

БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

В.П. Михайлов, К.М. Моисеев, Ю.В. Панфилов

ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

БИБЛИОТЕКА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

Серия основана в 2022 году

Том 2

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, директор Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН
- 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. Одинокоев — заместитель генерального директора по науке АО НИИ «Точного машиностроения»
- И.А. Покровский — исполнительный директор Ассоциации разработчиков и производителей электроники
- Ю.С. Сахаров — д-р техн. наук, профессор университета «Дубна»
- А.Л. Стемповский — 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)»

В.П. Михайлов, К.М. Моисеев, Ю.В. Панфилов

Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении

*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*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2023

УДК 621.01.03
ББК 34.44
М69

Издание доступно в электронном виде по адресу:
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8109>

Издание учебно-методического комплекса по укрупненным группам специальностей и направлений «Информатика и вычислительная техника» и «Приборостроение» подготовлено в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рецензенты:

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

Михайлов, В. П.

М69 Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении / В. П. Михайлов, К. М. Моисеев, Ю. В. Панфилов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. — 213, [1] с. : ил. (Библиотека «Приборостроение». Т. 2).

ISBN 978-5-7038-6098-4

ISBN 978-5-7038-6155-4 (т. 2)

Учебное пособие по дисциплине «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении» содержит нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций, практических занятий, семинаров, лабораторных работ и деловых игр, перечень учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава и студентов по данной дисциплине.

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

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

УДК 621.01.03
ББК 34.44



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

ISBN 978-5-7038-6155-4 (т. 2)
ISBN 978-5-7038-6098-4

© Михайлов В.П., Моисеев К.М.,
Панфилов Ю.В., 2023
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Предисловие

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

В настоящее время во всех отраслях промышленности, медицины, сельского хозяйства, оборонной техники и т. д. используются приборы различных классов, назначения и функциональной сложности — это микроэлектронная элементная база, сенсорная техника, приборы для научных исследований, радиоэлектронные и электронно-вычислительные приборы и устройства, системы управления разного уровня, а также бытовая электроника.

Основная особенность предметной области «Приборостроение» заключается в ее междисциплинарном характере, который 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 по тематическому направлению «Приборостроение» образовательными учреждениями высшего профессионального образования на территории РФ.

Целью создания данного комплекта УМК 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.

Авторы выражают благодарность рецензентам Д.Ю.Муромцеву — научному руководителю кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета и Н.К. Юркову — заведующему кафедрой «Конструирование и

производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета, замечания которых позволили улучшить содержание УМК.

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

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию УМК, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., МТ11, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В.А. Шахнов

Список сокращений

АЛТ	— атомно-лучевое травление
ВКРБ	— выпускная квалификационная работа бакалавра
ВЧ	— высокая частота; высокочастотный
ГТ	— газовое травление
ИЛЛ	— ионно-лучевая литография
ИЛТ	— ионно-лучевое травление
ИМС	— интегральная микросхема
ИПТ	— ионно-плазменное травление
ИТ	— ионное травление
ИХТ	— ионно-химическое травление
КП	— катодное пятно
КР	— коэффициент распыления
МРС	— магнетронная распылительная система
ОПОП	— основные профессиональные образовательные программы
ПТБ	— правила техники безопасности
ПТЭ	— правила технической эксплуатации
ПХТ	— плазмохимическое травление
РАЛТ	— реактивное атомно-лучевое травление
РИЛТ	— реактивное ионно-лучевое травление
РИПТ	— реактивное ионно-плазменное травление
РТ	— радикальное травление
СВВ	— сверхвысокий вакуум
СВЧ	— сверхвысокая частота; сверхвысокочастотный
СТО	— специальное технологическое оборудование
СУОС	— самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт
ХТ	— химическое травление
ЭВП	— электровакуумный прибор
ЭЛЛ	— электронно-лучевая литография
ЭОС	— электронно-оптическая система

Термины и определения

Абсорбция	— поглощение газа объемом твердого тела или жидкости
Адсорбция	— поглощение газа или пара поверхностью твердого вещества или жидкости
Быстрота действия вакуумного насоса	— величина, характеризующаяся быстротой откачки во входном сечении насоса при его работе
Быстрота откачки	— объем газа, откачиваемого в единицу времени при фиксированном давлении
Вакуум	— состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного
Газовыделение	— самопроизвольное выделение газа из материала в вакуум

Газовый разряд	— протекание тока в ионизированном газе
Газоразрядная плазма	— состояние сильно ионизированного газа, при котором плотности отрицательных зарядов электронов и положительных зарядов ионов примерно равны
Десорбция	— освобождение газов или паров, сорбированных каким-либо материалом
Диффузия газа	— движение газа в другой среде под влиянием градиента концентраций
Длина свободного пути молекулы (атома)	— длина пути молекулы (атома) между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами (атомами)
Имплантация ионная	— внедрение ионов вещества в твердое тело
Ионизация	— процесс образования ионов из нейтральных атомов или молекул
Ионное травление	— удаление частиц с поверхности твердого тела за счет явления физического распыления
Коэффициент распыления	— отношение количества выбитых атомов к количеству падающих на поверхность мишени ионов
Натекание	— проникновение газа из окружающей среды в откачанный сосуд
Обезгаживание	— принудительное удаление газа из материала
Откачка	— уменьшение молекулярной концентрации газа с помощью устройств, удаляющих или поглощающих газ
Проводимость элемента вакуумной системы	— отношение потока газа, проходящего через элемент вакуумной системы, к разности давлений на его концах
Производительность вакуумного насоса	— поток газа через входное сечение насоса
Растворимость	— свойство газа растворяться до насыщения в определенном объеме твердого тела
Сорбат	— поглощаемое вещество
Сорбент	— поглощающее вещество
Сорбция	— поглощение газа или пара твердым телом или жидкостью
Тонкая пленка	— слой материала, толщина которого находится в диапазоне значений от долей нанометра до нескольких микрометров
Физическая сорбция	— сорбция под действием физических сил, при которой не образуются химические связи
Физическое распыление	— выбивание частиц материала под действием ионов рабочего газа
Хемосорбция	— сорбция, при которой образуются химические связи
Химическое травление	— удаление частиц с поверхности твердого тела за счет химических реакций
Электронная эмиссия	— испускание электронов поверхностью твердого тела или жидкости
Электронный прибор	— прибор, в котором проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся в вакууме, газе или полупроводнике
Эмиссионный катод	— элемент прибора, предназначенный для генерации электронов за счет явления эмиссии

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

Основная цель дисциплины: получение теоретических знаний и практических навыков расчета и выбора параметров высоковакуумных технологических процессов и оборудования, используемых в приборостроении.

Задачи дисциплины:

- изучение физических основ протекания высоковакуумных технологических процессов;
- изучение теоретических основ и методов расчета и выбора параметров высоковакуумных технологических процессов для конкретных применений;
- изучение типа и состава высоковакуумного технологического оборудования для высоковакуумных технологических процессов.

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

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

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И МЕСТО ВЫСОКОВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Цель лекции: определить назначение и роль высоковакуумных технологических процессов и оборудования для их реализации, используемых при создании изделий приборостроения.

Разработка и производство электронных приборов являются основными направлениями приборостроения.

Согласно определению, данному ГОСТ 13820–77, электронным называется прибор, в котором проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся в вакууме, газе или полупроводнике. В основном выделяют электровакуумные (ЭВП), полупроводниковые и сверхвысокочастотные (СВЧ) электронные приборы. В последнее время активно ведутся разработки приборов для фотоники, оптики, плазмоники, наноэлектроники и других современных направлений.

Технологический маршрут изготовления электронных приборов может содержать до нескольких сотен операций, значительная часть которых происходит в вакууме. Для ряда приборов, прежде всего ЭВП, вакуум является необходимой средой для их функционирования, поэтому конструкторам и технологам необходимо обладать знаниями в области создания вакуумной среды, протекающих в ней технологических процессов, а также оборудования, на котором такие процессы реализуются.

1.1.1. ОБЕЗГАЖИВАЮЩИЙ ПРОГРЕВ И ОТЖИГ

Обезгаживающий прогрев в вакууме является, как правило, вспомогательной технологической операцией. Однако чем более высоковакуумный технологический процесс планируется провести в дальнейшем, тем более значимым является обезгаживающий прогрев. В общем случае обезгаживающий прогрев необходим для увеличения скорости газовыделения с поверхностей приборов и их составных частей, рабочей камеры и изделий в ней. После проведения этого процесса уменьшается количество газов, растворенных в приповерхностном слое материалов, снижается поток газовыделения с них, повышается степень вакуума.

Время обезгаживающего прогрева зависит от требуемой степени вакуума, газосодержания в вакуумной арматуре и элементах приборов (концентрации растворенных в материале газов), температуры обезгаживающего прогрева, материалов.

Для примера рассмотрим процессы обезгаживающего прогрева для металла и стекла.

При обезгаживающем прогреве металлов газ, преимущественно водород, выделяется в основном из объема и приповерхностного слоя металла вследствие большого коэффициента диффузии.

Во внутренних слоях стекла растворено большое количество газов — в значительной степени водяных паров. Однако вследствие малого коэффициента диффузии H_2O в стекле обезгазить внутренние слои стекла практически невозможно. Таким образом, при обезгаживающем прогреве стекла газ выделяется в основном с поверхности и из тонкого приповерхностного слоя.

Вакуумный отжиг в вакууме представляет собой обезгаживающий прогрев, но предметом обезгаживания в этом случае являются сами изделия (приборы). При вакуумном отжиге добиваются уменьшения газовой выделенности в процессе эксплуатации электривакуумных приборов.

1.1.2. ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Одним из самых распространенных применений высоковакуумных технологических процессов является формирование тонких пленок на поверхности различных материалов. Области применения тонкопленочных покрытий и характерные материалы приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Материалы тонких пленок и области их применения

Тип покрытия	Материал	Назначение и область применения
Оптическое, в том числе с защитой (в качестве защиты, как правило, используются прозрачные диэлектрические пленки)	Al, Al + SiO ₂ , Al + ZrO ₂ , Al + SiO ₂ , Cu, Cu + SiO ₂ , Cu + ZrO ₂ и др.	Отражающие, антибликовые, просветляющие покрытия для различных оптических приборов, охранных систем и других применений
Прозрачное проводящее	ITO (indium tin oxide), NiO, ZnO и др.	Оптические и полупроводниковые приборы, дисплеи, солнечные панели, системы обработки информации
Защитное	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , некоторые металлы (Ni, Cr) и др.	Предохранение от механических повреждений, коррозии (окисления) и т. п.; полупроводниковая электроника
Покрытие, обеспечивающее пайку или сварку	Cu, Cr + Cu, Ni, Al и другие металлы	Изделия на основе керамики (керамические платы, волноводы, антенны), окна корпусов приборов, гермовводы и др.

Окончание табл. 1.1

Тип покрытия	Материал	Назначение и область применения
Электроды	Cu, Ni и другие металлы и проводящие покрытия	Контактные площадки и коммутационные дорожки полупроводниковых приборов и печатных плат, электроды к оптическим кристаллам и др.
Функциональное для микроэлектроники и приборостроения	Различные металлы, диэлектрики, полупроводники	Пассивные компоненты, барьерные слои, эмиссионные термо- и фотокатоды, волноводы в микросхемах, изделиях силовой электроники и электровакуумных приборах
Декоративные	TiN, Cr, Al, Ni и др.	Сувенирная и другая продукция, в которой покрытия осуществляют декоративные функции; элементы интерьеров и т. д.
Адгезионные и «зародышевые» слои	Ti, Cr, Ni и др.	Улучшение адгезионных свойств в случаях, когда при непосредственном нанесении требуемых материалов на поверхность объекта не удастся обеспечить необходимую адгезию и механические характеристики покрытия, а также использование в качестве «зародышевого слоя» при необходимости осаждения покрытий гальваническими или химическими методами на поверхность диэлектрических объектов
Маскирующее	Al, Ni, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ и др.	Более низкая скорость травления, чем у маскируемого материала, обеспечивает применение при создании заданного рельефа, например, методами сухого травления

1.1.3. ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Ионное удаление поверхностного слоя — травление — в вакууме применяется как перед нанесением тонких пленок (в целях удаления оксидного слоя, очистки и активации поверхности), так и для получения требуемого микрорельефа поверхности.

С помощью вакуумного травления можно обрабатывать полупроводниковые материалы, металлы, диэлектрики, оксиды, нитриды, карбиды, алмаз, камни, высокомолекулярные соединения и т. д., причем как в монолитном, так и в тонкопленочном виде. В качестве инструмента травления используются: газоразрядная плазма (инертные и химически активные газы); ионный луч (Ag⁺, Kr⁺, Cl⁺, F⁺ и др.); атомный и молекулярный пучок (Ar, Kr, Cl₂, F₂, O₂, H₂ и др.). Глубина травления составляет от единиц

нанометров до нескольких микрометров, минимальная ширина линии травления — 0,1...0,5 мкм.

В зависимости от вида обрабатываемого материала, требований к точности размеров микроструктур и производительности оборудования применяются различные способы вакуумного травления (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Способы вакуумно-плазменного травления

Способ	Разновидность	Схема
Ионное (ИТ)	Ионно-плазменное (ИПТ)	
	Ионно-лучевое (ИЛТ)	
	Атомно-лучевое (АЛТ)	
Ионно-химическое (ИХТ)	Реактивное ионно-плазменное (РИПТ)	
	Реактивное ионно-лучевое (РИЛТ)	
	Реактивное атомно-лучевое (РАЛТ)	
Химическое (ХТ)	Газовое (ГТ)	
	Радикальное (РТ)	
	Плазмохимическое (ПХТ)	

Примечание. 1 — подложка; 2 — слой толщиной h ; 3 — маска; δ — погрешность травления.

1.1.4. ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) — метод формирования топологического рисунка интегральной микросхемы (ИМС) с субмикронными размерами элементов на полупроводниковой пластине, покрытой электронорезистом с помощью электронного луча. Минимальные размеры элементов в современных литографах приближаются к 10 нм. На практике чаще всего используют два метода: непосредственное сканирование пластины сфокусированным электронным лучом (сканирующая электронно-лучевая литография) и электронную проекцию всего изображения на пластину (проекционная электронно-лучевая литография).

При сканирующей электронно-лучевой литографии для формирования топологического рисунка ИМС используют два способа сканирования электронного луча: растровое и векторное. При растровом сканировании электронный луч сканирует всю поверхность кристалла, при этом луч включают и выключают в соответствии с передаваемым рисунком. Максимальный размер поля сканирования составляет всего несколько миллиметров (ограничен глубиной фокуса электронного луча и искажениями рисунка по краям кристалла). При векторном сканировании электронный луч движется только в тех местах рисунка, где требуется экспонирование, т. е. выключается в местах перехода от одного элемента к другому.

Проекционная электронно-лучевая литография основана на одновременной передаче всего топологического рисунка шаблона на пластину с электронорезистом. Шаблон представляет собой маску из металлической фольги с топологическим рисунком в увеличенном масштабе (10:1). Электронно-оптическая система (ЭОС) уменьшает изображение в 10 раз и проецирует его на подложку с электронорезистом. Максимальный размер поля проецирования также составляет несколько миллиметров. Минимальный размер элементов 250 нм. Проекционная электронно-лучевая литография отличается более высокой производительностью по сравнению со сканирующей.

Для экспонирования резистов в методе ионно-лучевой литографии (ИЛЛ) используются сфокусированные ионы до 10 нм, позволяющие формировать топологический рисунок с таким же разрешением. Для формирования пучка ионов применяют легкие газы — водород и гелий. В отличие от электронного пучка, ионы вследствие большей массы имеют меньшее рассеяние и более эффективно передают энергию резисту, что обеспечивает меньшую погрешность и увеличивает производительность. Вместе с тем можно создавать структуры в приповерхностном слое и без использования резиста.

Тесты к лекции 1.1

1. Какой прибор называется электронным?

- а) в котором проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся в вакууме, газе или полупроводнике;
- б) использующийся в электронной технике;
- в) имеющий сенсорное управление.

2. Каково назначение обезгаживающего прогрева?

- а) уменьшить поток газовой выделенной из материала;
- б) нагреть материал до заданной температуры в вакууме;
- в) очистить поверхность материала от загрязнений.

3. Что представляет собой тонкопленочное покрытие?

- а) слой материала толщиной в диапазоне от долей нанометра до нескольких микрометров;
- б) защитный слой на поверхности любого материала;
- в) процесс нанесения тонкой пленки.

4. Для чего применяют процесс ионного травления?

- а) для удаления поверхностного слоя материала ионами газа;
- б) удаления поверхностного слоя материала ионами в электролите;
- в) замещения ионов кристаллической решетки твердого тела.

5. Для чего используется электронная литография?

- а) для формирования топологического рисунка интегральной микросхемы;
- б) формирования маркировки на корпусе интегральной микросхемы;
- в) формирования сфокусированного электронного пучка.

1.2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ВАКУУМА И ЕГО СВОЙСТВА

Цель лекции: дать определение вакуума и основных его характеристик для использования в качестве технологической среды.

Вакуум — газовая среда с давлением ниже атмосферного ($p < p_{\text{атм}}$), используется в технологии производства практически всех приборов электронной техники (ЭВП и полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и др.) и других изделий, необходима для физического функционирования электровакуумных приборов.

Размерность давления воздуха в соответствии с ГОСТ 8.417–2002:

1 Па = 1 Н/м²; 1 бар = 10⁵ Па = 750 мм рт. ст. = 750 Торр; 1 Торр = 133,3 Па.

Вакуум обладает рядом свойств, которые обеспечивают реализацию технологических процессов:

- позволяет формировать потоки заряженных и нейтральных частиц с приданием им необходимой энергии и плотности;
- благодаря вакууму потоки заряженных частиц могут беспрепятственно преодолевать межэлектродные расстояния (при этом они могут ускоряться, фокусироваться и отклоняться от заданной траектории);
- позволяет сохранить чистоту обрабатываемой поверхности материала (обеспечить отсутствие сорбированных молекул газа, паров углеводорода и воды, оксидов и др.) для технологических процессов (формирование элементов топологии на полупроводниковой пластине, ионная очистка и т. д.);
- предохраняет нагреваемые поверхности (нити накала, катоды и др.) от окисления и перегорания.

1.2.1. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА. ТЕПЛОВЫЕ СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ

Давление газа — отношение нормальной составляющей силы, действующей со стороны газа на ограничивающую поверхность, к площади этой поверхности.

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией газов в стационарном состоянии ($T_{\text{газа}} = T_{\text{стенок}}$) устанавливается *определенное распределение скоростей* между отдельными молекулами.

Наиболее вероятная скорость движения молекул газа

$$v_r = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; m — масса молекулы.

Средняя арифметическая скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

Средняя квадратическая скорость

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m}};$$

Соотношение скоростей молекул

$$v_{н.в} : v_a : v_k = 1 : 1,13 : 1,22.$$

Функция распределения молекул газа по скоростям $F(v)$ приведена на рис. 1.1.

Определим выражение для давления p из уравнения Менделеева — Клапейрона для одного моля газа:

$$pV_m = RT,$$

где V_m — объем одного моля газа; R — универсальная газовая постоянная.

Запишем это выражение в виде уравнения газового состояния:

$$p = \frac{R}{V_m} T = \frac{N_A}{V_m} \frac{R}{N_A} T = nkT,$$

где N_A — число Авогадро; n — концентрация молекул.

Полное давление смеси газов

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_k = \sum_{i=1}^k p_i,$$

где p_i — парциальное давление i -го газа; k — количество газов в смеси.

1.2.2. ОБЪЕМ ГАЗА, УДАРЯЮЩЕГОСЯ О ЕДИНИЦУ ПОВЕРХНОСТИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ

Число соударений молекул о единицу поверхности в единицу времени

$$N_1 = n \frac{v_a}{4},$$

где v_a — средняя арифметическая скорость молекулы.

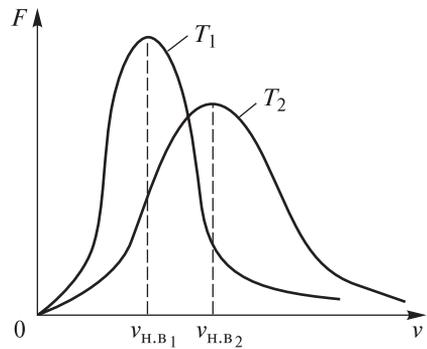


Рис. 1.1. Функция распределения молекул газа по скоростям:

$F(v)$ — вероятность того, что молекула имеет абсолютную скорость v ; $v_{н.в1}$, $v_{н.в2}$ — наиболее вероятные скорости молекул при температурах T_1 и T_2

Объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени,

$$V_1 = \frac{N_1}{n} = \frac{v_a}{4} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

При нормальных условиях ($T = 293$ К) средняя арифметическая скорость молекул воздуха

$$v_a = 462,5 \text{ м/с};$$

$$V_1 = \frac{462,5}{4} = 116 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 116 \text{ м/с}.$$

Величина V_1 не зависит от давления p и определяет максимальную теоретическую быстроту действия идеального вакуумного насоса, откачивающего все молекулы газа, которые попадают в него через входное сечение.

1.2.3. ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ

Определим длину свободного пробега молекул газа:

$$\lambda = \frac{v_a}{\nu},$$

где ν — число столкновений молекулы с другими частицами.

Пусть все молекулы газа неподвижны, кроме одной (нижней на рис. 1.2), движущейся со средней арифметической скоростью v_a . Молекула столкнется со всеми молекулами, центры которых находятся в цилиндре диаметром σ и высотой v_a .

Тогда число столкновений

$$\nu = \pi \sigma^2 v_a n,$$

где σ — диаметр молекулы; n — концентрация молекул.

Таким образом, получим

$$\lambda = \frac{1}{\pi \sigma^2 n} = \frac{kT}{p \pi \sigma^2}, \text{ поскольку } n = \frac{p}{kT}.$$

В действительности все молекулы движутся, и рассматриваемая молекула движется с относительной скоростью

$$v_{a \text{ отн}} = \sqrt{2} v_a.$$

При этом число столкновений

$$\nu = \sqrt{2} \pi \sigma^2 v_a n \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} p \pi \sigma^2}.$$

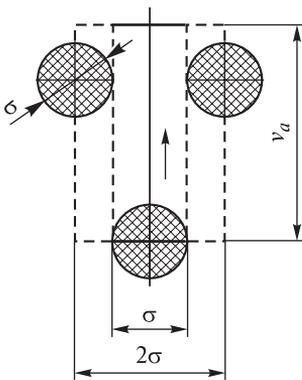


Рис. 1.2. Схема для определения длины свободного пробега молекул

Например, для молекулы воздуха при нормальной температуре $T = 293 \text{ К}$ и $\sigma_{\text{в}} = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

$$\lambda = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{\sqrt{2\pi} \cdot (3,7 \cdot 10^{-10})^2 p} = \frac{6,51 \cdot 10^{-3}}{p} [\text{м}].$$

1.2.4. СТЕПЕНИ ВАКУУМА

Если длина λ свободного пробега молекул становится соизмеримой с размерами сосуда (вакуумной камеры, электровакуумного прибора (ЭВП) и др.) и молекулы вместо взаимных соударений начинают сталкиваться в основном со стенками сосуда, то резко изменяется характер явления переноса (теплопроводности, диффузии, вязкости, движения потоков заряженных частиц — электронов и ионов).

Таким образом, степень вакуума, определяемая значением λ , существенно влияет на процессы, происходящие в вакуумированном объеме.

Низкий вакуум характеризуется давлением газа p , при котором $\lambda \ll d$, где d — характерный размер вакуумного сосуда.

Средний вакуум характеризуется давлением газа p , при котором λ соизмерима с d ($\lambda \approx d$).

Высокий вакуум характеризуется давлением газа p , при котором $\lambda \gg d$.

Сверхвысокий вакуум (СВВ) характеризуется давлением газа p , при котором за время рабочего процесса не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа.

Таким образом, степень вакуума определяется двумя параметрами: давлением p (и, соответственно, длиной свободного пробега λ) и характерным размером вакуумного сосуда d (например, диаметром). Учитывая, что наиболее используемыми размерами являются диаметры в диапазоне 16–320 мм, условные границы степеней вакуума приведены ниже:

Критерий степени вакуума	Давление, Па	Вакуум
$pd \geq 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$	$10^5 - 10^2$	Низкий
$0,004 < pd < 1,2 \text{ м} \cdot \text{Па}$	$10^2 - 10^{-1}$	Средний
$pd \leq 0,004 \text{ м} \cdot \text{Па}$	$10^{-1} - 10^{-4}$	Высокий
$\theta < 1, p < \frac{4 \cdot 10^{-4}}{t_0}$	$p < 10^{-4}$	Сверхвысокий

Условия существования СВВ определяются его взаимодействием с поверхностью материала, и в частности, коэффициентом заполнения поверхности θ :

$$\theta = \frac{N'_{\text{пов}}}{N'},$$

где N' — число мест на единице поверхности; $N'_{\text{пов}}$ — число сорбированных молекул на единице поверхности.

Если за время t_0 проведения рабочего процесса сохранится хотя бы малая доля чистой (ювенильной) поверхности, т. е. $\theta < 1$, то граница СВВ определяется давлением:

$$p \leq \frac{4 \cdot 10^{-4}}{t_0}.$$

С учетом того, что $t_0 = 1$ с, $p < 10^{-4}$ Па.

Тесты к лекции 1.2

1. Что понимают под вакуумом?

- а) газовую среду с давлением ниже атмосферного;
- б) полное отсутствие воздуха;
- в) пустоту.

2. Чем определяются скорости молекул в газе?

- а) температурой;
- б) давлением;
- в) типом газа.

3. Что характеризует объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени?

- а) максимальная теоретическая быстрота действия вакуумных насосов;
- б) давление газа;
- в) концентрация газа.

1.3. ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Цель лекции: дать определение термовакuumных процессов, их роли в высоковакуумных технологических процессах, а также описать их физическую сущность.

1.3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ

Термовакuumными называются процессы, которые обеспечивают получение требуемого давления и состава рабочей среды в вакуумированном объеме и сохранение этих параметров в течение регламентированного периода времени.

К термовакuumным технологическим процессам относятся

- удаление газов и паров из вакуумированного объема;
- обезгаживающий прогрев материалов, находящихся в вакууме;
- обработка катодов.

К физическим процессам в вакууме, на которые существенно влияет температура, относятся:

- *сорбция* — поглощение газа или пара твердым телом или жидкостью;
- *адсорбция* — поглощение газа или пара поверхностью твердого вещества или жидкости;
- *абсорбция* — поглощение газа объемом твердого тела или жидкости;
- *физическая сорбция* — сорбция под действием физических сил, при которой не образуются химических связей;
- *хемосорбция* — сорбция, при которой образуются химические связи;
- *десорбция* — освобождение газов или паров, сорбированных каким-либо материалом;
- *диффузия газа* — движение газа в другой среде под влиянием градиента концентраций.

1.3.2. РАСТВОРИМОСТЬ ГАЗОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Растворимость — свойство газа растворяться до насыщения в определенном объеме твердого тела.

Растворимость зависит от свойств газа и материала.

1. В неметаллах газ растворяется в молекулярном состоянии и объемная концентрация C газа пропорциональна давлению p :

$$C = Sp,$$

где S — коэффициент растворимости.

2. В металлах молекулы газа сначала диссоциируют на атомы, а затем растворяются, поэтому для двухатомных газов объемная концентрация C газа пропорциональна $p^{1/2}$:

$$C = Sp^{1/2}.$$

В общем случае

$$C = Sp^{1/j},$$

где j — число атомов в молекуле газа (закон Фрейндлиха).

Коэффициент растворимости

$$S = S_0 \exp\left(\pm \frac{Q_S}{jRT}\right),$$

где S_0 — константа растворимости; Q_S — энергия активации растворимости (знак «+» — для газов, образующих с материалом химические соединения (H_2 в Ti); знак «-» — для газов, образующих истинные растворы (H_2 в Fe, Cu, Ni, газы в металлах)); j — число атомов в молекуле газа, для металла $j = 2$, для неметалла $j = 1$.

1.3.3. ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ. ЗАКОНЫ ФИКА

Газ, растворенный в твердом теле, диффундирует из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией за счет явления диффузии.

