных элементов и приборов, методом стандартных (библиотечных) элементов и методом БМК. В первом случае принятые к разработке ИМС иногда называют заказными, во втором и третьем случаях — полузаказными.

Следует отметить, что применение библиотек и БМК приводят к избыточности элементов на кристалле ИМС, увеличению площади кристалла и, следовательно, к увеличению длины связей, что является платой за сокращение сроков разработки. Сравнительная характеристика (в относительных единицах) трех упомянутых методов приведена в табл. 4.2. Рентабельность их применения определяется, в частности, степенью интеграции

Таблица 4.2

Сравнительная характеристика методов разработки топологии ИМС

Характеристика	Полное проектирование	Метод стандартных ячеек	Метод БМК
Длительность разработки	1	0,2	0,3–0,4
Площадь кристалла	1	1,7–2,2	1,2–1,5
Число специальных шаблонов	8–12	3–7	3–7

проектируемого кристалла ИМС и годовой программой выпуска. Очевидно, что экономическая оправданность применения метода полного проектирования будет реализована при сравнительно больших программах выпуска — порядка сотен тысяч и миллионов изделий в год; применение метода БМК более оправдано при выпуске небольших серий ИМС, исчисляемых десятками тысяч.

В курсовом проекте студент проектирует ИМС методом БМК.

НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА РАЗРАБОТКИ ТОПОЛОГИИ

Важнейшее требование при разработке — минимизация площади ИМС, что обеспечивает малую суммарную длину связей и при определенной плотности дефектов повышает процент выхода годных кристаллов. С учетом этого требования конструктор при проектировании топологии БЛЭ должен руководствоваться следующими основными правилами:

– применять элементы с минимальной площадью, ограниченной нагрузочной способностью транзисторов и диодов и точностью резисторов с учетом возможностей технологии;

– проектировать минимально возможное число изолированных областей, следуя принципу функциональной интеграции элементов, т. е. в данном случае размещать в одной области элементы, имеющие общий потенциал (постоянный или переменный) и один тип проводимости;

– при компоновке стремиться к квадратной форме БЛЭ и ИМС в целом, что обеспечивает минимум суммарной длины межэлементных связей;

– в качестве начального варианта размещения элементов в БЛЭ можно принять их расположение на принципиальной электрической схеме;

– входы и выходы БЛЭ должны быть по возможности удалены друг от друга; контактные площадки входных и выходных сигналов желательно располагать на разных сторонах кристалла;

– учитывая принцип формирования элементов топологии генератором изображений, не следует применять межсоединения переменной ширины; все элементы соединений (как и элементы любого топологического слоя) по форме должны представлять собой прямоугольники или их сочетание;

– по мере возможности располагать поликремниевые межсоединения вертикально, а металлические — горизонтально; шины питания и земли выполнять металлическими и располагать параллельно другим металлическим межсоединениям;

– выполнять длинные межсоединения металлическими, поликремниевые шины использовать для коротких соединений так, чтобы их сопротивление не затрудняло обеспечение рабочих режимов устройства;

– в тех случаях, когда поликремниевое соединение проходит под металлическим, для уменьшения паразитных емкостей необходимо максимально сокращать длину участка, находящегося под металлом (разделяющий их слой диэлектрика имеет относительно малую толщину);

– пересечения в электрических цепях можно реализовать над оксидом с помощью проводника, проходящего поперек резистора, или под оксидом с помощью n^+- или p^+-канала. Во втором случае может понадобиться специальная изолированная область. В КМОП-структурах с поликремниевыми затворами пересечение может быть выполнено проводником поверх и поперек затвора, поскольку последний имеет на поверхности защитную пленку оксида.

Прочие рекомендации будут рассмотрены ниже применительно к конкретным топологическим элементам.

ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛА

Разработанный в курсовом проекте кристалл реализуется на основе КМОП-технологии как типовом процессе. Топологическое проектирование включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Разработка документа «Проектные топологические нормы». В качестве исходных данных для его составления выступает заданная в техническом задании на курсовой проект ширина поликремниевого затвора МОП-транзистора. Пользуясь этим размером, можно определить размеры остальных элементов всех топологических слоев.

Отметим, что ширина поликремниевого затвора в КМОП-технологическом процессе является минимальным топологическим размером. Все другие топологические размеры элементов во всех остальных слоях должны быть больше ширины поликремниевого затвора.

Шаг 2. Структурно-топологический расчет МОП-транзисторов. Это основа дальнейшего проектирования БЛЭ (порядок расчета — см. п. 4.2.3).

Шаг 3. Проектирование топологии базовых топологических элементов. Как правило, к ним относятся топологии логического элемента НЕ (инвертора), логических элементов 2И–НЕ, 2ИЛИ–НЕ и двунаправленного ключа.

Топологии более сложных цифровых элементов, таких как, например, триггер, всегда реализуются с использованием указанных выше базовых логических элементов.

Топологии всех элементов должны быть спроектированы с учетом топологических норм документа, разработанного на шаге 1 этапа топологического проектирования (табл. 4.3).

Примеры топологии элементарных логических элементов приведены на рис. 4.2–4.7.

На рис. 4.8 показан вариант топологической реализации каскада выходного умощнения сигнала, если в выбранном базисе БМЭ нет инвертора, но присутствуют элементы 2И–НЕ и 3И–НЕ. В этом случае первый элемент группы (2И–НЕ) подключается с объединением входов и выполняет функцию инвертора, а последующие семь элементов группы включены параллельно.

Таблица 4.3

Проектные топологические нормы разрабатываемого кристалла цифровой микросхемы

№ п/п	Проектная норма	Значение, мкм
1	Минимальная ширина поликремниевой области	3,0
2	Минимальная ширина p^--области	18,0
3	Минимальное расстояние между соседними p^--областями	8,0
4	Минимальное расстояние между соседними поликремниевыми областями	5,0
5	Минимальный размер p^+-области	11,0
6	Минимальный размер n^+-области	20,0
7	Минимальное расстояние между соседними n^+- и p^+-областями	6,0
8	Минимальный размер контактного окна в области тонкого диэлектрика	7,0×7,0
9	Минимальный размер контактного окна к n^+-области	7,0×7,0
10	Минимальный размер контактного окна к p^+-области	7,0×7,0
11	Минимальный размер контактного окна к области поликремния	7,0×7,0
12	Минимальное расстояние между контактным окном и границей области поликремния	2,0
13	Минимальная ширина дорожки металлизации на коротком участке	10,0
14	Минимальная ширина дорожки металлизации на длинном участке	12,0
16	Минимальное расстояние между соседними дорожками металлизации	10,0
17	Минимальное перекрытие контактного окна областью металлизации	1,0
18	Минимальный размер контактного окна в области пассивации	80,0×80,0
19	Минимальное перекрытие области металлизации областью пассивации	5,0
20	Полуширина скрайберной дорожки	40,0
21	Минимальное расстояние от границы скрайберной дорожки до границы контактной площадки	20,0

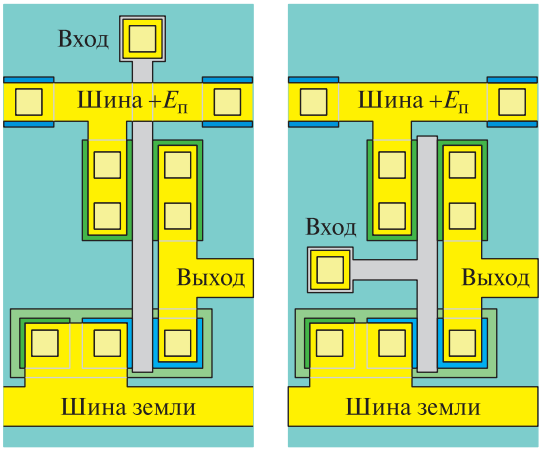


Рис. 4.2. Варианты топологической реализации логического элемента НЕ

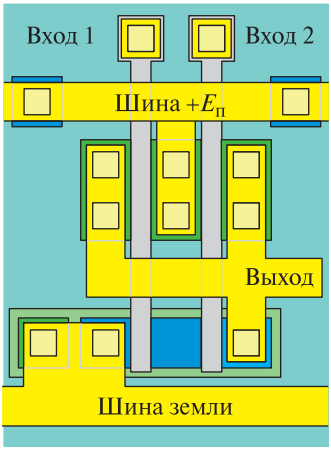


Рис. 4.3. Вариант топологической реализации логического элемента 2И–НЕ

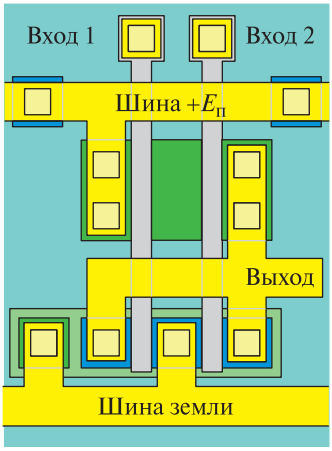


Рис. 4.4. Вариант топологической реализации логического элемента 2ИЛИ–НЕ

В конструкциях с КМОП-транзисторами имеются условия для образования паразитных каналов. На рис. 4.9 показан фрагмент структуры инвертора с КМОП-транзисторами. Паразитный *p*-канал образуется между областями *3* и *6* при отрицательном потенциале относительно подложки *1* на металлическом проводнике *4*, соединяющем стоки *3* и *8* КМОП-транзисторов. Паразитный *n*-канал образуется между областями *1* и *8* при положительном потенциале на проводнике *4* относительно *p*-кармана. Эти каналы способствуют протеканию токов утечки между транзисторами вследствие

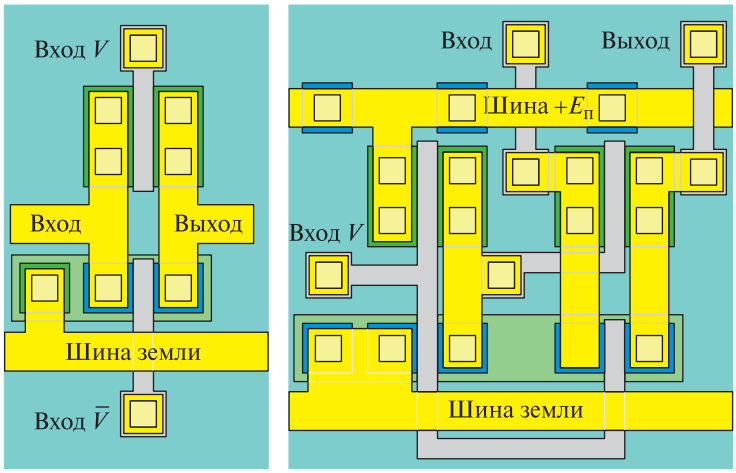


Рис. 4.5. Логический элемент «двунаправленный ключ»:
а — вариант топологической реализации; *б* — топологическая реализация вместе со схемой управления

инверсии электропроводности полупроводникового материала на границе кремний–оксид.

Одним из методов устранения паразитных каналов в КМОП-структурах является применение охранных колец, или, иными словами, каналоограничительных областей (КО). Их формируют локальным легированием в процессе формирования стоков и истоков *p*- и *n*-канальных транзисторов. При этом каждый *p*- и *n*-канальный транзистор окружают КО соответственно

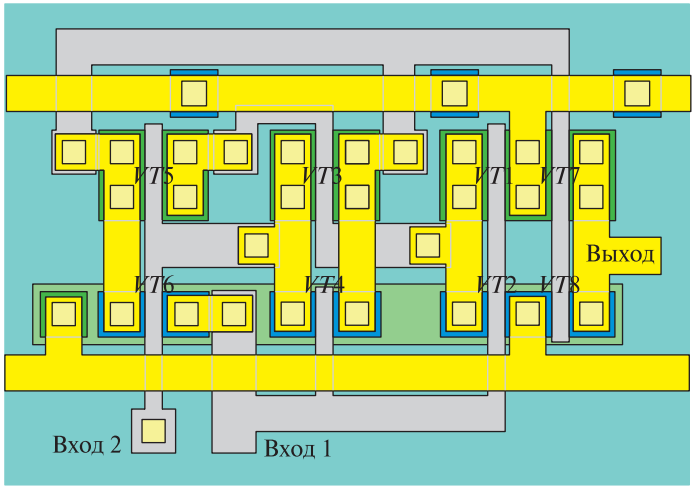


Рис. 4.6. Вариант топологической реализации логического элемента «исключающее ИЛИ»

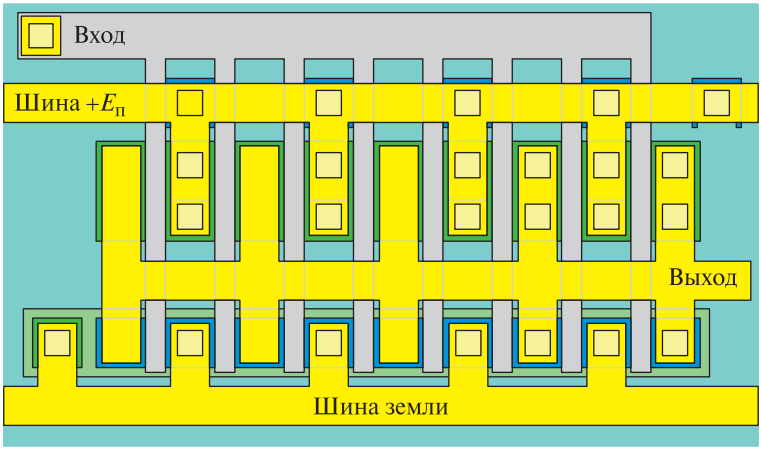


Рис. 4.7. Вариант топологической реализации каскада выходного умощнения сигнала (восемь инверторов, включенных параллельно)

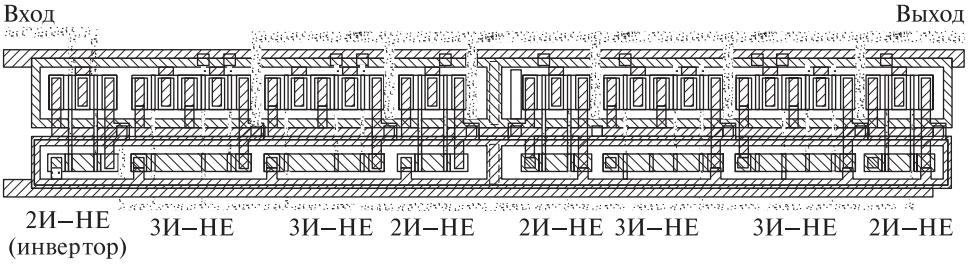


Рис. 4.8. Вариант топологической реализации каскада выходного умощнения сигнала (элемент 2И–НЕ с объединенными входами и группа из семи элементов 2И–НЕ и 3И–НЕ, включенных параллельно)

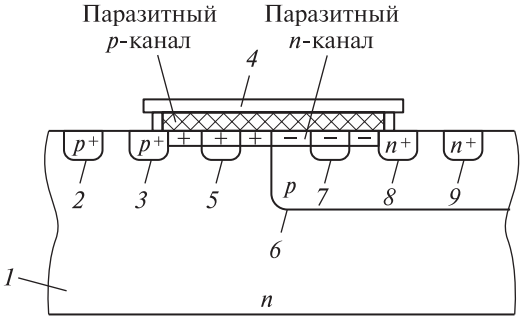


Рис. 4.9. Образование паразитных каналов в инверторе с активной нагрузкой:

1 — подложка; *2*, *3* — исток и сток *p*-канального МОП-транзистора; *4* — металлический проводник; *5* — n^+-каналоограничительная область; *6* — *p*-карман; *7* — p^+-каналоограничительная область; *8*, *9* — сток и исток *n*-канального МОП-транзистора

n^+- и p^+-типов. Для лучшей изоляции на кольцо p^+-типа подают самым низкий, а на кольцо n^+-типа — самый высокий потенциал схемы ($+E_п$). В структуре на рис. 4.9 каналоограничительные области 5 (n^+) и 7 (p^+) размещают в областях образования паразитных каналов. Применение КО существенно увеличивает площадь элементов КМОП-ИМС, поэтому при проектировании необходимо стремиться к уменьшению их числа, используя одну область для группы транзисторов.

При топологической разработке КМОП-структур прежде всего предусматривают взаимную изоляцию *n*- и *p*-канальных транзисторов.

Логический элемент 3ИЛИ–НЕ (рис. 4.10, *а*) содержит МОП-транзисторы двух типов: *n*-канальные (активные) и *p*-канальные (нагрузочные). Для реализации КМОП-схемы истоки и стоки *n*-канальных транзисторов размещены в общей *p*-области (*p*-кармане), которая, в свою очередь (так же как и истоки и стоки *p*-канальных транзисторов), сформирована непосредственно в исходной пластине *n*-типа (рис. 4.10, *б*). Во избежание образования паразитных каналов с проводимостью *p*- и *n*-типа группы *p*- и группа *n*-канальных транзисторов охвачены КО каналоограничительными областями соответственно n^+- и p^+-типа.

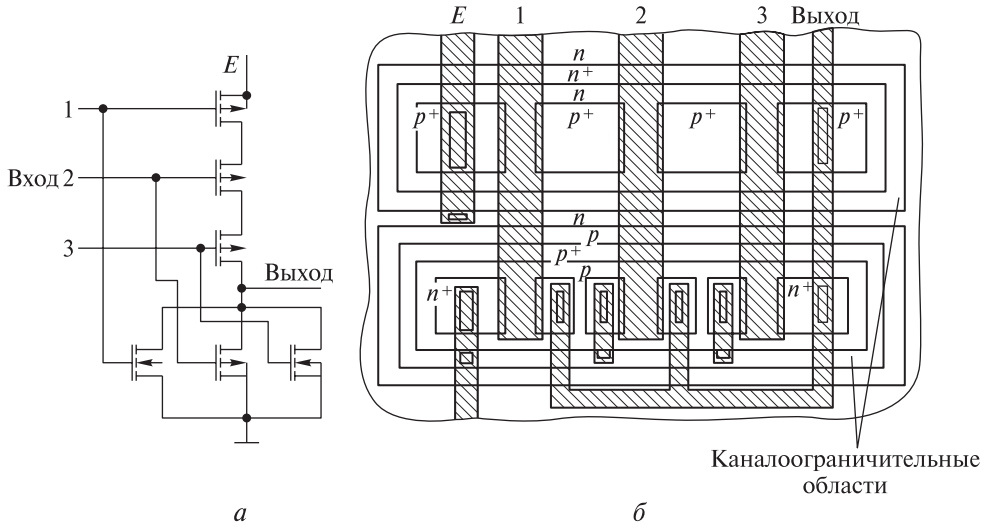


Рис. 4.10. Логический элемент 3ИЛИ–НЕ:
а — схема; *б* — топология

Следует отметить, что, во-первых, паразитные каналы могут возникнуть только под проводниками, которые в этом случае играют роль затворов паразитных транзисторов, поэтому КО можно оформить в виде отдельных областей под проводниками; во-вторых, необходимость введения КО должна быть обоснована расчетом порогового напряжения паразитных транзисторов, и если это напряжение в 2–3 раза превышает напряжение питания, то необходимость в КО отпадает.

В приведенном примере КО используются также для получения омических контактов n-пластины с шиной питания Е (n^+), а также p-кармана с шиной земли (p^+). С помощью p^+-КО к шине земли подключены и истоки активных (n-канальных) транзисторов. Поскольку нагрузочные транзисторы включены последовательно, становится возможным объединение стоков и истоков транзисторов 1–2 и 2–3 (функциональная интеграция).

В общем случае отдельные участки КО могут быть использованы в качестве межсоединений при реализации пересечений.