Стационарный процесс диффузии имеет место, когда концентрация C газа неизменна во времени в каждой точке твердого тела: $C(t) = \text{const}$. Этот процесс описывается *первым законом Фика*. Удельный поток газа через единичную площадку

$$q' = -\frac{\partial}{\partial x}(DC),$$

где D — коэффициент диффузии, m^2/c ; C — концентрация газа в точке на расстоянии x от начала координат.

Если D не зависит от x , то

$$q' = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где $\frac{\partial C}{\partial x}$ — градиент концентрации газа в твердом теле.

На основании первого закона Фика получим выражение для удельного потока газопроницаемости через стенку.

Удельный поток газопроницаемости через тонкую стенку (рис. 1.3)

$$q' = -D \frac{\partial C}{\partial x} = -D \frac{C_{\text{атм}} - C_{\text{вак}}}{z},$$

где $C_{\text{атм}}$ — объемная концентрация газа в материале у поверхности, соприкасающейся с атмосферой; $C_{\text{вак}}$ — объемная концентрация газа в материале у поверхности, соприкасающейся с вакуумом; z — толщина стенки.

Перейдя от C к коэффициенту растворимости S , получим

$$q' = -DS \frac{p_{\text{атм}}^{1/j} - p_{\text{вак}}^{1/j}}{z}.$$

Если $p_{\text{вак}} \ll p_{\text{атм}}$, то $q' = -DS \frac{p_{\text{атм}}^{1/j}}{z}$.

Коэффициент диффузии D

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_D}{jRT}\right),$$

где Q_D — энергия активации диффузии.

Таким образом,

$$q' = -\Pi \frac{p_{\text{атм}}^{1/j}}{z}.$$

Здесь Π — коэффициент проницаемости,

$$\Pi = \Pi_0 \exp\left(-\frac{Q_{\Pi}}{jRT}\right),$$

где Π_0 — константа проницаемости,

$$\Pi_0 = D_0 S_0;$$

Q_{Π} — энергия активации проницаемости, $Q_{\Pi} = Q_D \pm Q_S$ (знак «+» — для химического соединения газа и материала, знак «-» — для истинного раствора).

Нестационарный процесс диффузии наблюдается при обезгаживании материала или, напротив, при поглощении им газа и описывается *вторым законом Фика*:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

или, если D не зависит от x ,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

При этом обычно рассматривают плоское полубесконечное тело.

Распределение концентрации газа в твердом теле для разных значений времени $C = f(x, t)$.

Толщина обезгаженного слоя (рис. 1.4) $\delta = \sqrt{\pi Dt}$.

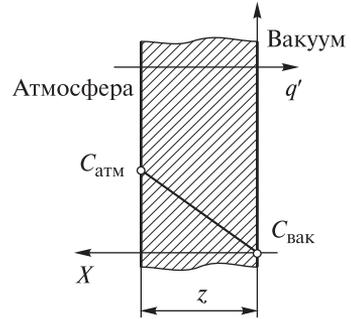


Рис. 1.3. Распределение объемной концентрации газа в тонкой стенке

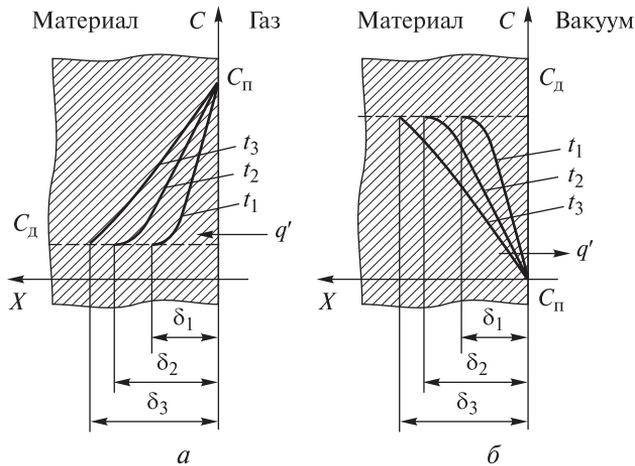


Рис. 1.4. К определению толщины (δ_1 – δ_3) обезгаженного слоя в разные моменты времени (t_1 – t_3):

a — газопоглощение; *б* — газовыделение; C_d , C_p — концентрация газа при газопоглощении и газовыделении соответственно

По номограммам, представленным на рис. 1.4, определяют значения толщины обезгаженного слоя для случаев газопоглощения и газовыделения.

Тесты к лекции 1.3

1. Растворимость газа в твердом теле — это:

а) свойство газа растворяться до насыщения в определенном объеме твердого тела

б) равномерное распределение газа в твердом теле;

в) перемешивание в твердом теле различных газов.

2. Диффузия газа в твердом теле — это:

а) движение газа в среде вследствие градиента концентрации;

б) встраивание атомов газа в кристаллическую решетку твердого тела;

в) перемешивание в твердом теле растворенных в нем газов.

3. Первый закон Фика описывает:

а) стационарный процесс диффузии;

б) градиент концентрации газа в твердом теле;

в) поток газопроницаемости через стенку.

4. Второй закон Фика описывает:

а) нестационарный процесс диффузии;

б) растворение газа в полубесконечном теле;

в) толщину обезгаженного слоя.

1.4. СОЗДАНИЕ ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ

Цель лекции: показать основные способы создания вакуумной среды, необходимой для проведения технологических процессов и функционирования ЭВП.

1.4.1. ПОЛУЧЕНИЕ ВАКУУМА РАЗЛИЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ

Для получения вакуумной среды используют вакуумные системы, примеры которых показаны на рис. 1.5. Основными элементами для получения вакуума в технологическом объеме являются вакуумные насосы. Для создания низкого и среднего вакуума ($p \approx 10^3 \dots 10^{-1}$ Па) применяют, как правило, механические насосы (рис. 1.5, а). Для получения высокого вакуума ($p \approx 10^{-3}$ Па) используют последовательно соединенные форвакуумный (механический) и высоковакуумный (например, диффузионный) насосы (рис. 1.5, б).

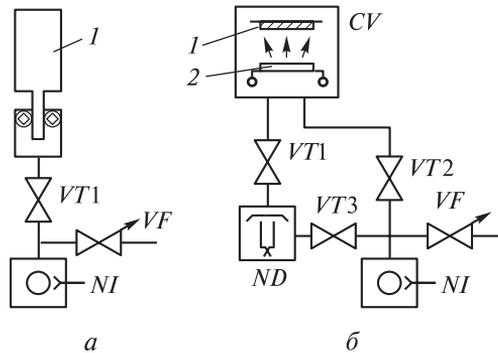


Рис. 1.5. Принципиальные схемы вакуумных систем:

а — низковакуумная откачка ($p \approx 10$ Па) установки для вакуумной упаковки продуктов ($p \approx 10^{-3}$ Па); *I* — ЭВП; *б* — высоковакуумная откачка установки для нанесения тонких пленок; *2* — подложка; *3* — испаритель; *VT1*, *2*, *3* — вентили тарельчатые; *VF* — натекатель; *NI*, *ND* — насосы механический и диффузионный соответственно; *CV* — вакуумный колпак

Вакуумные насосы можно классифицировать следующим образом:

- *по назначению*: сверхвысоковакуумные, высоковакуумные и низковакуумные (форвакуумные);
- *по принципу действия*: механические, сорбционные (для низкого, среднего и высокого вакуума), диффузионные, магнитные электроразрядные, геттероионные, крионасосы (для высокого и сверхвысокого вакуума).

Основные параметры вакуумной системы (рис. 1.6):

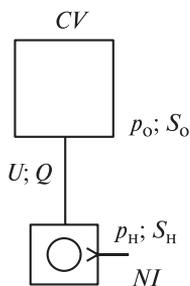


Рис. 1.6. Расчетная принципиальная схема вакуумной системы

- *быстрота откачки объекта* S_0 — объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод при давлении $p_0 \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *быстрота действия насоса* S_H — объем газа, откачиваемый насосом в единицу времени через впускной патрубок при давлении $p_H \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *производительность насоса* Q — поток газа, проходящий через его впускной патрубок, $\left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right]$;
- *проводимость трубопровода* U — отношение потока газа, протекающего через трубопровод, к разности давлений на концах трубопровода,

$$U = \frac{Q}{p_0 - p_H} \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right].$$

1.4.2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Для стационарного потока ($Q = \text{const}$) при откачке вакуумной камеры выполняется условие сплошности газовой среды:

$$Q = S_0 p_0 = p_H S_H = \text{const}.$$

Установим взаимосвязь между основными параметрами вакуумной системы S_0 , S_H , U :

$$S_H = \frac{Q}{p_H} = \frac{U(p_0 - p_H)}{p_H};$$

$$S_0 = \frac{Q}{p_0} = \frac{U(p_0 - p_H)}{p_0};$$

$$\frac{1}{S_H} = \frac{p_H}{U(p_0 - p_H)}; \quad \frac{1}{S_0} = \frac{p_0}{U(p_0 - p_H)};$$

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_n} = \frac{p_o - p_n}{U(p_o - p_n)} = \frac{1}{U}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}.$$

Это уравнение называется основным уравнением вакуумной техники. Таким образом, при увеличении проводимости трубопровода до бесконечности быстрота откачки камеры стремится к быстроте действия насоса; при закрытом трубопроводе его проводимость стремится к нулю и быстрота откачки камеры также равна нулю.

1.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТКАЧКИ

Введем следующее определение: *количество газа* — произведение объема газа на давление, при котором этот газ находится:

$$G = pV [\text{Па} \cdot \text{м}^3].$$

Количество газа численно равно объему газа, прошедшему через сечение трубопровода за некоторое время dt , умноженное на давление p в этом сечении, или же произведению скорости S_o откачки за время t , умноженное на давление p :

$$G = S_o p t.$$

Пусть в начальный момент времени в камере объемом V давление p_o (см. рис. 1.6). Поскольку процесс откачки есть удаление газа из камеры, давление в ней будет уменьшаться. Скорость этого уменьшения будет зависеть от параметров насоса (быстроты действия S_n и предельного давления p'_n) и от параметров трубопровода, т. е. от проводимости U .

За единицу времени dt через сечение трубопровода у выхода из камеры пройдет количество газа

$$dG = S_o p dt.$$

При этом, поскольку из камеры ушло указанное выше количество газа, давление в камере уменьшилось на величину dp . При неизменном объеме камеры количество ушедшего из нее газа

$$dG = -V dp,$$

следовательно,

$$S_o p dt = -V dp.$$

Разделим переменные и возьмем интегралы по времени, в результате получим решение дифференциального уравнения для определения времени откачки газа от давления p_1 до давления p_2 ($p_1 > p_2$) для простейшей идеальной вакуумной системы:

$$t = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{S_o p} dp = - \frac{V}{S_o} \ln p \Big|_{p_1}^{p_2} = - \frac{V}{S_o} (\ln p_2 - \ln p_1) = \frac{V}{S_o} \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В реальном процессе откачки вакуумной системы существуют следующие условия, влияющие на время откачки:

1) давление в системе никогда не может быть меньше или равно предельному давлению насоса $p'_н$ вследствие сопротивления трубопровода;

2) эффективная скорость откачки зависит от быстроты действия насоса и является функцией давления;

3) в системе всегда присутствуют дополнительные источники газов.

Следует отметить, что условие 1 на расчет реального времени откачки не влияет, однако при проектировании вакуумных систем для уменьшения времени откачки необходимо обращать внимание на предельное давление насоса $p'_н$, а трубопроводы проектировать с учетом их наименьшего сопротивления.

Быстрота откачки объекта связана с быстротой действия насоса *основным уравнением вакуумной техники*:

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}.$$

В данном уравнении и проводимость, и быстрота действия насоса зависят от давления. В случае проводимости эта зависимость определяется режимом течения газа, поэтому время откачки следует рассчитывать отдельно для

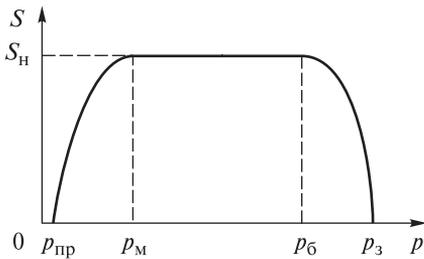


Рис. 1.7. Основная характеристика вакуумного насоса

каждого режима течения газа. Быстрота действия насоса, как правило, имеет нелинейный характер зависимости от входного давления вследствие конструктивных особенностей каждого типа насоса. Такая зависимость называется основной характеристикой вакуумного насоса (рис. 1.7). Параметры основной характеристики: S — быстрота действия насоса; p — входное давление насоса; S_n — номинальная быстрота действия насоса; $p_{пр}$ — предельное давление насоса; p_m — наименьшее рабочее давление вакуумного насоса, при котором насос сохраняет номинальную быстроту действия; p_b — наибольшее рабочее давление вакуумного насоса, при котором насос сохраняет номинальную быстроту действия; p_z — давление запуска вакуумного насоса, т. е. максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

Если изменением зависимости быстроты действия насоса от давления на входе нельзя пренебречь, т. е. насос работает некоторое время в области

Если изменением зависимости быстроты действия насоса от давления на входе нельзя пренебречь, т. е. насос работает некоторое время в области

давлений, где его быстрота действия уменьшается, то в этом случае следует разделить кривую зависимости на участки, где быстроту действия можно считать постоянной или линейной (в этом случае требуется аналитическое описание линейной зависимости). Для каждого участка необходимо рассчитать время откачки и затем все просуммировать (учитывая режимы течения газа).

1.4.4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ГАЗА В ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЕ

В реальной вакуумной системе всегда присутствуют два независимых дополнительных источника газов:

- *газовыделение* — выделение газов со стенок камеры;
- *натекание* — проникновение газов через неплотности вакуумной системы (в местах стыков, трещин), а также через материал, из которого изготовлены трубопроводы и камера (газопроницаемость).

В вакуумной технике при расчетах оперируют понятиями *потока газовыделения* $Q_{\text{гв}}$ и *потока натекания* $Q_{\text{н}}$. Суммарно их объединяют в общий *поток газонатекания* $Q_{\text{гн}}$.

При давлении p поток $dQ_{\text{гн}}$ газонатекания соответствует объему $dQ_{\text{гн}}/p$ газа, поступающего в объем камеры за единицу времени.

С учетом этих дополнительных потоков уравнение баланса количества газа в объеме камеры при ее откачке будет иметь следующий вид:

$$S_0 p dt = -V dp + Q_{\text{гн}} dt,$$

время откачки

$$t = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{S_0 p - Q_{\text{гн}}} dp = - \frac{V}{S_0} \ln(p - Q_{\text{гн}}) \Big|_{p_1}^{p_2} = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_{\text{гн}}}{S_0}}{p_2 - \frac{Q_{\text{гн}}}{S_0}}.$$

При длительной откачке устанавливается некоторое равновесие между потоком $Q_{\text{гн}}$ газонатекания в объем камеры и потоком газа, откачиваемого насосом, т. е. изменения давления не происходит. Давление в камере при таком режиме называется предельным давлением системы p' и может быть определено следующим образом:

$$p' = \frac{Q_{\text{гн}}}{S_0}.$$

Тогда выражение для времени откачки можно записать в виде

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - \frac{Q_{\text{гн}}}{S_0}}{p_2 - \frac{Q_{\text{гн}}}{S_0}} = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1 - p'}{p_2 - p'}.$$

Как правило, $p_1 \gg p'$, поэтому в формуле для определения времени откачки им можно пренебречь, т. е.

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_1}{p_2 - p'}$$

Зависимость давления от времени откачки удобно строить в полулогарифмических координатах, откладывая по оси ординат $\lg p$. Поэтому окончательно выражение для времени откачки имеет следующий вид:

$$t = 2,3 \frac{V}{S_0} \lg \frac{p_1}{p_2 - p'}$$

Тесты к лекции 1.4

1. Для получения высокого вакуума используется:

- а) комбинация высоковакуумного и форвакуумного насосов;
- б) высоковакуумный насос;
- в) вакуумная принципиальная схема.

2. Поток газонатекания состоит из:

- а) суммы потоков газовыделения и газонатекания;
- б) газов, находящихся в откачиваемом объеме;
- в) газов, подаваемых в рабочую камеру для реализации технологического процесса.

3. Какие параметры связывает основное уравнение вакуумной техники?

- а) скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость;
- б) время откачки, скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость;
- в) поток газовыделения, время откачки, скорость откачки объекта, быстроту действия насоса и проводимость.

1.5. НИЗКОВАКУУМНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Цель лекции: классификация низковакуумных средств откачки, изучение принципа их действия и современных параметров, а также получение знаний и умений по выбору параметров для конкретного технологического процесса.

К низковакуумным средствам откачки относят следующие типы насосов, работающих в диапазоне давления от атмосферного до примерно равного 10^{-1} Па:

- диафрагменные;
- водокольцевые;
- пластинчато-роторные;
- золотниковые;
- спиральные;
- кулачково-зубчатые;
- винтовые;
- двухроторные типа Рутса.

Наиболее часто используемыми в технологических вакуумных установках являются пластинчато-роторные, спиральные, винтовые и двухроторные насосы типа Рутса, а также их комбинации.

1.5.1. ПЛАСТИНЧАТО-РОТОРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип работы насоса заключается в том, что вращающийся ротор и неподвижный статор образуют замкнутый объем, увеличивающийся в размере и всасывающий газ. Для уплотнения движущихся частей насоса используют жидкости (вакуумные масла) с низким давлением насыщенных паров.

Схема вращательного пластинчато-роторного насоса показана на рис. 1.8.

Насос включает стальной ротор, закрепленный эксцентрично внутри стального корпуса. Две пластины скользят внутри ротора и плотно прижимаются к внутренним стенкам корпуса с помощью пружины или центробежной силой. При вращении ротора с пластинами откачиваемый газ по впускному патрубку входит в область всасывания, которая расширяется. Затем газ захватывается следующей пластиной, образует область переноса, переносится к впускному патрубку, образуя область сжатия, где сжимается до атмосферного давления, и выбрасывается из насоса через выпускной клапан.

Данный тип насосов получил широкое распространение в промышленности за счет хорошего сочетания скорости откачки, простоты конструкции и надежности. Основным недостатком является наличие масла, присутствие

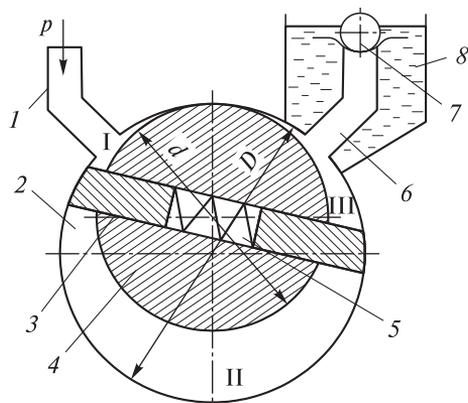


Рис. 1.8. Схема пластинчато-роторного насоса:

1 — впускной патрубок; 2 — корпус; 3 — пластины; 4 — ротор; 5 — пружина между пластинами (не обязательно); 6 — выпускной патрубок; 7 — выпускной (шариковый) клапан; 8 — масло; рабочие зоны насоса: I — область всасывания; II — область перекачки; III — область сжатия

которого в ряде технологических процессов недопустимо. Для уменьшения миграции паров масла из насоса в трубопровод и камеру на выходе насоса устанавливают разного рода ловушки.

Пластинчато-роторные насосы могут иметь одну или две ступени сжатия, вследствие чего значения их предельного давления различаются на порядок и составляют примерно 1 и 0,1 Па соответственно.

Конструкция пластинчато-роторных насосов включает газобалластное устройство, обеспечивающее дополнительное сообщение внутренней полости насоса с атмосферой для периодического удаления паров воды. Кроме того, насосы снабжены обратным клапаном, который механически запирает выхлопной патрубок насоса при окончании процесса откачки и таким образом предотвращает выброс масла в вакуумную магистраль.

1.5.2. СПИРАЛЬНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Спиральный вакуумный насос — это механический объемный вращательный насос, в котором перемещение газа осуществляется за счет периодического изменения объема двух или более серповидных полостей, образованных между двумя спиралями, одной — неподвижной, второй — совершающей орбитальное движение, повернутыми по отношению друг к другу на 180° .

Спиральный вакуумный насос (рис. 1.9) с однозаходными спиралями состоит из следующих основных частей. Две спирали, чаще всего эвольвентные, выполнены заодно с торцевыми дисками. Одна спираль, подвижная, совершает орбитальное движение относительно оси вращения привода

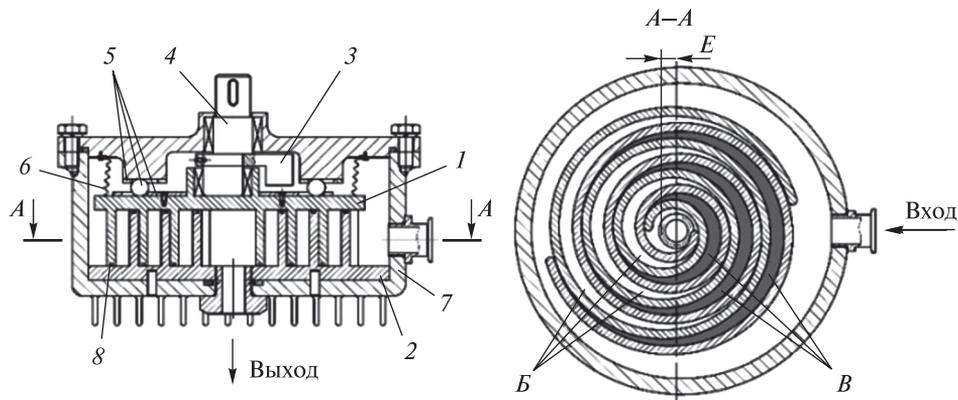


Рис. 1.9. Конструкция спирального вакуумного насоса:

1 — подвижная спираль; 2 — неподвижная спираль; 3 — корпус насоса; 4 — сифон; 5 — противоположное устройство; 6 — эксцентриковый вал; 7 — противовес; E — эксцентриситет входного вала; B, B — серповидные объемы между подвижной и неподвижной спиралями

насоса с некоторым небольшим эксцентриситетом (как правило, до 5 мм). Вторая спираль неподвижно соединена с корпусом насоса. Подвижная спираль уравнивается противовесом. При движении спирали не касаются друг друга, поскольку между ними имеется небольшой зазор $\sim 50 \dots 100$ мкм.

Эксцентриковый вал передает движение от привода к подвижной спирали. В конструкции насоса также предусмотрено устройство, предотвращающее поворот подвижной спирали относительно оси вращения, поскольку даже ее незначительное угловое перемещение приведет к заклиниванию. Это противоположное устройство выполнено в виде нескольких кулачковых механизмов, смещение осей которых равно эксцентриситету E . Эксцентриковый вал совместно с противоположным устройством обеспечивают орбитальное движение подвижной спирали. Сифон большого диаметра герметично соединяет подвижную спираль с корпусом насоса. Благодаря такой конструкции спиральный насос становится абсолютно безмасляным, полностью предотвращая возможность проникновения паров масла в откачиваемый объем.

Спирали в насосе расположены таким образом, что могут практически соприкасаться в нескольких точках, образуя при этом в случае однозаходных спиралей две серии серповидных объемов B и B , которые при орбитальном движении подвижной спирали уменьшают свой объем от периферии спиралей к их центру. Всасывание газа происходит с внешней стороны спиралей, а выброс — из отверстия в центре неподвижной спирали. Для работы спирального механизма не требуется использования клапанов ни на входе в насос, ни на выходе. Однако для предотвращения прорыва атмосферы в насос при аварийном отключении электричества можно использовать отсечной клапан на входе. Все элементы насоса, требующие смазки, вынесены за пределы рабочей камеры насоса. Наряду с клапаном на входе, необходимо использование также и клапанов на выходе из насоса. Герметичные спиральные

насосы используются для откачки сильно агрессивных и особо дорогих газов, а также в технологических процессах с применением вакуума, не допускающих присутствия углеводородов.

1.5.3. ВИНТОВЫЕ НАСОСЫ

В конструкции винтового насоса (рис. 1.10) входят два параллельных ротора в форме винтов с переменным шагом, установленные относительно друг друга с микронными зазорами и вращающиеся навстречу друг другу. Винты расположены в корпусе с минимальными зазорами, которые изменяются

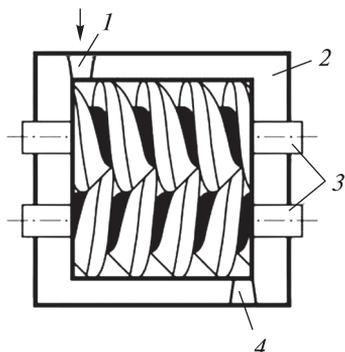


Рис. 1.10. Схема винтового насоса:

1 — впускной патрубок (фланец); 2 — корпус; 3 — роторы, выполненные в форме винтов; 4 — выпускной патрубок (фланец)

вследствие изменяющегося шага винтов. В результате попадающий в полость насоса через входной патрубок воздух постепенно сжимается и перемещается к выхлопному патрубку. Чем меньше зазоры в конце винтов, тем ниже предельное давление насоса. Однако при сжатии воздуха происходят разогрев и тепловое расширение корпуса и винтов, что ограничивает минимальные зазоры и требует постоянного охлаждения насоса.

К достоинствам такой конструкции можно отнести отсутствие смазок в полости сжатия и, соответственно, обеспечение безмасляного вакуума; отсутствие затрат на рабочую жидкость (масло), высокий КПД, высокую стойкость к влажным и пыльным откачиваемым средам, широкий диапазон скорости действия до 5000 м³/ч.

Недостатками являются высокая стоимость как самого насоса, так и его ремонта из-за требования выдерживать малые зазоры с высокой точностью; необходимость использования дополнительного управления для контроля скоростей вращения роторов.

1.5.4. ДВУХРОТОРНЫЕ НАСОСЫ (НАСОСЫ РУТСА)

Принцип работы насосов Рутса, предложенный в 1857 г., впервые был успешно применен в доменных воздуходувках. В последнее время такие насосы успешно используются в вакуумной технике в качестве механических бустерных насосов (т. е. вспомогательных насосов, улучшающих работу последовательно соединенных с ними высоковакуумных диффузионных насосов).

В насосе используются два встречно-вращающихся ротора, выполненных в форме восьмерок. Принцип работы насоса (рис. 1.11) основан на том, что роторы при вращении захватывают карманом, образованным боковой поверхностью ротора и статора, порцию откачиваемого газа из области, находящейся у впускного патрубка, и переносят его в область выхлопного патрубка.

Обязательным требованием к конструкции роторов является чрезвычайно высокая точность их изготовления. При их встречном вращении зазор δ между поверхностями роторов не должен превышать 0,05 мм, при этом касание роторов недопустимо, так как это приводит к их разогреву и заклиниванию. Увеличение зазора δ обуславливает увеличение обратного потока газа и снижение эффективности работы.

Обычно двухроторный насос устанавливают между механическим и диффузионным насосами. Двухроторный насос может работать с выхлопом в атмосферу, но это не рекомендуется из-за большого обратного потока газов через зазоры, а также вследствие нагрева насоса, приводящего к его заклиниванию.

Разновидностью двухроторных насосов Рутса являются многоступенчатые насосы (рис. 1.12).

Каждая пара роторов повернута относительно друг друга на 90° и отделена диском-статором с отверстием для перетекания газа. Откачиваемый газ от впускного патрубка последовательно сжимается каждой парой роторов по направлению к выхлопу. При этом пространство между парами дополнительно

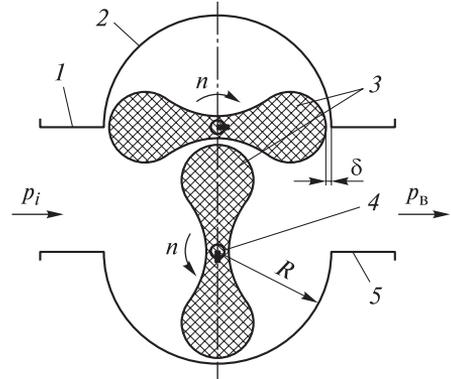


Рис. 1.11. Схема двухроторного насоса Рутса:

1 — впускной патрубок (фланец); 2 — корпус; 3 — роторы, выполненные в форме восьмерок; 4 — вал; 5 — выпускной патрубок (фланец)

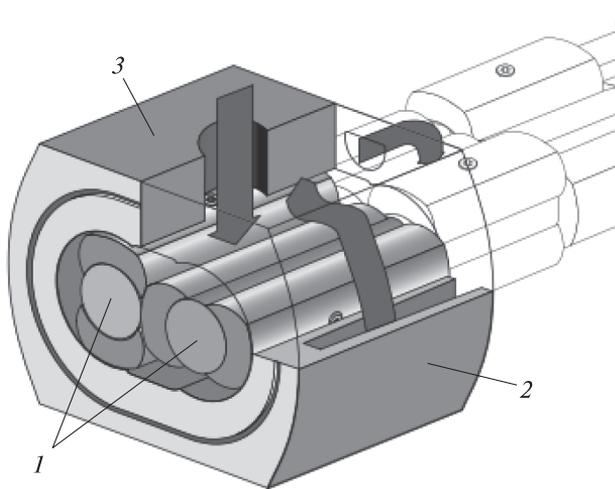


Рис. 1.12. Конструкция многоступенчатого насоса Рутса:

1 — роторы, выполненные в форме восьмерок в количестве от четырех до шести пар; 2 — общий корпус насоса; 3 — впускной патрубок

служит ловушкой для молекул газа. За счет разных значений зазора между роторами в каждой паре (ступени) эти насосы, в отличие от классических насосов Рутса, могут откачивать от атмосферного давления. Использование специального коррозионно-стойкого покрытия роторов, а также несколько большие зазоры между ними по сравнению с классическим исполнением, делают многоступенчатые насосы Рутса идеальными для применения в процессах плазмохимического травления и осаждения в линиях производства приборов и изделий микро- и наноэлектроники.

Тесты к лекции 1.5

1. Пластинчато-роторный насос является:

- а) насосом объемного действия с масляным уплотнением;
- б) обязательным элементом для процесса высоковакуумной откачки;
- в) универсальным форвакуумным насосом.

2. Спиральный вакуумный насос используется для:

- а) создания безмасляного вакуума в рабочей камере;
- б) откачки сжатого газа из турбомолекулярного насоса;
- в) откачки сжатого газа из диффузионного насоса.

3. Винтовой вакуумный насос предназначен для:

- а) создания безмасляного вакуума в рабочей камере;
- б) откачки камер с объемом больше 1000 литров;
- в) применения в установках нанесения тонких пленок.

4. Особенностью двухступенчатого насоса Рутса является:

- а) использование его в качестве второй ступени совместно с другими механическими насосами;
- б) повышенная быстрота действия при давлении, близком к атмосферному;
- в) возможность откачивать агрессивные газы.

1.6. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Цель лекции: классификация высоковакуумных средств откачки, изучение принципа их действия и современных параметров, а также получение знаний и умений по их выбору для конкретного технологического процесса.

К высоковакуумным средствам откачки относят следующие типы насосов, работающие в диапазоне давления $10^{-1} \dots 10^{-10}$ Па и ниже:

- диффузионные;
- молекулярные;
- сорбционные;
- криогенные;
- геттероионные.

Все эти насосы примерно в одинаковой степени используются для создания высокого и сверхвысокого вакуума в технологических установках. В меньшей степени в последнее время применяются диффузионные насосы, поскольку при их использовании требуется дополнительная защита в виде ловушек для предотвращения миграции паров масла в вакуумную камеру.

1.6.1. ДИФфуЗИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип работы диффузионного насоса заключается в откачке молекул газа струей пара, переносящей откачиваемые молекулы из области впуска к выпускному патрубку. Принцип работы насоса с «прямым» диффузионным соплом показан на рис. 1.13. Главной частью такого насоса является расположенное в центре охлаждаемого водой или воздухом корпуса прямооточное расширяющееся сопло — сопло Ловаля. Струя паров масла или ртути, выходящая из сопла со сверхзвуковой скоростью, образует расходящийся конус и, касаясь холодного корпуса, конденсируется на нем.

Молекулы откачиваемого газа, находящиеся в области впускного патрубка, попадая в струю пара, переносятся этой струей к области выпускного патрубка насоса (к форвакуумной области насоса). Прямое

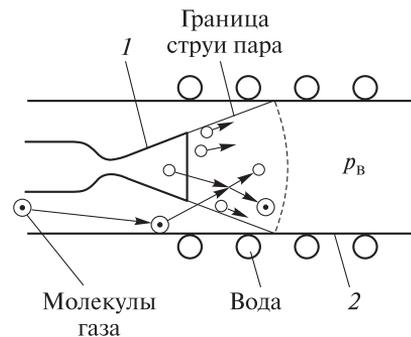


Рис. 1.13. Принцип работы сопла Ловаля:

1 — сопло; 2 — охлаждающая стенка;
 p_v — выпускное давление

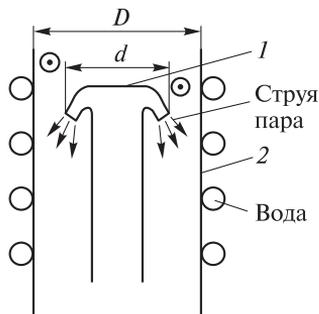


Рис. 1.14. Принцип работы зонтичного («обращенного») сопла:

1 — сопло; 2 — охлаждающая стенка; D — диаметр охлаждающей стенки; d — диаметр сопла

сопло образует струю высокой плотности, в которую откачиваемым молекулам газа трудно проникнуть (диффундировать), что снижает скорость откачки, так как большая часть молекул газа отражается от струи обратно.

Если использовать сверхзвуковую струю пара малой плотности, то можно достигнуть высокой эффективности откачки. Такая струя образуется в так называемом «обращенном» сопле — зонтичном сопле (рис. 1.14).

Только 25...30 % молекул, ударяющихся о струю, проникают в нее и могут быть откачаны. Кроме того, обратное давление в зоне работы рассматриваемого сопла должно быть минимальным, чтобы уменьшить обратный поток газа. В одноступенчатом диффузионном насосе не удается обеспечить малое обратное давление, поэтому обычно применяются многоступенчатые диффузионные насосы, где обратное давление растет от ступени к ступени. На рис. 1.15 показан насос, в котором использованы три последовательных диффузионных «обращенных» (зонтичных) сопла и одно прямооточное инжекторное сопло.

Охлаждаемая водой ловушка-колпачок уменьшает обратный (в сторону вакуумной камеры) поток паров масла из сопла на 90 %, незначительно

уменьшая при этом скорость откачки насоса. В центральный паропровод из кипятыльника попадают лишь тяжелые фракции масла с меньшим давлением насыщающих паров, кипящих при большей температуре, только в центре кипятыльника. Козырек внутри наружной трубы паропровода, служит для отражения капель при кипячении масла. Днище кипятыльника обеспечивает хорошую теплопередачу, не допускающую перегрева зон кипятыльника свыше 240 °С, чтобы избежать образования легких фракций масла, не улавливаемых ловушкой. Форвакуумная ловушка-лабиринт уменьшает потери (выбрасывание в форвакуумную линию) масла.

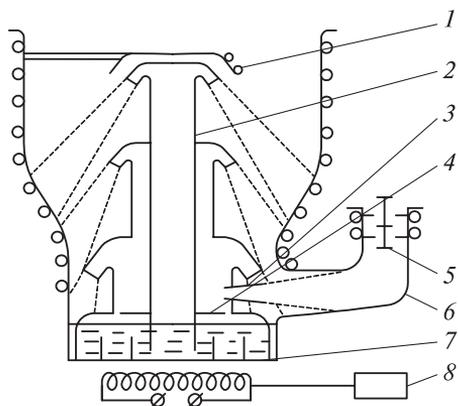


Рис. 1.15. Схема конструкции четырехступенчатого диффузионного насоса:

1 — ловушка-колпачок; 2 — центральный паропровод; 3 — инжекторное (прямоточное) сопло; 4 — козырек; 5 — форвакуумная ловушка-лабиринт; 6 — выпускной патрубок; 7 — днище кипятыльника; 8 — нагреватель (печь)

Поскольку в отличие от ртути (мономера) вакуумное масло — полимер, состоящий из смеси фракций, слегка

различающихся по давлению насыщающих паров, необходимо не допустить легкие (легкокипящие) фракции к впускному патрубку. Приведенный на рис. 1.15 насос — разгоночный, так как отделяет (разгоняет) легкие фракции, кипящие в зоне внешнего паропровода, от тяжелых, достигающих центральной, более нагретой, зоны кипятильника и кипящих в зоне центрального паропровода. Таким образом происходит улучшение предельного вакуума примерно на порядок (на вакуумном масле ВМ-5 достигается $p' \approx 4 \cdot 10^{-4}$ Па).

1.6.2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Главная идея молекулярного насоса — придание всем молекулам откачиваемого газа, движущимся в произвольных направлениях, дополнительной составляющей скорости в направлении к выпускному патрубку. Классическим примером молекулярного насоса является вращательный насос (см. рис. 1.10).

Однако с таким типом насоса невозможно обеспечить большую быстроту откачки ($S_n > 1$ л/с) из-за малой пропускной способности рабочей полости насоса. Для достижения больших скоростей откачки используют другой тип молекулярных насосов — турбомолекулярные насосы.

В отличие от молекулярного насоса, в котором ротор и отраженные от него молекулы перемещаются в одном направлении, в турбомолекулярном насосе молекулы откачиваемого газа движутся перпендикулярно плоскости вращения ротора насоса.

Процесс откачки газа в турбомолекулярном насосе обеспечивается системой чередующихся, вращающихся и неподвижных дисков с косыми прорезями (рис. 1.16, а).

Молекулы, движущиеся вниз от впускного фланца вдоль наклонных прорезей неподвижного диска (рис. 1.16, б), попадая в объем, занимаемый диском ротора, не соударяются со стенками прорезей в этом диске и движутся с линейной скоростью v_r . Эту скорость можно рассчитать с помощью векторной диаграммы скоростей (рис. 1.16, в), где \mathbf{v}_m — вектор скорости теплового движения «откачиваемой» молекулы; \mathbf{v}_r — вектор скорости перемещения стенки зазора ротора; штриховая линия — направление вектора «проскальзывания» молекулы вдоль стенки прорези ротора. Молекулы газа, движущиеся в других направлениях с другой (резко отличающейся от v_m) скоростью или движущиеся в обратном направлении, пропускаться системой дисков не будут.

Для эффективной откачки молекул газа, движущихся со средней тепловой скоростью $v_a \approx 500$ м/с, необходимо придать ротору диаметром 200...400 мм скорость вращения около 16 000–25 000 об/мин.

Турбомолекулярные насосы создают предельное давление до $p_1 = 10^{-8}$ Па и обеспечивают стабильную быстроту откачки 50...4000 л/с со впускным давлением в диапазоне $p_{вп} = 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-8}$ Па.

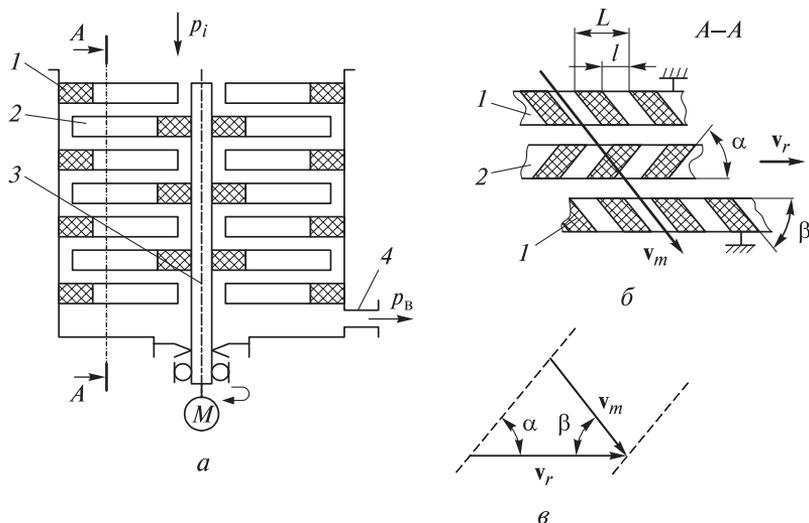


Рис. 1.16. Схема работы турбомолекулярного насоса:

a — схема конструкции; *б* — процесс пролета молекул через систему дисков с прорезями; *в* — диаграмма скоростей; 1 — диски статора с прорезями, наклоненными под углом β к плоскости дисков; 2 — диски ротора с прорезями, наклоненными под углом α к плоскости вращения дисков; 3 — вал ротора; 4 — выпускной патрубок

Эти насосы предназначены для откачки больших потоков газов, в том числе агрессивных, что делает их незаменимыми в приборостроении при реализации процессов нанесения и травления тонких пленок.

1.6.3. СОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Сорбционные насосы — насосы для удаления газов из вакуумного объема, в которых используется физическая адсорбция.

Большим достоинством сорбционных насосов является отсутствие масла в конструкции, что позволяет получить с их помощью «безмасляный» вакуум. Обычно сорбционные насосы используют как насосы предварительного разряжения совместно с магнитно-разрядными или криосорбционными насосами для получения «безмасляного» сверхвысокого вакуума.

В ряде случаев сорбционные насосы применяются как самостоятельное средство откачки для получения «безмасляного» среднего и высокого вакуума.

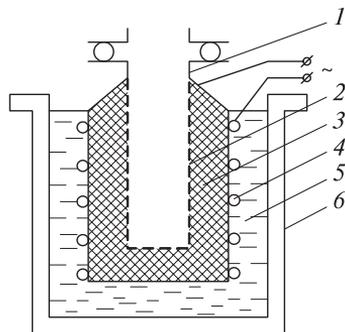
Рассмотрим принцип работы сорбционного насоса (рис. 1.17).

Обычно корпус насоса выполнен в виде цилиндрического стального контейнера, наполненного сорбентом, эффективно поглощающим газ (активированным углем, цеолитом, силикагелем) и допускающим многократную регенерацию.

Поскольку полный рабочий цикл одного насоса включает в себя как период регенерации (нагрева, когда насос не откачивает, а, наоборот, выделяет

Рис. 1.17. Схема сорбционного насоса:

1 — присоединительный патрубок, служащий как для откачки (всасывания газов в насос), так и для регенерации (удаления газов из объема насоса); 2 — сетчатый контейнер, наполненный адсорбентом; 3 — адсорбент; 4 — нагреватель для регенерации адсорбента; 5 — охлаждающее устройство, заполняемое жидким азотом после регенерации для приведения адсорбента в рабочее состояние; 6 — теплоизолирующий контейнер (сосуд Дьюара)



откачанный им газ), так и рабочий период, для обеспечения непрерывности процесса откачки необходимо использовать два насоса. Тогда в любой момент времени один насос откачивает газ из вакуумной системы, а другой — регенерируется.

1.6.4. КРИОСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Криосорбционными (криогенными) называются насосы, в которых для удаления остаточных газов из вакуумного объема используется очень низкая температура ($T = 4...20$ К). Откачка происходит за счет конденсации молекул откачиваемого газа на поверхностях криопанелей, охлаждаемых до криогенных температур.

Обычно в криогенных насосах применяют жидкий гелий (температура кипения в атмосфере 4,2 К) или, реже, жидкий водород (температура кипения 20,3 К). Для того чтобы минимизировать потери (испарение) используемых жидких хладагентов (H_2 и He) и не допустить нежелательного повышения температуры криопанелей с конденсированным на них газом, в крионасосах используются экраны, охлаждаемые жидким азотом и уменьшающие тепловую радиацию от деталей корпуса, нагретых до комнатной температуры (300 К). Защитные экраны проектируют таким образом, чтобы криопанель не была «видна» со стороны нагретых до комнатной температуры деталей.

Схема конструкции «заливного» крионасоса, в который хладагент — жидкий гелий или водород — заливают снаружи, показана на рис. 1.18.

Рабочая криопанель представляет собой емкость, заливаемую рабочим хладагентом. Эта панель окружена охлаждаемыми жидким азотом (77 К) экранами. Емкость, охлаждаемая жидким азотом, предотвращает нагрев крепежной горловины криопанелями до комнатной температуры. Для уменьшения теплового потока, подводимого по материалу горловины, она выполнена в виде тонкостенного сильфона из коррозионно-стойкой стали, обладающей малой теплопроводностью. Такая конструкция горловины уменьшает подвод теплоты от корпуса к рабочей криопанели и уменьшает расход жидкого гелия. Экраны уменьшают теплоподвод, осуществляемый за счет тепловой радиации от корпуса насоса (нагретого до комнатной температуры 300 К). При этом экраны конструируют таким образом, чтобы не уменьшать быстроту откачки насоса (криопанели).

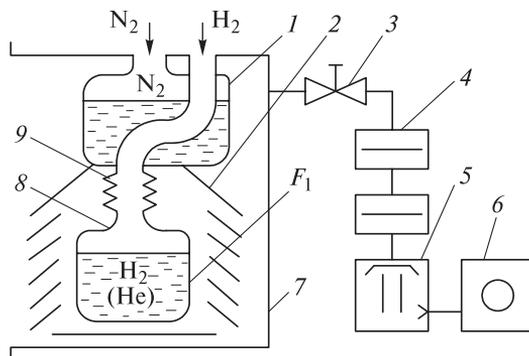


Рис. 1.18. Схема конструкции «заливного» крионасоса:

1 — емкость, охлаждаемая жидким азотом;
 2 — экраны; 3 — затвор; 4 — азотная ловушка;
 5 — диффузионный насос; 6 — механический насос;
 7 — корпус; 8 — рабочая криопанель; 9 — тонкостенный сильфон (горловина)

В принципе, криогенный насос может работать, начиная с атмосферного давления, но при этом большое количество хладагента (жидкого гелия или водорода) необходимо затратить на конденсацию газов, которые можно было бы откачать насосами других типов с минимальными затратами средств. Поэтому перед запуском (заливкой) крионасоса вакууммируемый объем откачивается системой предварительной откачки, которая обычно включает в себя диффузионный паромасляный насос (так как пары масла хорошо вымораживаются ловушкой), механический насос и присоединяется к корпусу криогенного насоса через затвор. Эта система создает предварительное разрежение порядка $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па.

Конденсационный насос с криогенератором приведен на рис. 1.19. В корпусе насоса 1 размещена криопанель 3, являющаяся откачивающим элементом насоса. Криопанель имеет хороший тепловой контакт со второй ступенью машины, температура которой достигает примерно 10 К. Для снижения теплопритока к криопанели со стороны теплых стенок насоса и откачиваемой камеры предусмотрен жалюзийный экран 2, который имеет хороший тепловой контакт с первой ступенью машины 8. Температура экрана поддерживается на уровне 80 К.

На первой ступени конденсируются пары воды и пары углеводородов, на второй — азот, кислород, неон, углекислый газ. Для откачки водорода на нижнюю поверхность криопанели второй ступени наносят слой активированного угля, который сорбирует водород. При этом крионасосы такого типа практически не откачивают гелий.

В картере 12 размещены компрессорный поршень 9 и шатуны привода, сидящие на эксцентриковых втулках 11 и 13 вала 14 встроенного электродвигателя 15. Картер криогенератора через кран 10 заполняется газообразным гелием под давлением 16...20 атм (1,62...2,03 МПа).

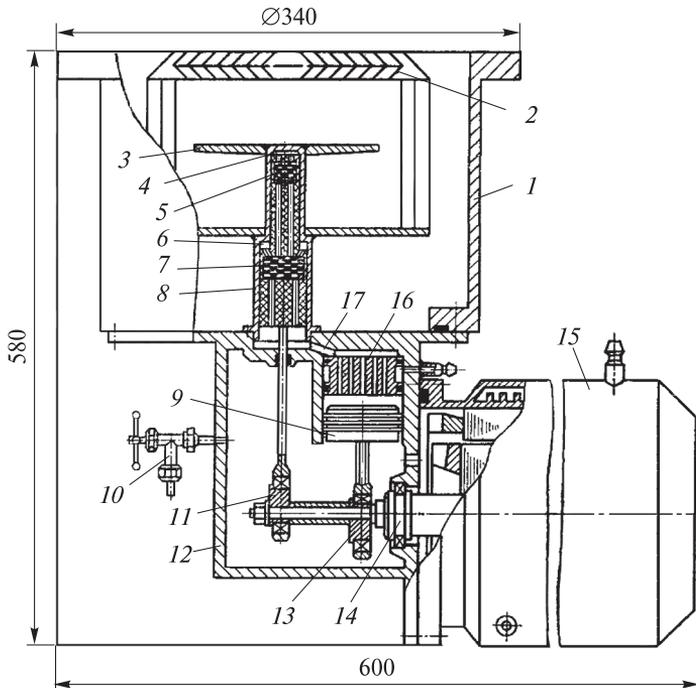


Рис. 1.19. Конденсационный насос со встроенным криогенератором

Криогенератор работает следующим образом. Газ, сжатый компрессорным поршнем 9 до давления 35...40 атм (3,55...4,06 МПа), поступает в водяной холодильник 16, где отводится теплота сжатия. Затем газ по каналу 17 проходит через сетчатый регенератор 7, расположенный в вытеснителе. Часть газа поступает в полость расширения 6 первой ступени, а другая часть, пройдя регенератор 5, поступает в полость расширения 4 второй ступени. При движении поршня вниз происходит расширение газа в обеих ступенях и его охлаждение.

Быстрота действия серийно выпускаемых конденсационных насосов достигает 10^5 л/с, предельное остаточное давление составляет менее 10^{-7} Па.

1.6.5. ИОННЫЕ НАСОСЫ

Принцип работы ионных насосов основан на сорбции ионизированных молекул газа сорбентами (геттерами), использующими принцип хемосорбции. При этом для повышения эффективности процесса поглощения ионизированные молекулы газа (ионы) с помощью электрического поля принудительно направляются к сорбирующей поверхности и с большой силой «вбиваются» в нее.

В качестве геттера используется титан (иногда в сплаве с цирконием) благодаря высокой энергии сорбции, позволяющей прочно удерживать сорби-

рованные молекулы. На практике применяют два вида ионных насосов, различающихся по способу увеличения траектории электронов и способу испарения титана: магнитоэридные и геттероионные насосы.

Первичные электроны (рис. 1.20), образовавшиеся в центре ячеек ячеистого анода (например, вследствие космического излучения), ионизируют молекулы находящегося в объеме ячеек газа. Образовавшиеся вторичные электроны устремляются к стенкам ячеек положительно заряженного анода. Поперечное магнитное поле превращает их траекторию в архимедову спираль, лежащую в плоскости, нормальной к магнитным силовым линиям. Увеличение траектории электронов резко повышает вероятность ионизации остальных молекул газа. Образовавшиеся ионы летят к титановым катодам и, бомбардируя их, распыляют титан на стенки ячеек анода. Таким образом, катоды поглощают газ в виде ионов, а аноды — в виде нейтральных молекул (поглощая их свежераспыленной титановой пленкой).

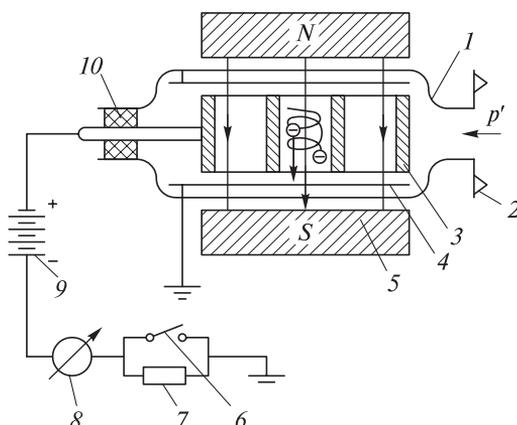


Рис. 1.20. Схема конструкции магнитоэридного насоса:

1 — корпус; 2 — фланец для крепления к вакуумной системе (камере); 3 — ячеистый анод; 4 — катод (два катода по обе стороны анода); 5 — магнит, образующий поперечное магнитное поле; 6 — переключатель для работы в среднем либо в высоком вакууме; 7 — дополнительное сопротивление для работы в среднем вакууме; 8 — амперметр; 9 — высоковольтный источник; 10 — токоввод

Свойство геттерных насосов откачивать различные газы с разной скоростью (селективность откачки) может быть использовано для поиска течей. Так, обдувая негерметичную вакуумную систему аргоном или гелием, при попадании струи пробного газа на место течи оператор наблюдает увеличение давления, поскольку эти газы медленнее откачиваются (медленнее, чем N_2 и O_2 , составляющие основу атмосферы).

Ионные насосы работают в широком диапазоне давления: $10^{-1} \dots 10^{-7}$ Па. Максимальное (стартовое) рабочее давление насоса составляет 1 Па. Насос может быть прогрет до температуры 450°C без магнитов или до 150°C в сборе с магнитами.

Тесты к лекции 1.6

1. В чем заключается принцип действия диффузионного насоса?

а) в захвате молекул газа струей пара и их переносе из области входного патрубка насоса к его выпускному патрубку;

б) в специальном направлении потока паров масла, совпадающем с направлением движения молекул газа;

в) в распределении откачиваемых газов по типам за счет системы сопел, обеспечивающих разные скорости паров масла.

2. Особенностью турбомолекулярных насосов является:

а) отсутствие обратного движения молекул из полости насоса в вакуумную камеру;

б) откачка любых типов газа с одной и той же скоростью;

в) возможность откачки от атмосферного давления.

3. Криогенный насос используется для:

а) откачки газов, у которых температура конденсации выше температуры холодных поверхностей насоса;

б) преимущественной откачки гелия;

в) преимущественной откачки паров воды.

4. Магниторазрядный насос является наилучшим выбором для:

а) получения высокого и сверхвысокого вакуума в рабочих камерах небольшого объема;

б) откачки больших потоков газа;

в) откачки гелия.

1.7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Цель лекции: изучить классификацию, принцип действия и характеристики средств измерения вакуума в разных диапазонах давлений, а также вспомогательных элементов, используемых при построении вакуумных систем.

1.7.1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

Следует отметить, что измерение вакуума — это измерение давления ниже атмосферного. Поскольку давление является критическим параметром практически для всех технологических процессов, реализуемых в вакууме, измерение давления (вакуума) представляет собой важнейшую процедуру. Давление, создаваемое современными вакуумными системами, варьируется в диапазоне $10^5 \dots 10^{-13}$ Па (рис. 1.21), поэтому технически невозможно создать манометр, работающий в столь широком диапазоне давления.

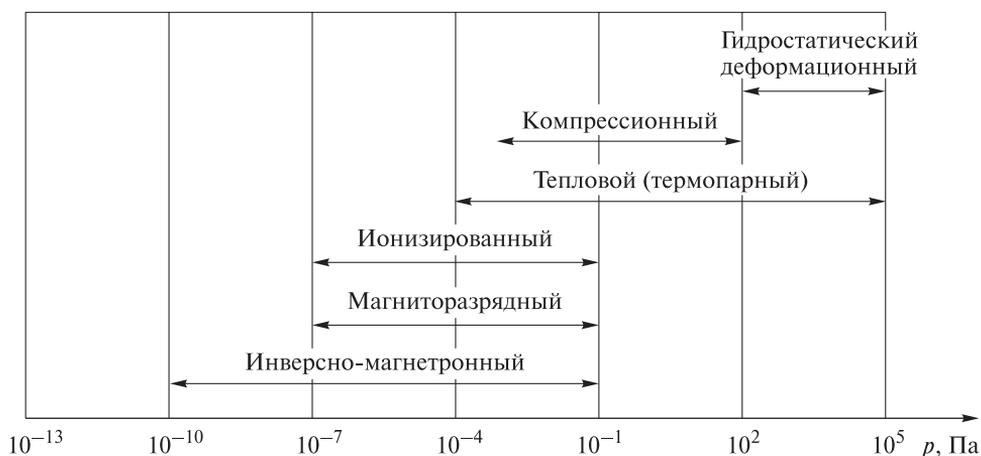


Рис. 1.21. Диапазоны измерений манометров

Единицей давления в СИ является паскаль, названный в честь Паскаля, впервые измерившего атмосферное давление:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

До 1950-х годов была принята внесистемная единица давления 1 Торр = = 1 мм рт. ст. = 133,3 Па, названная в честь Торричелли, впервые определившего «силу боязни пустоты». Соотношения указанных единиц с некоторыми другими, принятыми в Англии и США, а также с единицами, принятыми в гидравлике и пневматике, приведены ниже.