Приведенная на рис. 4.11, *а* КМОП-схема состоит из четырех логических элементов 2И–НЕ и одного инвертора. В качестве материала затворов использован поликремний, который наряду с металлом выполняет функции межсоединений (шины 3–7), а также позволяет реализовать пересечения. Компоновка транзисторов представлена на рис. 4.11, *б*. Поликремниевые шины 1–7 размещены параллельно друг другу (штриховые линии). Шины

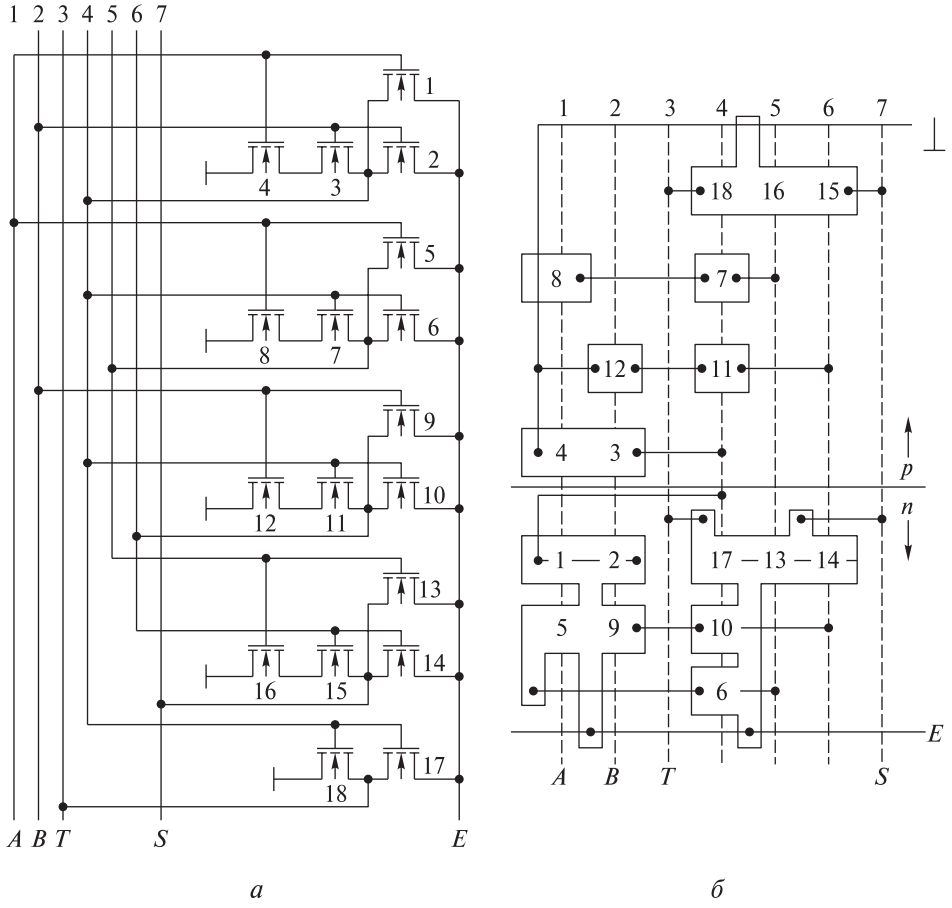


Рис. 4.11. КМОП-схема из четырех логических элементов 2И-НЕ и одного инвертора: *а* — электрическая принципиальная схема; *б* — компоновка

питания и земли (перпендикулярные шинам 1–7) и металлические соединения показаны сплошными жирными линиями, диффузионные области транзисторов изображены прямоугольниками, контакты показаны черными кружками, области каналов под шинами поликремниевых затворов условно не показаны.

Транзисторы с каналами *n*-типа сгруппированы в *p*-кармане (верхняя часть рис. 4.11, *б*), а группа *p*-канальных транзисторов находится непосредственно в пластине *n*-типа. Ответвления от диффузионных областей стоков и истоков также реализуют пересечения и способствуют более плотной компоновке транзисторов. Области стоков и истоков последовательно включенных транзисторов совмещены согласно электрической схеме (функциональная интеграция).

На рис. 4.12 представлены схемы и топология совмещенной по аналогичным принципам группы в составе двух элементов 2И–НЕ и двух элементов 3И–НЕ.

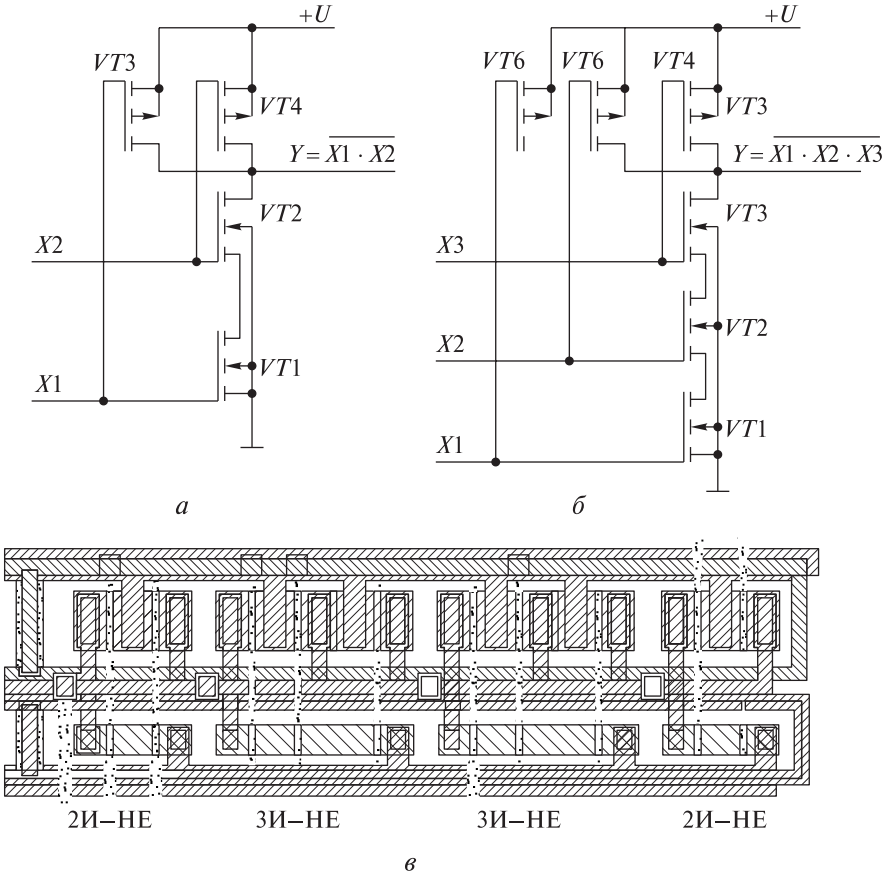


Рис. 4.12. Совмещенная группа из двух элементов 2И–НЕ и двух элементов 3И–НЕ:
а — схема электрическая принципиальная из двух элементов 2И–НЕ; *б* — схема электрическая принципиальная из двух элементов 3И–НЕ; *в* — топологическая реализация

Шаг 4. Разработка плана кристалла. На этом шаге необходимо составить план кристалла, включающий в себя выбор места размещения всех входных и всех выходных сигналов, а также места расположения контактных площадок для шин земли и питания. При этом контактные площадки всех входных сигналов и всех выходных сигналов располагают как можно дальше друг от друга. Контактные площадки для шин земли и питания обычно располагают в углах кристалла по диагонали.

После завершения компоновки кристалла, включая определение месторасположения всех задействованных БЛЭ, составляют документ «Схема расположения на БМК основных логических элементов» (рис. 4.13). Каждый задействованный БЛЭ изображают прямоугольником с порядковым номером в соответствии с принципиальной электрической схемой в базисе выбранных БЛЭ. Умощняющие каскады (выделенные номера 98, 100, 102, 104, 106 на рис. 4.13) обладают общим номером, нумерации отдельных БЛЭ нет. Следует отметить, что при реализации какого-либо устройства на базе БМК, как правило, незадействованными остаются около 20...30 % БЛЭ от их общего числа в составе БМК. Такие неподключенные элементы не нумеруют, а на

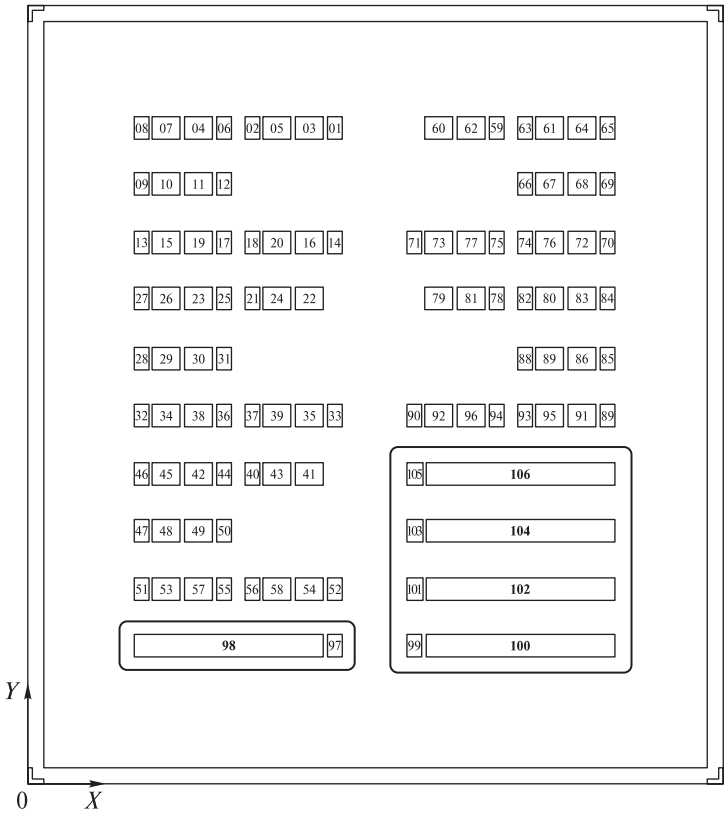
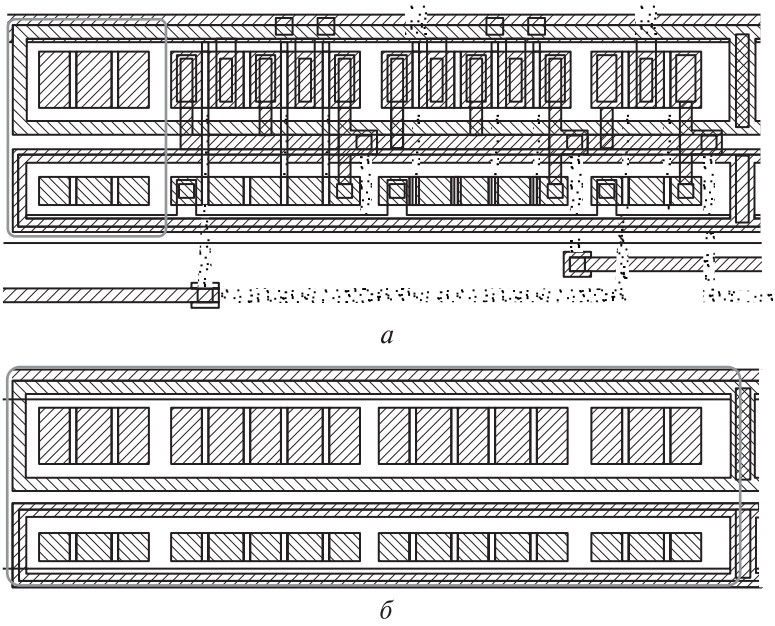


Рис. 4.13. Пример документа «Схема расположения на БМК основных логических элементов»

чертеже совмещенной топологии отображают как БЛЭ с выполненными диффузионными областями транзисторов и КО (при наличии) без выполнения затворов, контактных окон, поликремниевых и металлических соединений (рис. 4.14).



а

б

Рис. 4.14. Базовые логические элементы в составе базового матричного кристалла:

а — задействованные (подключенные); *б* — незадействованные (неподключенные)

Шаг 5. Разработка топологии схемы защиты кристалла от воздействия статического электричества. Известно, что интегральные микросхемы, изготовленные по КМОП-технологии, чувствительны к воздействию статического электричества. Толщина подзатворного диэлектрика в МОП-транзисторах крайне мала (около нескольких нанометров), поэтому напряжение пробоя такого диэлектрика невысокое и обычно не превышает напряжения питания микросхемы.

Для того чтобы избежать этого и сделать микросхему нечувствительной к воздействию статического электричества, все входы (а часто и выходы) снабжают схемой защиты. Наиболее распространенной является диодная схема защиты (рис. 4.15).

Схема работает следующим образом. Если напряжение на входной контактной площадке превысит значение напряжения отсечки $U_д$, то диоды *VD*1 и *VD*3 открываются и через них начинает протекать ток к шине источника питания. В результате напряжение на затворах входной пары КМОП-транзисторов ограничивается на этом уровне. И наоборот, если напряжение на

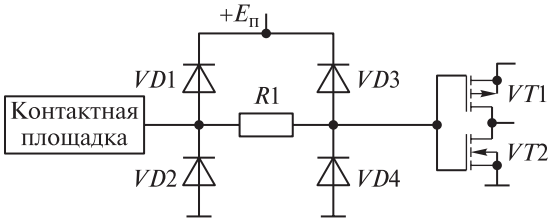


Рис. 4.15. Принципиальная электрическая схема диодной защиты

входной контактной площадке станет ниже $-U_д$, то открываются диоды *VD*2 и *VD*4. Ток через эти находящиеся в открытом состоянии диоды течет из шины земли в направлении контактной площадки. Резистор большого номинала необходим для уменьшения тока, который может попасть на затворы входных МОП-транзисторов.

Вариант топологической реализации такой схемы диодной защиты показан на рис. 4.16.

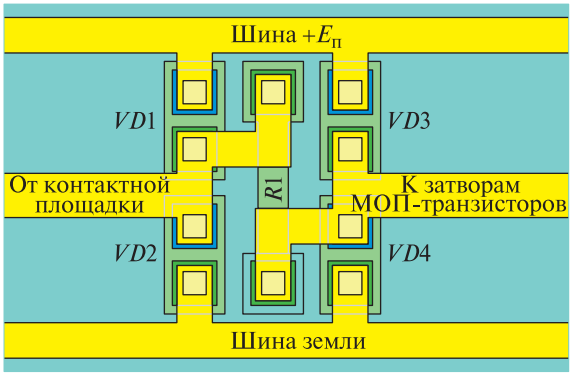


Рис. 4.16. Вариант топологической реализации схемы диодной защиты

На рис. 4.17, *а* показана еще одна конфигурация схемы защиты совместно с контактной площадкой и МОП-ячейкой; на рис. 4.17, *б* приведена соответствующая электрическая схема, на рис. 4.17, *в* — сечение по линии *x*–*x*′. При подаче на контактную площадку высокого напряжения область диффузии (обозначенная *A* на рис. 4.17, *а*), обычно работающая как резистор, выполняет функцию диода (между пластиной и собой), который пропускает ток и уменьшает тем самым напряжение, поступающее на затвор МОП-транзистора *B* (см. рис. 4.17, *б*).

Работает данная схема следующим образом. При подаче на контактную площадку положительного напряжения ток протекает от диффузионной области к подложке, так как положительное напряжение приложено в прямом направлении диода, образованного диффузионной областью *A* и пластиной.

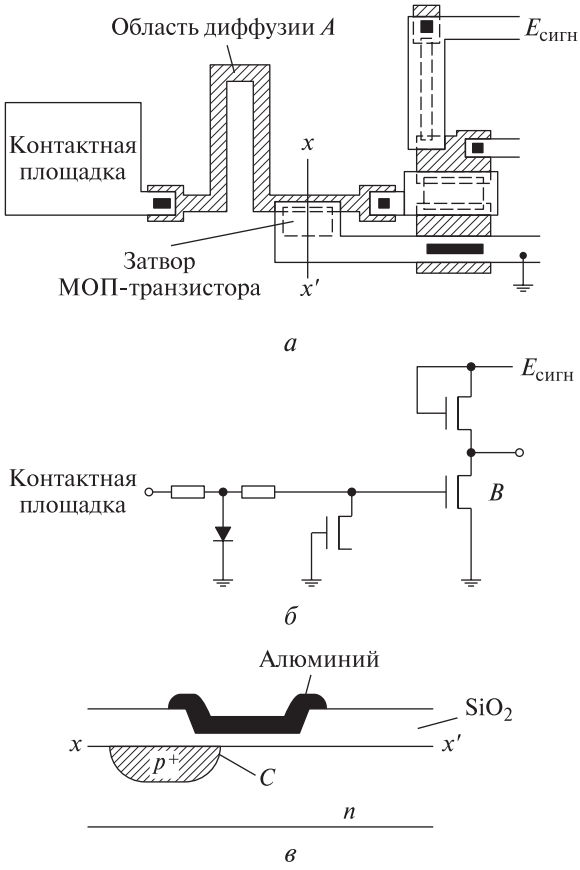


Рис. 4.17. Схема защиты на основе области диффузии (диода) и МОП-транзистора:

а — конфигурация; *б* — схема; *в* — сечение по линии *x*–*x*′

При подаче на контактную площадку отрицательного напряжения небольшой ток протекает через диод в обратном направлении. В частности, ток с бóльшим значением протекает под алюминиевым электродом, где образуется сильное электрическое поле (указатель *C* на рис. 4.17, *в*), что приводит к падению напряжения на большом сопротивлении области диффузии *A*, уменьшая тем самым напряжение, поступающее на затвор МОП-транзистора *B* (см. рис. 4.17, *б*). Топологическая реализация данной схемы представлена на рис. 4.18.

Следует отметить, что в проектируемом БМК необходимо предусмотреть размещение схемы защиты около каждой контактной площадки, вне зависимости от того, задействована ли она при реализации данного цифрового устройства на БМК и следует ли использовать схему защиты для конкретной площадки (рис. 4.19).

Шаг 6. Проектирование контактных площадок. Размер контактных площадок устанавливают в зависимости от диаметра алюминиевой или золотой

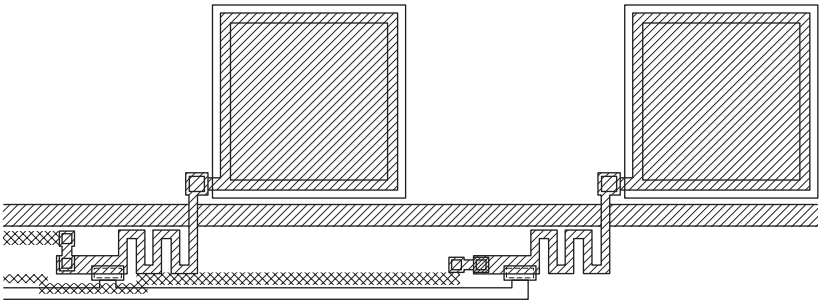


Рис. 4.18. Топологическая реализация схемы защиты на основе области диффузии (диода) и МОП-транзистора

проволоки, которая используется для разварки (подключения) кристалла ИМС в корпус. Ранее основным материалом для разварки кристаллов в корпус была отожженная золотая проволока марки Au 999,9 диаметром 30 мкм. В настоящее время для разварки используется проволока меньшего диаметра — 25 мкм.

Минимальный размер контактной площадки должен составлять не менее трех диаметров проволоки, используемой для разварки. Это определяется точностью позиционирования технологического оборудования, используемого для автоматизированной разварки, поэтому минимальный размер открытой части контактной площадки должен составлять не менее 80×80 мкм.

Кроме того, область металлизации контактной площадки должна примерно на 5 мкм с каждой стороны перекрываться сверху областью пассивации, поэтому размер контактной площадки по металлизации должен составлять примерно 90×90 мкм.

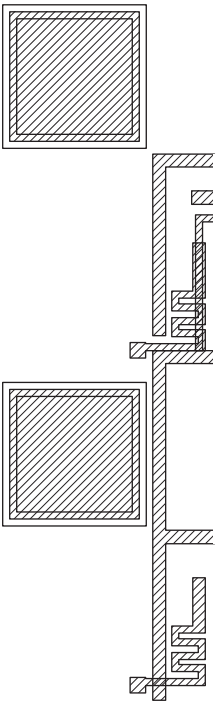


Рис. 4.19. Размещение схем защиты у незадействованных контактных площадок базового матричного кристалла

Расстояние между соседними контактными площадками не должно быть меньше половины их ширины. Пример спроектированных нескольких находящихся рядом контактных площадок показан на рис. 4.20.