Единица измерения	Торр	Миллибар	Бар	Паскаль	Стандартная атмосфера, атм (ГОСТ 4401–81)
1 Торр.....	1	1,333	$1,33 \cdot 10^{-3}$	133,3	$1,326 \cdot 10^{-3}$
1 мбар.....	0,75	1	0,001	100	$9,87 \cdot 10^{-4}$
1 бар.....	750	1000	1	$1 \cdot 10^5$	$9,87 \cdot 10^{-1}$
1 Па.....	0,0075	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$	1	$9,87 \cdot 10^{-6}$
1 атм.....	760	1013	1,013	101 325	1

Обычно манометры снабжены блоком управления с контроллером, позволяющим преобразовывать изменения давления в электрический сигнал, для управления автоматикой вакуумной системы.

Рассмотрим основные типы широко применяемых манометров.

Гидростатические V-образные манометры. Эти манометры позволяют измерять давление от атмосферного до 10^2 Па и состоят из откачанной V-образной трубки, частично заполненной ртутью и соединенной с вакуумной системой. Преимущество манометров — прямое измерение давления независимо от вида газа.

Деформационные манометры. Принцип их работы основан на изменяющейся (в зависимости от давления) деформации упругого элемента — трубки Бурдона или металлической мембраны. Использование металлической мембраны в сочетании с индуктивными или емкостным датчиком точных перемещений позволяет измерять давление в области $p_{\text{изм}} = 10^5 \dots 10^{-2}$ Па.

Компрессионный манометр (Мак-Леода). Это усовершенствованная разновидность гидростатического V-образного манометра. Газ сжимается в манометре в известное число раз, что обеспечивает с помощью прямого метода измерение давления до 10^{-3} Па. Компактная разновидность манометра — **вакустат** — позволяет монтировать манометр на установке.

Достоинства компрессионного манометра:

- прямое измерение давления, что позволяет использовать его в качестве образцового для калибровки манометров других типов;
- широкий диапазон измеряемого давления, распространяющийся на область высокого вакуума.

К недостаткам следует отнести:

- большое время, затрачиваемое на один замер (2...5 мин);
- невозможность работы с конденсирующимися парами.

Тепловые манометры. Принцип работы тепловых манометров основан на связи теплопроводности газа с давлением. В зависимости от способа измерения температуры нагреваемой нити их подразделяют на два типа:

1) манометры сопротивления (манометры Пирани) — измеряют изменение температуры нити как функцию изменения ее сопротивления. Сопротивление нити измеряют с помощью мостовой схемы. Манометр может измерять давление в диапазоне $10^3 \dots 10^{-2}$ Па;

2) термопарный манометр — основан на том же принципе, что и манометр Пирани. Представляет собой наиболее дешевую и простую разновидность теплового манометра, в котором температура нагретой нити измеряется с помощью термопары. Работает в диапазоне давления $10^2 \dots 10^{-1}$ Па.

Ионизационный манометр. Принцип его работы основан на ионизации газа в объеме датчика потоком электронов, который строго стабилизирован (обычно $50 \cdot 10^{-6}$ А). Тогда количество образованных (за счет электронной бомбардировки молекул) ионов будет зависеть от давления (точнее, от объемной концентрации газа). В простейшей модификации возможно измерение давления в диапазоне $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Па. В усовершенствованной модификации (датчик Альперта), где устранена причина, вызывающая заметный фототок, диапазон измеряемого давления $10^{-1} \dots 10^{-9}$ Па.

Магниторазрядный манометр (манометр Пеннинга). Принцип действия манометра Пеннинга, или так называемого манометра с холодным катодом, как и у ионизационного манометра, основан на ионизации газа. Для расширения диапазона измеряемого давления и возможности использования холодного катода в манометре использована система скрещенных магнитного и электрического полей. Магнитное поле закручивает траекторию электронов по спирали, увеличивая вероятность ионизации молекул газа электронами. Диапазон измеряемого давления составляет $10 \dots 10^{-10}$ Па.

Инверсно-магнетронный манометр, как и магниторазрядный, основан на схеме скрещенных электрического и магнитного полей. В отличие от магниторазрядного, конструкция системы «анод—катоды» позволяет создать практически стационарную орбиту для появляющихся в результате ионизации вторичных электронов. Конструкция предусматривает также разделение фонового и ионного (измеряемого) токов, что обеспечивает расширение диапазона измеряемого давления в области сверхвысокого вакуума и работу в диапазоне $p_{\text{изм}} = 10 \dots 10^{-12}$ Па.

1.7.2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Запорная арматура (клапаны, затворы, натекатели) предназначена для герметичного перекрытия вакуумных линий, а также для подачи рабочих газов в объем камеры или в требуемые элементы вакуумной системы.

Существует множество различных типов запорной арматуры для разных применений в области вакуумной техники. Их наименования определяются в зависимости от конструкции или функции.

Угловые клапаны (рис. 1.22) отличаются высокой герметичностью, они прочны, пригодны для промышленного применения и устойчивы к загрязнениям. Входной и выходной фланцы расположены под углом 90° друг к другу на корпусе из алюминия или коррозионно-стойкой стали. Уплотнение

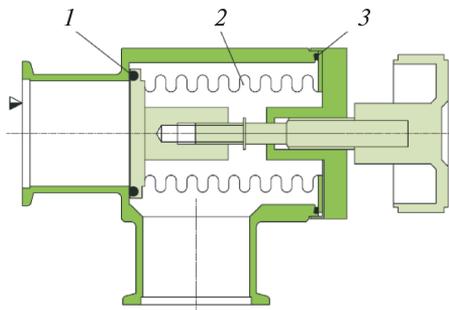


Рис. 1.22. Схема углового клапана с сильфонным уплотнением:

1 — уплотнение тарелки; 2 — сильфон;
3 — уплотнение корпуса

из эластомера трапецевидной или кольцевой формы находится на тарелке клапана. Пластина клапана прижата к седлу клапана для его герметизации. Поскольку элементы привода расположены вне вакуумного объема, их можно смазывать. Угловые клапаны выпускаются со всеми распространенными типами фланцев и могут иметь ручное, пневматическое, электромеханическое или электромагнитное управление.

Для сверхвысокого вакуума уплотнения корпуса и седла клапана выполняют из фторкаучука, меди или специальных сплавов. В последнем случае они называются цельнометаллическими.

Прходные (линейные) клапаны в основном имеют ту же конструкцию, что и описанные выше угловые клапаны, за исключением того, что их вход и выход расположены по оси. Благодаря этой особенности проводимость линейных клапанов обычно выше, чем у угловых клапанов.

В то время как клапаны лишь частично освобождают номинальное поперечное сечение, затворы (рис. 1.23) обеспечивают свободный проход в открытом положении. Вкупе с их небольшой высотой это способствует высокой проводимости и, следовательно, уменьшению потерь эффективной скорости откачки при использовании высоковакуумных насосов.

Тарелка затвора, обычно сдвоенной конструкции, двигается вперед и назад, открывая и закрывая проходное отверстие затвора. В закрытом положении элементы тарелки раздвигаются и прижимаются к уплотняющим поверхностям с помощью шариков. Большинство затворов являются герметичными при перепаде давления 0,1 МПа, действующем на тарелку, однако они могут открываться только при наличии низкого перепада давления на тарелке.

Клапаны дозирования газа — натекатели (рис. 1.24) — используются для ввода заданных потоков газа в вакуумную систему, например, для поддержания или установления определенного давления. Часто они работают по принципу игольчатого клапана. При повороте шпинделя освобождается зазор, что обеспечивает пропускную способность определенного потока газа. Поток газа зависит от оборотов шпинделя и представлен в виде характе-

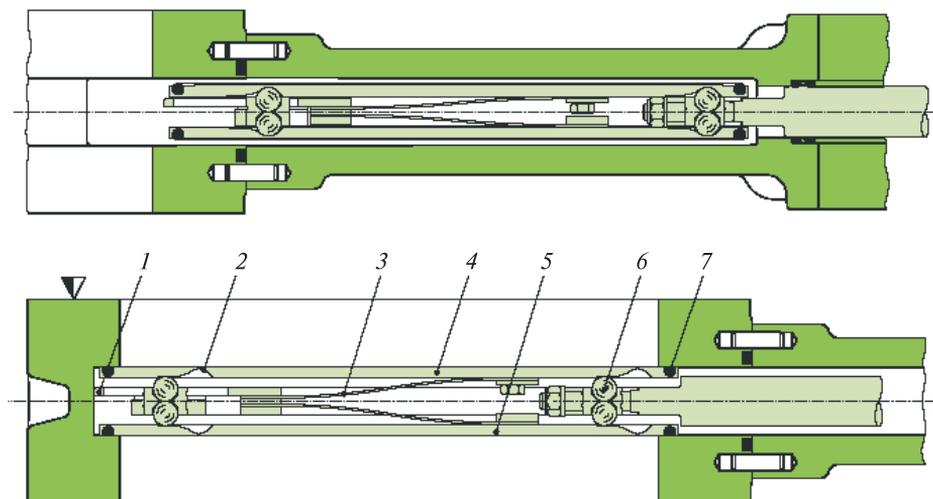


Рис. 1.23. Конструкция шиберного затвора:

1 — пружинный стопор; 2 — фиксаторы шариков; 3 — пластинчатые пружины; 4 — тарелка;
5 — распорная пластина; 6 — пары шариков; 7 — уплотнение тарелки

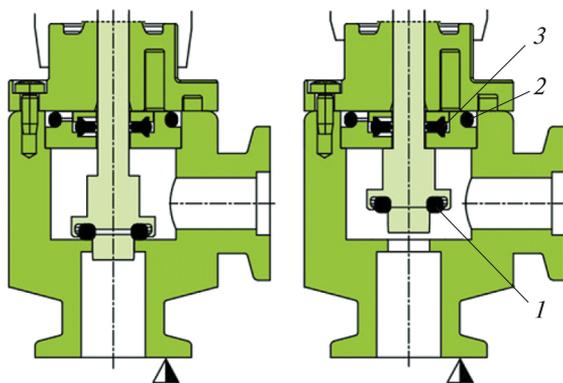


Рис. 1.24. Конструкция механического натекателя:

1 — уплотнение тарелки; 2 — уплотнение корпуса;
3 — уплотнение штока

ристической кривой. Положение клапана можно считать со шкалы при установке.

Фитинги предназначены для соединения (коммутации) остальных элементов вакуумной системы между собой.

Для монтажа стандартных вакуумных соединений до условного диаметра (ДУ) проходного сечения DN50 в низком, среднем и высоком вакууме (рис. 1.25) используется KF-фланец (DIN 28403, ISO 2861).

Между двумя фланцами находится уплотнение. Оно состоит из центрирующего кольца из коррозионно-стойкой стали или алюминия и

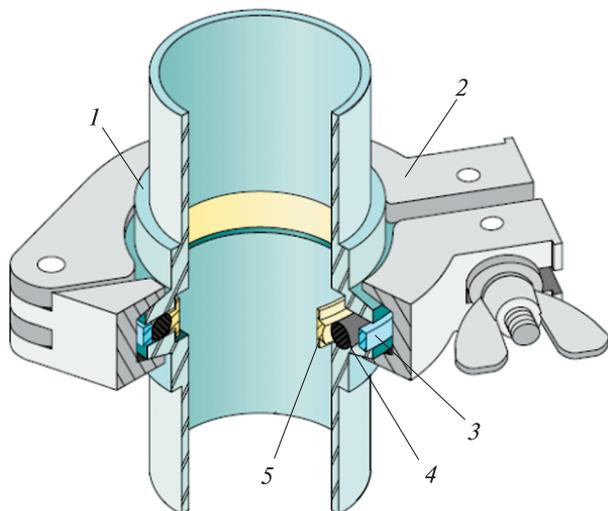


Рис. 1.25. Соединение с помощью KF-фланца:

1 — KF-фланец; 2 — хомут; 3 — дополнительное внешнее кольцо;
4 — уплотнительное кольцо; 5 — центрирующее кольцо

уплотняющего кольца из вакуумной резины (витона, нитрила). Фланцы соединяются с помощью накладного хомута, который имеет коническую внутреннюю поверхность, соответствующую внешней конической поверхности фланцев.

Для монтажа применяют, как правило, внутренние центрирующие кольца и обычные шарнирные хомуты с «барашковой» гайкой. Они позволяют проводить быстрый и простой монтаж без инструментов. Для особых случаев имеются, кроме того, внешние центрирующие кольца и специальные хомуты или звеньевые хомуты.

При монтаже стандартных вакуумных трубопроводов для среднего и высокого вакуума, начиная с условного диаметра проходного сечения DN63, используется нормированная система соединения ISO-K (DIN 28404, ISO 1609) (рис. 1.26).

Два одиночных ISO-K-фланца соединяются с помощью струбинообразных зажимов с двойным захватом. На внешней (атмосферной) стороне фланцы имеют паз, за который крепятся зажимы, стягивающие фланцы. Как и при KF-соединениях, между фланцами находится уплотнение, состоящее из центрирующего и уплот-

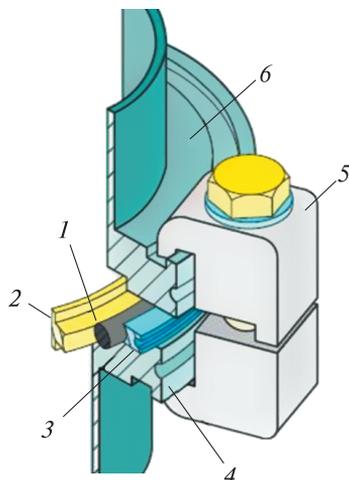


Рис. 1.26. ISO-K-соединение:

1 — уплотнительное кольцо; 2 — центрирующее кольцо; 3 — внешнее кольцо; 4, 6 — фланцы ISO; 5 — двойная струбина

нящего колец. Чаще всего используется дополнительное опорное кольцо, которое обеспечивает сохранение равномерного расстояния между фланцами во время монтажа.

Для получения сверхвысокого вакуума (UHV) к материалам и соединениям предъявляются особые требования, в частности CF-стандарт (ISO/TS 3669-2:2007).

На сверхточных токарных станках с числовым управлением вытачиваются CF-фланцы из нержавеющей стали. Вращающиеся CF-фланцы состоят из двух частей: внутренней части с уплотняющей поверхностью и внешней части с отверстиями для болтов. С вакуумной стороны CF-фланцы имеют специальный острый выступ — «зуб», который вдавливается в плоское уплотнительное кольцо, в результате чего происходит уплотнение (рис. 1.27).

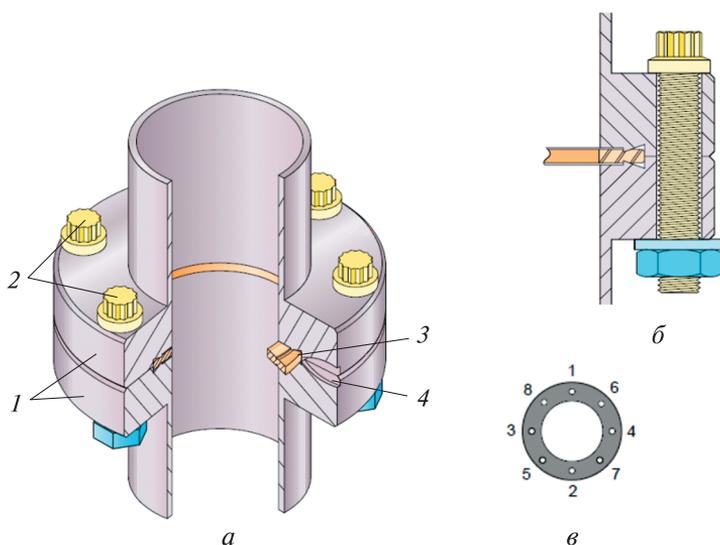


Рис. 1.27. CF-соединение:

a — схема монтажа медной прокладки; *б* — схема монтажа фланцев;
в — последовательность затягивания болтов; 1 — фланцы; 2 — болты; 3 — медная прокладка; 4 — щель для шупа течеискателя

Компоненты, применяемые в технике сверхвысокого вакуума, должны иметь минимальный уровень натекания и высокую температуру нагрева. Для уплотнения CF-фланцев используют уплотнительные кольца из особо чистой бескислородной меди (OFHC). Вследствие деформации режущей кромкой медные кольца можно использовать только один раз. При этом прокладка из отожженной меди является одноразовой, т. е. ее многократное применение не допускается. Сдавливание проводится болтами, которые равномерно затягивают с помощью гаечного ключа во избежание деформаций. Такое фланцевое соединение имеет уровень натекания менее $1 \cdot 10^{-9}$ л/с и температуру нагрева до 450 °С.

Тесты к лекции 1.7

1. Тепловые и термопарные датчики давления предназначены для измерения:

- а) низкого и среднего вакуума;
- б) высокого вакуума;
- в) сверхвысокого вакуума.

2. Ионизационные датчики давления предназначены для измерения:

- а) высокого и сверхвысокого вакуума;
- б) высокого вакуума;
- в) низкого и среднего вакуума.

3. В соединениях стандарта KF в качестве материала уплотнения используется:

- а) вакуумная резина;
- б) алюминий;
- в) бескислородная медь.

4. В соединениях стандарта CF в качестве материала уплотнения используется:

- а) бескислородная медь;
- б) алюминий;
- в) вакуумная резина.

1.8. ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ

Цель лекции: изучение основных характеристик электронных потоков, методов их формирования и физических явлений, позволяющих получать эти потоки.

1.8.1. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

В приборостроении и в электронных технологиях в качестве инструмента используются острогофокусированные электронные, ионные, атомарные, оптические, рентгеновские пучки, газоразрядная плазма, а также мощные электрические и магнитные поля, благодаря которым функционируют сами приборы, и с помощью которых обрабатывают изделия и измеряют их размеры, контролируют свойства и диагностируют параметры, управляют технологическими процессом и оборудованием.

Параметры пучков, характерные как для приборов, так и для электронных, ионных и плазменных технологических процессов, приведены в табл. 1.3. Для фотонов с энергиями 1,6...3,5 эВ, соответствующими видимому свету, минимальный размер обработки составляет приблизительно 1 мкм, а в области ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения (энергия фотонов находится в диапазоне 5...1000 эВ) размер обработки можно уменьшить до 0,1 мкм.

Таблица 1.3

Характеристики пучков атомных частиц

Тип пучка	Длина волны, нм	Энергия, эВ	Минимальный размер, нм	Удельная мощность, Вт/см ²
Оптический	200–400	1,6–3,5	1000	10^{-2} – 10^{10}
Рентгеновский	0,2–2,0	5–1000	100	10^{-3} –1
Электронный	0,01	10^2 – 10^5	10	10^{-2} – 10^{10}
Ионный	0,001	10^2 – 10^7	1	10^{-4} – 10^5
Атомарный	0,001	$0,1$ – 10^{4*}	1*	10^{-6} – 10^{2*}

* Максимальные значения энергии и плотности мощности атомарного пучка, а также минимальный размер обработки относятся к ионному пучку с нейтрализованным зарядом.

В обычно используемом диапазоне энергий электронов 0,1...100 кэВ можно получить разрешение, сравнимое с размерами атомов — порядка 0,1 нм. Ограничения на минимальный размер пучка электронов (порядка 10 нм)

связаны с их рассеянием. Ионные и атомарные пучки характеризуются отсутствием ограничений на дебройлевскую длину волны даже при малых энергиях ионов. Доля рассеянных ионов обычно очень мала, так как их размеры соизмеримы с периодом кристаллических решеток материалов, с которыми они взаимодействуют. Минимальный размер пучка ионов или атомов может достигать примерно 1 нм.

Для формирования потоков частиц и управления этими потоками, например, при электронно-лучевой обработке формирующие, ускоряющие, фокусирующие и отклоняющие электроды выполняют как единый блок — электронно-оптическую систему (ЭОС).

Основой для формирования потока электронов является процесс электронной эмиссии — испускания электронов поверхностью твердого тела или жидкости. Для перехода из твердого тела в вакуум электрон должен преодолеть потенциальный барьер — совершить работу выхода. Эмиссия присутствует всегда, поскольку всегда имеются электроны с энергией, превосходящей работу выхода. Однако в нормальных условиях их относительно мало. Для того чтобы процесс эмиссии стал заметным и постоянным, необходимо наличие внешнего электрического поля, обеспечивающего отвод электронов и сообщение телу дополнительной энергии для повышения энергии электронов.

В зависимости от того, каким образом сообщается телу энергия, различают следующие виды эмиссии:

- термоэлектронную;
- фотоэлектронную;
- автоэлектронную;
- вторичную электронную;
- ионно-электронную;
- горячих электронов;
- взрывную эмиссию.

В электронике тела, используемые в качестве эмиттеров, называются катодами: термокатоды, фотокатоды, автокатоды и т. д.

Формирование потоков электронов осуществляется с помощью электронных пушек (рис. 1.28). Пушка состоит из источника электронов (эмиттера) и двух или более электродов, находящихся под разными электрическими потенциалами. Назначением электрода Венельта, потенциал которого близок к потенциалу эмиттера, является придание силовым линиям (особенно у заостренного конца эмиттера) такой формы, чтобы обеспечить требуемую интенсивность электрического поля и направление движения электронного пучка.

Важнейшей характеристикой источника электронов является его яркость

$$\beta = I/(\Omega S), \quad (1.1)$$

где I — ток эмиссии; Ω — телесный угол; S — площадь эмитирующей поверхности.

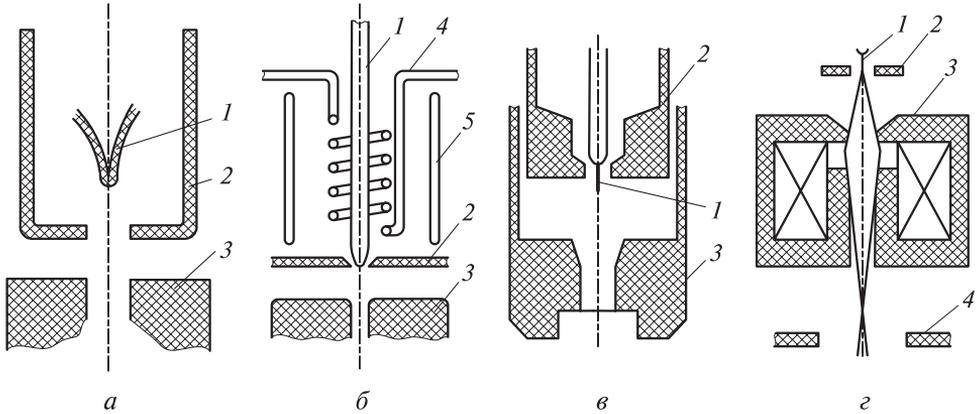


Рис. 1.28. Схемы электронных пушек:

a — с термоэмиссионным катодом из вольфрамовой проволоки; *б* — типа Броерса с катодом из гексаборида лантана с косвенным подогревом; *в* — автоэмиссионный источник с электростатической фокусирующей системой; *г* — автоэмиссионный источник с магнитной линзой и двумя анодами; 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод; 4 — нить подогрева; 5 — экран

Обычно заземленный анод разгоняет электроны до конечной скорости при движении от катода, находящегося под отрицательным потенциалом, соответствующим требуемой энергии носителей заряда. Может быть и наоборот: катод заземлен, а на анод подается положительный потенциал 10...100 кВ.

1.8.2. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Термоэлектронная эмиссия — процесс испускания электронов нагретой поверхностью. Эффект протекания тока в вакууме между отрицательным нагретым и положительным электродами был открыт в 1884 г. Эдисоном и объяснен в 1887 г. Томпсоном. Ток эмиссии возрастает с температурой тела до определенного значения — тока насыщения.

Чем выше температура (в разумных пределах) и чем ниже работа выхода материала, тем выше ток насыщения и тем эффективнее катод. Для использования эмиссии в практических целях необходимо иметь в простейшем случае пару электродов: отрицательный катод и положительный относительно электрода анод для создания разности потенциалов и ускорения электронов.

Плотность тока термоэмиссии можно рассчитать по формуле Ричардсона — Дэшмана:

$$j_0 = AT^2(1-r)\exp\left[-\frac{e}{kT}(\phi - \sqrt{eE})\right], \quad (1.2)$$

где A — константа Ричардсона, $A = 120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \text{К}^{-2}$; T — температура эмиттера, К; r — коэффициент отражения от потенциального барьера; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; ϕ — работа выхода электрона; E — напряженность электрического поля, В/м.

Для придания электронному пучку необходимой энергии (скорости) и формы служат формирующие и апертурные диафрагмы, фокусирующие и отклоняющие линзы, стигматоры, сканирующие системы и другие элементы ЭОС.

1.8.3. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Фотоэлектронная эмиссия, или внешний фотоэффект, — это процесс испускания электронов твердыми телами и жидкостями под действием электромагнитного излучения (фотонов). Г. Герц заметил, что облучение ультрафиолетовым светом двух электродов под напряжением облегчает проскакивание разряда между ними. Фотоэмиссию в 1887 г. открыл Герц, а Ленард и Томпсон в 1898 г. показали, что это именно испускание электронов.

Для фотоэмиссии характерны следующие закономерности:

— количество испускаемых фотоэлектронов пропорционально интенсивности излучения;

— для каждого материала существует пороговая частота, так называемая красная граница фотоэффекта, т. е. такая частота излучения (максимальная длина волны), меньше (больше) которой испускание электронов не происходит;

— кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты излучения и не зависит от его интенсивности.

Сущность фотоэмиссии состоит в следующем: фотон излучения передает свою энергию свободным электронам, фотоэлектрон перемещается к поверхности и выходит в вакуум. Для этого энергия электрона должна быть выше работы выхода материала, которая для щелочноземельных металлов более 2 эВ, а для других — более 3 эВ.

Вследствие специфики процесса и малых значений токов фотокатоды практически не используются в качестве электронных пушек. Основными объектами являются различные полупроводниковые и электровакуумные приборы: фотодиоды, электронно-оптические преобразователи, фотоэлектронные умножители.

1.8.4. АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Автоэлектронная эмиссия (полевая, электростатическая, туннельная) — процесс испускания электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля высокой напряженности.

Автоэлектронную эмиссию открыл в 1897 г. Р. Вуд. При исследовании вакуумного разряда Вуд заметил в сильном электрическом поле испускание электронов, наблюдая свечение стекла под их воздействием, и описал это явление.

Автоэлектронная эмиссия объясняется туннельным эффектом и происходит без затрат энергии на возбуждение электронов, необходимых для электронной эмиссии иных видов. При автоэлектронной эмиссии электроны преодолевают потенциальный барьер на границе эмиттера не путем прохода над ним за счет кинетической энергии теплового движения, как при термоэлектронной эмиссии, а путем туннельного просачивания сквозь барьер, суженный и сниженный электрическим полем.

Зависимость автоэлектронной эмиссии от электрического поля и работы выхода значительная (табл. 1.4).

Автоэлектронная эмиссия зависит от двух основных параметров автоэлектронного катода:

- работы выхода;
- напряженности электрического поля на поверхности автоэлектронного катода.

Таблица 1.4

Зависимость автоэлектронной эмиссии, А/см², от поля и работы выхода

Поле, В/см	Работа выхода, эВ		
	2,0	4,5	6,3
10 ⁷	10 ³	2 · 10 ⁻¹⁷	—
2 · 10 ⁷	2,5 · 10 ⁷	5 · 10 ⁻⁴	10 ⁻¹³
5 · 10 ⁷	—	4 · 10 ⁶	2 · 10 ⁻²
10 ⁸	—	6 · 10 ⁸	5 · 10 ⁶

Плотность тока автоэлектронной эмиссии определяется законом Фаулера — Нордгейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left(- \frac{6,85 \cdot 10^7 \cdot \phi^{\frac{3}{2}}}{E} \cdot \theta \left(3,62 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{E}}{\phi} \right) \right), \quad (1.3)$$

где E — напряженность электрического поля у поверхности эмиттера, В/см; ϕ — работа выхода, эВ; $\theta(y)$ — табулированная функция Нордгейма.

Тесты к лекции 1.8

1. Термоэлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) нагреве;
- б) облучении фотонами;
- в) бомбардировке высокоэнергетичными электронами.

2. Фотозлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) облучении фотонами;
- б) бомбардировке ионами рабочего газа;
- в) нагреве.

3. Автоэлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) нахождении в электрическом поле высокой напряженности;
- б) бомбардировке высокоэнергетичными электронами;
- в) бомбардировке ионами рабочего газа.

1.9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

Цель лекции: изучение различных эффектов, возникающих при взаимодействии электронных потоков с материалами.

1.9.1. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С МАТЕРИАЛОМ

Поверхность твердого тела отличается от объемного материала по геометрическому расположению атомов, структуре электронных связей, химическим соединениям и т. п. Все поверхности, соприкасающиеся с атмосферой, покрыты слоями адсорбированных атомов и молекул. Так, если при давлении 10^{-4} Па получить ювенильно чистую поверхность, то примерно через 1 с она оказывается покрытой монослоем (приблизительно 10^{15} атом/см²) адсорбированных газов. Для удержания поверхности на атомарно чистом уровне при проведении, например, молекулярно-лучевой эпитаксии необходим сверхвысокий вакуум с давлением не выше 10^{-8} Па.

Эффекты, возникающие при взаимодействии электронного пучка с веществом (рис. 1.29), реализуются как дискретные события, сопровождающиеся ионизацией и возбуждением остаточных газов и паров, появлением вторичных электронов, возбуждением колебаний плотности плазмы, ионизацией на внутренних электронных оболочках, вызывающих рентгеновское излучение и эмиссию оже-электронов и атомных частиц, рождением электронно-дырочных пар с последующим световым излучением, переходным излучением и возбуждением упругих колебаний кристаллической решетки — возбуждением фононов, образованием дислокаций и радиационных дефектов, нагревом, химическими реакциями и другими явлениями.

При столкновении ускоренных электронов с атомами или молекулами остаточных или рабочих газов и паров происходят их ионизация (образование и поддержание газоразрядной плазмы) и испускание фотонов (свечение плазмы). Метод получения плазмы «электронным ударом» используется во многих источниках ионов и плазменных установках.

В зависимости от параметров пучка электронов и свойств материала мишени (обрабатываемой детали) возможны упругое и неупругое отражение электронов от поверхности твердого тела, что позволяет наблюдать за поверхностью с помощью электронного микроскопа, получать новые электронные пучки, анализировать химический состав материала мишени и др. Электронные пучки могут вызывать и эмиссию атомов и молекул с облучаемой

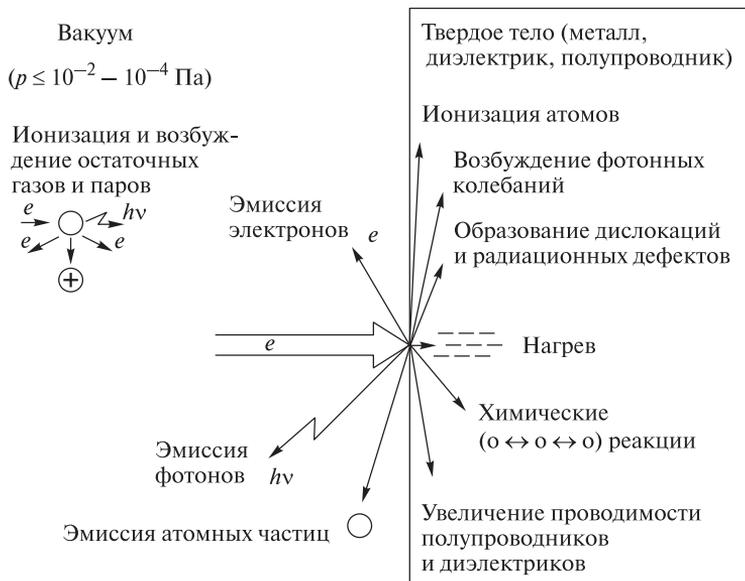


Рис. 1.29. Эффекты взаимодействия электронных пучков с материалом

поверхности за счет испарения или сублимации вещества, термо- и электростимулированной десорбции адсорбированных газов, разложения химических соединений и т. п.

Эффекты, возникающие при проникновении электронного пучка в вещество на глубину x , определяются характером и величиной потерь энергии электронов E_e в твердом теле:

$$\frac{dE_e}{dx} = \left(\frac{N_A q_e^4}{2\pi\epsilon_0^2} \right) \left(\frac{Z\rho}{M} \right) \left(\frac{1}{E_e} \ln \frac{1,66E_e}{J} \right), \quad (1.4)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; q_e — заряд электрона, Кл; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; Z — атомный номер; ρ — плотность вещества, кг/м³; M — молекулярная масса, кг/кмоль; $J = 13,5Z$ — потенциал ионизации, эВ.

В зависимости от энергии электрона возникают следующие процессы:

1) упругие столкновения с атомами вещества (энергия и направление движения мало изменяются), когда скорость электрона $v_e > v_{\text{орб}}$, где $v_{\text{орб}}$ — орбитальная скорость электронов атома, равная $2,2 \cdot 10^6$ м/с, а средняя энергия E , передаваемая электроном атому с массой m_a ,

$$E = E_e \frac{4m_e m_a}{(m_e + m_a)^2} \sin^2 \frac{\Theta}{2}, \quad (1.5)$$

где Θ — угол рассеяния электрона ($\approx 1^\circ$), при этом

$$E/E_e \approx 10^{-9} \dots 10^{-10};$$

2) неупругие столкновения (изотропное или диффузное рассеяние), когда $v_e < v_{орб}$ и потеря энергии происходит дискретно на межатомном расстоянии $0,3...0,4$ нм, что вызывает возбуждение, ионизацию, диссоциацию, ассоциацию атомов и молекул вещества, колебания кристаллической решетки и т. п.

Согласно модели Арчарда (рис. 1.30), траекторный пробег электронов R_s (сумма пробегов электрона от атома к атому (рис. 1.30, а))

$$R_s \approx \frac{32\varepsilon_0 E_e^2}{Nq^4 Z}, \quad (1.6)$$

где N — плотность атомов ($\approx 10^{28}...10^{29} \text{ м}^{-3}$), а проекция пробега R на ось x составляет

$$R \approx \frac{E_e^2}{\rho b}, \quad (1.7)$$

где b — константа торможения, равная $\approx 5 \cdot 10^5 \text{ кэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$; E_e , ρ — энергия и плотность электронов.

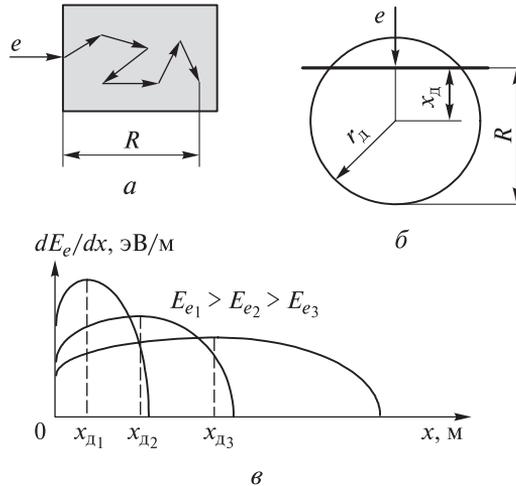


Рис. 1.30. Модель Арчарда

Таким образом, модель Арчарда позволяет рассчитать глубину проникновения электрона x_d , на которой выделяется максимум энергии, а также радиус r_d диффузного рассеяния энергии электронов (рис. 1.30, б, в):

$$x_d \approx \frac{12R}{(Z+8)}; \quad r_d \approx R - x_d = \frac{R(Z-4)}{(Z+8)}. \quad (1.8)$$

Согласно рис. 1.30, в, с увеличением энергии электронов E_e увеличивается x_d и уменьшается максимум выделения энергии dE_e/dx .

Физические эффекты в объеме твердого тела, возникающие в результате проникновения электронного пучка в глубь материала, подразделяют на нетермические и термические. К первым относятся ионизация атомов мишени, возбуждение фоновых колебаний, образование дислокаций и радиационных дефектов, активация химических реакций и увеличение проводимости полупроводников и диэлектриков; ко вторым — плавка, испарение, сварка и размерная обработка (прошивка отверстий, пазов, профилирование и т. п.).

Из нетермических эффектов наибольшее применение нашло изменение структуры и свойств материала электронорезиста при облучении его острофокусированным электронным пучком с энергией 20...30 кэВ. В электронно-лучевой литографии в качестве резиста используются органические материалы, которые при взаимодействии с ускоренными электронами либо полимеризуются (образуются более крупные молекулы), либо в них происходит деструкция материала (распад на более мелкие молекулы).

Нагрев вещества при облучении его электронами имеет несколько особенностей: так, максимум поглощенной энергии находится в объеме твердого тела (см. рис. 1.30, *в*), а не на поверхности, как, например, при лазерной обработке; с помощью термического воздействия электронов можно вызывать в веществе структурные фазовые переходы, отжиг дефектов, диффузию примесей, рекристаллизацию, плавление материала, десорбцию и испарение с поверхности атомных частиц.

Тепловое воздействие электронного луча с энергией E_0 на твердое тело характеризуется распределением температуры по его поверхности во времени:

$$T(r, t) = \frac{E_0}{\rho c (4\pi\sigma_T t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-r^2}{4\sigma_T t}\right). \quad (1.9)$$

Здесь r — расстояние от центра луча до рассматриваемой точки; ρ — плотность материала; c — теплоемкость; $\sigma_T = \frac{\lambda_T}{\rho c}$ — температуропроводность материала, где λ_T — теплопроводность.

Установившаяся температура

$$T(r) \approx \frac{r_0^2}{2r} \frac{P_e}{\lambda_T}, \quad (1.10)$$

где r_0 — радиус электронного луча; P_e — удельная мощность электронного луча.

Изменение температуры поверхности при воздействии электронного луча

$$\Delta T = \frac{3}{2} \frac{E_0 I_e}{\pi q_e \lambda_T R}, \quad (1.11)$$

где I_e — ток пучка; q_e — заряд электрона.

Скорость испарения материала

$$v_{\text{и}} = 5,38 \cdot 10^{-3} p_s \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (1.12)$$

где p_s — упругость пара материала при температуре T ; M — молекулярная масса испаряемого материала.

1.9.2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Параметры электронных пучков можно регулировать в широком диапазоне значений для разных видов обработки изделий (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Параметры электронных пучков

Вид электронно-лучевой обработки	Энергия электронов E_e , кэВ	Диаметр пучка $d_{\text{п}}$, мм	Удельная мощность P_e , Вт/см ²
Нетермическое воздействие	20–250	10^{-5} – 10^{-2}	10^{-2} – 10^5
Химическое воздействие	20–5000	10–300	10^{-3} – 10^3
Плавка	15–40	10–50	10^3 – 10^4
Испарение	10–40	2–30	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$
Сварка	15–175	10^{-1} –6	$8 \cdot 10^4$ – 10^7
Резание	20–150	$5 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-1}	10^5 – 10^{10}

Несмотря на сложности выполнения электронно-лучевой обработки, связанные с необходимостью помещать объекты обработки в вакуум, она успешно конкурирует с другими методами благодаря следующим преимуществам:

- универсальности (можно обрабатывать практически любые материалы, причем не только изменять геометрические размеры деталей и свойства их поверхности, но и проводить различные измерения);
- экологической чистоте (процесс протекает в высоком вакууме, электронный луч не вносит загрязнений и не подвержен износу, контроль с его помощью, как правило, является неразрушающим);
- управляемости (можно легко регулировать энергию, фокусировку, модуляцию и отклонение электронных пучков, причем малая инерционность позволяет быстро перемещать луч с одного участка на другой и обеспечивать высокую скорость обработки и локальность воздействия).

Тесты к лекции 1.9

1. От чего в наибольшей степени зависят эффекты, возникающие при взаимодействии электронного пучка и твердого тела?

- а) от энергии электронов;
- б) состава среды распространения электронного пучка;
- в) типа электронно-лучевой пушки.

2. Что позволяет определить модель Арчарда?

а) глубину проникновения электрона в твердое тело, на которой выделяется максимум энергии, а также радиус диффузного рассеяния энергии электронов;

- б) количество и энергию проникающих в твердое тело электронов;
- в) вероятность взаимодействия электронов с атомами кристаллической решетки твердого тела.

3. От чего зависит скорость испарения вещества при его нагреве электронным лучом?

- а) от молекулярной массы испаряемого материала;
- б) энергии электронов;
- в) остаточного давления в вакуумной камере.

1.10. ФОРМИРОВАНИЕ ИОННЫХ ПОТОКОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МАТЕРИАЛАМИ

Цель лекции: изучение основных характеристик ионных пучков, методов их формирования и физических явлений, возникающих при взаимодействии пучков различных энергий с материалами.

1.10.1. ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Формирование пучков ионов осуществляется с помощью источников ионов, которые состоят из разрядной (ионизационной) камеры, источника электронов (нагреваемого термокатода, холодного или полого катода), анода, магнитной системы (для повышения эффективности ионизации), экстрагирующего электрода и электрода первичной фокусировки, системы подачи рабочего газа или пара. Ионные источники должны генерировать однородные высокоинтенсивные пучки со стабильными во времени параметрами и многозарядные ионные пучки, обеспечивать предельную плотность ионного тока при максимально низких экстрагирующих напряжениях, ионизировать газообразные (Ar , N_2 , O_2 , BF_3 , PCl_3 , AsF_3 , AlCl_3 и т. п.) и твердые (B , As , Sb , Al , Tl и т. п.) вещества, формировать ионный пучок заданного сечения, быть простыми в управлении и обладать большим временем наработки на отказ катода и всего источника.

Поскольку обеспечить в одном источнике все перечисленные требования невозможно, применяют разные типы источников, основными из которых являются автономные источники ионов с горячим, холодным или полым катодом, дуоплазмотроны, источники с высокочастотным (ВЧ-) и СВЧ-возбуждением, источники с поверхностной ионизацией и др.

В источниках ионов с горячим катодом, также называемых источниками Кауфмана (рис. 1.31, *а*), в качестве источника электронов используются катоды прямого накала или с косвенным подогревом. Эти источники бывают с экстракцией ионов вдоль оси разрядной камеры и коническим пучком (аксиальная экстракция) или перпендикулярно оси разрядной камеры через отверстие прямоугольной формы и пучком ионов в виде узкой ленты (радиальная экстракция). Основным достоинством таких источников является возможность получения высокоинтенсивных пучков ионов, а главным недостатком — быстрое разрушение термокатода при использовании химически активных рабочих газов.

Автономные источники ионов с холодным катодом и разрядом Пеннинга (рис. 1.31, *б*) содержат цилиндрический кольцевой анод, размещенный между

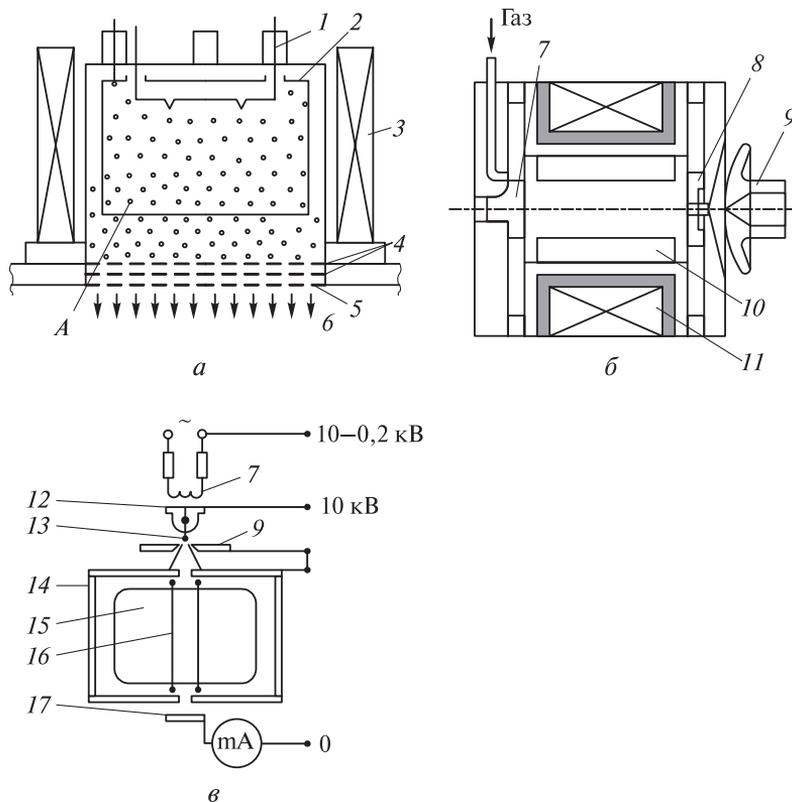


Рис. 1.31. Типы ионных источников:

а — источник Кауфмана; *б* — автономный источник ионов; *в* — жидкометаллический источник; *А* — область плазмы разряда; 1 — термокатод; 2 — анод; 3 — магнит; 4 — ионно-оптические сетки; 5 — ускоряющая сетка; 6 — ионный пучок; 7 — катод; 8 — антикатод; 9 — экстрактор; 10 — цилиндрический кольцевой анод; 11 — соленоид; 12 — контейнер; 13 — игла; 14 — магнитопровод; 15 — плоский магнит; 16 — отклоняющая пластина; 17 — коллектор

параллельно расположенными катодом и антикатодом. Ионы вытягиваются из плазмы самостоятельного газового разряда через отверстие в антикатоде и ускоряются системой экстракции. Благодаря наличию соленоида источник обладает высокой эффективностью ионизации (до 10^{14} ион/см³), срок службы катода превышает 1000 ч. Недостатком такой конструкции является малый ток пучка ионов (до 100 мкА), большая пульсация тока и возможность использования только газообразных рабочих веществ.

Типовой жидкометаллический источник ионов (рис. 1.31, *в*) состоит из двух электродов: острия-анода и заземленного экстрактора, между которыми приложено напряжение порядка 4...10 кВ. Острие выполнено в виде тонкой вольфрамовой трубки с капиллярным отверстием диаметром 50 мкм, через которое поступает жидкий металл. При давлении внутри иглы порядка 1 МПа

и наличии электрического поля высокой напряженности (порядка 10^{10} В/м) на конце капилляра образуется выступ жидкого металла в виде конуса, с вершины которого эмитируется расходящийся пучок положительных ионов.

1.10.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

В зависимости от материала, формы, энергии и удельной мощности ионного пучка при взаимодействии его с веществом происходят процессы направленного изменения геометрических размеров и свойств твердого тела, а также их контроля. Ионный пучок может быть сформирован как из положительных, так и из отрицательных ионов, однако наиболее часто используют ионы, несущие положительный заряд, вследствие большей простоты их получения и управления параметрами пучка. В качестве материала ионного пучка могут быть использованы атомы практически всех элементов таблицы Менделеева, включая ионы молекул, что при возможности варьирования величиной заряда делает ионные пучки потенциально более гибким средством воздействия на обрабатываемый или исследуемый объект по сравнению с электронными пучками.

Основные эффекты, возникающие при взаимодействии ионов, ускоренных до энергий $10^2 \dots 10^6$ эВ, с веществом и наиболее часто используемые в ионных и плазменных технологиях, иллюстрирует следующая схема (рис. 1.32).

Ионизация газа (рис. 1.32, а). Двигаясь в вакууме к облучаемому образцу, ионы могут сталкиваться с атомами и молекулами остаточных или рабочих газов и паров. Как и в случае с электронными пучками, может происходить рассеяние и потеря энергии первичных частиц, однако кроме ионизации попавшегося на пути атома и испускания при этом фотона возможно явление перезарядки ионного пучка. Оно сводится к тому, что движущийся ион захватывает электрон у атома, с которым он столкнулся, и продолжает движение практически с той же скоростью, но уже в нейтральном состоянии. Эффект перезарядки ионного пучка можно осуществить и с помощью направленного на него потока электронов, которые нейтрализуют заряд и тем самым создают пучок ускоренных атомов, которые используются, например, для обработки диэлектриков.

Осаждение на поверхность (рис. 1.32, б). Ударяющиеся о поверхность образца ионы могут оказаться связанными с ней за счет адсорбции или хемосорбции, что может быть использовано для получения тонкопленочных слоев. Вероятность того, что ударившийся о поверхность ион останется на ней, рассчитывается с помощью коэффициента accommodations $\alpha = (E_i - E_d') / (E_i - E_d'') \leq 1$, где E_i — кинетическая энергия иона; E_d' — энергия десорбированного атома до наступления термодинамического равновесия с подложкой; E_d'' — энергия десорбированного атома после установления термодинамического равновесия с подложкой.

Отражение ионов (рис. 1.32, в). При столкновении с поверхностью твердого тела ионный пучок может рассеиваться атомами или группой атомов

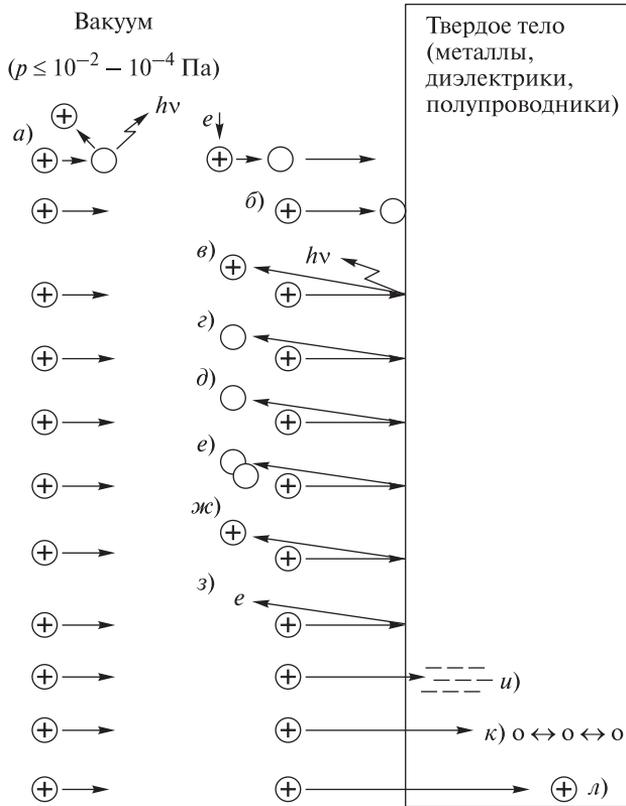


Рис. 1.32. Эффекты взаимодействия ускоренных ионов с веществом:

а — ионизация газа; *б* — осаждение на поверхность; *в* — отражение иона; *г* — десорбция атома или молекулы; *д* — физическое распыление; *е* — химическое распыление; *ж* — вторичная ионная эмиссия; *з* — эмиссия электронов; *и* — нагрев; *к* — химические реакции; *л* — ионная имплантация

облучаемого образца, при этом происходят отклонение траектории ионов от первоначального направления и обмен энергией между ними и атомами мишени. В зависимости от материала взаимодействующих частиц и энергии ионного пучка обмен энергиями может быть упругим (с ядрами) и неупругим (с электронами). При неупругих соударениях энергия может выделяться в виде квантов излучения — свечения (ионолюминесценция), характеристического или тормозного рентгеновского излучения. Эти эффекты используются в ионной микро- и спектроскопии. Если импульс иона достаточно велик, то он может сместить поверхностный атом из положения, где он слабо связан с кристаллической структурой образца, в положение, где связь оказывается сильнее (атомная дислокация). Ионы с более высокими уровнями энергии могут вызывать внутренние дислокации в толще образца.

Десорбция молекул или атомов (рис. 1.32, *з*). Упруго отраженные ионы могут вызывать десорбцию слабо связанных с поверхностью атомов и молекул газов и паров, а также различных видов загрязнений. Этот эффект широко используется для очистки поверхностей деталей перед многими операциями, особенно перед процессами эпитаксии и осаждения тонких пленок.

Физическое распыление (рис. 1.32, *д*). Если бомбардирующие поверхность образца ионы передают настолько большой импульс, что полностью освобождают от связей один или несколько атомов, то происходит физическое распыление. Это явление наиболее эффективно проявляется при энергии иона 0,5...5 кэВ, а показателем эффективности является коэффициент распыления $S = N_a / N_i$, где N_a — число распыленных атомов; N_i — число падающих на поверхность мишени ионов.

Коэффициент распыления зависит от максимальной энергии E_{max} , передаваемой атому материала падающим на поверхность мишени ионом (с энергией E_i), коэффициента α , энергии межатомных связей распыляемого материала U_0 и рассчитывается по следующей формуле:

$$S(E) = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{E_{max}}{U_0}. \tag{1.13}$$

Отношение масс распыленных атомов и падающих ионов M_2 / M_1 влияет на коэффициент α , а $U_0 \approx 4H_{субл}$, где $H_{субл}$ — энергия сублимации распыляемого материала.

Соотношение между M_2 / M_1 и α :

M_2 / M_1	0,01	1,0	10,0
α	0,17	0,23	5,0

Коэффициент распыления S зависит также от угла падения иона φ :

$$S(\varphi) = \frac{S(0)}{\cos \varphi}, \tag{1.14}$$

где $S(0)$ — коэффициент распыления при падении иона перпендикулярно поверхности мишени, т. е. при $\varphi = 0$. Увеличение коэффициента распыления при отклонении направления падения иона от перпендикуляра к поверхности объясняется гипотезой о парных упругих столкновениях (рис. 1.33).

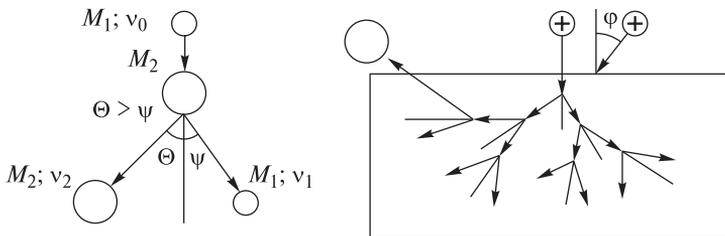


Рис. 1.33. Эффект парных соударений

В соответствии с этой гипотезой при столкновении ускоренного иона с молекулярной массой M_1 с атомом материала мишени с молекулярной массой M_2 угол отклонения иона Ψ меньше угла отклонения атома Θ :

$$\Theta = \frac{1}{2} \left(\pi - \Psi - \arcsin \frac{\sin \Psi}{\mu} \right);$$

$$\cos \Psi = \frac{1}{2} \left[(1 - \mu) \frac{v_0}{v_1} + (1 + \mu) \frac{v_1}{v_0} \right]; \quad \mu = \frac{M_2}{M_1}, \quad (1.15)$$

где v_1, v_2 — соответственно скорости иона и атома материала мишени.

Таким образом, при $M_1 < M_2$ вероятность «выхода» иона больше, так как увеличиваются углы Θ и Ψ ; при $M_1 > M_2$ вероятность «выхода» иона меньше, так как движение атомов зарождается на большей глубине. При этом атомы или группы атомов в приповерхностном слое толщиной порядка 1 нм движутся в направлении границы «твердое тело — вакуум» и выходят из мишени. Вылетающие атомы или кластеры (группы атомов) могут находиться в нейтральном, заряженном или возбужденном состоянии.

Явление ионного распыления широко используется для строго дозированного удаления вещества с определенных участков обрабатываемого изделия (ионное фрезерование), нанесения тонких пленок в вакууме из большой номенклатуры материалов, анализа распыленных частиц по массам.

Химическое распыление (рис. 1.32, *e*). Пучок химически активных ионов на основе H^+ , O^+ , N^+ , Cl^+ , F^+ и других элементов может вступать в химическую реакцию с атомами облучаемого образца и образовывать на его поверхности новые химические соединения, в том числе и газообразные. Этот эффект называется химическим ионным распылением и широко применяется в операциях ионно-химического травления материалов и ионно-химического осаждения тонких пленок.

Вторичная ионная эмиссия (рис. 1.32, *ж*). Если при ионном распылении поверхностные атомы возбуждаются до ионизированных состояний и покидают образец, то имеет место вторичная ионная эмиссия. Сила тока вторичных ионов моноизотопа распыленного вещества $J_{i2} = \eta k C S$, где η — чувствительность датчика; k — коэффициент ионизации (10^{-5} – 10^{-1}); C — концентрация i -го элемента в мишени; S — коэффициент распыления i -го элемента (0,1–10). Этот эффект лежит в основе принципа действия анализатора химического состава вещества.