Контактные площадки должны располагаться только на периферии кристалла. Для уменьшения паразитной емкости и устранения опасности закорачивания (вследствие возможных «проколов» в изолирующей пленке) целесообразно под каждой монтажной площадкой сформировать область, ограниченную *p*–*n*-переходом, т. е. изолировать каждую площадку в отдельном *p*-кармане (рис. 4.21). Граница *p*-кармана также отстоит от границы

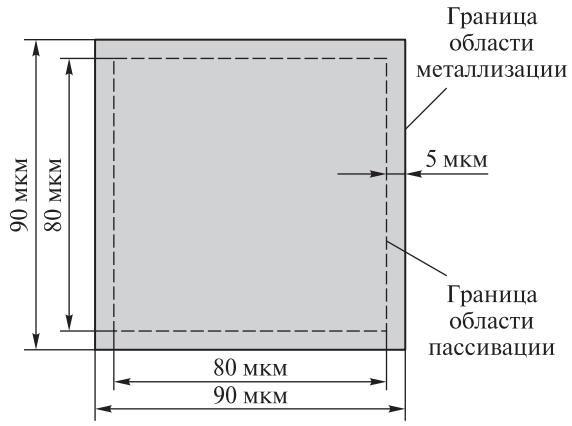


Рис. 4.20. Размеры контактной площадки для разварки кристалла интегральной микросхемы в корпус



Рис. 4.21. Контактная площадка, снабженная изолирующим *p*-карманом

области металлизации на 5 мкм по всем сторонам контактной площадки.

Шаг 7. Проектирование скрайберных дорожек. Скрайберные дорожки необходимы для выполнения технологической операции разделения пластин на кристаллы. В настоящее время наиболее распространенным способом разделения пластины на кристаллы является технологическая операция резки пластины на три четверти толщины с последующей ломкой. Резка осуществляется в зонах пластины, называемых скрайберными дорожками. Размер скрайберной дорожки зависит от толщины реза. Режущая кромка современного инструмента, с помощью которого осуществляют резку пластины, имеет толщину около 40 мкм, что примерно в 2 раза меньше, чем у режущей кромки обычной бритвы.

С учетом этого ширина скрайберной дорожки должна быть примерно в 2 раза больше указанного размера, т. е. около 80 мкм, по 40 мкм на каждую сторону (рис. 4.22).

Шаг 8. Проектирование и расчет фигур совмещения. При контактной литографии фигуры совмещения являются необходимым элементом рисунка кристалла ИМС. В процессе производства микросхемы с их помощью осуществляют совмещение шаблона топологического слоя с рисунком топологии кристалла.

Основное требование к фигурам совмещения (рис. 4.23) состоит в выборе такой их конфигурации, которая исключала бы неоднозначное совмещение шаблона с рисунком топологии кристалла, а размер фигуры позволил бы оператору прецизионной литографии уверенно различить ее в микроскоп с увеличением около ×250 (таким микроскопом обычно оснащается производственный участок контактной литографии).

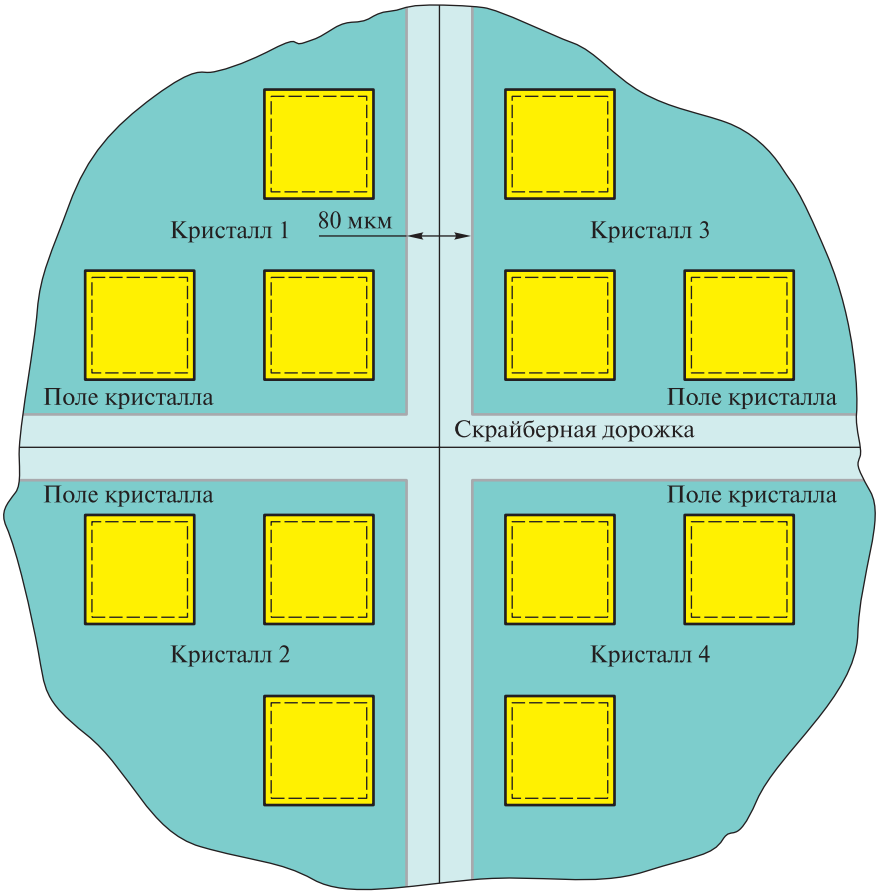


Рис. 4.22. Расположение скрайберных дорожек на пластине

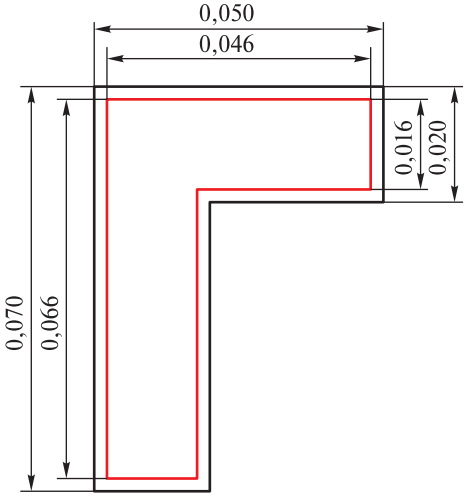


Рис. 4.23. Различимые в микроскоп размеры фигуры совмещения

Следует отметить, что поле зрения микроскопа зависит от его увеличения и убывает с возрастанием кратности увеличения. При этом также убывают рабочее расстояние и глубина резкости. По мере формирования топологических слоев кристалл «накапливает» использованные фигуры, поэтому форма фигуры и ее местоположение должны обеспечивать быстрое и безошибочное нахождение оператором нужной фигуры среди других уже использованных фигур.

Все фигуры совмещения разделяют на *основные* и *подготовительные*. По основной фигуре выполняют совмещение шаблона с кристаллом микросхемы на пластине. Одновременно с процессом совмещения на кристалле формируют подготовительную фигуру, которая на следующей операции совмещения со следующим шаблоном уже будет основной.

Существует два способа формирования фигур совмещения для контактной литографии: глобальный и последовательный.

При использовании *глобального* метода чертеж первого топологического слоя содержит подготовительные фигуры всех последующих слоев, а шаблоны всех последующих слоев содержат только по одной основной фигуре совмещения.

При *последовательном* методе чертеж шаблона первого и последнего топологических слоев содержит по одной фигуре совмещения, причем первый слой — подготовительную, последний — основную фигуры. В этом случае все шаблоны промежуточных топологических слоев содержат по две фигуры совмещения: одну основную и одну подготовительную.

Фигуры совмещения могут иметь произвольную форму, но чаще всего используют фигуру в форме неравнобокого уголка, которую специалисты по микроэлектронике обычно называют «сапог» (рис. 4.24). Вследствие различной ориентации такая форма фигуры позволяет получить восемь вариантов и может «обслужить» таким образом до девяти топологических слоев.

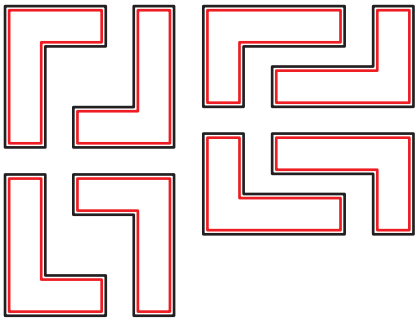


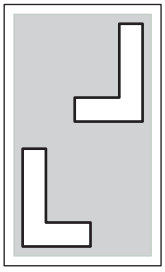
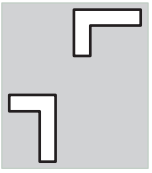
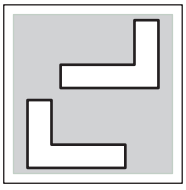
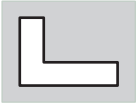
Рис. 4.24. Фигуры совмещения для контактной литографии

В табл. 4.4 представлен пример расположения фигур совмещения в шаблонах топологических слоев для последовательного способа применительно к простому КМОП-технологическому процессу производства микросхем.

Фигуры для всех слоев могут быть сгруппированы конструктором в одном свободном месте кристалла или рассредоточены по полю кристалла, например, между периферийными контактными площадками и даже в дефектной зоне. Для оператора, постоянно работающего с одним слоем (крупносерийное и массовое производство), более удобен второй вариант, когда «его фигура» обособлена от других (рис. 4.25).

Таблица 4.4

Пример расположения фигур совмещения для простого КМОП-процесса

Область, формируемая шаблоном	Фигуры совмещения
Область p^--легирования	
Область тонкого диэлектрика	
Область поликремния	
Область p^+-легирования	
Область n^+-легирования	
Область контактных окон	
Область металлизации	
Область пассивации	

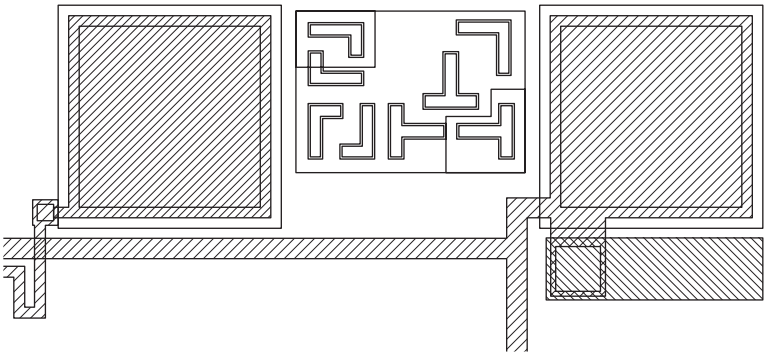


Рис. 4.25. Пример группировки фигур совмещения между двумя контактными площадками

Ниже представлен порядок расчета зазоров в фигурах совмещения.

Задав размер фигуры $A_{ш}$ на шаблоне, размер фигуры $A_{п}$ на пластине определяют по формуле

$$A_{п} = A_{ш} + 2\delta_{н},$$

где $\delta_{н}$ — номинальный зазор между фигурами совмещения, т. е. равномерный зазор, который образуется при номинальных значениях размеров фигур и идеальном их центрировании (совмещении).

Номинальный зазор рассчитывают по формуле

$$\delta_{н} = \frac{200}{\Gamma} + \Delta_{и} + \frac{\Delta_{п} + \Delta_{ш}}{2} + \Delta_{доб},$$

где 200 — линейное разрешение нормального глаза, мкм; Г — кратность увеличения микроскопа, $\Delta_{и}$ — инструментальная погрешность (указывается в паспорте установки совмещения); $\Delta_{п}$, $\Delta_{ш}$ — предельная погрешность размеров фигуры на пластине и фотошаблоне соответственно; $\Delta_{доб}$ — дополнительное расширение зазора для снижения зрительного напряжения оператора.

Предельную погрешность совмещения учитывают в расчетах размеров элементов топологического слоя и оценивают по формуле

$$\Delta_{с} = \Delta_{п} + \Delta_{ш} + \Delta_{и} + \Delta_{t} + \Delta_{доб},$$

где Δt — предельная погрешность относительного расположения модулей в групповом фотошаблоне (погрешность шага). Эта погрешность указывается в паспорте фотоповторителя.

Шаг 9. Разработка конструкторской документации на шаблоны. Разработка комплекта конструкторской документации является завершающим шагом выполнения курсового проекта.

Конструкторская документация в данном случае представляет собой набор послойных чертежей топологических слоев кристалла ИМС, на основе которых изготовляют шаблоны для производства микросхемы.

На каждом чертеже топологического слоя обозначают элемент топологии слоя и проверяют соответствие размера элемента на шаблоне критическому размеру. По этому номеру изготовитель шаблона проверяет размер элемента и устанавливает, насколько он соответствует полю допусков. Критический размер на слое можно проверять либо на темной фигуре (в этом случае его обозначают Рт), либо на светлом элементе топологии слоя — в этом случае на чертеже он указывается как Рс.

Помимо указания элемента топологии, по которому измеряют критический размер, чертеж каждого топологического слоя должен, как было указано, обязательно содержать фигуру совмещения, обозначаемую на чертеже Ф.с. По этой фигуре в случае контактной литографии шаблон совмещают с рисунком топологии кристалла микросхемы.

Кроме того, на каждом чертеже каждого топологического слоя указывают следующие данные:

– наименование или функциональное назначение разработанной микросхемы;

– фамилию и инициалы Главного конструктора — разработчика микросхемы и его внутренний рабочий телефон. Это делают для того, чтобы специалисты отдела шаблонов могли оперативно связаться с Главным конструктором микросхемы для решения текущих рабочих вопросов, связанных с изготовлением шаблонов;

– номер топологического слоя;

– номер текущего варианта. Если по каким-либо причинам в дальнейшем потребуется провести коррекцию топологии этого слоя и заменить шаблон, то в новом чертеже шаблона номер слоя оставляют прежним, а номер варианта увеличивают на единицу;

– наименование топологического слоя, которое всегда начинается словом «область...» (например, «область контактных окон к поликремнию», «область пассивации» и т. д.);

– критический размер.

Пример заполнения таких обозначений приведен ниже:

Декодер один из восьми
Главный конструктор: Сидоров А.В.
Слой 08 Вариант 02
Область пассивации
Критический размер Рс = 16 мкм

Кроме того, на чертеже шаблона топологического слоя указывают направление координатных осей x и y и точку, которая имеет топологические координаты (0, 0).

На рис. 4.26 приведены примеры готовых чертежей топологических слоев (без конструкторских надписей).

В топологических слоях, которые состоят из темных полей, для обозначения границ кристалла по углам вставляют так называемые габаритные уголки, имеющие светлую тональность. Обычные размеры габаритных уголков показаны на рис. 4.27.

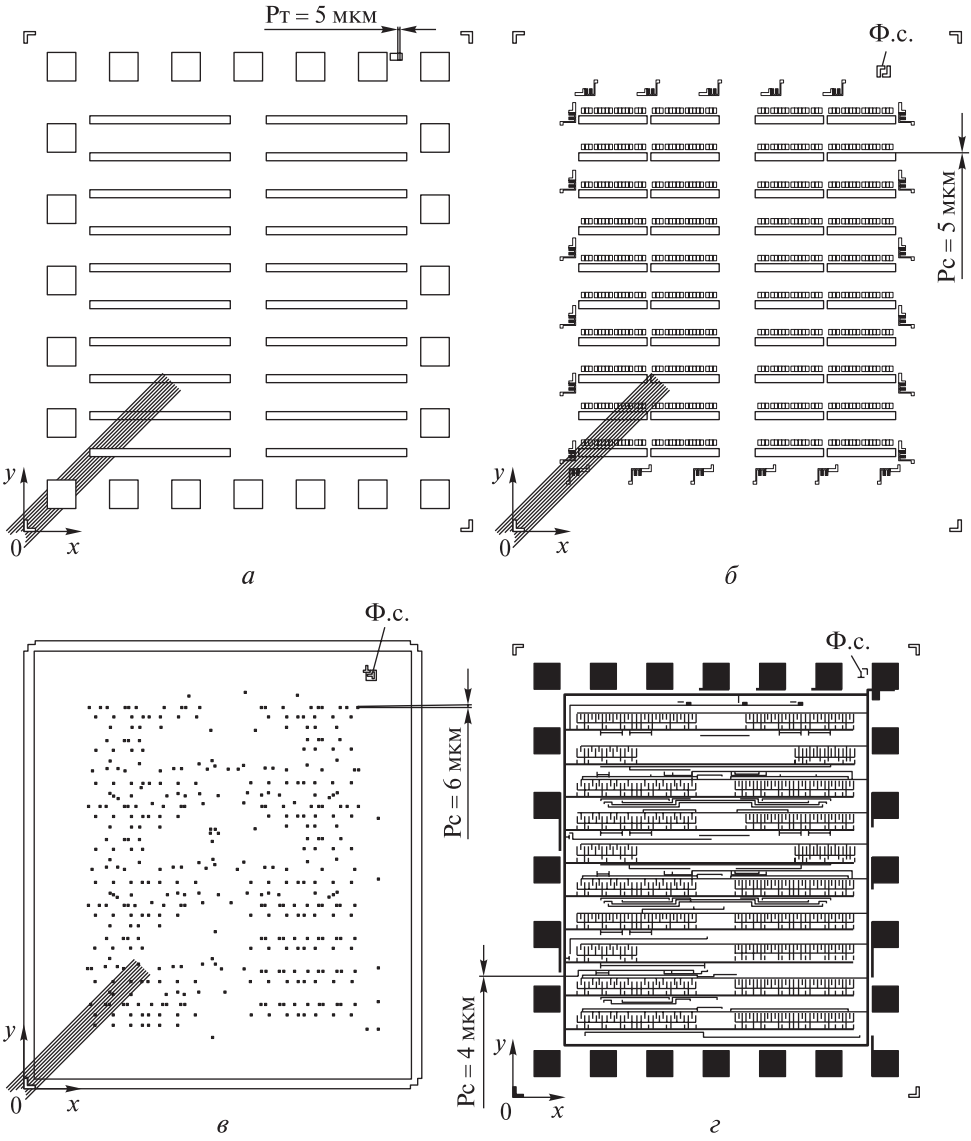


Рис. 4.26. Примеры готовых чертежей топологических слоев:
а — область *p*-легирования (*p*-карманов); *б* — область p^+-легирования; *в* — область контактных окон к поликремнию; *г* — область металлизации

Когда основное поле шаблона имеет преимущественно светлую тональность на границах кристалла, габаритные уголки не вводят.

Примеры оформления чертежей топологических слоев для случаев, когда границы поля кристалла имеют светлую и темную тональности, показаны на рис. 4.27 и 4.28.

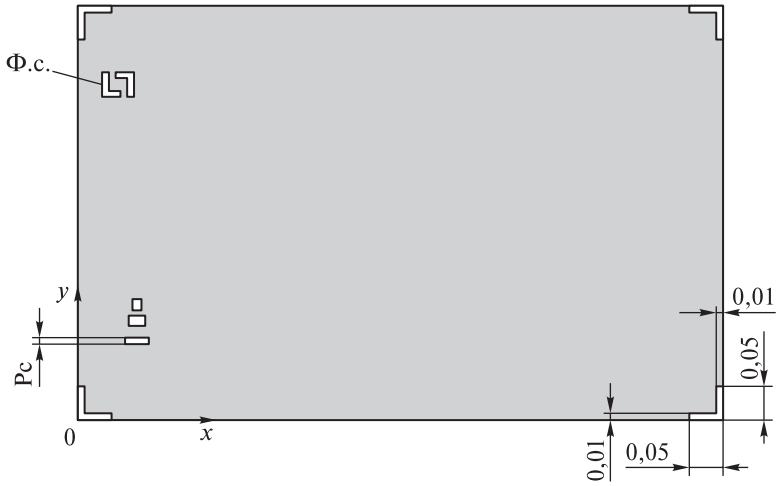


Рис. 4.27. Пример оформления чертежа топологического слоя микросхемы при отсутствии на шаблоне смены тональности на границах поля кристалла

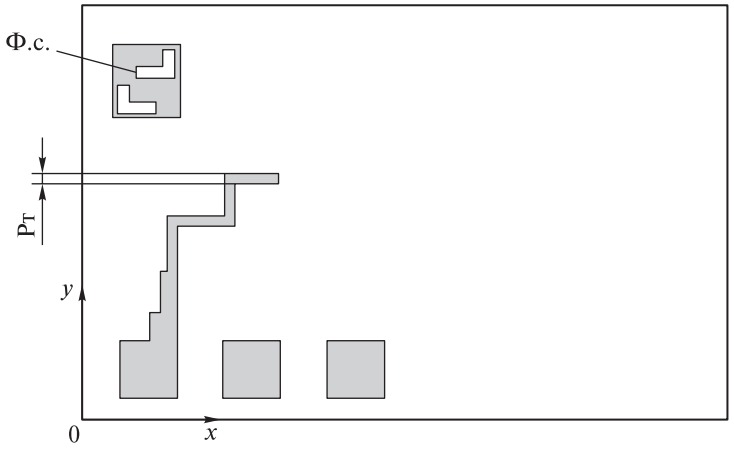


Рис. 4.28. Пример оформления чертежа топологического слоя микросхемы для случая перехода от темной к светлой тональности шаблона на границах поля кристалла

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИН ЗЕМЛИ И ПИТАНИЯ

При проектировании шин земли и питания микросхемы, имеющей два коммутационных слоя, один из которых является слоем металлизации, а второй — поликремнием, разводку выполняют в слое металла в виде гребенчатой структуры так, как показано на рис. 4.29, не допуская переходов из одного топологического слоя в другой.