Вторичная электронная эмиссия (рис. 1.32, *з*). При ионной бомбардировке металлических поверхностей возникает вторичная электронная эмиссия, которая является естественным средством поддержания самостоятельного газового разряда. Кроме того, это явление используется в ионной микроскопии и спектроскопии.

Нагрев (рис. 1.32, *и*). Если энергии, переданной пучком ионов атомам мишени, недостаточно для их распыления, атомы начинают колебаться около положения равновесия, растрчивая энергию на нагрев окружающей их

среды, что приводит к нагреву мишени. При достаточной мощности, выделяемой на единицу поверхности мишени, возникают процессы (плавление и испарение вещества мишени, термоэмиссия электронов, термоизлучение и т. п.), которые не отличаются от происходящих при облучении мишени электронами. Примером термической обработки с помощью ионных пучков может служить протонный отжиг полупроводниковых материалов. Однако этот способ, как правило, не выдерживает конкуренции с нагревом электронными пучками, получение которых значительно проще.

Химические реакции (рис. 1.32, к). Ионные пучки, подобно электронным, могут изменять химический состав вещества, в который они проникают. Если в качестве материала использовать ионорезист, а ионный пучок сфокусировать в пятно малого диаметра, можно получить изображение с размерами в доли микрометра.

Ионная имплантация (рис. 1.32, л). При энергии ионов более 30 кэВ они могут проникать в глубь образца. На этом явлении основан процесс, который называется ионной имплантацией или ионным легированием. Независимо от материала мишени в нее можно внедрить атомы практически любых элементов таблицы Менделеева, что широко используется для изменения механических, электрических, химических, оптических, эмиссионных и других свойств вещества.

Поскольку имплантация ионов — процесс термодинамически неравновесный, можно создавать соединения, которые принципиально невозможно получить диффузией или металлургическим путем, а также достигнуть концентрации имплантированного материала, существенно превышающей предел растворимости данной примеси в материале мишени.

Этот эффект используется в микроэлектронике для получения $p-n$ -переходов в полупроводниковых материалах, в машиностроении — для легирования сталей, в других областях — для определения в широких пределах свойств материалов.

Тесты к лекции 1.10

1. Что определяет коэффициент аккомодации?

- вероятность того, что ион материала останется на поверхности твердого тела после взаимодействия с ней;
- отношение энергий иона до и после взаимодействия с поверхностью твердого тела;
- часть энергии, переданной твердому телу при взаимодействии с ним.

2. От чего зависит коэффициент распыления?

- от угла падения иона на поверхность твердого тела;
- от величины остаточного давления в рабочей камере;
- от концентрации ионов.

3. В чем заключается физический смысл эффекта парных соударений?

а) взаимодействие падающего иона и покинувшего твердое тело атома осуществляется через цепочку последовательных соударений атомов в твердом теле;

б) атом покидает кристаллическую решетку твердого тела после двукратного (парного) соударения с ионами;

в) выход атома из твердого тела осуществляется после двух соударений с соседними атомами кристаллической решетки.

1.11. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ

Цель лекции: изучение основных характеристик атомарных и молекулярных потоков, методов формирования таких потоков и физических явлений, позволяющих эти потоки получать.

1.11.1. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ ИСПАРЕНИЕМ

Основными способами формирования атомарных и молекулярных пучков являются: термическое и дуговое испарение; испарение взрывом; ионное распыление; получение ионных пучков из газовой фазы с последующей нейтрализацией.

Термин «испарение» отражает высокую температуру формирования потока вещества и наличие паровой фазы. С помощью испарения можно формировать потоки атомов и молекул металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков.

Термическое испарение (рис. 1.34) с точки зрения термодинамики описывается уравнением Клаузиуса — Клапейрона:

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{dT} = \frac{H_{\text{г}} - H_{\text{ж}}}{T(V_{\text{г}} - V_{\text{ж}})} = \frac{\Delta H}{TV_{\text{г}}}, \quad (1.16)$$

где $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенного пара испаряемого материала, Па; T — температура материала, К; H — энтальпия газа (г) и жидкости (ж), ккал/кмоль; V — объем газа (г) и жидкости (ж), м³ ($V_{\text{г}} \gg V_{\text{ж}}$); ΔH — теплота испарения, ккал/кмоль.

Поскольку

$$V_{\text{г}} = \frac{R_0 T}{p}, \quad (1.17)$$

где R_0 — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К); p — давление пара, Па, то

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{p} = \frac{\Delta H}{T^2 R_0} dT; \quad \lg p_{\text{нас}} = -\frac{\Delta H}{R_0 T} + C; \quad \lg p_{\text{нас}} = A - \frac{B}{T}, \quad (1.18)$$

где C — постоянная интегрирования; A, B — константы (табличные данные).

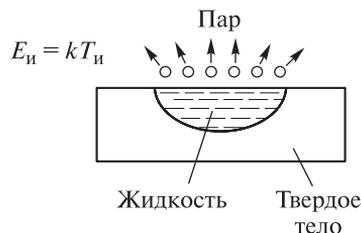


Рис. 1.34. Схема процесса термического испарения

Согласно молекулярно-кинетической теории газов, термическое испарение подчиняется закону Герца — Кнудсена:

$$\frac{dN_{\text{и}}}{dtA} = \frac{p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}}}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{и}}}} \left[\frac{\text{атом}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right], \quad (1.19)$$

где $N_{\text{и}}$ — количество испаренных атомов или молекул; t — время, с; A — площадь испарения, м^2 ; $\alpha_{\text{и}}$ — коэффициент испарения (для чистых материалов $\alpha_{\text{и}} = 1$); m — масса испаренного атома или молекулы, кг; $T_{\text{и}}$ — температура испарения, К.

Скорость испарения рассчитывается по следующей формуле:

$$v_{\text{и}} = m \frac{dN_{\text{и}}}{dtA} = m \frac{p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}}}{\sqrt{2\pi mkT_{\text{и}}}} = p_{\text{нас}}\alpha_{\text{и}} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_{\text{и}}}}, \quad (1.20)$$

или

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{и}}}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right], \quad (1.21)$$

где M — молекулярная масса испаряемого вещества, кг/кмоль.

Испарение сплавов описывается законом Рауля:

$$\frac{p_{\text{нас}A_{\text{раст}}}}{p_{\text{нас}A}} = \frac{x_A}{x_A + (100 - x_A) \frac{M_A}{M_B}}, \quad (1.22)$$

где x_A — содержание материала А в растворе, %; $M_{A,B}$ — молекулярные массы материалов А и Б сплава, кг/кмоль.

Испарение диэлектриков и полупроводников может происходить: без диссоциации (SiO , MgF_2); с диссоциацией (при $T > 1800$ К практически все диссоциируют, а при $T > T_{\text{и}} + (200 \dots 400)$ К без диссоциации испаряются MgO , Al_2O_3 , BeO , SiO_2 , ThO_2); с разложением, когда химический состав пара не соответствует испаряемому веществу (Ag_2S , CuJ , WC , CrN , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$).

1.11.2. ФОРМИРОВАНИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ ИОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Ионное распыление материала происходит при взаимодействии («бомбардировке») ускоренных до 0,5...5 кэВ ионов с веществом, находящемся в твердом или жидком состоянии. Сущность метода заключается в механическом выбивании атомов или молекул материала мишени путем передачи им кинетической энергии ускоренных ионов инертного газа (рис. 1.35). Основным показателем эффективности данного процесса является коэффициент распыления

$$S = \frac{N_A z q_e \Delta m}{M J_i t}, \quad (1.23)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; $z q_e$ — заряд иона (z — кратность ионизации), Кл; Δm , M — масса (кг) и молекулярная масса (кг/кмоль) распыляемого вещества; J_i — ионный ток, А; t — время, с.

Скорость ионного распыления рассчитывается по следующим формулам ($z = 1$):

$$v_p = S \frac{j_i M}{q_e N_A} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]$$

или

$$v_p = S \frac{j_i M 10^9}{q_e N_A \rho} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right], \quad (1.24)$$

где j_i — плотность ионного тока, А/м²; ρ — плотность распыляемого материала, кг/м³.

Поток атомов или молекул, сформированный из газовой фазы, характеризуется небольшой энергией ($E_r = k T_r = 0,1 \dots 0,2$ эВ, где T_r — температура газа, К) и гибким регулированием интенсивности N_r или v_r путем изменения давления газа p_r в широком диапазоне — $10^{-5} \dots 10^5$ Па:

$$N_r = \frac{p_r}{\sqrt{2 \pi m_r k T_r}} \left[\frac{\text{атом}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]; \quad v_r = 5,83 \cdot 10^{-3} p_r \sqrt{\frac{M}{T_r}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]. \quad (1.25)$$

Тесты к лекции 1.11

1. Что описывает уравнение Клаузиуса — Клапейрона?

а) термодинамический процесс перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое;

б) взаимосвязь давления в камере и давления насыщенного пара испаряемого вещества;

в) зависимость скорости испарения от термодинамических условий системы.

2. Что описывает закон Герца — Кнудсена?

а) количество испаренных атомов или молекул, испаренных с единицы поверхности в единицу времени;

б) взаимосвязь давления насыщенных паров испаряемого вещества и температуры его испарения;

в) взаимосвязь массы испаренного вещества и температуры его испарения.

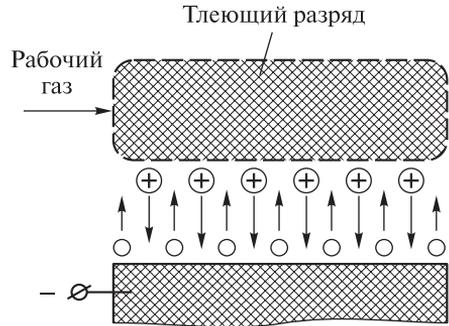


Рис. 1.35. Схема процесса ионного распыления

3. От каких параметров зависит скорость испарения?

- а) от молекулярной массы испаряемого вещества и давления насыщенных паров при температуре его испарения;
- б) скорости разогрева испаряемого вещества;
- в) мощности источника питания, используемого для разогрева испаряемого вещества.

4. От каких параметров зависит скорость ионного распыления?

- а) от коэффициента распыления, молекулярной массы и плотности распыляемого вещества;
- б) концентрации ионов рабочего газа;
- в) мощности источника распыления.

1.12. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ С МАТЕРИАЛАМИ

Цель лекции: изучение различных эффектов, возникающих при взаимодействии атомарных и молекулярных потоков с материалами.

1.12.1. АДГЕЗИЯ

Атомарные и молекулярные пучки имеют две основные области применения: осаждение тонких пленок и травление диэлектрических слоев. Варьируя энергию и плотность пучка атомов или молекул, можно получать пленки толщиной от долей нанометра (несколько слоев молекул) до нескольких микрометров. В технологии тонких пленок атомарные и молекулярные пучки используются при конденсации металлических и диэлектрических слоев, окислении, эпитаксиальном росте пленок, а также при легировании полупроводниковых материалов.

С помощью атомарных или молекулярных потоков можно создавать уникальные структуры тонких пленок и химические соединения с не имеющими аналогов в природе параметрами кристаллической решетки и физическими характеристиками. Для получения тонкопленочных слоев с уникальными свойствами необходимо сохранить атомарно чистую поверхность подложки, для чего парциальное давление посторонних примесей должно быть существенно ниже 10^{-4} Па. Подготовка поверхностей перед осаждением тонких пленок является важным процессом для получения хорошей адгезии и других требуемых свойств на границе раздела «подложка – пленка». Для очистки подложек от поверхностных загрязнений служит вакуумно-плазменное травление ионами инертных или химически активных газов.

Общим для всех тонкопленочных покрытий свойством является адгезия (от лат. *adhaesio* — прилипание) — сцепление поверхностей различных твердых и жидких тел. Адгезия обусловлена межмолекулярным взаимодействием в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей.

1.12.2. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Свойства тонких пленок и качество тонкопленочных покрытий в значительной мере зависят от стадии роста пленки на поверхности подложки. Существует несколько теорий роста тонких пленок в вакууме, из которых

наибольшее практическое применение нашли термодинамическая и молекулярно-кинетическая теории.

Количество осаждающихся атомов или молекул n_1 и задерживающихся на единице поверхности подложки на время жизни адатома τ_a (адсорбированного атома)

$$n_1 = N_1 \tau_a = v_0 \frac{N_A}{M} \frac{1}{v} \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{дес}}}{kT}\right) \left[\frac{\text{шт.}}{\text{м}^2} \right], \quad (1.26)$$

где N_1 — поток осаждающихся на единицу поверхности подложки в единицу времени атомов или молекул, атом/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$); v — частота собственных колебаний адатома ($v \approx 10^{14}$ Гц); $\Delta E_{\text{дес}}$ — энергия активации десорбции, Дж; T — температура подложки, К (условием, необходимым для образования адатома, является $E_a > kT$, где E_a — энергия осаждающихся атомов или молекул (рис. 1.36)).

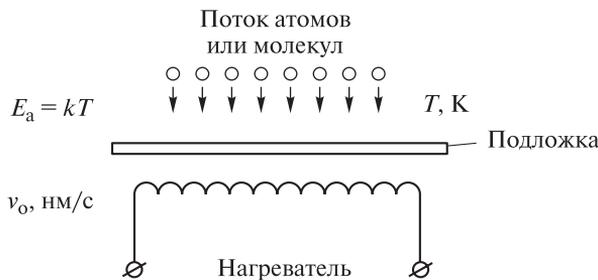


Рис. 1.36. Схема осаждения атомов или молекул на подложку

Поскольку температура (энергия) осаждающихся атомов или молекул больше температуры поверхности подложки, адатомы перемещаются (диффундируют) по поверхности и могут либо покинуть поверхность (десорбировать), либо остаться на ней. Процесс роста тонкой пленки включает в себя несколько стадий (рис. 1.37): 1) перемещение адатомов по поверхности, их соединение и образование зародышей; 2) укрупнение зародышей за счет захвата новых адатомов; 3) слияние зародышей и образование островков; 4) слияние островков; 5) образование несплошной пленки; 6) образование сплошной пленки.

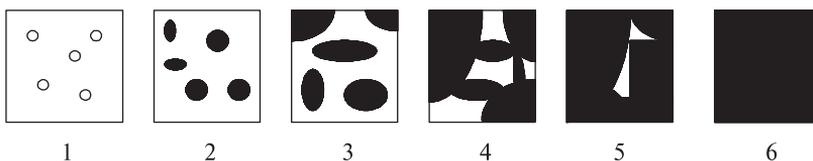


Рис. 1.37. Стадии формирования тонкопленочного покрытия (1–6)

Существует понятие «критический радиус зародыша», которое объясняет стадию зарождения тонкой пленки: минимальное количество атомов, при котором энергия (температура) десорбции зародыша меньше температуры поверхности подложки.

Критический радиус зародыша

$$r_{\text{кр}} = \frac{8\pi r_a^3 \sigma}{3kT \ln \frac{p_s}{p}}, \quad \text{или} \quad r_{\text{кр}} = \frac{2\sigma}{\Delta E_{\text{дис}}}, \quad (1.27)$$

где r_a — радиус одного адатома; p_s, p — давление насыщенного пара при температуре испарения материала и температуре T поверхности подложки соответственно; σ — коэффициент поверхностного натяжения ($\approx 10^{-4}$ Дж/см²); $\Delta E_{\text{дис}}$ — энергия диссоциации зародыша ($\approx 2 \cdot 10^3$ Дж/см³). При приведенных в скобках данных критический радиус зародыша и число составляющих его атомов приблизительно составят

$$r_{\text{кр}} \approx 10^{-7} \text{ см} \approx 10 \text{ \AA} \quad \text{и} \quad n_{\text{кр}} \approx \frac{r_{\text{кр}}^2}{r_a^2} \approx 6-7 \text{ шт.} \quad (1.28)$$

Скорость образования зародышей v_3 зависит от r_a и $r_{\text{кр}}$, потока осаждающихся на единицу поверхности в единицу времени атомов или молекул N_1 , энергии активации десорбции и диффузии $\Delta E_{\text{диф}}$, температуры поверхности подложки T :

$$v_3 = \frac{1}{4} \left(\frac{r_a}{r_{\text{кр}}} \right)^2 N_1 \exp \left(\frac{\Delta E_{\text{дес}} - \Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right) \left[\frac{\text{зар}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]. \quad (1.29)$$

Время образования зародышей

$$t_3 = \frac{1}{\pi r_{\text{кр}}^2 v_3} [\text{с}]. \quad (1.30)$$

Температура поверхности подложки является одним из важнейших факторов, определяющим не только скорость образования зародышей и роста пленки, но и структуру и свойства тонкопленочного покрытия. Структура пленки определяется характером зависимости максимального числа устойчивых зародышей от температуры T поверхности подложки (рис. 1.38, а): при $T > T_0$:

$$n_3^{\text{max}} \exp \left(-\frac{\Delta E_{\text{дес}} - \Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right), \quad (1.31)$$

а при $T < T_0$:

$$n_3^{\text{max}} \sqrt{\frac{n_0 N_1}{v} \exp \left(\frac{\Delta E_{\text{диф}}}{kT} \right)}, \quad (1.32)$$

где n_0 — число отдельных атомов, которое может поместиться на единице площади подложки ($n_0 \approx 2 \cdot 10^{18}$ шт./м²). Температура T_0 — критическая

температура, выше которой происходит неполная конденсация, когда коэффициент аккомодации $\alpha < 1$, время жизни адатома меньше времени диффузии (перемещения) адатома по поверхности подложки ($\tau_a < \tau_{диф}$, $r_{кр} > r_a$), а максимальное число устойчивых зародышей не зависит от потока осаждающихся атомов или молекул N_1 , т. е. созданы условия для роста кристаллической пленки. Если подложка относительно холодная ($T < T_0$), то максимальное количество устойчивых зародышей зависит от N_1 и практически каждый осевший атом или молекула остается на подложке, т. е. при полной конденсации $\alpha \approx 1$, $\tau_a > \tau_{диф}$, $r_{кр} \approx r_a$, а пленка получается аморфной.

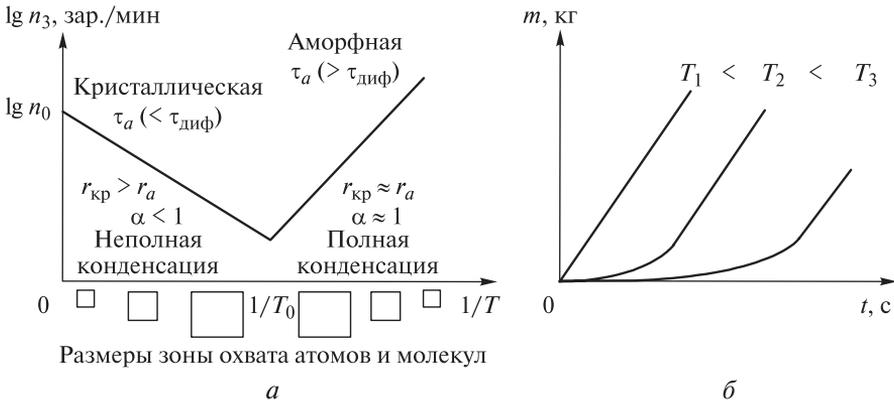


Рис. 1.38. Зависимость числа зародышей (а) и скорости увеличения массы тонкопленочного покрытия (б) от температуры поверхности подложки

Изменение размеров зоны захвата адатомов при увеличении температуры поверхности подложки объясняется увеличением или уменьшением вероятности образования зародышей с радиусом, равным или бóльшим критического. Увеличение массы растущей пленки во времени тем больше, чем меньше температура подложки (рис. 1.38, б), однако после образования сплошной пленки скорость дальнейшего увеличения ее массы слабо зависит от температуры подложки.

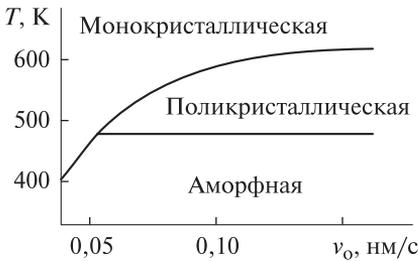


Рис. 1.39. Типовая зависимость структуры тонкопленочного покрытия от температуры поверхности подложки и скорости осаждения пленкообразующих частиц

Таким образом, чтобы получить аморфную, моно- или поликристаллическую пленку, необходимо правильно выбрать режимы технологического процесса: скорость осаждения v_0 , температуру поверхности подложки T (рис. 1.39), энергию атомов и молекул и др.

Тесты к лекции 1.12

1. От чего зависит число осаждающихся и задерживающихся на поверхности атомов?

- а) от температуры подложки;
- б) остаточного давления в камере;
- в) длины свободного пробега молекул.

2. На степень кристалличности пленки влияют:

- а) скорость осаждения и температура подложки;
- б) только скорость осаждения;
- в) только температура подложки.

3. Сколько стадий выделяют до образования сплошной пленки?

- а) 5;
- б) 6;
- в) 4.

1.13. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

Цель лекции: изучение газоразрядной плазмы в вакууме, ее назначения, параметров и способов получения.

1.13.1. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Газовым разрядом называется протекание тока в ионизированном газе. При приложении к электродам в вакууме напряжения, превышающего определенное значение, возникает пробой и зажигается тлеющий разряд, который часто называют газоразрядной плазмой. При определенных условиях тлеющий разряд может перейти в дуговой.

Газоразрядная плазма является источником заряженных частиц — электронов и ионов, в связи с чем комплексно воздействует на поверхность материалов.

С помощью газоразрядной плазмы можно осаждать металлические и диэлектрические пленки, стимулировать осаждение из газовой фазы диэлектрических пленок, пленок переходных металлов и их силицидов, вытравливать материал через резистивную маску после операций микролитографии, а также формировать ионные и электронные пучки большой интенсивности. Плазменная обработка, заменившая жидкостное травление, получила название «сухое травление».

Плазменная обработка осуществляется при давлении ниже атмосферного и поэтому совместима с другими вакуумными процессами — электронно- и ионно-лучевыми, лазерными, рентгеновскими и другими операциями. Формирование микротопологии или микрорельефа на обрабатываемых изделиях осуществляется повторением цикла, включающего три группы операций: 1) получение, обработку и легирование тонких пленок и слоев; 2) микролитографию (фото-, электроно-, ионо- и рентгенолитографию); 3) травление топологического рисунка или микрорельефа. Благодаря использованию сухого травления геометрические размеры рисунка могут быть получены с погрешностью менее 0,1 мкм. Для определения момента окончания травления, контроля за химическими и физическими процессами в плазме, измерения скорости осаждения пленок и других параметров применяют различные методы диагностики плазмы.

1.13.2. ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Газоразрядная плазма (рис. 1.40), состоящая из электронов, ионов и электрически нейтральных атомов, молекул и радикалов, генерирующая различные виды излучений, также может служить инструментом для обработки материалов.

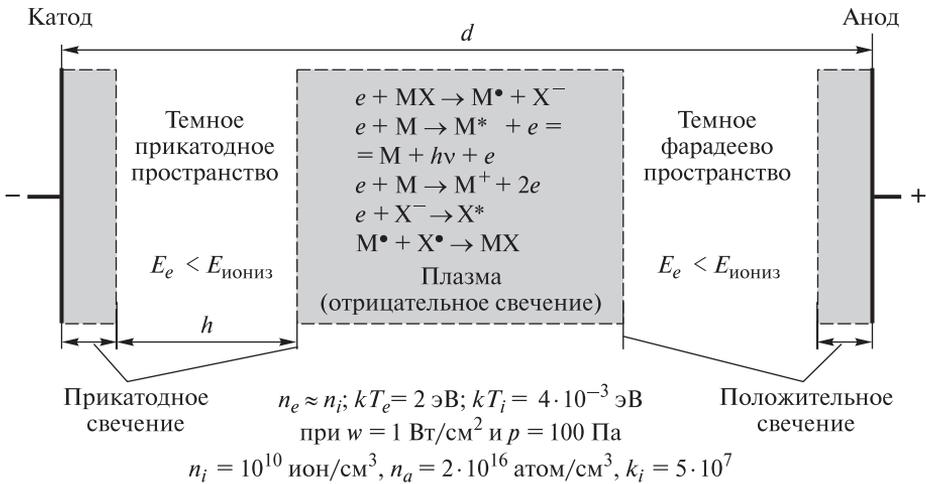


Рис. 1.40. Низкотемпературная газоразрядная плазма:

MX — молекула; M , X — атомы; M^* — возбужденный атом; M^+ — положительный ион; X^- — отрицательный ион; M^\bullet , X^\bullet — радикалы; $h\nu$ — фотон (квант излучения); e — электрон

Параметрами газоразрядной плазмы являются: состав и концентрация частиц, температура электронов и ионов, плазменное давление и др. В плазменных технологиях в качестве рабочего газа для обработки материалов чаще других используются Ar , O_2 , N_2 , H_2 , CF_4 , CCl_4 , SiH_4 , различные углеводородные соединения C_xH_y при давлении от 0,65 до 250 Па; концентрация ионов в плазме составляет порядка 10^{10} ион/см³, а электронов — $10^8 \dots 10^{10}$ эл./см³; энергия электронов может составлять 1,2...30 эВ, частота ВЧ-плазмы может изменяться в диапазоне 3,5...27 МГц.

Различные виды плазменной обработки материалов зависят от энергетических характеристик плазмы и доминирующего влияния одного из эффектов в пространстве между областью газового разряда и электродами (рис. 1.41).

Важным параметром плазмы является энергия E_e (температура kT_e) электронов (рис. 1.42), которая имеет нормальное распределение (см. рис. 1.42, а) и от которой зависит вероятность образования ионов, т. е. коэффициент ионизации (см. рис. 1.42, б).

Длина свободного пробега электрона в плазме $\lambda = \frac{1}{(S_e N)}$, где S_e — сечение столкновения электрона с атомами плазмообразующего газа, м² (для Ar

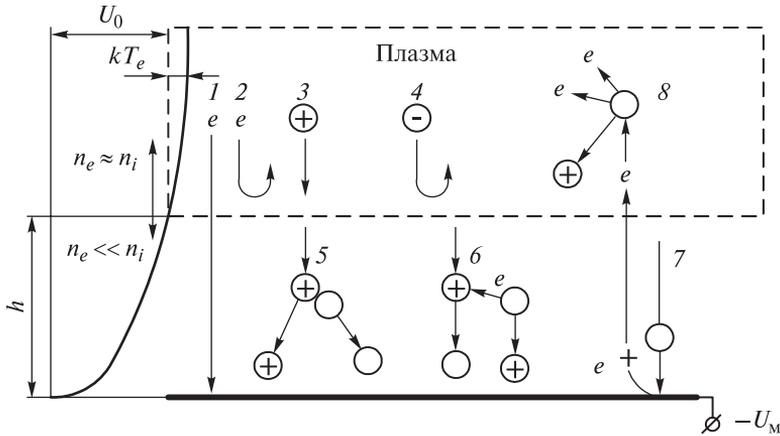


Рис. 1.41. Явления в газоразрядной плазме и ее энергетические характеристики:

1 — уход быстрого электрона; 2 — отражение медленного электрона; 3 — инжекция иона; 4 — отражение отрицательного иона; 5 — рассеяние на нейтральной частице; 6 — обмен заряда иона с нейтральной частицей; 7 — эмиссия вторичного электрона; 8 — ионизация электронным ударом; U_0 — прикатодный потенциал; h — толщина прикатодной области — темного катодного пространства; n_e , n_i — концентрация соответственно электронов и ионов; kT_e — энергия электрона; U_M — потенциал мишени

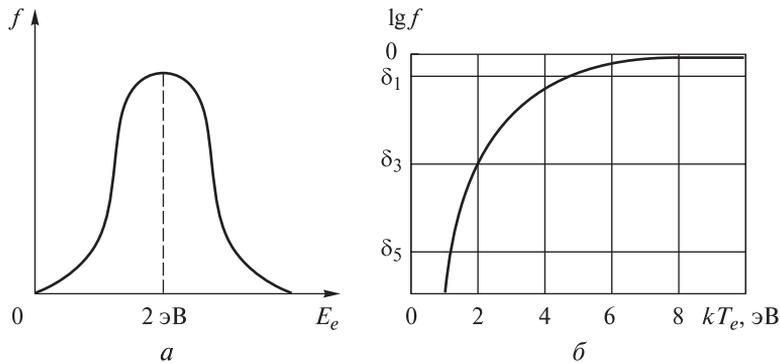


Рис. 1.42. Распределение электронов в газоразрядной плазме по энергиям (а) и вероятность ионизации атомов аргона (б)

при $E_e = 2$ эВ имеем $S_e = 3 \cdot 10^{-16}$ см²); N — концентрация атомов или молекул газа (м⁻³), $N = \frac{p}{(kT)} = 2,5 \cdot 10^{16}$ атом/см³ (при давлении аргона $p = 100$ Па и температуре стенок вакуумной камеры $T = 293$ К). При этих параметрах плазмы $\lambda = 0,13$ см.

Средняя скорость электронов в плазме

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e B}}, \quad (1.33)$$

где m_e — масса электрона при скорости v_e ; B — коэффициент, $B = 6,24 \times 10^{11} \left[\frac{\text{эВ} \cdot \text{с}^2}{\Gamma \cdot \text{см}^2} \right]$ (при $E_e = kT_e = 2 \text{ эВ}$; $v_e = 10^8 \text{ см/с} = 1000 \text{ км/с}$). Частота столкновений электронов с молекулами газа в плазме $\nu = v_e S_e N$ и составляет $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, или 750 МГц, при вышеприведенных параметрах плазмы.

1.13.3. КРИВЫЕ ПАШЕНА

Напряжение зажигания самостоятельного тлеющего газового разряда U_3 зависит от рода газа и произведения давления p и расстояния между электродами d . Эта зависимость иллюстрируется кривыми Пашена (рис. 1.43).

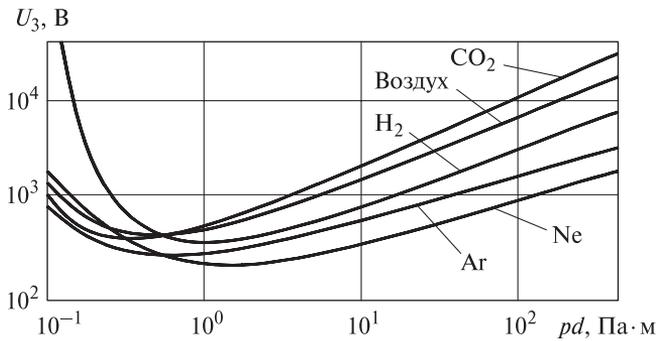


Рис. 1.43. Зависимость потенциала зажигания газового разряда U_3 от произведения pd для разных газов (кривые Пашена)

Поток ионов в катодное пространство приблизительно равен

$$Q_i \approx n_i \sqrt{\frac{kT_i}{M_i}}, \quad [\text{ион}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})], \quad (1.34)$$

где kT_i , M_i — энергия, Дж, и молекулярная масса иона, кг/кмоль.

Плотность ионного тока

$$j_i = Q_i q_e \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]. \quad (1.35)$$

Высокочастотная плазма формируется исходя из условия, что значение пробега электронов равно расстоянию между электродами d (рис. 1.44), а пробег значительно более тяжелых ионов намного меньше.

Необходимую частоту изменения полярности на электродах рассчитывают из неравенства $f > \frac{1}{t_e}$, где время пробега

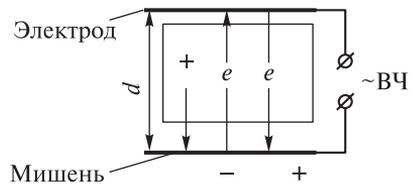


Рис. 1.44. Схема высокочастотной плазмы

электронов $t_e = d / v_e$ (при $v_e = 10^6$ м/с и $d = 0,1$ м имеем $t_e = 10^{-7}$ с, а $f > 10^7$ Гц). Наиболее распространена стандартная частота $f = 13,56$ МГц, при которой время t_i пробега ионами расстояния d составляет $t_i = d/v_i$ (при $v_i \approx 500$ м/с имеем $t_i = 2 \cdot 10^{-4}$ с), а пробег ионов за время t_i составляет $d_i = \frac{v_i}{f}$ ($d_i = 3,7 \cdot 10^{-5}$ м, или 37 мкм).

Тесты к лекции 1.13

1. Под газовым разрядом понимают:

- а) протекание тока в ионизированном газе;
- б) пробой разрядного промежутка;
- в) свечение в разрядном промежутке.

2. Тлеющий разряд характеризуется:

- а) относительно высоким напряжением и низким током;
- б) относительно низким напряжением и высоким током;
- в) наличием процесса испарения катода.

3. Кривые Пашена описывают:

- а) зависимость потенциала зажигания газового разряда от произведения давления в разрядном промежутке и расстояния между электродами;
- б) зависимость потенциала зажигания газового разряда от давления в разрядном промежутке;
- в) зависимость потенциала зажигания газового разряда от расстояния между электродами.

1.14. ДУГОВОЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

Цель лекции: изучение дугового разряда в вакууме, его назначения, параметров и способов возбуждения.

1.14.1. ПЕРЕХОД ИЗ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ДУГОВОЙ

Дуговой разряд является одним из основных типов газового разряда в вакууме. Вольт-амперные характеристики дугового разряда в вакууме приведены на рис. 1.45. Дуговой разряд возникает, когда между двумя электродами возрастает ток и происходит падение напряжения.

Переход от тлеющего разряда к дуговому может быть постепенным (см.

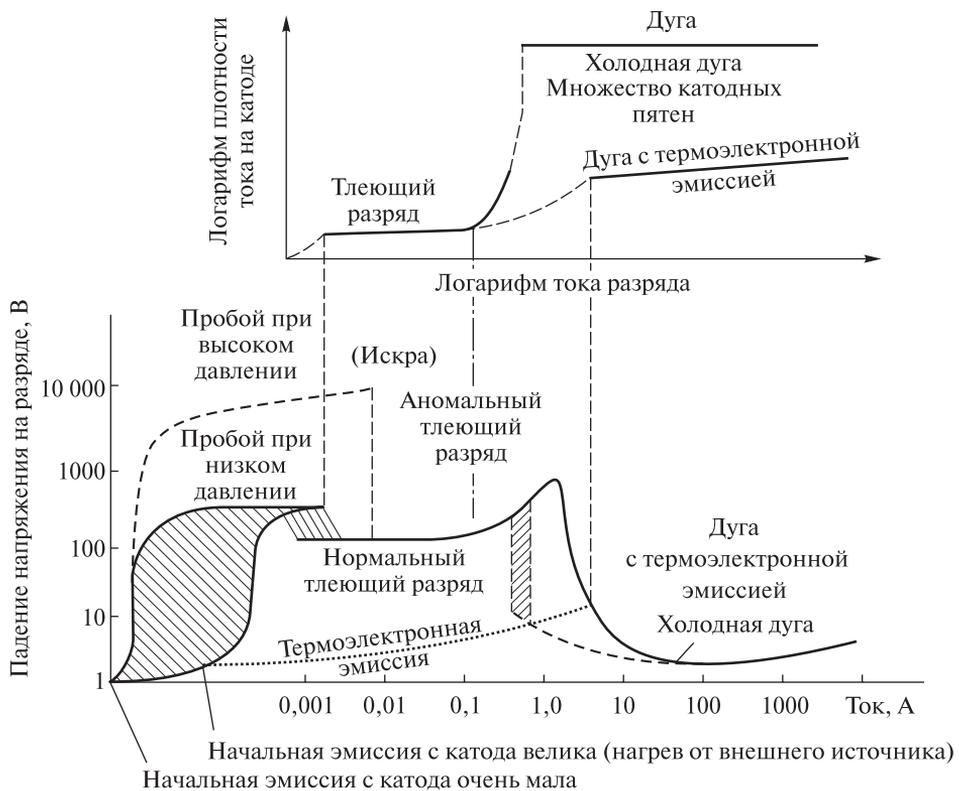


Рис. 1.45. Вольт-амперные характеристики дугового разряда в вакууме

рис. 1.45, гладкая кривая) в случае накаливаемого катода с термоэлектронной эмиссией или в случае очень тугоплавкого материала, нагревающегося до высокой температуры за счет тока аномального тлеющего разряда. Такой переход в общем случае происходит резко (штриховая кривая и заштрихованная область) для большинства материалов, являющихся холодными катодами, таких как медь или железо. На подобных материалах ток дуги создается многочисленными катодными пятнами, а не однородной термоэлектронной эмиссией. Напряжение горения короткой дуги лежит обычно в диапазоне 10...50 В. Эта разность потенциалов состоит из анодного и катодного падения (обычно порядка 10 В; анодное падение часто значительно выше катодного) и падения напряжения на столбе дуги, зависящего от его длины. Ток дуги обычно составляет от одного до многих тысяч ампер.

Следует отметить, что самое лучшее определение дуги принадлежит Комптону: дуга — это разряд в газе или паре с падением напряжения в катодной области порядка минимального потенциала ионизации того газа или пара, в котором этот разряд происходит.

1.14.2. ПАРАМЕТРЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Все дуги можно разделить на два довольно общих типа, различающихся в основном атмосферой, в которой они горят. Это дуги высокого давления, горящие в газе или паре с плотностями, которые соответствуют давлениям выше нескольких десятков мм рт. ст. (например, обычная электрическая дуга при атмосферном давлении), и дуги низкого давления, горящие в газе или паре с давлением ниже 10 мм рт. ст., т. е. в условиях, когда средняя длина свободного пробега весьма велика.

В большинстве случаев возникновение вакуумной дуги происходит так, как это схематически показано на рис. 1.46. Пар, необходимый для горения дуги, поставляется множеством очень подвижных катодных пятен (КП), которые хаотически перемещаются по отрицательному электроду. Плотность тока в каждом из этих небольших пятен чрезвычайно высока и часто достигает значений 10^6 А/см² и более. Причем то, что визуально воспринимается как одно пятно, оказывается совокупностью большого числа небольших активных участков, весь комплекс которых можно заставить быстро двигаться под действием поперечного магнитного поля. В КП возникают струи металлического пара, скорости которых достигают 1000 м/с. В этих струях, являющихся основным источником пара в вакуумной дуге, один удаленный атом металла может приходиться примерно на каждые десять эмитированных электронов.

Основная особенность дугового разряда — его внутренняя нестабильность. Как отмечалось выше, разряд горит в отдельных КП, которые, в свою очередь, состоят из элементарных ячеек. Каждая ячейка имеет свое время жизни. Поэтому при неизменном токе на катоде осуществляется непрерывный процесс самопроизвольной гибели старых и образования новых ячеек. Их распад и образование происходят с частотой $10^5 I c^{-1}$, где I — разрядный ток, А.

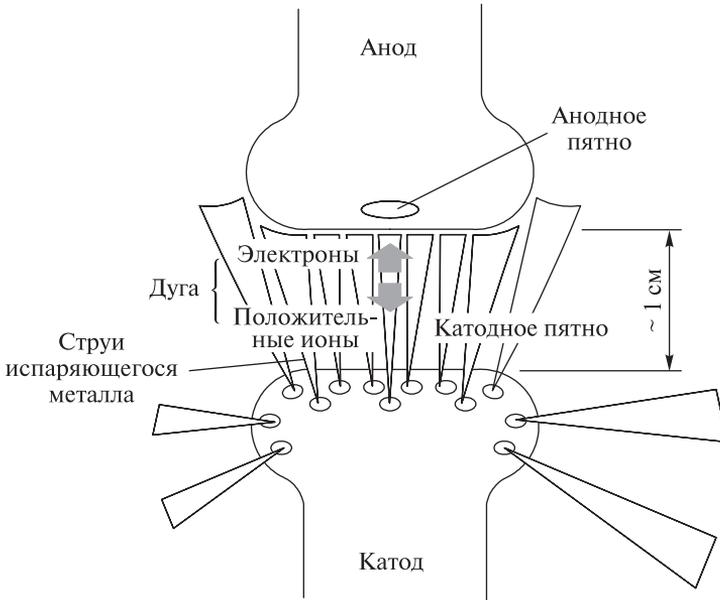


Рис. 1.46. Принципиальная схема вакуумной дуги

Таким образом, дуговой разряд устойчив, пока поддерживается динамическое равновесие между процессами распада и возникновения элементарных ячеек.

Поскольку время жизни отдельной ячейки — случайная величина, продолжительность горения дуги в целом также оказывается случайной величиной и определяется соотношением

$$N_t = N^{-t/\theta}, \quad (1.36)$$

где N_t — число дуг с временем горения, большим t ; N — полное число возникших дуг; θ — среднее время существования дуги, которое экспоненциально растет с увеличением тока и зависит также от теплофизических характеристик материала катода и параметров внешней электрической цепи.

Когда ток и общее число элементарных ячеек достаточно велики, горение разряда дуги становится стационарным. Разряд статистически устойчив при наличии на рабочей поверхности не менее двух КП. Минимальный ток, при котором еще возможно стационарное существование дуги (критический ток), зависит от материала катода, расстояния между электродами и параметров внешней электрической цепи. Если рабочий ток разряда превышает критический, то при уходе одного из КП из рабочей области и его гибели оставшееся пятно спонтанно делится на два, обеспечивая стационарное существование разряда. При прочих равных условиях I_{\min} тем меньше, чем ниже температура кипения материала катода. Наложение магнитного поля резко уменьшает I_{\min} .

Разряд горит при напряжении, несколько превышающем (иногда в 2-3 раза) потенциал ионизации материала катода. Основную часть этого напряжения составляет катодное падение потенциала. Наименьшее значение катодного падения соответствует материалам с более низким значением параметра $T_{\text{кип}} k^{0,5}$, где $T_{\text{кип}}$ — температура кипения материала катода, К; k — теплопроводность материала катода, Вт/(м·К). Исключение составляют только алюминий и никель.

Току дуги свойственны колебания с частотой $10^5 \dots 10^7$ Гц, параметры которых зависят в основном от теплофизических свойств материала катода.

Физические процессы в вакуумных дугах определяются поведением КП. По своей природе их можно подразделить на электровзрывные и тепловые. Электровзрывные КП развиваются как результат циклического возбуждения взрывной электронной эмиссии. Они оставляют на поверхности характерные микрократеры и предшествуют тепловым. Последние формируются в тех же областях катода при его нагреве до критической температуры, соответствующей переходу от взрывного эмиссионного механизма к термоавтоэлектронному. Время жизни тепловых пятен примерно пропорционально квадрату их размера. В зависимости от условий возникновения, продолжительности существования и подвижности различают КП трех типов.

Пятна первого типа (КП-I) появляются в начальный период разряда и затем расходятся, занимая все большую площадь. Они наиболее подвижны; скорость их движения в зависимости от материала катода составляет 10...100 м/с. Длительность фазы разряда, в течение которой существуют только КП-I, зависит от теплофизических характеристик катода; она лежит в пределах 0,1...0,5 мс и уменьшается с ростом тока.

В следующий период на участках наиболее частого пребывания КП-I возникают КП второго типа (КП-II). Вначале пятна обоих типов сосуществуют, а затем могут существовать и независимо. Время жизни КП-II слабо зависит от материала катода и колеблется в пределах 0,5...1,5 мс; их скорость — 0,1...10 м/с. Длительность фазы горения с КП второго типа определяется током разряда; она может быть и неограниченной.

Пятна третьего типа (КП-III) возникают лишь при токах, больших I_{min} , и представляют собой групповые образования из нескольких КП-II, расположенных на расстояниях, сравнимых с их размерами. Время жизни таких пятен достигает нескольких миллисекунд; они малоподвижны.

Динамика развития КП сильно зависит от концентрации остаточных газов. В форвакууме возможно одновременное существование КП всех типов или их парных комбинаций. Средний ток, приходящийся на одно КП для данного материала, почти не связан с параметрами разряда, поэтому при увеличении тока общее число КП возрастает. При сохранении стабильности из разрядной плазмы могут экстрагироваться ионные токи до 7...10 % полного разрядного тока. Линии электрического поля в зоне КП направлены по нормали к поверхности катода.

Плазма дугового разряда обладает специфическими характеристиками. Вблизи поверхности катода энергия электронов близка к 1 эВ. С удалением

от поверхности энергия электронов возрастает вследствие развития ионно-звуковой турбулентности и на расстоянии от КП более 10 мм достигает примерно 10 эВ. Средняя концентрация электронов обратно пропорциональна квадрату расстояния от КП. Вблизи КП на расстоянии 15 мкм она близка к 10^{19} см^{-3} . В противоположность этому концентрация нейтральных атомов катодного вещества увеличивается к периферии разряда, а средняя скорость ионов ограничена инфразвуковой скоростью 0,5...1,0 км/с.

Разряд сопровождается образованием быстрых паровых струй материала катода со скоростями до 10 км/с. В струях присутствуют ионы с энергией до 300 эВ. Средняя энергия ионов также намного превышает ту, которую мог бы приобрести однозарядный ион под действием статической разности потенциалов на разрядном промежутке. Аномально высокие энергии ионов связаны с неустойчивостями, развивающимися в плазме. Не исключена возможность газодинамического ускорения частиц в прикатодной зоне, где существуют области с паровой фазой очень высокого давления. Степень ионизации струй для разных металлов достигает 25...100 %, возрастая для более тяжелых элементов; для них же характерна и более высокая энергия ионов.

Тесты к лекции 1.14

1. Дуговой разряд характеризуется:

- а) относительно низким напряжением и высоким током;
- б) относительно высоким напряжением и низким током;
- в) наличием процесса распыления катода.

2. Катодные пятна являются источником:

- а) быстрых паровых струй материала катода;
- б) распыления материала катода;
- в) слабого рентгеновского излучения.

3. К дуговому разряду относится процесс:

- а) дуговой сварки;
- б) катодного распыления;
- в) термического испарения.

1.15. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Цель лекции: изучение классификации методов нанесения тонких пленок, основных характеристик наиболее часто используемых методов, их режимов и особенностей.

1.15.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Классификация методов нанесения тонких пленок в вакууме, в основу которой положены физические принципы генерации и переноса потоков атомов или молекул и способы реализации этих принципов, представлена в табл. 1.6.

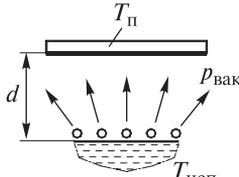
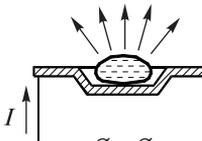
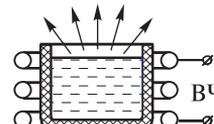
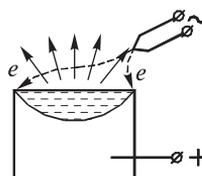
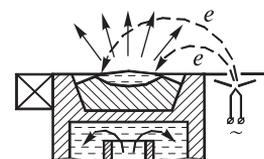
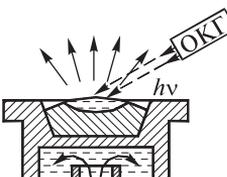
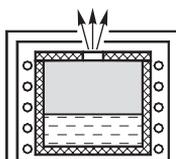
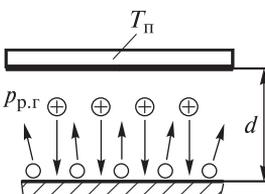
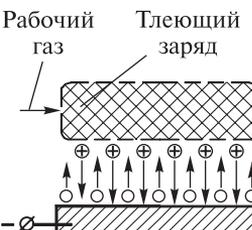
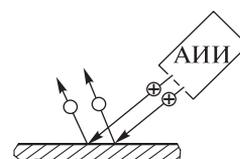
Основными технологическими режимами нанесения тонких пленок в вакууме являются: давление в рабочей камере $p_{\text{вак}}$ (остаточных газов — вакуума) и давление $p_{\text{р.г}}$ (рабочего газа — инертного, химически активного, смеси газов), Па; температура подложки (изделия) $T_{\text{п}}$, К; максимальная скорость осаждения пленки v_0^{max} , мкм/с; энергия осаждающихся атомов, молекул, ионов и кластеров E , эВ; доля ионизированных частиц $K_{\text{и}}$.

В приведенных в табл. 1.6 формулах использованы следующие обозначения: $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенного пара, Па; M — молекулярная масса испаряемого материала, кг/кмоль; $T_{\text{исп}}$ — температура испарения материала, К; $F_{\text{и,р}}$ — площадь поверхности испарения или распыления, м²; d — расстояние от источника до подложки, м; ρ — плотность осаждаемого материала, кг/м³; $j_{\text{и}}$ — плотность ионного тока, А/м²; S — коэффициент распыления, атом/ион; $q_{\text{доп}}$ — допустимая плотность потока энергии на поверхность конденсации, Вт/см²; $E_{\text{опт}}$ — оптимальная энергия осаждающихся частиц, эВ; p_i , ρ_i и M_i — соответственно парциальное давление, Па, плотность, кг/м³, и молекулярная масса, кг/кмоль, осаждающихся из газовой смеси компонентов n .

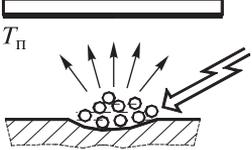
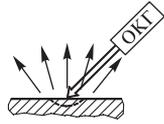
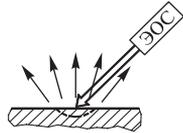
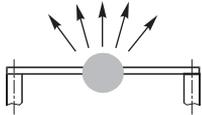
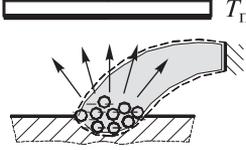
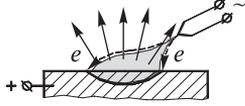
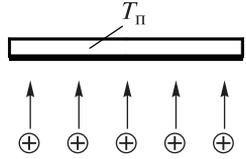
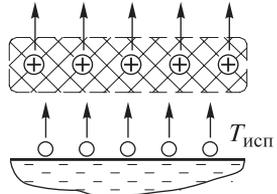
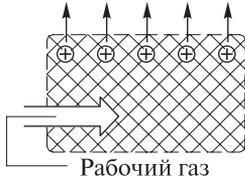
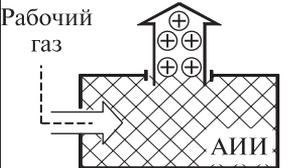
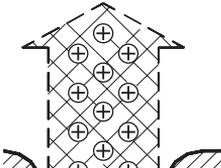
Условные обозначения методов D00 — D51 приняты в целях использования их в базах данных и автоматизированных экспертных системах, необходимых для повышения уровня информационного обеспечения разработок и исследований в области технологии тонких пленок. Если кроме физических процессов, происходящих во время осаждения тонкой пленки, при напуске в рабочую камеру реактивного газа в пространстве между источником и подложкой или на поверхности подложки протекает химическая реакция, то соответствующий метод называется реактивным D__R (например, для получения пленок нитрида титана $2\text{Ti} + \text{N}_2 = 2\text{TiN}$).

Таблица 1.6

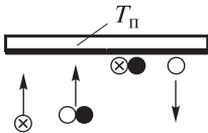
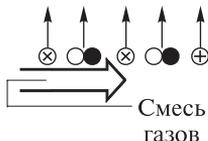
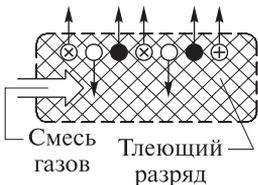
Методы нанесения тонких пленок в вакууме

Принцип генерации частиц	Метод осаждения тонкой пленки	
<p>Термическое испарение D0</p>  <p> $p_{\text{вак}} = 10^{-4} - 10^{-8} \text{ Па}$ $T_{\text{п}} = 373 - 973 \text{ К}$ $v_{\text{о}}^{\text{max}} = 1,4 \cdot 10^3 p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{исп}}} \frac{F_{\text{и}}}{d^2 \rho}} =$ $= 0,1 - 1,0 \text{ мкм/с}$ $E = 0,01 - 0,1 \text{ эВ};$ $K_{\text{и}} = 0$ </p>	<p>Резистивный D00</p> 	<p>ВЧ-нагревом D01</p> 
<p>Электронный D02</p> 	<p>Электронно-лучевой D03</p> 	
<p>Лазерный D04</p> 	<p>Молекулярно-лучевой D05</p> 	
<p>Ионное распыление D1</p>  <p> $p_{\text{р.г}} = 1 - 10^{-2} \text{ Па}$ $T_{\text{п}} = 293 - 693 \text{ К}$ $v_{\text{о}}^{\text{max}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} j_{\text{и}} S M F_{\text{п}}}{\rho d^2} =$ $= 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1} \text{ мкм/с}$ $E = 3 - 5 \text{ эВ}$ $K_{\text{и}} \approx 0,01$ </p>	<p>Ионно-плазменный D10</p> 	<p>Ионно-лучевой D11</p>  <p>(АИИ — автономный источник ионов)</p>

Продолжение табл. 1.6

Принцип генерации частиц	Метод осаждения тонкой пленки		
<p>Воздействие взрывом D2</p>  <p>$T_{\text{п}} = 293 \text{ K}$</p> <p>$p_{\text{вак}} = 10^3 - 10^{-5} \text{ Па}$</p> <p>$v_{\text{о}}^{\text{max}} \leq 10^3 \text{ мкм/с}$</p> <p>$E = 1 - 1000 \text{ эВ}$</p> <p>$K_{\text{и}} = 0,1 - 0,5$</p>	<p>Импульсный лазерный D20</p> 	<p>Импульсный электронный D21</p> 	<p>Электро-разрядный D22</p> 
<p>Дуговое испарение D3</p>  <p>$p_{\text{вак}} = 10^{-2} - 10^{-5} \text{ Па}$</p> <p>$T_{\text{п}} = 293 - 693 \text{ K}$</p> <p>$v_{\text{о}}^{\text{max}} \leq \frac{q_{\text{доп}} M \cdot 10^2}{E_{\text{опт}} \rho} = 0,1 - 50 \text{ мкм/с}$</p> <p>$E = 0,1 - 10 \text{ эВ}$</p> <p>$K_{\text{и}} = 0,2 - 1,0$</p>	<p>С холодным катодом D30</p> <p>Дуговой разряд</p> 	<p>С горячим катодом D31</p> 	
<p>Формирование потока ионов D4</p>  <p>$p_{\text{вак}} = 10^{-3} - 10^{-5} \text{ Па}$</p> <p>$p_{\text{р.г}} = 10^3 - 10^{-1} \text{ Па}$</p> <p>$T_{\text{п}} = 293 - 493 \text{ K}$</p> <p>$v_{\text{о}}^{\text{max}} \leq \frac{q_{\text{доп}} M \cdot 10^2}{E_{\text{опт}} \rho} = 0,1 - 50 \text{ мкм/с}$</p> <p>$E = E_{\text{опт}} \approx 100 \text{ эВ}$</p> <p>$K_{\text{и}} = 0,1 - 1,0$</p>	<p>Термоионный D40</p>  <p>$T_{\text{исп}}$</p>	<p>Ионно-плазменный D41</p>  <p>Рабочий газ</p>	
	<p>Ионно-лучевой D42</p>  <p>Рабочий газ</p> <p>АИИ</p>	<p>Плазмотронный D43</p> 	

Окончание табл. 1.6

Принцип генерации частиц	Метод осаждения тонкой пленки	
<p>Химическое воздействие D5</p>  <p>$p_{p,r} = 10^5 - 10^{-1}$ Па $T_{п} = 293 - 1793$ К</p> $v_o^{\max} = 4,38 \cdot 10^3 \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_i} \sqrt{\frac{M_i}{T_{п}}} =$ <p>$= 0,01 - 1,00$ мкм/с $E = 0,1 - 10$ эВ $K_{и} = 0$</p>	<p>Из газовой фазы D50</p>  <p>Смесь газов</p>	<p>Плазмохимический D51</p>  <p>Смесь газов Тлеющий разряд</p>

1.15.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Осаждение тонких пленок в вакууме методом термического испарения D0 осуществляется путем подведения к веществу энергии резистивным D00 и высокочастотным D01 нагревом, электронной бомбардировкой D02, электронно-лучевым нагревом D03 и нагревом с помощью лазерного излучения D04. При температуре вещества, равной либо превышающей $T_{исп}$, частицы покидают испаритель, переносятся в вакууме на подложку и конденсируются на ее поверхности в виде тонкой пленки.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносит пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения v_o , низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц E , ионизированная фаза в потоке испаренных атомов и молекул практически отсутствует.