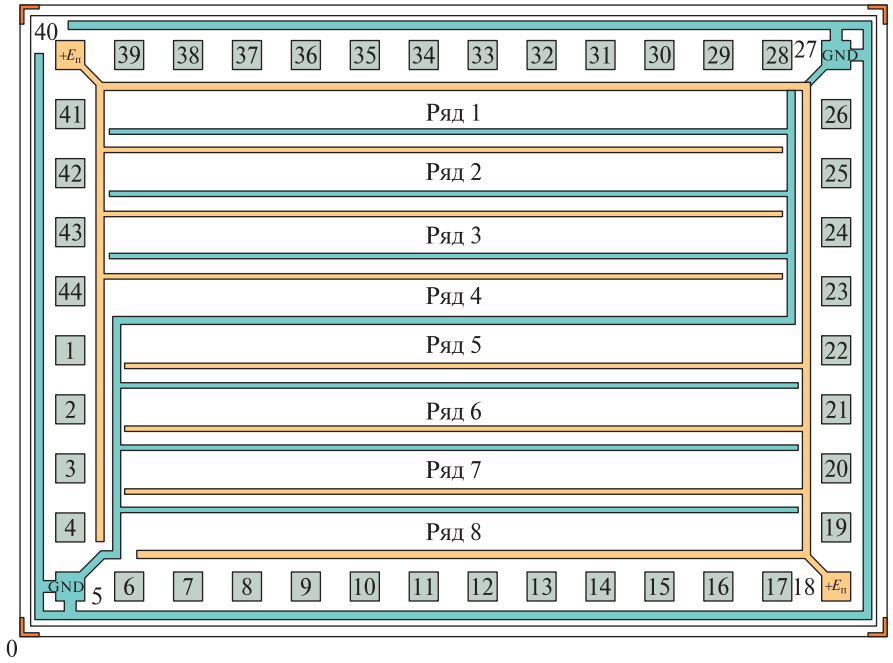


Рис. 4.29. Пример разводки шин земли и питания

Нумерацию контактных площадок выполняют таким образом, чтобы контактная площадка с номером 1 находилась слева в середине ряда контактных площадок кристалла. Номера контактных площадок при монтаже кристалла в корпус рабочей поверхностью вверх увеличивают против хода часовой стрелки, а в случае монтажа рабочей поверхности кристалла вниз — по ходу часовой стрелки.

Гребенчатая структура позволяет разместить в ряд между шинами земли и питания все логические элементы, а пространство между соседними рядами использовать для выполнения горизонтальной трассировки.

Одну из шин (обычно шину земли) часто располагают по контуру кристалла за пределами контактных площадок. Эго упрощает подачу потенциала смещения на изолирующие области.

Размер кристалла по обеим осям координат должен быть кратным значению 0,05 мм, что обусловлено дискретностью шага реза установки для резки пластин на кристаллы. При этом соотношение сторон кристалла проектируемой микросхемы не должно превышать 2:1. Для достижения наибольшей плотности компоновки желательно максимально приблизить форму кристалла к квадратной.

МАСШТАБЫ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

При разработке конструкторской документации на проектируемую микросхему ее выполняют в определенных масштабах.

Приведем типовые масштабы, которые должны быть использованы и при выполнении настоящего курсового проекта.

Топологию базовых логических элементов выполняют на листах формата А4 в масштабе 1000:1 с указанием координатной измерительной линейки по осям *x* и *y*.

Совмещенный чертеж всех топологических слоев разработанного кристалла микросхемы выполняют в одном из следующих масштабов:

– 500:1 — в 1 мм 2 мкм;
– 250:1 — в 1 мм 4 мкм;
– 200:1 — в 1 мм 5 мкм.

Масштаб совмещенного чертежа топологии спроектированного кристалла выбирают из перечисленных выше таким образом, чтобы чертеж уместился на листе формата А1.

На чертеже совмещенной топологии указывают координатные измерительные линейки по осям *x* и *y*. Точка с топологическими координатами (0, 0) принадлежит середине скрайберной дорожки (рис. 4.30).

Чертежи топологических слоев шаблонов выполняют в произвольном масштабе, но так, чтобы каждый чертеж вместе с конструкторскими надписями уместился на листе формата А3.

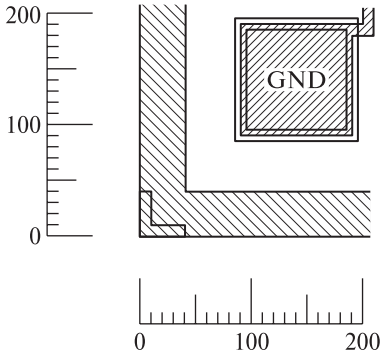


Рис. 4.30. Фрагмент левого нижнего угла чертежа совмещенной топологии с точкой начала координат (0; 0)

4.2.3. СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

В рамках курсового проекта студентом выполняется структурно-топологическое проектирование КМОП-транзисторов. Поперечный разрез КМОП-структуры представлен на рис. 4.31, исходные данные для проектирования — в табл. 4.5.

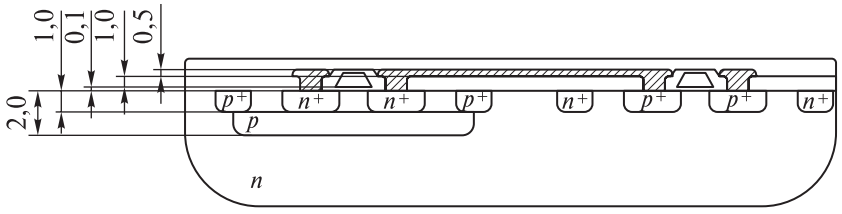


Рис. 4.31. Поперечный разрез КМОП-структуры

Концентрацию примеси в областях истоков и стоков выбирают предельно возможной, обеспечивая поверхностное сопротивление n^+-областей не выше 15 Ом, p^+-областей — не выше 50 Ом.

Таблица 4.5

Типовые исходные данные для структурно-топологического проектирования КМОП-транзисторов

№ п/п	Параметр	Типовое значение
1	Концентрация примеси *n*-типа в подложке $N_{исх} = N_{подл}$, см$^{-3}$	$1{,}5 \cdot 10^{15}$
2	Кристаллографическая ориентация поверхности	<100>
3	Поверхностная концентрация примеси (бор) в *p*-кармане N_0, см$^{-3}$	$2 \cdot 10^{16}$
4	Толщина области *p*-кармана x_p, мкм	2–6
5	Толщина всех областей истока и стока *p*- и *n*-канальных транзисторов (для обеспечения технологической совместимости) x_n, мкм	1,0–2,5
6	Толщина подзатворного диэлектрика (SiO_2), мкм	0,08–0,12
7	Толщина межслойной изоляции и пассивации (SiO_2), мкм	0,6–1,0
8	Толщина поликремния, мкм	1,0–1,2
9	Толщина металлизации (алюминий), мкм	1,0–1,2

Концентрацию примеси в подложке уточняют при расчете порогового напряжения *p*-канальных транзисторов.

Толщину подзатворного диэлектрика $d_з$, мкм, рассчитывают из условий электрической прочности. Пробивная напряженность пленки SiO_2, выращенной в сухом кислороде: $E_{пр} = 5 \cdot 10^6$ В/см. Напряжение пробоя $U_{пр}$, В, должно в 2–3 раза превышать напряжение питания:

$$U_{пр} = (2-3)U_{пит};$$

$$d_з \geq \frac{10^4 U_{пр}}{E_{пр}}.$$

Расчет технологических режимов формирования областей МДП-транзистора проводят для одно- и двухстадийного процессов термической диффузии примеси.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАБОЧИХ ОБЛАСТЕЙ ТРАНЗИСТОРА

ФОРМИРОВАНИЕ *p*-КАРМАНА

Поскольку *p*-карман имеет невысокую поверхностную концентрацию и значительную глубину, для его формирования используется двухстадийный процесс термической диффузии.

Расчет параметров разгонки. Вычисляют произведение $D_p t_p$, см^2, коэффициента диффузии при разгонке D_p и времени разгонки t_p:

$$D_p t_p = \frac{x_n^2}{4 \ln\left(\frac{N_0}{N_{исх}}\right)}.$$

Значение поверхностной концентрации примеси $N_{пов}$ задают из условия $N_0 < N_{пов} < N_{пред}$, где $N_{пред}$ — концентрация предшествующего слоя.

Задавшись значением температуры разгонки T_p из диапазона 1000...1200 °С, по графику $f(t_p, N_0)$, приведенному на рис. 4.32, определяют значение коэффициента диффузии при разгонке D_p, см^2/с.

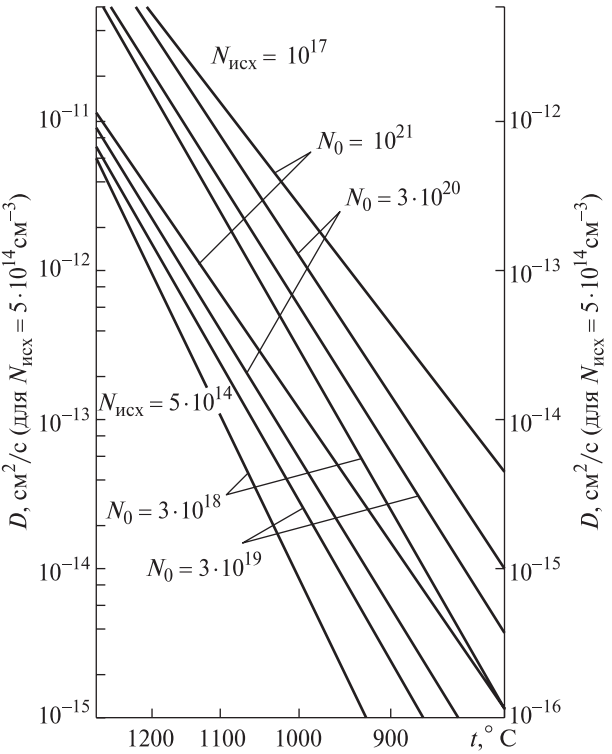


Рис. 4.32. Температурная зависимость коэффициента диффузии фосфора и бора в кремний

Вычисляют время разгонки t_p, мин:

$$t_p = \frac{D_p t_p}{D_p}.$$

Определяют необходимую дозу легирования Q, см$^{-2}$:

$$Q = N_0 \sqrt{\pi D_p t_p}.$$

Расчет параметров загонки. Вычисляют произведение $D_з t_з$, см^2, коэффициента диффузии при загонке $D_з$ и времени загонки $t_з$:

$$D_з t_з = \left(\frac{Q\sqrt{\pi}}{2N_{пов}} \right)^2.$$

Задавшись значением температуры загонки из диапазона 800...1000 °С, по графику, приведенному на рис. 4.32 $f(t_з, N_0)$, определяют значение коэффициента диффузии при загонке $D_з$, см^2/с:

Вычисляют время загонки $t_з$, мин:

$$t_з = \frac{D_з t_з}{D_з}.$$

ФОРМИРОВАНИЕ p^+-ОБЛАСТЕЙ (СТОКА И ИСТОКА p-КАНАЛЬНОГО ТРАНЗИСТОРА)

Поскольку p^+-области имеют высокую поверхностную концентрацию и малую глубину, для их формирования применяется одностадийный процесс термической диффузии.

Вычисляют значение функции ошибок:

$$\operatorname{erfc}(V) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x_p}{2\sqrt{D_з t_з}} \right) = \frac{N_{исх}}{N_0}.$$

Значение параметра V выбирают по табл. 4.6.

Таблица 4.6

Дополнения функции ошибок $\operatorname{erfc}(V) = 1 - \operatorname{erf}(V)$

V	erfc(V)	V	erfc(V)	V	erfc(V)	V	erfc(V)
0,0	1,00000	1,0	0,15730	2,0	0,004680	3,0	0,000022090
0,1	0,88754	1,1	0,11980	2,1	0,002980	3,1	0,000011650
0,2	0,77730	1,2	0,08969	2,2	0,001860	3,2	0,000006030
0,3	0,67137	1,3	0,06599	2,3	0,001140	3,3	0,000003060
0,4	0,57161	1,4	0,04772	2,4	0,000689	3,4	0,000001520
0,5	0,47950	1,5	0,03390	2,5	0,000407	3,5	0,000000743
0,6	0,39614	1,6	0,02365	2,6	0,000236	3,6	0,000000356
0,7	0,32220	1,7	0,01621	2,7	0,000134	3,7	0,000000167
0,8	0,25790	1,8	0,01091	2,8	0,000075	3,8	0,000000077
0,9	0,20309	1,9	0,00721	2,9	0,000041	3,9	0,000000035

Вычисляют произведение Dt, см^2, коэффициента диффузии и времени диффузии:

$$Dt = \left(\frac{x_p}{2V} \right)^2.$$

Задавшись значением температуры легирования из диапазона 800...1000 °С, по графику на рис. 4.32 $f(t_з, N_0)$ определяют значение коэффициента диффузии D, см^2/с.

Вычисляют время диффузии t, мин:

$$t = \frac{Dt}{D}.$$

ФОРМИРОВАНИЕ n^+-ОБЛАСТЕЙ (СТОКА И ИСТОКА n-КАНАЛЬНОГО ТРАНЗИСТОРА)

Поскольку n^+-области имеют высокую поверхностную концентрацию и малую глубину, для их формирования применяется одностадийный процесс термической диффузии.

Области стока и истока n-канального транзистора формируются в p-кармане, поэтому исходной концентрацией примеси является концентрация, полученная после диффузии p-кармана. Исходную концентрацию $N_{исх}$, см$^{-3}$, можно рассчитать по формуле

$$N_{исх} = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_р t_р}} \exp\left(-\left(\frac{x_n}{2\sqrt{D_р t_р}} \right)^2 \right).$$

Вычисляют значение функции ошибок:

$$\operatorname{erfc}(V) = \operatorname{erf}\left(\frac{x_n}{2\sqrt{D_з t_з}} \right) = \frac{N_{исх}}{N_0}.$$

Значение параметра V выбирают по табл. 4.6.

Вычисляют произведение Dt, см^2, коэффициента диффузии и времени диффузии:

$$Dt = \left(\frac{x_p}{2V} \right)^2.$$

Задавшись значением температуры легирования из диапазона 800...1000 °С, по графику, приведенному на рис. 4.32 $f(t_з, N_0)$, определяют значение коэффициента диффузии D, см^2/с.

Вычисляют время диффузии t, мин:

$$t = \frac{Dt}{D}.$$

Следует отметить, что, исходя из технологических возможностей оборудования, необходимо обеспечить время выполнения процессов термической диффузии примеси не менее 30...40 мин.

РАСЧЕТ УДЕЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ

Удельное поверхностное сопротивление $R_{сл}$, Ом, определяют по формуле

$$R_{сл} = \frac{\rho}{x_п},$$

где ρ — удельное объемное сопротивление кремния, Ом·см; $x_п$ — глубина p–n-перехода (в данном случае — толщина слоя), см.

Определить значение ρ, Ом·см, можно по формуле

$$\rho = \frac{1}{q\mu N_{ср.эф}},$$

где q — заряд электрона, Кл; μ — подвижность носителей заряда, см^2/(В·с); $N_{ср.эф}$ — средняя эффективная концентрация примеси в слое, см$^{-3}$.

В свою очередь, значение $N_{ср.эф}$, см$^{-3}$, определяют по формуле

$$N_{ср.эф} = \frac{Q_п}{x_п},$$

где $Q_п$ — эффективная доза легирования (за вычетом примеси, находящейся ниже p–n-перехода), см$^{-2}$.

Учитывая сильную крутизну зависимости концентрации примеси от глубины p–n-перехода, для оценочных расчетов можно принять $Q_п = Q$. По приведенным выше зависимостям рассчитывают удельное поверхностное сопротивление p-кармана, n^+- и p^+-областей.

РАСЧЕТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

РАСЧЕТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ *p*–*n*-ПЕРЕХОДА *p*-КАРМАН–ПОДЛОЖКА

Расчет для донной части перехода. Градиент a, см$^{-4}$, концентрации примеси на донной части перехода вычисляют по формуле

$$a = \frac{-Qx_p}{2D_р t_р \sqrt{\pi D_р t_р}} \exp\left(-\left(\frac{x_p^2}{4D_р t_р}\right)\right),$$

где x_p — толщина области p-кармана.

Поскольку структура получена с помощью диффузии и переход является плавным, пробивное напряжение для данной части перехода $U_{пр}$, В, рассчитывают по формуле

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 E_{\max}^3}{q|a|}},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость подложки, для кремния ε = 11,7; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-14}$ Ф/см; $E_{\max}$ — максимальная напряженность поля, $E_{\max} = 3\cdot 10^5$ В/см; q — заряд электрона, $q = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл; a — градиент эффективной концентрации примеси, см$^{-4}$.

Расчет для боковой части перехода. Для боковой части перехода справедлива следующая формула для градиента концентрации введенной примеси:

$$a = \frac{-0{,}5N_{0\text{з}}}{\sqrt{\pi D_{\text{р}} t_{\text{р}}}} \exp\left(-\left(\frac{x_p^2}{4D_{\text{р}}t_{\text{р}}}\right)\right).$$

Поскольку структура получена с помощью диффузии и переход является плавным, пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, В, рассчитывается по формуле

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 E_{\max}^3}{q|a|}}.$$

РАСЧЕТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ *p*–*n*-ПЕРЕХОДА n^+-ОБЛАСТЬ–*p*-КАРМАН

Поскольку n^+-область формируется в процессе одностадийной диффузии, для вычисления градиента концентрации a_n^+, см$^{-4}$, введенной примеси справедлива формула

$$a_n^+ = \frac{-N_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4Dt}\right)\right),$$

где x_n — толщина n^+-области.

Градиент концентрации a_p, см$^{-4}$, примеси в *p*-кармане на глубине, соответствующей толщине x_n, вычисляют по формуле

$$a_p = \frac{-Qx_p}{2D_{\text{р}}t_{\text{р}}\sqrt{\pi D_{\text{р}}t_{\text{р}}}} \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4D_{\text{р}}t_{\text{р}}}\right)\right).$$

Градиент эффективной концентрации $a_{\text{эф}}$, см$^{-4}$, примеси рассчитывают по формуле

$$a_{\text{эф}} = a_{n^+} - a_p.$$

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 E_{\max}^3}{q|a_{\text{эф}}|}}.$$

РАСЧЕТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ *p–n*-ПЕРЕХОДА *p*⁺-ОБЛАСТЬ–ПОДЛОЖКА

Поскольку p^+-область формируется в процессе одностадийной диффузии, для вычисления градиента концентрации a_p^+, см$^{-4}$, введенной примеси справедлива формула

$$a_p^+ = \frac{-N_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\left(\frac{x_n^2}{4Dt}\right)\right).$$

Подложка — это пластина монокристаллического кремния, равномерно легированная донорной примесью, поэтому градиент концентрации примеси в подложке $a_{\text{подл}} = 0$.

Градиент $a_{\text{эф}}$, см$^{-4}$, эффективной концентрации, примеси рассчитывают по формуле

$$a_{\text{эф}} = a_{p^+} - a_{\text{подл}}.$$

Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$, В, вычисляют по формуле

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0 E_{\max}^3}{q\left|a_{\text{эф}}\right|}}.$$

Номинальное напряжение электропитания транзистора должно превышать пробивное напряжение не менее чем в 3–4 раза.

РАСЧЕТ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

РАСЧЕТ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПАРАЗИТНОГО КАНАЛА В *n*-ПОДЛОЖКЕ

Паразитный *p*-канал в подложке возникает в системе Al–SiO_2–*p*–Si. Удельную емкость C_0, Ф/см^2, проводник–паразитный канал рассчитывают по формуле

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{д}}}{d_{\text{д}}},$$

где $\varepsilon_{\text{д}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость SiO_2, $\varepsilon_{\text{д}} = 3{,}9$; $d_{\text{д}}$ — суммарная толщина подзатворного диэлектрика и изолирующего оксида, см.

Пороговое напряжение U_0, В, при котором под металлической разводкой и защитным оксидом образуется паразитный канал, может быть оценено по формуле

$$U_0 = \varphi_{\text{м–п}} - \frac{Q_{0\text{Si}}}{C_0} - 2\varphi_F - \frac{\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_n N_0 \varphi_F}}{C_0},$$

где $\varphi_{\text{м–п}}$ — разность работ выхода материала затвора и кремния, поскольку материал одинаковый, $\varphi_{\text{м–п}} = 0$; $Q_{0\text{Si}}$ — плотность заряда поверхностных состояний; для кристаллографических ориентаций <111>, <110>, <100> $8 \cdot 10^{-8}$;

$3{,}2\cdot10^{-8}$; $1{,}44\cdot10^{-8}$ Кл/см, соответственно; φ_F — модуль потенциала Ферми, $\varphi_F = 0{,}026\ln\left(N_0/1{,}38\cdot10^{10}\right)$, В; ε_n — относительная диэлектрическая проницаемость кремния, $\varepsilon_n = 11{,}7$; N_0 — концентрация примеси на поверхности подложки, см$^{-3}$.

РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПАРАЗИТНОГО КАНАЛА В *p*-КАРМАНЕ

Паразитный *n*-канал в *p*-кармане возникает в системе Al–SiO_2–*n*–Si. Пороговое напряжение U_0, В, при котором под металлической разводкой и защитным оксидом образуется паразитный канал, может быть оценено по формуле

$$U_0 = \varphi_{\text{м–п}} - \frac{Q_{0\text{Si}}}{C_0} + 2\varphi_F + \frac{\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_n N_0\varphi_F}}{C_0}.$$

Значение разности работ выхода $\varphi_{\text{м–п}}$ для системы Al–SiO_2–*n*–Si выбирают по табл. 4.7 при заданном значении концентрации примеси на поверхности N_0.

Таблица 4.7

Значения разности работ выхода $\varphi_{\text{м–п}}$, В

N_0, см$^{-3}$	Система Al–SiO_2–*n*–Si	Система Al–SiO_2–*p*–Si
10^{14}	–0,36	–0,82
10^{15}	–0,30	–0,88
10^{16}	–0,24	–0,94
10^{17}	–0,18	–1,00

Полученные значения порогового напряжения паразитных транзисторов сравнивают с номинальным напряжением электропитания транзистора. В случае когда пороговые напряжения меньше напряжения питания, возможно ввести каналоограничительные области p^+- и n^+-типов.

РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В *n*- И *p*-КАНАЛЬНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Канал в *n*-канальном транзисторе является системой Al–SiO_2–*n*–Si. Удельную емкость C_0, Ф/см^2, затвор — канал рассчитывают по формуле

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_д}{d_д},$$

где $d_д$ — толщина подзатворного диэлектрика, см.

Пороговое напряжение U_0, В, при котором образуется канал, может быть оценено по формуле

$$U_0 = \varphi_{\text{м–п}} - \frac{Q_{0\text{Si}}}{C_0} + 2\varphi_F + \frac{\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_n N_0\varphi_F}}{C_0},$$

здесь $\varphi_{\text{м–п}} = 0$.

Канал в *p*-канальном транзисторе является системой Al–SiO_2–*p*–Si, расчет аналогичен приведенному выше.

Полученные значения порогового напряжения паразитных транзисторов сравнивают с номинальным напряжением электропитания транзистора.

РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ ТРАНЗИСТОРОВ

Проектирование топологии *n*-канального МОП-транзистора выполняют в целой микронной координатной сетке. Это означает, что все координатные точки границ областей топологии МОП-транзистора должны лежать в узлах такой сетки, а их координаты должны выражаться только целыми числами.

Проектирование начинают с области затвора, которая представляет собой полоску минимальных размеров, длина которой соответствует проектной норме заданного технологического процесса. Длина полоски на данном этапе проектирования значения не имеет, однако целесообразно выбрать ее примерно в 5 раз большей ширины затвора.

Затем на расстоянии 2 мкм по обе стороны от полоски затвора располагают контакты к областям стока и истока. Размеры контактных окон должны быть как минимум на 1 мкм больше ширины затвора, а области контактов должны иметь форму квадратов.

Каждое контактное окно на 1 мкм со всех сторон перекрывают областью металлизации.

Затем обводят область контактных окон с отступом на 2 мкм прямоугольной областью. Это будет границей областей истока и стока *n*-канального МОП-транзистора (легирование n^+-типа).

Полученную область с зазором 2 мкм обводят с внешней стороны еще одной прямоугольной областью. Это будет область p^--легирования кармана МОП-транзистора.

В результате получаем топологию МОП-транзистора (рис. 4.33).

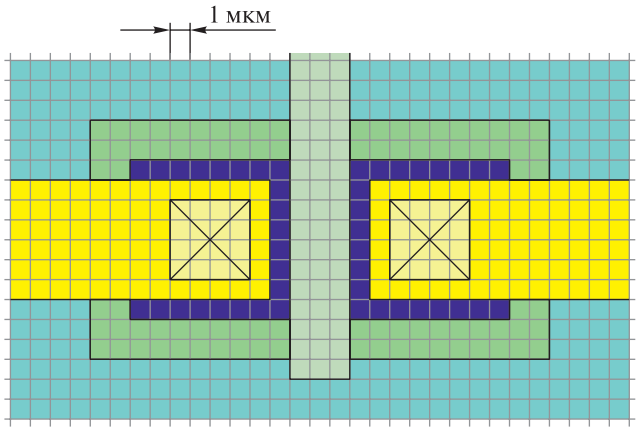


Рис. 4.33. Пример топологии *n*-канального МОП-транзистора

Проектирование топологии *n*-канального МОП-транзистора завершено. На рис. 4.33 области закрашены по-разному, при этом чем насыщеннее цвет, тем сильнее степень легирования. Области металлизации обычно закрашивают желтым цветом — это цвет, который мы видим, рассматривая алюминиевые соединительные дорожки проводников под микроскопом. Области поликремниевых затворов и соединительных проводников закрашены серым цветом.

Топологию *p*-канального МОП-транзистора проектируют аналогичным образом.

Расчетная методика для определения топологии МОП-транзистора приведена ниже. Исходными данными для расчета топологии служат выбранная проектная топологическая норма (минимальная ширина поликремниевой области) $a_{\min}$, мкм; погрешность (предельное отклонение) размера топологического элемента на подложке $\Delta_{\text{п}}$, мкм; погрешность (предельное отклонение) совмещения двух топологических слоев, формируемых на смежных этапах литографии, $\Delta_{\text{с}}$, мкм. Схемы для топологического расчета области затвора МОП-транзистора приведены на рис. 4.34.

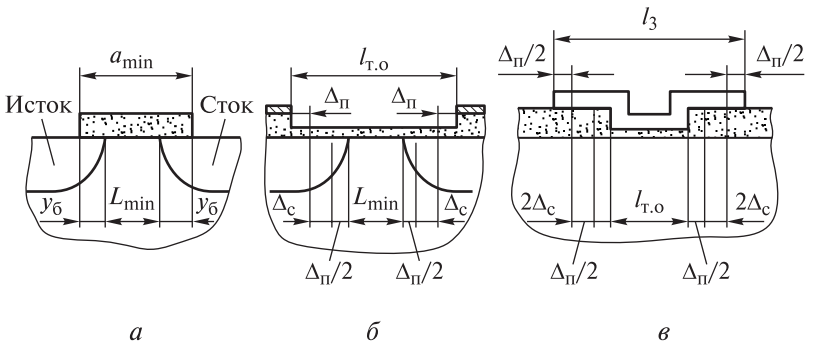


Рис. 4.34. Схемы к топологическому расчету области затвора МОП-транзистора

Минимальную длину $L_{\min}$, мкм, канала с учетом условия смыкания областей истока и стока определяют по формуле

$$L_{\min} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon U_{\text{пит}}}{qN}},$$

где N — концентрация примеси в подложке на уровне дна истока (стока), см^{-3}.

Реальная длина канала определяется технологическими возможностями и ограничениями. Достижимый минимум длины канала зависит от минимальной длины перемычки между кромками окон под диффузию стока и истока (принимают равной топологической норме $a_{\min}$) и шириной боковой диффузии $y_{\text{б}}$ под маскирующий оксид, которая составляет $(0{,}75...0{,}85)x_n$. Таким образом, длину канала $L_{\min}$ (рис. 4.34, *а*) технологически определяют по формуле

$$L_{\min} = a_{\min} - 2y_{\text{б}} = a_{\min} - 2x_n.$$

Из двух полученных значений $L_{\min}$ выбирают большее.

Длину тонкого оксида $l_{т.о}$, мкм, которая должна гарантировать перекрытие канала по всей его длине (рис. 4.34, *б*), определяют по формуле

$$l_{т.о} = L_{\min} + 2\Delta_{п} + 2\Delta_{с}.$$

Длину затвора $l_{з}$, мкм, которая должна гарантировать перекрытие тонкого оксида по всей его длине (рис. 4.34, *в*), определяют по формуле

$$l_{з} = l_{т.о} + 2\Delta_{п} + 4\Delta_{с}.$$

Ширину канала Z, мкм, определяют по формуле

$$Z = \frac{bL_{\min}}{\mu C_0},$$

где b — заданная удельная крутизна вольт-амперной характеристики МОП-транзистора; μ — подвижность носителей в поверхностном слое, см^2/(В·с).

Подвижность носителей μ в поверхностном слое для кремния при температуре 300 К определяют по приведенным ниже формулам:

– подвижность дырок μ_p, см^2/(В·с)

$$\mu_p = 47{,}7 + \frac{447{,}3}{1 + \left(\frac{N_{\Sigma}}{6{,}3 \cdot 10^{16}}\right)^{0{,}76}};$$

– подвижность электронов μ_n, см^2/(В·с)

$$\mu_n = 65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{N_{\Sigma}}{8{,}5 \cdot 10^{16}}\right)^{0{,}72}},$$

где N_{Σ} — суммарная концентрация примеси, см$^{-3}$.

Ширину тонкого оксида $Z_{т.о}$, мкм, определяют по формуле

$$Z_{т.о} = Z + 2\Delta_{п} + 2\Delta_{с}.$$

Ширину затвора $Z_{з}$, мкм, определяют по формуле

$$Z_{з} = Z + 2\Delta_{п} + 4\Delta_{с}.$$

Каналоограничительные области (n^+ и p^+) при необходимости формируют одновременно с соответствующими областями истоков и стоков на расстоянии примерно 10 мкм от соседних областей с проводимостью противоположного типа. Такие же расстояния предусматривают между n^+-истоками (стоками) и границами изолирующей p-области.

4.3. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Подготовленный к защите курсовой проект должен содержать перечисленные ниже документы.

1. Расчетно-пояснительную записку (РПЗ), в которую включены:

– исходные данные по проекту;

– результаты моделирования работы схемы;

– таблица топологических норм;

– структурно-топологический расчет МОП-транзисторов;

– выбранная схема защиты;

– расчет фигур совмещения;

– описание принципов компоновки кристалла ИМС.

2. Графическую часть.

Структура РПЗ:

1. Титульный лист.

Титульный лист оформляется по установленной единой форме, отчет оформляется в соответствии с требованиями Положения «О порядке организации и проведения практики студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по основным образовательным программам бакалавриата, специалитета, магистратуры».

2. Техническое задание на выполнение курсового проекта.

3. Календарный план выполнения курсового проекта.

4. Содержание (оглавление).

5. Введение.

Во введении должны быть изложены цели и задачи курсового проекта.

6. Основная часть.

В основной части курсового проекта должна содержаться следующая информация:

– разработка электрической принципиальной схемы устройства;

– разработка этой схемы в базовых логических элементах;

– перечень проектных топологических норм, в которых спроектирована топология кристалла;

– расчет технологических параметров процесса формирования областей *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов;

– расчет пробивного напряжения сформированных структур;

– проектирование топологии *n*- и *p*-канального МОП-транзисторов;

– проектирование топологии схем защиты входных цепей микросхемы от воздействия статического электричества;

– проектирование совмещенной и послойной топологии кристалла;

– расчет знаков совмещения.

7. Заключение.

В заключении должны быть представлены краткие выводы по результатам выполнения курсового проекта.

8. Список использованных источников.

9. Приложения.

В качестве приложения к курсовому проекту приобщается полный комплект конструкторской документации на спроектированный кристалл, а именно:

– принципиальная электрическая схема цифрового устройства (лист формата А3);

– временны́е диаграммы работы схемы (лист формата А4);

– принципиальная электрическая схема в базисе основных логических элементов (лист формата А3 либо нестандартного формата);

– проектные топологические нормы спроектированного БМК (лист формата А4);

– принципиальные электрические схемы базовых логических элементов и других узлов, входящих в спроектированный БМК, с указанием номиналов резисторов (листы формата А4);

– чертежи топологии базовых логических элементов и других схем, входящих в состав БМК (листы формата А4 либо А3);

– совмещенный топологический чертеж БМК (лист формата А1);

– схема расположения логических элементов на кристалле (лист формата А4 или А3);

– комплект послойных топологических чертежей спроектированного БМК (лист формата А3).

5. Нормативная документация

5.1. 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

«Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

для направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение»
(уровень бакалавриата)

Авторы программы:
Д.В. Андреев, доцент, канд. техн. наук
А.Е. Курносенко, доцент
В.В. Макарчук, доцент, канд. техн. наук
В.А. Соловьев, доцент

Москва

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ), СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

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 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата);

– основной профессиональной образовательной программой (ОПОП) по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата);

– учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных ОПОП на основе СУОС 3++ по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Для категорий «знать», «уметь», «владеть» планируется достижение результатов обучения, вносящих на соответствующих уровнях вклад в формирование компетенций, которые предусмотрены основной профессиональной образовательной программой.

Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в блок Б1 «Дисциплины (модули)» образовательной программы по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

При изучении дисциплины предполагается предварительное освоение следующих дисциплин учебного плана:

– «Физико-химические основы электронных средств»;

– «Физические основы микроэлектроники».

Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее для изучения следующей дисциплины образовательной программы:

– «Проектирование микропроцессорных систем».

Освоение учебной дисциплины связано с формированием компетенций с учетом матрицы компетенций ОПОП для направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общий объем дисциплины составляет шесть зачетных единиц (з. е.), 216 акад. ч (162 астр. ч), в том числе: первый семестр – 3 з. е. (108 акад. ч), второй семестр – 3 з. е. (108 акад. ч).

Таблица 5.1

Объем дисциплины по видам учебных занятий

Виды учебной работы	Объем по семестрам, акад. ч		
	Всего	Первый семестр	Второй семестр
Объем дисциплины	108	108	108
Аудиторная работа*	68	68	0
Лекции (Л)	51	51	0
Лабораторные работы (ЛР)	17	17	0
Самостоятельная работа (СР)	40	40	108
Проработка учебного материала лекций	6,25	6,25	0
Подготовка к лабораторным работам	16	16	0
Выполнение домашнего задания	15	15	0
Выполнение курсового проекта	108	0	108
Другие виды самостоятельной работы	2,75	2,75	0
Вид промежуточной аттестации		Зачет	Дифференцированный зачет

* В том числе в форме практической подготовки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ, СТРУКТУРИРОВАННОЕ ПО МОДУЛЯМ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ, С УКАЗАНИЕМ ОТВЕДЕННОГО НА НИХ ЧИСЛА АКАДЕМИЧЕСКИХ ИЛИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЧАСОВ И ВИДОВ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ

Таблица 5.2

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
1	«Формирование пленок из проводящих, резистивных и диэлектрических материалов»	
Лекции		21
1.1	Введение	6
1.2	Подложки интегральных микросхем	2
1.3	Тонкопленочная и толстопленочная технология	9
1.4	Пленочные элементы интегральных микросхем	4
Лабораторные работы		6
ЛР1.1	Анализ топологии полупроводниковой интегральной микросхемы	4
ЛР1.2	Анализ состава и размещения элементов базового матричного кристалла	4
Самостоятельная работа		14
СР1.1	Проработка учебного материала лекций	2,5
СР1.2	Подготовка к лабораторным работам	6
СР1.3	Выполнение домашнего задания	3
СР1.4	Другие виды самостоятельной работы	2,5
2	«Формирование полупроводниковых структур»	
Лекции		15
2.1	Основы конструирования полупроводниковых интегральных микросхем	2
2.2	Литография	6
2.3	Термическая диффузия	2
2.4	Ионная имплантация, эпитаксия и термическое окисление кремния	2
2.5	Последовательность создания основных структур интегральных микросхем	3

Окончание табл. 5.2

№ п/п	Наименование модуля, содержание	Часы
2.6	Проектирование топологии интегральных микросхем	2
Лабораторные работы		6
ЛР2.1	Исследование точности совмещения комплекта фотошаблонов	4
Самостоятельная работа		14
СР2.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР2.2	Подготовка к лабораторным работам	6
СР2.3	Выполнение домашнего задания	6
СР2.4	Другие виды самостоятельной работы	0
3	«Корпусирование и герметизация интегральных микросхем и микросборок»	
Лекции		15
3.1	Разделение пластин на кристаллы	2
3.2	Корпуса интегральных микросхем	2
3.3	Монтаж кристаллов в корпуса	2
3.4	Герметизация интегральных микросхем	2
3.5	Перспективы развития микро- и наноэлектроники	2
3.6	Технологические основы формирования наноструктур	5
Лабораторные работы		5
ЛР3.1	Экспериментальные исследования многослойных структур металл–оксид–металл, обладающих мемристивным эффектом	5
Самостоятельная работа		12
СР3.1	Проработка учебного материала лекций	1,75
СР3.2	Подготовка к лабораторным работам	4
СР3.3	Выполнение домашнего задания	6
СР3.4	Другие виды самостоятельной работы	0,25
4	Курсовой проект	108
СР4.1	Выполнение курсового проекта	108

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа студентов по дисциплине обеспечивается следующими учебно-методическими материалами.

1. Рабочая программа дисциплины.
2. Учебная литература и дополнительные материалы (раздел 6 рабочей программы дисциплины).
3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет (раздел 7 рабочей программы дисциплины).
4. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (раздел 8 рабочей программы 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.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине базируется на перечне компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы. Фонд оценочных средств обеспечивает объективный контроль достижения всех результатов обучения, запланированных для дисциплины, и включает в себя:

– перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы;

– описание показателей и критериев оценки компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценки;

– типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, владений и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы;

– методические материалы, определяющие процедуры оценки знаний, умений, владений и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Фонд оценочных средств является приложением к данной рабочей программе дисциплины.

ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев В.В.*, *Столяров А.А.* Физические основы наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 223 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 16).

2. *Варламов П.И.*, *Елсуков К.А.*, *Макарчук В.В.* Технологические процессы в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 175 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 2).

3. *Королёв М.А.*, *Крупкина Т.Ю.*, *Ревелева М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие: в 2 ч. / под ред. Ю.А. Чаплыгина. 4-е изд. М.: Лаборатория знаний, 2020. 400 с.

4. *Макарчук В.В.*, *Родионов И.А.* Проектирование электронной компонентной базы наносистем: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 156 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 5).

5. *Макарчук В.В.*, *Родионов И.А.*, *Цветков Ю.Б.* Методы литографии в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 175 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 9).

6. *Моро У.* Микролитография: в 2 ч.; пер. с англ. М.: Мир, 1990. 606 с.; 634 с.

7. *Панфилов Ю.В.*, *Моисеев К.М.*, *Михайлов В.П.* Высоковакуумные технологические процессы в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 191 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 3).

8. *Парфенов О.Д.* Технология микросхем: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 318 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Красников Г.Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.

2. *Красников Г.Я.*, *Горнев Е.С.*, *Матюшкин И.В.* Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: Техносфера, 2020. 434 с.

3. *Макарчук В.В.* Проектирование топологии биполярного планарно-эпитаксиального транзистора: метод. указания к курсовому проектированию по курсу «Технологические процессы микроэлектроники». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 20 с.

4. *Мурога С.* Системное проектирование сверхбольших интегральных схем: в 2 кн.; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 288 с.; 291 с.

5. *Парфенов О.Д.* Конструирование полупроводниковых интегральных схем: метод. указания по курсовому проектированию по курсу «Конструирование и технология микросхем». М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. 27 с.

6. *Парфенов О.Д.* Расчет и конструирование интегральных резисторов: метод. указания к курсовому проектированию по курсу «Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. 27 с.

7. *Парфенов О.Д.* Расчет и конструирование интегральных транзисторов: метод. указания по курсовому проектированию. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 19 с.

8. *Рабаи Ж.М.*, *Чандракасан А.*, *Николич Б.* Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2007. 912 с.

9. Технология СБИС: в 2 кн. Кн. 1. / К. Пирс, А. Адамс, Дж. Цай, Т. Сейдел, Д. Макгиллис; пер. с англ. под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. 404 с.

10. *Уэйкерли Дж.Ф.* Проектирование цифровых устройств: в 2 т. М.: Постмаркет, 2002. 544 с.

11. *Хоровиц П.*, *Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т.; пер. с англ. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1993. 372 с.; 368 с.; 413 с.

ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТ, РЕКОМЕНДУЕМЫХ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРИ ОСВОЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ*

1. Библиотека МГТУ им. Н.Э. Баумана. http://library.bmstu.ru

2. Видеотека по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». https://vk.com/videos-242540

3. Государственная публичная научно-техническая библиотека России. http://www.gpntb.ru

4. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов. http://school-collection.edu.ru

5. Научная электронная библиотека. http://eLIBRARY.RU

6. Научно-техническая библиотека Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. http://library.bmstu-kaluga.ru

7. Российская государственная библиотека. http://www.rsl.ru

8. Сайт Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана. https://bmstu.press/

9. Сайт кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры». http://iu4.ru

10. Сайт МГТУ им. Н.Э. Баумана. http://bmstu.ru

11. Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов. http://fcior.edu.ru

12. Центральная библиотека образовательных ресурсов Министерства образования и науки РФ. www.edulib.ru

13. Электронно-библиотечная система издательства «Лань». http://e.lanbook.com

* Здесь и далее дата обращения к электронным ресурсам 26.02.2024 г.

14. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека онлайн». http://biblioclub.ru
15. Электронно-библиотечная система «Юрайт». https://biblio-online.ru
16. Электронно-библиотечная система IPRbooks. http://www.iprbookshop.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Приступая к работе, каждый студент должен принимать во внимание нижеследующие положения.

Дисциплина построена по модульному принципу, каждый модуль представляет собой логически завершенный раздел курса. Дисциплина делится на три модуля.

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, предложенных для самостоятельной проработки.

Лабораторные работы предназначены для приобретения опыта практической реализации основной профессиональной образовательной программы. Методические указания к выполнению лабораторных работ 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, которые предусматривают 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 обучающимся учебной информации, необходимой для последующего выполнения работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Самостоятельная работа студентов включает следующие виды: проработка учебного материала лекций, подготовка к лабораторным работам, выполнение домашнего задания. Результаты всех видов работы студентов формируются в виде их личного рейтинга, который учитывается при проведении 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, почерпнутой из всех возможных источников.

Текущий контроль проводится в течение каждого модуля, его итоговые результаты складываются из оценок по следующим видам контрольных мероприятий:

– домашнее задание.

Освоение дисциплины и его успешное завершение на стадии промежуточной аттестации возможно только при регулярной работе в течение семестра и планомерном прохождении текущего контроля. Набрать рейтинг по всем модулям в каждом семестре, пройти по каждому модулю плановые контрольные мероприятия во время экзаменационной сессии невозможно.

Для завершения работы в семестре студент должен выполнить все контрольные мероприятия.

Промежуточная аттестация по дисциплине проходит в форме зачета.

Методика оценки по рейтингу

Студент, выполнивший все предусмотренные учебным планом задания и прошедший все контрольные мероприятия, получает итоговую оценку по дисциплине за семестр в соответствии с приведенной ниже шкалой:

Рейтинг	Оценка на зачете
85–100	Зачтено
71–84	Зачтено
60–70	Зачтено
0–59	Не зачтено

Оценка знаний по теме дисциплины ведется в соответствии с Положением о текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ, ВКЛЮЧАЯ ПЕРЕЧЕНЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ БАЗ ДАННЫХ

Информационные технологии:

– 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, формирование электронного портфолио обучающегося, в том числе сохранение 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;

– электронная образовательная система МГТУ им. Н.Э. Баумана. https://e-learning.bmstu.ru/iu4/

– система BigBlueButton. https://webinar.bmstu.ru

Программное обеспечение:

– LibreOffice.

Информационные справочные системы:

– информационно-правовая система «Гарант». http://www.garant.ru

– информационно-правовая система «Консультант Плюс». http://www.consultant.ru

– каталог национальных стандартов. https://www.gostinfo.ru/catalog/gostlist/

– электронно-информационный портал по электронике. http://www.radioradar.net/

Профессиональные базы данных:

– ресурс «Машиностроение». http://www.i-mash.ru

– портал машиностроения. http://www.mashportal.ru

– ресурс «Радиоэлектронные схемы и компоненты». https://www.radiokot.ru/

– портал Nano. https://nano.nature.com/

ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Таблица 5.3

Перечень материально-технического обеспечения дисциплины

№ п/п	Вид занятий	Вид и наименование оборудования
1	Лекции	Специально оборудованные аудитории с мультимедийными средствами, средствами звуковоспроизведения и имеющими выход в сеть Интернет; помещения для проведения аудиторных занятий, оборудованные учебной мебелью; аудитории, оснащенные компьютерами с доступом к базам данных и сети Интернет; студии; компьютерные классы
2	Лабораторные работы	Специально оборудованные аудитории с мультимедийными средствами, средствами звуковоспроизведения и имеющими выход в сеть Интернет; помещения для проведения аудиторных занятий, оборудованные учебной мебелью; аудитории, оснащенные компьютерами с доступом к базам данных и сети Интернет; студии; компьютерные классы
3	Самостоятельная работа	Библиотека, имеющая рабочие места для студентов; выставочные залы; аудитории, оснащенные компьютерами с доступом к сети Интернет. Социокультурное пространство Университета позволяет студенту качественно выполнять самостоятельную работу

5.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине включают в себя:

– перечень тем для рейтинговых и контрольных мероприятий;

– макет оформления билета к зачету.

Поскольку в МГТУ им. Н.Э. Баумана принята модульно-рейтинговая система, оценочные средства используются только для ликвидации академической задолженности или разницы в программах.

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ДЛЯ РЕЙТИНГОВЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

1. Проектирование интегральных микросхем: задачи и уровни.
2. Классификация полупроводниковых интегральных микросхем.
3. Классификация пленочных интегральных микросхем.
4. Классификация подложек интегральных микросхем.
5. Технология получения чистого кремния.
6. Метод Чохральского.
7. Метод бестигельной зонной плавки.
8. Подложки для пленочных интегральных микросхем.
9. Метод термического вакуумного напыления.
10. Методы уменьшения неоднородности толщины пленок.
11. Проволочные, ленточные и коробчатые испарители.
12. Тигельные испарители.
13. Метод дискретного испарения.
14. Электронно-лучевые испарители.
15. Индукционные испарители.
16. Катодная система распыления.
17. Ионно-плазменная система распыления.
18. Магнетронная система распыления.
19. Способы получения глубокого вакуума.
20. Пленочные резисторы.
21. Пленочные конденсаторы.
22. Пленочные катушки индуктивности.
23. Подгонка значений пленочных элементов.
24. Толстопленочная технология.
25. Биполярные транзисторы в интегральном исполнении.
26. Полевые транзисторы в интегральном исполнении.

27. Диоды в интегральном исполнении.
28. Резисторы в интегральном исполнении.
29. Конденсаторы в интегральном исполнении.
30. Совмещенные интегральные микросхемы.
31. Структура и топология биполярного транзистора.
32. Структура и топология МОП-транзистора.
33. Диоды в интегральном исполнении.
34. Резисторы в интегральном исполнении.
35. Конденсаторы в интегральном исполнении.
36. Пленочные элементы.
37. Фотолитография.
38. Рентгенолитография.
39. Электронолитография.
40. Ионно-лучевая литография.
41. Диффузия из ограниченного источника.
42. Диффузия из неограниченного источника.
43. Ионная имплантация.
44. Эпитаксия.
45. Диффузионно-планарная структура.
46. Эпитаксиально-планарная структура.
47. Структура с диэлектрической изоляцией.
48. Изопланарная структура.
49. Полипланарная структура.
50. КМОП-структура.
51. Структура «кремний на сапфире».
52. Разделение пластин на кристаллы.
53. Способы монтажа кристаллов на подложке.
54. Герметизация методом обволакивания.
55. Метод свободной заливки во вспомогательные формы.
56. Метод свободной заливки в корпус.
57. Компрессионное прессование.
58. Литьевое прессование.
59. Герметизация корпусов клеем.
60. Герметизация корпусов пайкой.
61. Герметизация корпусов холодной сваркой.
62. Герметизация корпусов аргонно-дуговой сваркой.
63. Герметизация корпусов лазерной сваркой.
64. Герметизация корпусов шовной контактной сваркой.
65. Методы контроля герметичности.

ВАРИАНТЫ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Получение чистого кремния. Метод Чохральского.
2. Проекционная фотолитография.
3. Диффузионно-планарная структура.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Электронно-лучевая литография.
2. Эпитаксиально-планарная структура.
3. Скрайбирование.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Диффузия из ограниченного источника.
2. Структура с диэлектрической изоляцией.
3. Резка пластин диском с твердой алмазной кромкой.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Термическое вакуумное напыление: основные принципы.
2. Иммерсионная фотолитография.
3. Резисторы и конденсаторы в интегральном исполнении.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Катодная система распыления.
2. КМОП-структура.
3. Герметизация корпусов холодной сваркой.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Диффузия из неограниченного источника.
2. Пленочные резисторы.
3. Герметизация корпусов лазерной сваркой.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Ионно-плазменная система распыления.
2. Ионная имплантация.
3. КНС-структура.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Магнетронная система распыления.
2. Рентгенолитография.
3. Структура и топология биполярного транзистора.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Электронно-лучевая литография.
2. Пленочные конденсаторы.
3. Герметизация методом обволакивания.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Проволочные, ленточные и коробчатые испарители.
2. Эпитаксия.
3. Диоды в интегральном исполнении.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 11

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Тигельные испарители. Метод дискретного испарения.
2. Ионно-лучевая литография.
3. Структура и топология МОП-транзистора.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 12

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Диффузия из неограниченного источника.
2. Пленочные катушки индуктивности.
3. Метод свободной заливки во вспомогательные формы.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки.
2. Совмещенные интегральные микросхемы.
3. Методы контроля герметичности.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 14

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Двойное шаблонирование.
2. Ионная имплантация.
3. Осаждение пленок из газовой среды с использованием плазмы.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 15

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Методы уменьшения неоднородности толщины пленок.
2. Корпуса с матричным расположением выводов.
3. Фотолитография с зазором.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 16

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Проблемы фотолитографии, возникающие при проектных нормах менее 100 нм.
2. Структура и топология МОП-транзистора.
3. Герметизация корпусов аргонно-дуговой сваркой.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 17

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Углеродные нанотрубки.
2. Диффузия из ограниченного источника.
3. Литьевое прессование.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 18

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Подгонка значений пленочных элементов.
2. Корпуса с периферийным расположением выводов.
3. FinFET-транзисторы.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 19

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Гетероструктуры в полупроводниках.
2. Проектная норма, способы определения.
3. Электронно-лучевые и индукционные испарители.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 20

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Толстопленочная технология.
2. Молекулярно-лучевая эпитаксия.
3. Наноимпринт-литография.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 21

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Осаждение пленок из газовой среды при нормальном давлении.
2. Послеимплантационный отжиг.
3. STI МОП-транзисторы.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 22

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. LOCOS МОП-транзисторы.
2. Скоростной термический отжиг.
3. Ионная имплантация кислорода в кремний.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 23

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Вертикальный полевой туннельный транзистор.
2. Осаждение пленок из газовой среды при нормальном давлении.
3. Окисление кремния сухим кислородом.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 24

по курсу «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения»

1. Одноэлектронный транзистор.
2. Формирование медных проводников с помощью двойного дамасского процесса.
3. Окисление кремния пиролитическим методом.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры ИУ4 «__» _____ 202_ г., протокол № _

5.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ, ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 5.4

Спецификация слайдов к лекциям

Название раздела	Число слайдов
1. Введение в технологические процессы приборостроения	**36**
1.1. Структура курса. Основная и дополнительная литература. Основные положения. Задачи схемотехнического проектирования. Задачи конструкторского проектирования. Задачи технологического проектирования. Контроль качества. Уровни проектирования	9
1.2. Основные понятия и определения. Интегральная микросхема. Структура микросхемы. Топология микросхемы: общая топология, послойная топология. Интегральная технология. Степень интеграции	11
1.3. Классификация ИМС. Виды классификации. Классификация по степени интеграции. Классификация по конструкторско-технологическим признакам. Классификация по функциональному назначению. Классификация по применяемости. Классификация цифровых микросхем по виду логики	16
2. История развития микроэлектроники	**43**
2.1. Начало микроэлектроники. Открытие биполярного транзистора. Выбор основного полупроводникового материала. Планарная технология. Открытие полевого транзистора. Борьба за скорость. «Вероломная восьмерка» и компания Fairchild Semiconductor	15
2.2. Бурное развитие микроэлектроники в 1960-е гг. Космическая гонка — стимул для развития микросхем. Выбор типа логических микросхем. Решение проблем полевых транзисторов. Закон Мура. Регулярные и нерегулярные структуры. Развитие микросхем памяти. Открытие поликремниевого затвора. Уход «вероломной восьмерки» из компании Fairchild Semiconductor и основание новых компаний	15
2.3. Совершенствование микропроцессоров. Первый микропроцессор. Линейная зависимость основных параметров микросхем. МОП-транзисторы против биполярных. Борьба за уменьшение себестоимости микросхем. Появление персональных компьютеров на процессорах ×86. Дальнейшее развитие микроэлектроники	13

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
3. Подложки ИМС	**92**
3.1. Классификация подложек. Подложки для полупроводниковых микросхем. Полупроводниковые материалы. Полупроводники *p*-типа. Полупроводники *n*-типа. Свойства кремния. Достоинства кремния и кремниевой технологии. Виды кристаллов. Монокремний и поликремний. Индексы Миллера. Получение технического кремния. Физико-химическая очистка кремния. Метод зонной плавки. Выращивание монокристаллического кремния методом Чохральского. Резка кремния на пластины и финальная обработка	82
3.2. Подложки пленочных и гибридных микросхем. Требования к материалу подложки. Стеклянные подложки. Керамические подложки. Ситалловые подложки. Полиимидные пленки. Металлические подложки	10
4. Основы конструирования ИМС	**52**
4.1. Полупроводниковые транзисторы. Биполярные транзисторы. Методы изоляции между элементами. Структуры на биполярных транзисторах. МОП-транзисторы. Структуры на МОП-транзисторах	25
4.2. Диоды в интегральном исполнении. Полупроводниковые резисторы. Пленочные резисторы. Конденсаторы в интегральном исполнении. Катушки индуктивности. Проводники и контактные площадки	27
5. Тонкопленочная технология	**56**
5.1. Схема технологического процесса получения ГИС. Определяющие параметры резистивных, проводящих и диэлектрических пленок. Требования к материалам и пленкам. Особенности технологии. Классификация методов получения тонких пленок	8
5.2. Термическое вакуумное напыление. Установка для термического вакуумного напыления. Обеспечение низкого давления. Формирование пленки на подложке. Интенсивность испарения. Методы уменьшения неравномерности толщины пленки на подложке. Виды испарителей. Испарители с резистивным нагревом. Испарители с косвенным нагревом. Проволочные, ленточные, коробчатые и тигельные испарители. Метод взрывного испарения. Электронно-лучевые испарители. Индукционные испарители. Недостатки термического вакуумного напыления	37
5.3. Распыление ионной бомбардировкой. Особенности процесса. Катодная (диодная) система. Триодная система. Магнетронная система	11
6. Толстопленочная технология	**9**
6.1. Область применения. Структурная схема цикла. Пасты для толстопленочной технологии. Трафаретная печать. Сушка. Вжигание паст	9
7. Пленочные элементы ГИС	**28**
7.1. Пленочные резисторы. Материалы для резисторов. Технологические варианты формирования пленочных резисторов. Структура и топология пленочных резисторов. Проектирование топологии пленочных резисторов. Подгоняемые резисторы. Лазерная подгонка номиналов	19

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
7.2. Пленочные конденсаторы. Конструкции пленочных конденсаторов. Материалы для конденсаторов. Определение емкости пленочного конденсатора. Подгоняемые конденсаторы	6
7.3. Пленочные катушки индуктивности. Конструкции индуктивных элементов. Определение индуктивности	3
8. Литография	**414**
8.1. Основные понятия и положения. Место литографии в структуре производственного цикла. Ключевые факторы процесса литографии. Виды литографии. Последовательность операций. Фотолитография. Разрешающая способность. Искажения при литографии. Знаки совмещения	27
8.2. Резисты. Развитие резистов и способов литографии. Классификация резистов. Резисты для позитивной литографии. Химически усиленные фоторезисты. Резисты для негативной литографии. Растворители и присадки. Параметры и характеристики резистов. Требования к резистам. Хранение резистов	35
8.3. Нанесение резиста. Очистка подложки. Грунтовка. Центрифугирование. Вязкость резистов как фактор управления качеством. Сушка резиста. Регидрация резиста после сушки. Послеэкспозиционная сушка. Задубливание резиста	44
8.4. Взрывная литография. Обоасть применения. Особенности процесса	10
8.5. Источники актиничного излучения. Спектральный диапазон фоторезистов. Ртутные и ксеноновые лампы. Эксимерные лазеры	19
8.6. Экспонирование. Общие понятия. Методы экспонирования. Контактная литография. Литография с зазором. Проекционная литография. Степперы. Сканеры. Проекционные линзы. Система перемещения пластины. Совмещение	38
8.7. Контроль качества рисунка. Контролируемые параметры. Случаи рассогласования. Минимальные размеры. Результаты контроля	7
8.8. Автоматизация процесса литографии. Система стекового степпера. Блочный степпер	15
8.9. Проблемы фотолитографии. Предельные возможности фотолитографии. Искажения при фотолитографии. Вычислительная литография. Коррекция эффекта оптической близости. Влияние дифракции света. Снижение дифракции. Сбор дифрагированного света линзой. Эффект стоячей волны на фоторезисте. Влияние числовой апертуры на изображение. Улучшение разрешающей способности. Влияние глубины резкости на изображение. Требования к гладкости поверхности	35
8.10. Способы формирования изображений с размерами меньше длины волны. Технология двойного фотошаблона. Кратное шаблонирование. Использование внеосевого излучения. Фазосдвигающие маски. Иммерсионная литография	51

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
8.11. Литография экстремального ультрафиолета. Схема установки. Источник излучения. Особенности строения покрытий зеркал и шаблонов	26
8.12. Электронно-лучевая литография. Общая характеристика. Проекционная электронно-лучевая литография. Сканирующая электронно-лучевая литография. Резисты для электронно-лучевой литографии. Источники электронов. Проблемы электронно-лучевой литографии. Недостатки электронно-лучевой литографии. Использование маски SCALPEL	36
8.13. Рентгенолитография. Общая характеристика. Шаблоны для рентгенолитографии. Источники рентгеновского излучения. Резисты для рентгенолитографии. Недостатки рентгенолитографии	16
8.14. Ионно-лучевая литография. Общая характеристика. Достоинства ионно-лучевой литографии. Источники ионов. Проекционная ионно-лучевая литография. Зондовая ионно-лучевая литография. Безрезистная ионно-лучевая литография. Шаблоны для ионно-лучевой литографии. Недостатки ионно-лучевой литографии	21
8.15. Наноимпринт-литография. Общая характеристика. Особенности технологии. Область применения наноимпринт-литографии. Виды наноимпринт-литографии. Термоконтакная наноимпринт-литография. Мягкая наноимпринт-литография. Технология S-FIL. Обращенная импринт-литография	22
8.16. Другие методы литографии. DIP-PEN-литография. Нанолитография. LIGA-процесс	12
9. Термическая диффузия	**51**
9.1. Физические основы процесса. Условия возникновения p–n-перехода. Первый закон Фика. Коэффициент диффузии. Уравнение Аррениуса. Энергия активации диффузионного процесса. Предельная растворимость примеси. Зависимость коэффициента диффузии от температуры. Второй закон Фика. Диффузия из неограниченного источника. Диффузия из ограниченного источника. Механизмы диффузии	24
9.2. Проведение диффузии в микроэлектронике. Диффузия в открытой трубе. Рабочая камера диффузионной печи. Диффузия в замкнутом объеме, схема установки	18
9.3. Диффузанты. Твердые диффузанты. Жидкие диффузанты. Газообразные диффузанты. Стеклообразные диффузанты. Общие недостатки диффузии	8
10. Ионная имплантация	**157**
10.1. Общие принципы. Внедрение атомов примеси. Распределение примеси по глубине. Энергия ионного пучка. Доза облучения. Сравнение диффузии и ионной имплантации. Контроль ионной имплантации. Область применения ионной имплантации. Достоинства ионной имплантации. Недостатки ионной имплантации. Особенности формирования глубоких профилей	15

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
10.2. Физические основы процесса. Взаимодействие ионов с подложкой. Ядерное торможение ионов. Электронное торможение ионов. Распределение ионов по глубине. Траектория ионов и глубина легирования. Концентрационный профиль примеси. Эффект каналирования. Каналирование ионов после соударений. Борьба с каналированием. Теневой эффект. Повреждение кристаллической решетки кремния при бомбардировке ионами. Термический отжиг после ионной имплантации. Скоростной термический отжиг. Возможности ионного легирования	45
10.3. Установка для ионной имплантации. Общая схема установки. Варианты компоновки. Газовая система. Электрическая система. Вакуумная система. Система контроля. Система потока ионов. Ионизация газов в плазме. Источники ионов. Экстракция ионов из камеры. Масс-сепаратор. Ускорительная колонна. Контроль потока ионов. Электростатическое сканирование ионным лучом. Механическое сканирование подложки. Нейтрализация заряда ионного луча. Система наполнения плазмой. Система «электронный душ». Ловушка для нейтральных атомов. Облучение единичной подложки. Остановка потока ионов. Выходной анализатор. Проблемы ионной имплантации. Эффект загрязнения частицами. Оценка загрязнения частицами. Опасности при работе с оборудованием	91
10.4. Легирование на сверхмалую глубину. Ионная имплантация кислорода для формирования структуры «кремний на изоляторе». Ионная имплантация с помощью погружения в плазму	6
11. Термическое окисление кремния и другие высокотемпературные процессы	**104**
11.1. Общие сведения. Требования к оборудованию. Способы окисления. Области применения. Создание экранирующего оксида. Создание боковой изоляции: LOCOS и STI. Применение жертвенного оксида. Применение диэлектрических материалов в качестве подзатворного диэлектрика	19
11.2. Очистка подложки перед окислением. RCA-очистка. Удаление макрочастиц. Удаление органических частиц. Удаление неорганических частиц. Удаление естественного оксида	7
11.3. Механизмы оксидирования. Сухое оксидирование. Особенности образования оксидной пленки. Модель Дила — Гроува. Темпы роста оксида. Влажное оксидирование. Зависимость скорости оксидирования от температуры. Зависимость скорости оксидирования от ориентации подложки. Зависимость скорости оксидирования от концентрации примесей. Эффекты накопления и истощения примесей при оксидировании. Хлорное окисление	21
11.4. Оборудование для окисления. Установка для сухого окисления. Типовые операции при окислении. Нарушенные связи и заряд на поверхности раздела. Установка для влажного окисления. Источники водяного пара. Система типа «котел». Система типа «барботер». Система промывки струей воды. Пирогенное окисление. Типовые операции при влажном окислении	17

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
11.5. Скоростное термическое оксидирование. Влияние давления на скорость процесса оксидирования. Установка для окисления под высоким давлением	7
11.6. Процессы отжига. Послеимплантационный отжиг. Возбуждающий отжиг. Получение силицида титана. Повторное оплавление. Скоростная термическая обработка. Отжиг и перераспределение примеси вследствие диффузии. Термическая нитридизация	33
12. Нанесение слоев химическим испарением (CVD)	**180**
12.1. Общие сведения. Область применения в микроэлектронике. Суть метода. Технические возможности интенсификации. Сравнение выращенного оксислением оксида с оксидом, полученным CVD-методом	8
12.2. Принцип CVD. Схема установки для CVD. Химические процессы и реакции при CVD. Кинетика CVD. Формирование пленок. CVD при атмосферном давлении. CVD при пониженном давлении. PECVD, интенсификация плазмой. Покрытие выступов и конформность. Достигаемые углы. Процесс образования пустот. Заполнение пор и пустот. Физическая сорбция и хемосорбция частиц на поверхности. Газы, используемые при CVD. Моносилан и TEOS. Система доставки газов	51
12.3. Варианты CVD в производстве. Применение диэлектрических тонких пленок. Формирование щелевой изоляции. Формирование боковых участков (спейсеров). Осаждение барьерного слоя при формировании первого слоя металлизации (PMD). Процесс PE-TEOS. Процесс O_3-TEOS. Использование плазмы высокой плотности. Пассивация. Характеристики диэлектрических тонких пленок. Определение толщины диэлектрических тонких пленок. Очистка камеры после проведения CVD	121
13. Эпитаксия	**56**
13.1. Основные понятия. Область применения. Методы эпитаксии. Механизмы наращивания эпитаксиальных пленок	7
13.2. Эпитаксия из газовой среды. Типовые операции при эпитаксии. Причины очистки водородом. Газы, используемые при эпитаксии. Легирование эпитаксиальных слоев. Химические реакции и кинетика. Формирование пленки кремния на поверхности. Механизм встраивания примеси при росте пленки. Реакторы для газофазной эпитаксии. Дефекты эпитаксиальных пленок и пути их снижения. Получение поликремния. Влияние температуры процесса на кристаллическую структуру осажденного кремния. Схема установки	42
13.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Сущность процесса. Схема реактора для МЛЭ. Область применения	7
14. Травление	**60**
14.1. Сущность процесса. Методы травления. Основные понятия. Профили травления. Дефекты травления. Жидкостное травление. Этапы травления. Область применения	15

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
14.2. Сухое травление. Сущность процесса. Ионно-плазменное травление. Ионно-лучевое травление. Реактивное ионное травление. Плазмохимическое травление. Сравнение методов сухого травления. Требования к процессу глубокого плазмохимического травления. Оборудование для плазмохимического травления	45
15. Химико-механическая планаризация	**78**
15.1. Общие сведения. Сущность процесса. Область применения. Планаризация поверхности. Примеры использования метода	24
15.2. Физические основы процесса. Аппаратное обеспечение ХМП. Схема установки для ХМП. Состав суспензий. Параметры ХМП. Селективность процесса. Эрозия при ХМП. Тарельчатый эффект. Частицы и дефекты. Детектирование частиц	39
15.3. ХМП меди (дамасский процесс). Основные операции. Определение момента окончания процесса ХМП. Достоинства процесса ХМП	15
16. Последовательность создания основных структур ИМС	**160**
16.1. Структуры на биполярных транзисторах. Диффузионно-планарная структура. Эпитаксиально-планарная структура. Структура с диэлектрической изоляцией. Изопланарная структура. Полипланарная структура	55
16.2. Структуры на МОП-транзисторах. КМОП-структура с защитными кольцами. КМОП-структура без защитных колец. Проблемы классических КМОП-структур. Способы борьбы с эффектом защелкивания. LOCOS-транзисторы. МОП-транзисторы с щелевой изоляцией (STI). КНС-структура. КНИ-структура. Технология напряженного кремния. HKMG-транзисторы. FinFET-транзисторы. Дальнейшая эволюция FinFET-транзисторов	105
17. Проектирование топологии ИМС	**37**
17.1. Структуры на биполярных транзисторах. Расчет размеров эмиттерного контакта и области эмиттера. Расчет размеров контакта к базе и области базы. Расчет размеров контакта к коллектору и области коллектора. Варианты топологической реализации полосковых биполярных транзисторных структур. Транзисторные структуры средней мощности	26
17.2. Структуры на МОП-транзисторах. Определение длины канала. Определение длины тонкого оксида. Определение длины затвора. Определение ширины канала, тонкого оксида и затвора. Определение длины истока и стока. Определение размеров *p*-кармана. Примеры топологической реализации МОП-транзисторов. Реализация схемы защиты	11
18. Разделение пластин на кристаллы	**35**
18.1. Способы разделения пластин. Резка пластин диском с наружной алмазной режущей кромкой. Конструкция современных ДАР. Алмазное скрайбирование. Лазерное скрайбирование. Электроно-лучевое скрайбирование. Разламывание пластин на кристаллы. Разделение подложек ГИС	35

Продолжение табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
19. Корпуса ИМС	**57**
19.1. Общие сведения о корпусах. Варианты исполнения корпусов. Шаг выводов корпусов. Материалы ИМС корпусов. Эволюция корпусов ИМС. Классификация корпусов ИМС по виду выводов. Классификация корпусов ИМС по расположению выводов	8
19.2. Корпуса с периферийным расположением выводов. Общие сведения. Конструкции планарных периферийных выводов. Корпуса DIP. Корпуса PLCC и CLCC. Корпуса QFP. Планарные корпуса с двухрядным расположением выводов	19
19.3. Корпуса с матричным расположением выводов. Общие сведения. Конструкции выводов в матричной системе. Достоинства и недостатки матричной системы выводов. Корпуса PGA. Корпуса BGA. Корпуса CCGA. Корпуса CSP	24
19.4. Российские корпуса. Типы корпусов. Шаг выводов. Обозначение корпусов	6
20. Монтаж кристаллов ИМС в корпус	**40**
20.1. Общие сведения. Размещение кристаллов в корпусе. Контактные площадки. Конструкции выводов для соединения с контактными площадками	8
20.2. Монтаж кристаллов с проволочными выводами. Монтаж кристаллов с паучковыми выводами. Монтаж кристаллов с балочными выводами. Конструкция шариковых выводов. Метод перевернутого кристалла (Flip-Chip)	18
20.3. Монтаж кристаллов непосредственно на плату. Технология «кристалл на плате» (COB). Технология «кристалл на стекле» (COG). Технология «кристалл на полимере» (COF)	7
20.4. Многокристальные модули (МСМ). Общие сведения. Стапелирование МСМ. Варианты монтажных оснований МСМ. МСМ на гибкой основе	7
21. Герметизация ИМС	**64**
21.1. Бескорпусная герметизация. Достоинства и недостатки. Материалы. Герметизация методом обволакивания. Метод свободной заливки во вспомогательные формы. Метод свободной заливки в корпуса. Компрессионное прессование. Литьевое (трансферное) прессование. Шовно-клеевая герметизация	32
21.2. Корпусная герметизация. Достоинства. Особенности корпусов. Требования к корпусам. Герметизация корпусов пайкой. Герметизация корпусов холодной сваркой. Герметизация корпусов аргонно-дуговой сваркой. Герметизация корпусов лазером. Герметизация корпусов контактной (роликовой) сваркой	25

Окончание табл. 5.4

Название раздела	Число слайдов
21.3. Контроль герметичности. Общие сведения. Масс-спектрометрический метод. Вакуумно-жидкостный метод. Пузырьковый метод	7
22. Перспективы развития электронной компонентной базы	**128**
22.1. Проектная норма. Виды технологических норм. Лямбда-система. Альфа-правило. Соотношение технологической нормы и длины затвора полевого транзистора. Эффективная и топологическая длина канала. Короткоканальные эффекты. Токи утечки в субмикронных транзисторах. Физические ограничения размеров транзисторов. Определение технологической нормы исходя из площади. Способы снижения токов утечки. Граница закона Мура. Технологические особенности технологического процесса 22, 14, 10 нм. Современное состояние микроэлектроники. Технологические процессы 7, 5, 3, 2, 1 нм. Трехмерные микросхемы	72
22.2. Развитие наноэлектроники.Транзисторы на основе арсенида индия-галлия и фосфида индия. Влияние эффекта квантования электрического заряда в нанокластерах. Магические кластерные конфигурации. Фулерены. Углеродные нанотрубки. Транзисторы на основе углеродных нанотрубок. Графен. Вертикальный полевой туннельный транзистор на основе графена. Жидкие нанотранзисторы. Биологические транзисторы (транскрипторы)	56

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ К ЛЕКЦИЯМ

Содержание лекции, ее продолжительность, язык, насыщенность фактами и аргументацией должны определяться возрастным и социальным составом аудитории. Готовясь к лекции, не рекомендуется записывать весь материал лекции дословно. Иногда перед самым началом лекции в ее сдержание приходится вносить срочные изменения, и сделать это легче в конспекте, чем в дословном тексте. При подготовке к чтению лекции особенное внимание рекомендуется уделять ее началу и окончанию. Начало не должно быть слишком затянутым, не следует начинать с общих, всем известных фраз. Необходимо постараться сразу заинтересовать слушателей, что называется «зацепить», показать связь предмета лекции с реальными, известными из повседневной жизни событиями и объектами.

При выступлении лучше избегать канцеляризмов, слов-паразитов («значит», «так сказать», «типа» и т. д.), жаргонных выражений. Живости выступлению придают поговорки и пословицы, цитаты из литературных произведений, крылатые слова великих людей. Но и здесь нужно соблюдать меру. Считается, что при получасовом выступлении возможно использование двух-трех цитат и пяти значений параметров. Текст лекции рекомендуется

готовить в черновом варианте за два-три дня до чтения перед аудиторией, а затем снова вернуться к нему.

Психологи отмечают, что внимание аудитории к лектору начинает снижаться уже через 15 минут после начала лекции. В связи с этим не рекомендуется слишком затягивать выступление. Доказано также, что материал лучше усваивается при комплексности воздействия на органы чувств человека. В связи с этим желательно демонстрировать на лекции визуальные дидактические материалы, и в частности слайды.

Далее приведен типовой пример оформления дидактических материалов по дисциплине, содержащий наиболее важные определения, теоретические сведения, а также примеры, иллюстрирующие принципы действия и области использования технологического оборудования. Первые два слайда (рис. 5.1 и 5.2) относятся к вводной лекции, посвященной фотолитографии.

Методологически дисциплина строится на основе оптимального соотношения теоретических и прикладных вопросов с реализацией проектных методов обучения. Материал реализован на базе блочно-вариативной концепции и проектных методов подготовки специалистов по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Типовая структура слайда содержит название дисциплины, название (тему) лекции, название кафедры, ее электронный адрес и название Университета.

На первом лекционном слайде отображаются название лекции, ее цель и дается краткая характеристика содержания. Затем следуют слайды, иллюстрирующие содержание лекционного материала.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

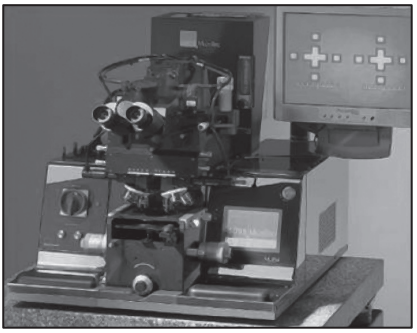
- **Цель дисциплины:** обучить студентов современным технологиям производства интегральных микросхем.
- **Рассматриваемые темы:**
  - принципы построения современных интегральных микросхем;
  - основные элементы, из которых состоят микросхемы;
  - основные технологические операции, используемые при производстве микросхем.
- **Программа курса:**
  - лекции – 51 ч;
  - три домашних задания:
    - расчет топологии пленочных резисторов;
    - расчет параметров диффузии МОП-транзисторов;
    - расчет топологии МОП-транзисторов;
  - лабораторные работы – 17 ч;
  - курсовой проект – 104 ч.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.1

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие 30 лет размеры топологических элементов при производстве СБИС значительно уменьшились. Дальнейшее уменьшение топологии связано с решением большого круга проблем, от квантовых взаимодействий до точности оборудования.

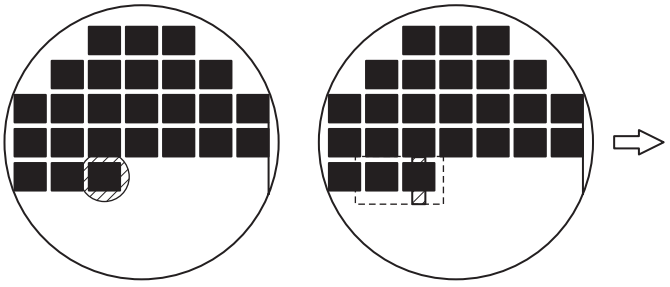


Установка совмещения и экспонирования Suss MJ134

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.2

СТЕППЕРЫ И СКАНЕРЫ

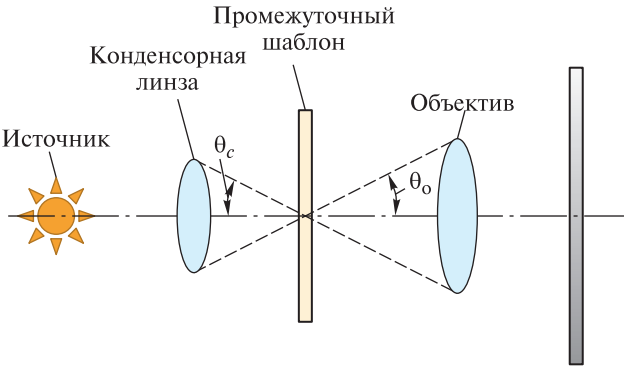


Степперы Сканеры

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.3

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СТЕППЕРА

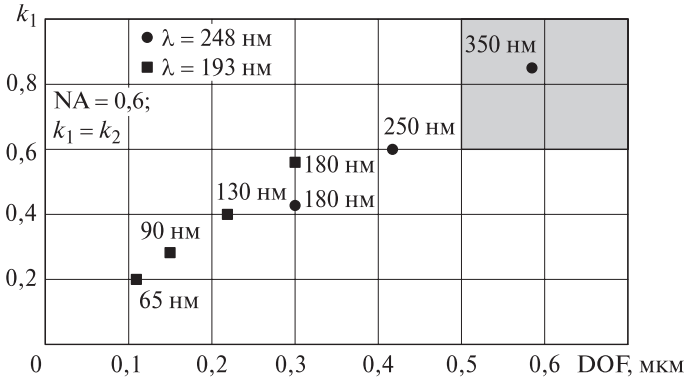


Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.4

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА k_1 ОТ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ DOF

Зона комфорта для производства



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.5

МЕТОДЫ ЭКСТЕНСИВНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

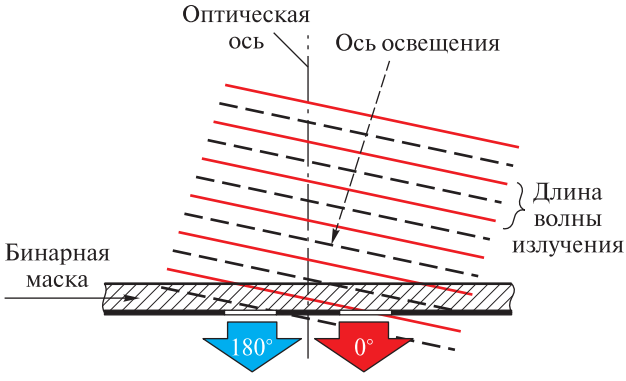
Совершенствование процесса фотолитографии за счет снижения значения коэффициента k_1 привело к появлению фотолитографии.

Способы снижения значения коэффициента k_1:
- внеосевое освещение;
- коррекция оптических эффектов близости;
- применение шаблонов с фазовым сдвигом.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.6

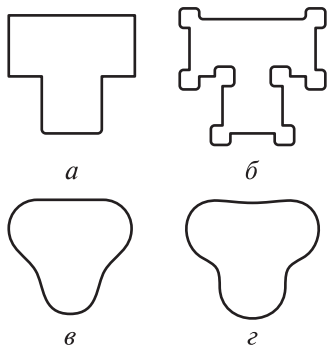
ВНЕОСЕВОЕ ОСВЕЩЕНИЕ



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.7

КОРРЕКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ

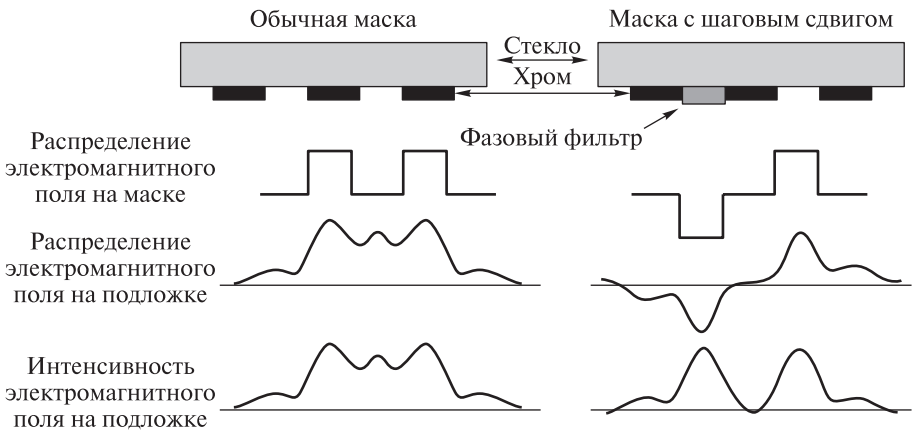


а – топология на шаблоне; *б* – дополнительные элементы топологии; *в* – изображение на резисте с искажением; *г* – изображение на резисте с небольшим искажением

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.8

ШАБЛОНЫ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ



Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.9

ЛИТОГРАФИЯ

Это совокупность операций технологического цикла производства интегральных микросхем, имеющая конечной целью создание на поверхности пластины защитной пленки фоторезиста (фотомаски), форма которого повторяет рисунок шаблона. С помощью процесса литографии обеспечивается получение конфигурации и необходимых компонентов микросхемы.

Суть процесса литографии состоит в переносе рисунка фотошаблона без искажения на поверхность пластины, покрытой фоторезистом (специальным светочувствительным слоем).

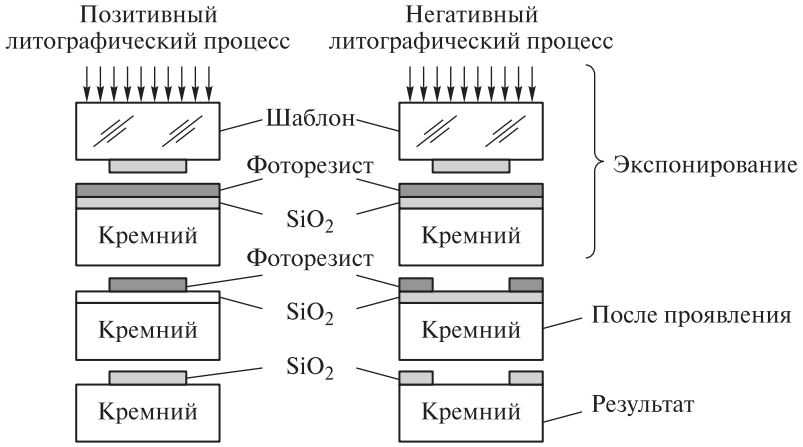
Фоторезисты – светочувствительные и устойчивые к действию агрессивных сред вещества, предназначенные для создания рельефа требуемой конфигурации для защиты от последующих агрессивных воздействий (физических, хирургических и пр.).

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.10

ЛИТОГРАФИЯ

Существуют позитивные и негативные фоторезисты,
позитивный и негативный процессы литографии.



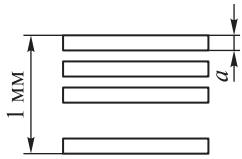
Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.11

ЛИТОГРАФИЯ

Все фоторезисты характеризуются разрешающей способностью R.

Она определяется числом линий, которые можно раздельно воспроизвести на расстоянии 1 мм.



$$R = \frac{1000}{2a}$$

С увеличением толщины наносимого слоя фоторезиста разрешающая способность снижается.
При малой толщине слоя фоторезиста возможны проколы этого слоя. Необходима оптимальная толщина слоя фоторезиста.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.12

ОПЕРАЦИИ ЛИТОГРАФИИ

Последовательность операций

1. Подготовка поверхности пластины к нанесению слоя резиста.
2. Нанесение слоя резиста.
3. Совмещение.
4. Экспонирование.
5. Проявление скрытого изображения.
6. Задубливание.
7. Травление.
8. Удаление слоя фоторезиста.
9. Отмывка поверхности пластины от остатков резиста.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.13

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ

Основная задача при нанесении слоя фоторезиста на поверхность пластины – обеспечить адгезию наносимого слоя и однородность его толщины.
Подготовка поверхности пластины к нанесению слоя заключается в удалении адсорбированных молекул воды, жировых пленок и других жировых загрязнений.
Молекулы воды удаляют термическим перегревом пластин при температуре 700...8000 °С в течение примерно 10 мин. Жировые пятна и органические загрязнения удаляют в диметилформамиде и ацетоне.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.14

НАНЕСЕНИЕ СЛОЯ ФОТОРЕЗИСТА

Неравномерность слоя фоторезиста в случае контактной литографии приводит к неровному прилеганию, что ухудшает разрешающую способность фоторезиста.
Поры и инородные частицы на этапе травления вызывают проколы.
В связи с этим фоторезист обязательно фильтруют. Его наносят и сушат в беспылевой атмосфере.
Существует два метода нанесения фоторезиста:
• центрирование;
• распыление.
Недостаток слоя фоторезиста, нанесенного методом центрифугирования: напряженное состояние фоторезиста. Также с увеличением толщины фоторезиста уменьшается разрешающая способность.
Недостатки центрифугирования: трудность получения пленок толщиной в несколько микрометров (из-за плохой растекаемости вязкого фоторезиста), напряженное состояние пленки (может порваться), наличие краевого утолщения как следствие повышения вязкости в процессе растекания фоторезиста, трудность организации одновременной обработки нескольких пластин.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.15

СОВМЕЩЕНИЕ

При контактной литографии операцию совмещения выполняют в два этапа: грубое и точное совмещение. Точное совмещение выполняют с помощью специальных меток совмещения. Метки бывают светлыми и темными. Первый и последний шаблоны имеют по одной метке, промежуточные – по две.

При проекционной литографии используют установку пошагового проекционного репродуцирования.

ЭКСПОНИРОВАНИЕ

Контактная литография выполняется на фотолитографическом степпере, время экспонирования – несколько секунд.

Степпер состоит из микроскопа, осветителя и блока механических перемещений подложки.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.16

ПРОЯВЛЕНИЕ

Негативные фоторезисты проявляют в органических растворителях.

Позитивные фоторезисты проявляют неорганическими проявителями с щелочными свойствами.

Точность рисунка зависит от температуры, времени проявления, концентрации проявителя, времени экспонирования.

ЗАДУБЛИВАНИЕ (СУШКА)

Цель – удаление влаги для повышения кислотоустойчивости (стойкости слоя к проявителям). Производят в термошкафах при температуре 120...1800 °С в течение 1 ч.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рис. 5.17

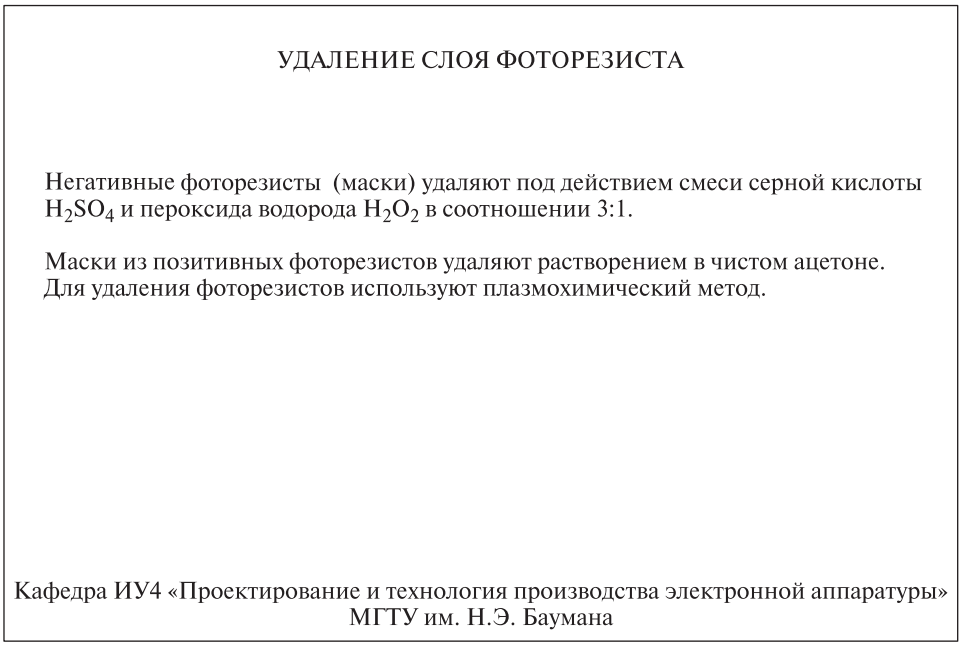


Рис. 5.18

Заключительный слайд содержит выводы по теме лекции и информацию об условиях использования представленных материалов студентами, преподавателями и сторонними лицами.

Заключение

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения» подготовлен на основе единой концепции создания учебных пособий и методических материалов, входит в комплекс дисциплин подготовки бакалавров и магистров по программам высшего профессионального образования по направлению 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Конспект лекций по дисциплине содержит рекомендации по организации и проведению лекционных и практических занятий, примеры слайдов, и другие дидактические материалы, необходимые для преподавания.

Структура и состав учебно-методического обеспечения соответствуют требованиям Федеральных законов от 10.07.1992 г. № 3266-1-ФЗ «Об образовании» (с изменениями и дополнениями) и от 22.08.1996 г. № 125-ФЗ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» (с изменениями и дополнениями), Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденного постановлением Правительства РФ, от 14 февраля 2008 г. № 71.

В заключение авторы выражают надежду на то, что представленные материалы будут полезны при подготовке к лекционным и практическим занятиям и тем представителям профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений, которые уже освоили преподавание указанной дисциплины, и тем, кому еще предстоит это сделать.

Данный учебно-методический комплекс разработан сотрудниками кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» и кафедры ИУК1 «Проектирование и технология производства электронных приборов» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартом, основной профессиональной образовательной программой и учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Литература

Андреев В.В., *Столяров А.А.* Физические основы наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 223 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 16).

Варламов П.И., *Елсуков К.А.*, *Макарчук В.В.* Технологические процессы в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 175 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 2).

Королёв М.А., *Крупкина Т.Ю.*, *Ревелева М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: учеб. пособие: в 2 ч. / под ред. Ю.А. Чаплыгина. 4-е изд. М.: Лаборатория знаний, 2020. 400 с.

Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.

Красников Г.Я., *Горнев Е.С.*, *Матюшкин И.В.* Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: Техносфера, 2020. 434 с.

Макарчук В.В. Проектирование топологии биполярного планарно-эпитаксиального транзистора: метод. указания к курсовому проектированию по курсу «Технологические процессы микроэлектроники». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 20 с.

Макарчук В.В., *Родионов И.А.* Проектирование электронной компонентной базы наносистем: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 156 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 5).

Макарчук В.В., *Родионов И.А.*, *Цветков Ю.Б.* Методы литографии в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 175 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 9).

Моро У. Микролитография: в 2 ч.; пер. с англ. М.: Мир, 1990. 606 с.; 634 с.

Мурога С. Системное проектирование сверхбольших интегральных схем: в 2 кн.; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 288 с.; 291 с.

Панфилов Ю.В., *Моисеев К.М.*, *Михайлов В.П.* Высоковакуумные технологические процессы в наноинженерии: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Шахнова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 191 с. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн.; кн. 3).

Парфенов О.Д. Конструирование полупроводниковых интегральных схем: метод. указания к курсовому проектированию по курсу «Конструирование и технология микросхем». М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. 27 с.

Парфенов О.Д. Расчет и конструирование интегральных резисторов: метод. указания по курсовому проектированию по курсу «Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. 27 с.

Парфенов О.Д. Расчет и конструирование интегральных транзисторов: метод. указания по курсовому проектированию. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 19 с.

Парфенов О.Д. Технология микросхем: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 318 с.

Рабаи Ж.М., *Чандракасан А.*, *Николич Б.* Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2007. 912 с.

Технология СБИС: в 2 кн. Кн. 1 / К. Пирс, А. Адамс, Дж. Цай, Т. Сейдел, Д. Макгиллис; пер. с англ. под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. 404 с.

Уэйкерли Дж.Ф. Проектирование цифровых устройств: в 2 т. М.: Постмаркет, 2002. 544 с.

Хоровиц П., *Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т.; пер. с англ. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1993. 372 с.; 368 с.; 413 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5
Список сокращений. 7
Термины и определения 10

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ 13
1.1. Миниатюризация объектов приборостроения 14
1.1.1. История развития электронной компонентной базы приборостроения 14
1.1.2. Создание интегральных микросхем и развитие микроэлектроники 16
Тесты к лекции 1.1 24
1.2. Виды интегральных микросхем 25
1.2.1. Основные понятия 25
1.2.2. Классификация интегральных микросхем 25
1.2.3. Основные характеристики полупроводниковой компонентной базы приборостроения 31
1.2.4. Технология получения *p*–*n*-переходов 33
Тесты к лекции 1.2 34
1.3. Подложки интегральных микросхем 35
1.3.1. Классификация подложек интегральных микросхем 35
1.3.2. Кремниевые подложки интегральных микросхем 36
1.3.3. Технология получения полупроводникового кремния 37
1.3.4. Подложки для пленочных и гибридных интегральных микросхем 45
Тесты к лекции 1.3 48
1.4. Тонкопленочная технология 49
1.4.1. Особенности технологии 49
1.4.2. Термическое вакуумное напыление тонких пленок 50
1.4.3. Ионное распыление 59
Тесты к лекции 4 62
1.5. Особенности толстопленочной технологии 63
Тесты к лекции 1.5 65
1.6. Пленочные элементы гибридных интегральных микросхем 66
1.6.1. Пленочные резисторы 66
1.6.2. Пленочные конденсаторы 70
1.6.3. Пленочные катушки индуктивности 72
Тесты к лекции 1.6 73

1.7. Фотолитография 74
1.7.1. Общие сведения 74
1.7.2. Фоторезисты 77
1.7.3. Нанесение фоторезиста 82
1.7.4. Сушка и задубливание фоторезиста 84
1.7.5. Взрывная литография 85
1.7.6. Экспонирование 86
1.7.7. Источники актиничного излучения для фотолитографии 93
1.7.8. Фотошаблоны для фотолитографии полупроводниковых структур 94
1.7.9. Проблемы фотолитографии 97
1.7.10. Использование внеосевого излучения и фазосдвигающих масок 102
1.7.11. Множественное шаблонирование 104
1.7.12. Иммерсионная литография 105
Тесты к лекции 1.7 106
1.8. Литография в сверхжестком ультрафиолетовом излучении и другие виды литографии 107
1.8.1. Фотолитография в сверхжестком ультрафиолетовом излучении 107
1.8.2. Электронно-лучевая литография 109
1.8.3. Рентгенолитография 111
1.8.4. Ионно-лучевая литография 114
1.8.5. Наноимпринт-литография 115
Тесты к лекции 1.8 118
1.9. Требования к основным технологическим процессам производства интегральных микросхем и применяемому оборудованию 119
1.9.1. Жидкостные химические процессы 119
1.9.2. Физико-термические процессы 121
1.9.3. Нанесение диэлектрических пленок из жидкой фазы 130
Тесты к лекции 1.9 133
1.10. Термическое окисление кремния 134
1.10.1. Методы получения диэлектрических пленок 134
1.10.2. Термическое окисление кремния в сухом кислороде 139
1.10.3. Термическое окисление кремния в парах воды 139
1.10.4. Скоростное термическое окисление кремния 142
1.10.5. Получение пленок нитрида кремния 144
Тесты к лекции 1.10 145
1.11. Формирование покрытий 146
1.11.1. Многоуровневая металлизация 146
1.11.2. Формирование проводящих слоев 148
1.11.3. Межуровневая изоляция и пассивация 150
1.11.4. Процесс химико-механической планаризации диэлектрика . . . 152
1.11.5. Эпитаксия при формировании покрытий 153
1.11.6. Осаждение диэлектрических пленок 154
Тесты к лекции 1.11 155

1.12. Травление покрытий 156
1.12.1. Общие сведения 156
1.12.2. Плазмохимическое травление неорганических материалов . . . 156
1.12.3. Плазмохимическое травление органических материалов 164
1.12.4. Плазмохимическая полимеризация и ее роль в плазмохимическом травлении материалов 165
1.12.5. Жидкостное химическое травление 169
1.12.6. Термодинамика травления 172
1.12.7. Общие принципы кинетики травления 174
1.12.8. Реакции при жидкостном травлении 176
1.12.9. Практическое применение жидкостного химического травления 186
Тесты к лекции 1.12 187
1.13. Термическая диффузия примеси 188
1.13.1. Физические основы процесса 188
1.13.2. Первый и второй законы Фика 190
1.13.3. Особенности технологического процесса и оборудования 192
1.13.4. Операционный цикл 193
1.13.5. Твердые планарные источники 195
1.13.6. Недостатки термической диффузии 195
Тесты к лекции 1.13 196
1.14. Ионная имплантация 197
1.14.1. Общая характеристика процесса 197
1.14.2. Физические основы процесса 199
1.14.3. Проведение ионной имплантации 203
1.14.4. Создание подложки для структуры «кремний на изоляторе» ионной имплантацией кислорода 210
Тесты к лекции 1.14 211
1.15. Разделение пластин на кристаллы 212
1.15.1. Общие сведения 212
1.15.2. Резка пластин диском с алмазной режущей кромкой 213
1.15.3. Алмазное скрайбирование 215
1.15.4. Лазерное и электронно-лучевое скрайбирование 215
1.15.5. Разделение скрайбированных пластин 216
Тесты к лекции 1.15 218
1.16. Герметизация интегральных микросхем 219
1.16.1. Бескорпусная герметизация 219
1.16.2. Корпусная герметизация интегральных микросхем 224
1.16.3. Контроль герметичности 238
1.16.4. Монтаж кристаллов в корпус 239
1.16.5. Монтаж кристалла интегральной микросхемы непосредственно на плату 242
1.16.6. Многокристальные модули 244
Тесты к лекции 1.16 245

1.17. Основные компоненты полупроводниковых интегральных микросхем 246
1.17.1. Биполярный транзистор в интегральном исполнении 246
1.17.2. Диоды в интегральном исполнении 249
1.17.3. Полупроводниковые резисторы 250
1.17.4. Конденсаторы в полупроводниковых микросхемах 251
1.17.5. МОП-транзистор в интегральном исполнении 252
1.17.6. Совмещенные микросхемы 260
1.17.7. Формирование слоев металлизации 261
Тесты к лекции 1.17 263

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 264
Лабораторная работа № 1.
Анализ топологии интегральных микросхем 264
Контрольные вопросы и задания 267
Лабораторная работа № 2.
Анализ состава и размещения элементов базового матричного кристалла 268
Контрольные вопросы и задания 272
Лабораторная работа № 3.
Исследование точности совмещения комплекта фотошаблонов . . . 273
Контрольные вопросы и задания 277
Лабораторная работа № 4.
Экспериментальные исследования многослойных структур металл–оксид–металл, обладающих мемристивным эффектом . . . 278
Контрольные вопросы и задания 293

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ 294
Домашнее задание № 1.
Расчет топологии пленочных резисторов 294
Домашнее задание № 2.
Расчет параметров диффузии МОП-транзисторов 295
Домашнее задание № 3.
Расчет топологии МОП-транзисторов 296

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА 297
4.1. Краткое содержание курсового проекта 297
4.2. Подробное содержание курсового проекта 299
4.2.1. Схемотехническое проектирование 299
4.2.2. Топологическое проектирование 300
4.2.3. Структурно-топологическое проектирование МДП-транзисторов 325
4.3. Общие правила оформления курсового проекта 337

5. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ 339
5.1. Примерная базовая программа дисциплины 339
5.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине 350
5.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов, плакатов и других дидактических материалов 361
Заключение 380
Литература 381

Учебное издание

Андреев Дмитрий Владимирович
Курносенко Алексей Евгеньевич
Макарчук Владимир Васильевич
Соловьев Владимир Анатольевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Редактор *Е.К. Кошелева*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
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 20.11.2024. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. 31,525 л. Тираж 101 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.