При молекулярно-лучевом методе D05 используются эффузионный источник в виде ячейки Кнудсена или капиллярный испаритель, в которых энергия к веществу подводится путем резистивного нагрева. Наличие тепловых экранов и контроль температуры обеспечивают одинаковые значения энергии испаренных частиц E и идеальную диаграмму распределения частиц по направлениям (косинусоидальный закон Кнудсена).

Таким образом, методом термического резистивного испарения D00 можно наносить тонкие пленки металлов с температурой испарения менее 2000 К (много меньше температуры плавления вольфрама, молибдена и тантала — материалов, из которых изготавливают резистивные испарители) и нельзя

наносить тонкие пленки сплавов (первыми начинают испаряться компоненты сплава с меньшей температурой испарения), оксидов и нитридов (при нагреве происходит их диссоциация или разложение, а при напуске реактивного газа — образование оксида или нитрида на испарителе, а следовательно, существенное повышение температуры испарения).

Методом термического испарения с ВЧ-нагревом D01 можно наносить тонкие пленки металлов с температурой испарения менее 2000 К (меньше температуры плавления нитрида бора, оксида алюминия и других диэлектрических материалов, из которых изготавливают тигли ВЧ-испарителей) и нельзя наносить тонкие пленки сплавов, оксидов и нитридов по той же причине, что и для метода D01.

Методом термического электронного испарения D02 можно наносить тонкие пленки любых металлов, даже тугоплавких, и нельзя наносить тонкие пленки сплавов по той же причине, что и для метода D01, а оксидов и нитридов — вследствие их диэлектрических характеристик.

Методом термического электронно-лучевого испарения D03 можно наносить тонкие пленки любых металлов, даже тугоплавких, и сплавов (мощность электронно-лучевого испарителя позволяет достаточно быстро нагревать сплав до температуры испарения самого тугоплавкого компонента), а тонкие пленки оксидов и нитридов можно наносить при соответствующей мощности испарителя.

Методом термического лазерного испарения D04 можно наносить тонкие пленки любых металлов, даже тугоплавких и сплавов (мощность лазерного испарителя позволяет достаточно быстро нагревать сплав до температуры испарения самого тугоплавкого компонента), а тонкие пленки оксидов и нитридов можно наносить при соответствующей мощности лазерного испарителя и длины волны излучения.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии D05 в сверхвысоком вакууме наносят пленки металлов и полупроводников (не тугоплавких), многокомпонентные пленки и сплавы получают испарением материалов из нескольких молекулярных источников (тонкие пленки оксидов, нитридов, карбидов и т. п. этим методом не наносят).

Сущность метода осаждения тонких пленок в вакууме ионным распылением D1 заключается в механическом выбивании (распылении) атомов вещества из поверхностных слоев мишени высокоэнергетичными ионами рабочего газа (обычно инертного аргона). Ионы образуются в газовом разряде при давлении $p_{p,r} = 1 \dots 10^{-2}$ Па и ускоряются до энергии 0,7...5 кэВ вследствие приложения к мишени отрицательного потенциала 0,7...5 кВ. Распыленные из мишени атомы осаждаются в виде тонкой пленки на поверхности подложки.

Различают ионно-плазменный D10 и ионно-лучевой D11 методы, в которых используются тлеющий (самостоятельный) и стимулированный (несамостоятельный) газовые разряды, а также автономные источники ионов Кауфмана (с горячим катодом) и Пеннинга (с холодным катодом). При использовании в качестве рабочего газа смеси из Ag и химически активного газа (O_2 , N_2 и т. п.) реализуется реактивный метод осаждения оксидов, нитридов и т. п. (D10__R и D11__R).

Достоинствами метода осаждения тонких пленок ионным распылением являются универсальность (можно наносить металлы, сплавы, магнитные композиции, диэлектрики, в том числе оксиды, нитриды, карбиды с напуском реактивного газа), регулируемая скорость осаждения v_0 и относительно простая конструкция. К недостаткам относятся невысокая чистота осаждаемой пленки (из-за наличия рабочего газа), низкая и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц E , ионизированная фаза в потоке распыленных атомов может составлять 1 % и более.

Тонкие пленки получают путем взрывного испарения вещества D2 при импульсном воздействии на него лазерного излучения D20 (лазерная абляция) или электронного пучка D21, а также при пропускании мощного импульса электрического тока через образец из наносимого материала в виде тонкой проволоки или фольги D22. Продукты взрыва с большой скоростью (энергия частиц E изменяется от 1 до 1000 эВ) переносятся к подложке (детали) и конденсируются на ее поверхности в виде тонкой пленки, ионизированная фаза осаждающихся частиц может составлять 20...50 %.

Достоинствами метода являются высокая скорость осаждения v_0 и хорошая адгезия тонкопленочного покрытия, однако его применение ограничено сложностью реализации и большой неравномерностью толщины пленки. Лазерной абляцией можно наносить тонкие пленки из любых материалов, поглощающих излучение с определенной длиной волны. При этом материалы тонких пленок сложного состава, включая оксиды, нитриды и карбиды, сохраняют стехиометрический состав мишени. Реактивным методом пленки оксидов, нитридов и карбидов получить нельзя, так как молекулы реактивного газа не будут успевать образовывать химическое соединение с генерируемым с помощью взрыва материалом.

Импульсным электронным лучом можно воздействовать практически на те же материалы, что и импульсным лазерным пучком. Методом D22 можно наносить только проводящие электрический ток материала, включая сплавы. Реактивным методом пленки оксидов, нитридов и карбидов получить также нельзя.

Осаждение тонких пленок дуговым разрядом в вакууме D3 происходит за счет эрозии вещества в сильноточных дуговых разрядах (с холодным D30 и горячим D31 катодом), образования ионизированной паровой фазы (от 20 до 100 % ионов), переносе ее с большой скоростью (энергия частиц E до 10 эВ) и конденсации на поверхности подложки.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок дуговым разрядом в вакууме относятся: практически неограниченная электрическая мощность; высокий коэффициент ионизации испаряемых частиц $K_{и}$; возможность получения пленок сплавов, оксидов, нитридов, карбидов и т. п. реактивным методом (типы D30__R и D31__R); отсутствие потребности в дополнительном газе для ионизации; скорость осаждения v_0^{max} — максимально возможная (ограничивается допустимым потоком энергии на поверхность конденсации). Недостатками являются наличие в потоке осаждаемого вещества капельной фазы, нерегулируемая энергия частиц E и относительная

сложность конструкции дуговых источников. На мишенях из диэлектрических материалов дуговой разряд в вакууме не зажигается.

В основе методов ионного осаждения тонких пленок D4 лежит сочетание двух процессов: 1) генерации плазмы исходного вещества с помощью одного из типов электрического разряда или ВЧ-индуктора и 2) ускорения ионов или всей квазинейтральной плазмы с последующей конденсацией на поверхности подложки (детали). Исходное вещество получают с помощью одного из методов термического испарения D0 (термоионный метод D40); из газовой смеси, содержащей компоненты осаждаемой пленки (ионно-плазменный D41 и ионно-лучевой D42 методы); с помощью дугового разряда D3, который используется как первая ступень плазменного ускорителя (плазмотронный метод D43).

Основными достоинствами метода ионного нанесения тонких пленок являются регулируемая в широких пределах энергия осаждаемых частиц (оптимальной считается энергия $E_{\text{опт}} = 100$ эВ) и высокая скорость осаждения v_0^{max} , а главными недостатками — сложность реализации и распыление конструкционных материалов, а следовательно, загрязнение плазмы и получаемой пленки.

Термоионным методом D40 можно наносить такие же пленки, как и соответствующим методом термического испарения (D00–D04) только с лучшими характеристиками благодаря более высокой энергии осаждаемых частиц. Ионно-плазменным D41 и ионно-лучевым D42 методами можно наносить однокомпонентные и многокомпонентные тонкие пленки (металлические, полупроводниковые, сплавы, оксиды, нитриды и т. п.) из материалов, у которых имеется газообразная фаза (газообразная фаза отсутствует или имеются сложности с ее получением у благородных металлов Au, Ag и Pt). Плазмотронным методом D43 можно наносить практически любые пленки, так как газообразную плазму получают из любых материалов разными методами (дуговым разрядом, электронным ударом и т. д.).

Метод химического осаждения тонких пленок D5 осуществляется при напуске в рабочую камеру (реактор) смеси газов, содержащей компоненты получаемой пленки; его подразделяют на осаждение атомов и молекул непосредственно из газовой фазы D50 (газофазное осаждение, или CVD-методы) и плазмохимическое осаждение электрически нейтральных атомов, молекул и радикалов D51. Главными достоинствами метода химического осаждения являются широкий диапазон скоростей осаждения v_0^{max} (благодаря широкому диапазону давления рабочего газа, вплоть до атмосферного) и возможность получения заданной кристаллической структуры пленки, вплоть до монокристаллов (благодаря возможности нанесения пленки при высокой температуре — до 1500 К), а основным недостатком — использование токсичных, экологически небезопасных газовых смесей.

Методами газофазного D50 и плазмохимического D51 осаждения можно наносить металлические и полупроводниковые однокомпонентные и многокомпонентные тонкие пленки, сплавы, оксиды, нитриды, карбиды и т. п. материалы, у которых имеется газообразная фаза (практически любые твердые материалы за исключением благородных металлов Au, Ag и Pt).

Особенностью технологии тонких пленок является возможность управлять служебными характеристиками тонкопленочных покрытий с помощью изменения структуры и геометрических размеров пленки (в первую очередь толщины), а также ее состава. Получать пленки с заданным составом можно реактивным нанесением или путем использования мишеней сложного состава, а также с помощью одновременного осаждения разных материалов из нескольких источников.

Реактивным методом можно получать пленки оксидов, нитридов, карбидов и т. п. Условием стабильности процесса является выполнение неравенства $p_{\text{реак}} < p_{\text{кр}}$, где $p_{\text{реак}}$ — парциальное давление реактивного газа, $p_{\text{кр}}$ — критическое давление, при котором происходит изменение химического состава поверхности мишени, приводящее к заметному изменению режимов осаждения пленки (т. е. скорость испарения или распыления мишени должен быть больше, чем скорость ее окисления, нитридации и т. п.).

Тесты к лекции 1.15

1. Молекулярно-лучевой метод осаждения основан на принципе генерации частиц:

- а) термическим испарением;
- б) дуговым испарением;
- в) ионным распылением.

2. Электроразрядный метод осаждения основан на принципе генерации частиц:

- а) воздействием взрывом;
- б) дуговым испарением;
- в) ионным распылением.

3. Плазмотронный метод осаждения основан на принципе генерации частиц:

- а) ионным распылением;
- б) дуговым испарением;
- в) воздействием взрывом.

1.16. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК

Цель лекции: дать понятие об основных характеристиках и свойствах тонких пленок и их значении для использования в приборостроении.

1.16.1. ТОЛЩИНА ПЛЕНКИ И ЕЕ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПО ДИАМЕТРУ ПОДЛОЖКИ

Толщина пленки оказывает существенное влияние на ее свойства, которые могут на порядки отличаться от свойств данного материала при толщинах, больших приблизительно 1 мкм.

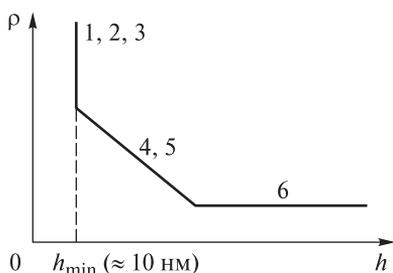


Рис. 1.47. Характер влияния толщины пленки h на ее удельное сопротивление ρ_c (1–6 — стадии роста)

Влияние толщины пленки на ее удельное сопротивление. Удельное сопротивление пленки ρ_c имеет три вида зависимости от ее толщины h : 1) увеличение до бесконечности при толщине, соответствующей островковой стадии роста ($h < h_{\min}$); 2) почти линейное уменьшение, соответствующее не сплошной и очень тонкой пленке; 3) независимое от толщины значение, соответствующее толстой пленке и монокристаллическому материалу (рис. 1.47).

Сопротивление тонкой пленки

$$R = \rho_c b / (ha) = \rho_{\square} b / a,$$

где a , b — ширина и длина тонкопленочного резистивного элемента, м; ρ_c , Ом·м, и ρ_{\square} («ро квадрат»), Ом/□, являются константами материала, причем ρ_{\square} соответствует максимально возможному для данного материала значению удельного сопротивления при $h = h_{\min}$ и составляет

$$\rho_{\square} = \rho_c \frac{a}{ah} = \frac{\rho_c}{h}.$$

1.16.2. НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ. ЗАКОН КНУДСЕНА

Одним из показателей качества тонкопленочных покрытий является неравномерность толщины пленки h , которая, согласно закону Кнудсена, возникает в результате косинусоидального распределения потока испаряемого или распыляемого материала по направлениям (рис. 1.48):

$$dq_{\text{и}}(\varphi) = q_{\text{и}} \cos \varphi d\omega / \pi,$$

где $q_{\text{и}}$ — масса испаренного или распыленного вещества, кг; φ — угол испарения; ω — телесный угол испарения. Элементарный участок, на который осаждается тонкая пленка,

$$dA_0 = r^2 d\omega / \cos \Theta,$$

где r — расстояние от источника испарения или распыления до элементарной площадки; Θ — угол конденсации.

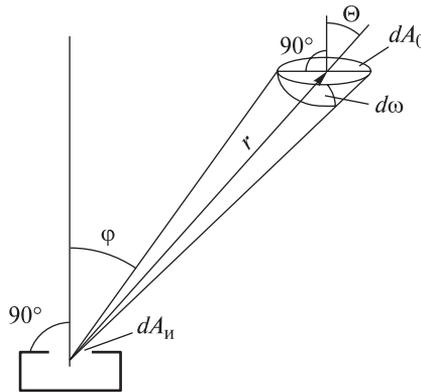


Рис. 1.48. Распределение испаренных молекул по направлениям

Закон Кнудсена имеет следующий вид:

$$\frac{dq_{\text{и}}(\varphi, \Theta)}{dA_0} = \frac{q_{\text{и}} \cos \varphi \cos \Theta}{\pi r^2}.$$

Скорость осаждения

$$v_0 = \frac{dq_{\text{и}}(\varphi, \Theta)}{dA_0 t} = \frac{q_{\text{и}} \cos \varphi \cos \Theta}{\pi r^2 t} \text{ [кг/(м}^2 \cdot \text{с)].}$$

Число испаряемых или распыляемых атомов с молярной массой M , осаждающихся на единицу поверхности в единицу времени.

$$N_o = v_o N_A / M \text{ [атом}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})],$$

где N_A — число Авогадро.

Толщина пленки в произвольной точке подложки δ (рис. 1.49)

$$h = \frac{dq_n(\varphi, \Theta)}{dA_0 \rho} = \frac{q_n l^2}{\pi r^2 \rho (l^2 + \delta^2)} \text{ [М]},$$

где l — расстояние от источника до подложки при $\varphi = 0$.

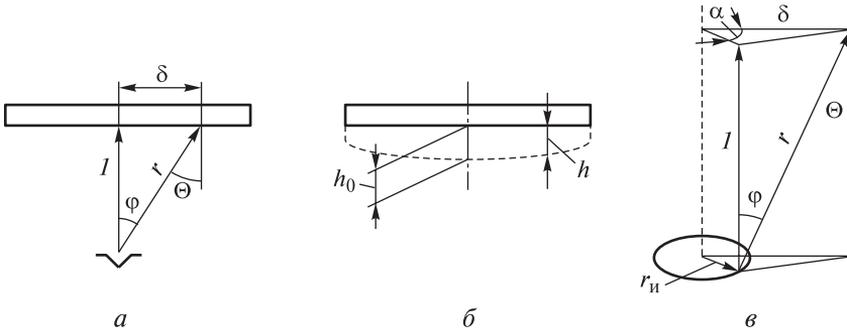


Рис. 1.49. Геометрические схемы расчета неравномерности толщины пленки h для точечного (a , b) и дискового ($в$) испарителя

Неравномерность толщины пленки при точечном испарителе (площадь испарителя пренебрежимо мала) характеризуется отношением толщины пленки h в точке δ к максимальной толщине пленки h_0 (см. рис. 1.49, a , b):

$$\Delta = \frac{h}{h_0} = \frac{1}{[1 + (\delta/l)^2]^{3/2}}.$$

При испарителе с радиусом r_n (см. рис. 1.49, $в$) толщина пленки в точке, отстоящей от центра подложки на расстояние δ :

$$h = \iiint_{r_n, \alpha} \frac{v_n r_n l^2 dr_n d\alpha dt}{\pi r^4},$$

где $\alpha = 0 \dots 2\pi$.

1.16.3. ОДНОРОДНОСТЬ СОСТАВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Важным показателем качества тонких пленок являются также состав и свойства технологической среды — вакуума или рабочих газов, которые оцениваются коэффициентом γ загрязнения осаждаемой тонкой пленки.

При термическом испарении

$$\gamma = \frac{N_{3,0}}{N_{M,0}},$$

где $N_{3,0}$ — поток «загрязняющих» атомов или молекул, осаждающихся на подложку, атом/(м²·с); $N_{M,0}$ — поток атомов или молекул осаждаемого материала, атом/(м²·с), а при ионном распылении

$$\gamma = \frac{N_{3,0} - N_{3,p}}{N_{M,0} - N_{M,p}},$$

где $N_{3,p}$ — поток «загрязняющих» атомов или молекул, осевших на подложку и распыленных ионами рабочего газа, атом/(м²·с); $N_{M,p}$ — поток атомов или молекул осаждаемого материала, распыленных с подложки ионами рабочего газа, атом/(м²·с).

Поток атомов и молекул остаточных газов, попадающих на подложку,

$$N_{3,0} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \alpha_i \sqrt{N_A}}{\sqrt{2\pi k T M_i}},$$

а поток атомов или молекул осаждаемого в виде тонкой пленки материала

$$N_{M,0} = \frac{v_0 N_A}{M_M} = \frac{10^{-9} v'_0 \rho N_A}{M_M}.$$

Здесь p_i — парциальное давление i -го газа («загрязнения»), Па; α_i — коэффициент аккомодации i -го газа; T — температура стенок вакуумной камеры, К; M_i — молярная масса i -го газа, кг/кмоль; v_0 — скорость осаждения пленки, кг/(м²·с); v'_0 , нм/с; ρ — плотность материала пленки, кг/м³; M_M — молярная масса материала пленки, кг/кмоль.

Поток «загрязняющих» атомов или молекул, распыленных ионами рабочего газа $N_{3,p}$, и поток атомов или молекул осаждаемого материала, распыленных с подложки ионами рабочего газа $N_{M,p}$, составляют соответственно:

$$N_{3,p} = S_3 N_{3,0} \quad \text{и} \quad N_{M,p} = S_M N_{M,0},$$

где S_3 — коэффициент распыления «загрязняющих» молекул; S_M — коэффициент распыления осаждаемого материала.

Таким образом, при ионном распылении

$$\gamma = \frac{N_{3,0}(1 - S_3)}{N_{M,0}(1 - S_M)}.$$

При нормальном законе распределения γ вероятность обеспечения требуемой чистоты осаждаемой пленки

$$P(\gamma \leq \gamma_d) = 0,5 + \Phi\left(\frac{\gamma_d - \bar{\gamma}}{\sigma_\gamma}\right),$$

где Φ — нормированная функция Лапласа.

Математическое ожидание коэффициента загрязнения осаждаемой пленки

$$\bar{\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \alpha_i M_m}{v_o \sqrt{2\pi k T M_i N_A}}$$

Допустимый коэффициент «загрязнения» пленки

$$\gamma_d \leq \frac{n_d h}{N_{m,0} t},$$

где n_d — допустимая концентрация загрязнений в материале пленки ($10^{18} \dots 10^{26}$ атом/м³); h — толщина пленки, м; t — длительность процесса осаждения пленки, с.

Среднее квадратичное отклонение коэффициента загрязнения пленки

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2},$$

где k — число параметров x , влияющих на чистоту технологической среды; σ_x — среднее квадратичное отклонение параметра x_j .

Тесты к лекции 1.16

1. С увеличением толщины тонкой пленки удельное сопротивление:

- уменьшается;
- увеличивается;
- остается неизменным.

2. Неравномерность толщины пленки при точечном испарителе определяется:

- отношением толщины пленки в заданной точке к максимальной толщине пленки;
- отношением толщины пленки в заданной точке к минимальной толщине пленки;
- отношением максимальной и минимальной толщин пленки.

3. Коэффициент загрязнения пленки при термическом испарении определяется:

- отношением потока молекул и атомов остаточных газов к потоку атомов испаряемого вещества;
- отношением потока молекул и атомов остаточных газов к потоку атомов и молекул рабочих газов;
- отношением потока атомов материала испарителя к потоку атомов испаряемого вещества.

1.17. ВАКУУМНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Цель лекции: изучить современное вакуумное оборудование, реализующее высоковакуумные технологические процессы, используемые при изготовлении изделий приборостроения.

1.17.1. СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ТИПОВОГО ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вакуумное технологическое оборудование представляет собой широкий класс оборудования, реализующего протекающие в вакууме технологические процессы. Его назначение также весьма обширно: кроме приборостроения и микроэлектроники, оно применяется в энергетической, аэрокосмической, пищевой, химической, фармацевтической отраслях промышленности, в металлургии, медицине и т. д.

Большинство вакуумных технологических установок имеют схожую структуру и состоят из нескольких подсистем, объединенных целевыми, механическими, энергетическими и информационными интерфейсами.

Технологическая система (источники частиц, нагреватели и т. д.) служит для создания технологического воздействия на обрабатываемые изделия.

Вакуумная система, включая рабочую камеру и средства откачки, обеспечивает требуемые условия для проведения технологического процесса.

Газовая система (система подачи газов) обеспечивает необходимый состав газовой среды в рабочей камере в случае, если того требует технологический процесс.

Транспортная система обеспечивает ввод (вывод) изделий в рабочую камеру и зону технологического процесса, а также их ориентацию относительно технологических источников.

Вспомогательная система (экраны, заслонки, средства контроля) применяется для обеспечения контроля качества и удобства процесса технологического процесса и межпроцессных работ.

Система питания и управления обеспечивает электропитание элементов установки и осуществляет требуемый уровень контроля и автоматизации ее работы.

Основная часть компонентов систем оборудования является стандартной (технологические источники, вакуумные насосы, датчики, запорная арматура, вводы движения, фитинги и т. д.), и ее выбирают исходя из предъявляемых требований. Сочетание (конфигурация) этих элементов является предметом проектирования и определяет качество реализации требуемого технологического процесса.

Типовая вакуумная технологическая установка для нанесения тонкопленочных покрытий приведена на рис. 1.50.

Оборудование одного и того же технологического назначения по своей конфигурации может существенно различаться в зависимости от производи-



Рис. 1.50. Типовая установка для нанесения тонкопленочных покрытий

тельности. Так, выделяют оборудование периодического, полунепрерывного, непрерывного действия и автоматические линии. К последним относится и кластерное оборудование.

Представленные далее типы оборудования для реализации высоковакуумных технологических процессов имеют множество разновидностей.

1.17.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Вакуумная установка для нанесения тонких пленок — специальное технологическое оборудование (СТО), предназначенное для формирования тонких слоев материала путем его переноса в вакууме от источника (мишени) до подложки (изделия) в результате различных воздействий на материал (нагрева, бомбардировки ионами).

На рис. 1.51–1.56 приведены схемы типовых технологических источников для формирования тонкопленочных покрытий — термических испарителей.

Рис. 1.51. Схема испарителя прямого нагрева:

1 — зажим токоввода; 2 — винт; 3 — испаряемый материал; 4 — поток паров; 5 — подложка

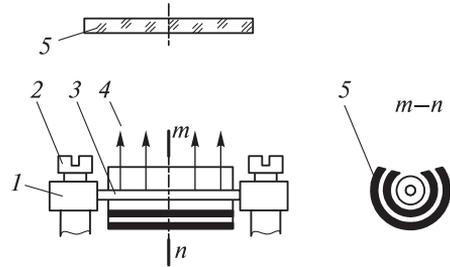


Рис. 1.52. Схема испарителя проволоочного типа:

a — цилиндрическая спираль; *б* — коническая спираль; 1 — место для зажима; 2, 6 — спирали; 3 — испаряемый материал; 4 — зажимы токоввода; 5, 7 — экраны

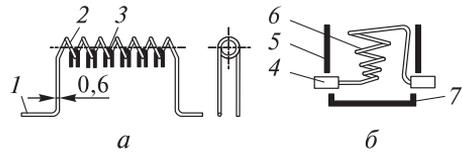


Рис. 1.53. Схемы тигельных испарителей:

a — для внутреннего нагрева; *б* — для внешнего нагрева; 1 — спираль нагревателя; 2 — тигель

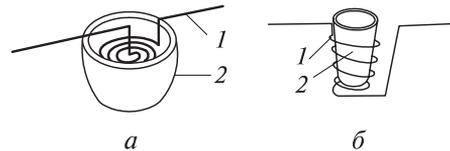


Рис. 1.54. Схема магнетронной распылительной системы:

1 — магнитная система; 2 — катод-мишень; 3 — зона распыления; 4 — магнитные силовые линии; 5 — поток распыляемого вещества; 6 — подложка; 7 — подложкодержатель

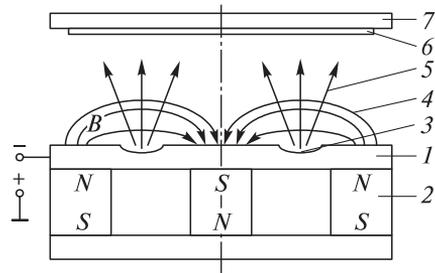
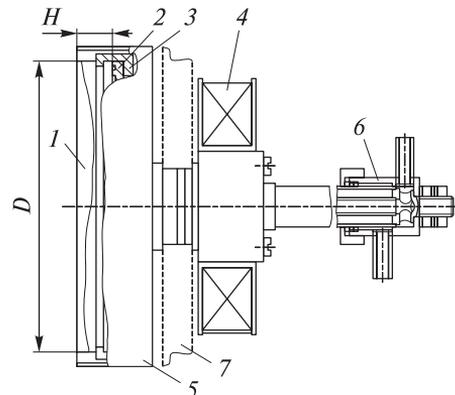


Рис. 1.55. Схема дугового испарителя торцевого типа:

1 — катод; 2 — катодный держатель; 3 — прижим; 4 — электромагнитная катушка; 5 — коллектор; 6 — фланец камеры; 7 — экран



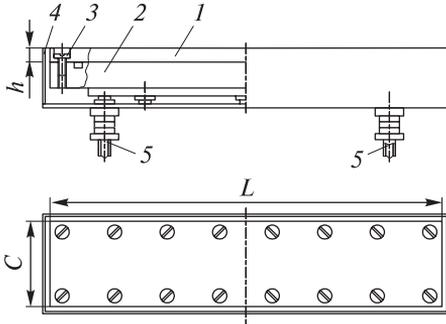


Рис. 1.56. Схема дугового испарителя планарного типа:

1 — катод; 2 — держатель; 3 — крепежные винты; 4 — экран; 5 — штуцеры

1.17.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Ионное травление поверхности изделий в вакууме можно осуществлять как в плазме газового разряда, так и направленным, предварительно сформированным потоком ионов. В первом случае изделие помещают между двумя электродами, одним из которых, как правило, является столик (подложкодержатель). Во втором случае для формирования потока ионов используют автономные источники ионов. Типовые ионные источники приведены на рис. 1.57. Устройство описано в п. 1.10.1.



a



б



в

Рис. 1.57. Сеточный (*a*), щелевой (*б*) и однолучевой (*в*) источники ионов

Сеточный источник ионов служит для травления микрорельефов (рис. 1.57, *a*), щелевой (рис. 1.57, *б*) и однолучевой (рис. 1.57, *в*) источники ионов используются для предварительной обработки и активации поверхности.

1.17.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБЕЗГАЗИВАЮЩЕГО ПРОГРЕВА И ОТЖИГА

Технологическими источниками для обезгаживающего прогрева и отжига оборудования служат разного рода нагреватели.

Типовые технологические источники нагрева приведены на рис. 1.58.

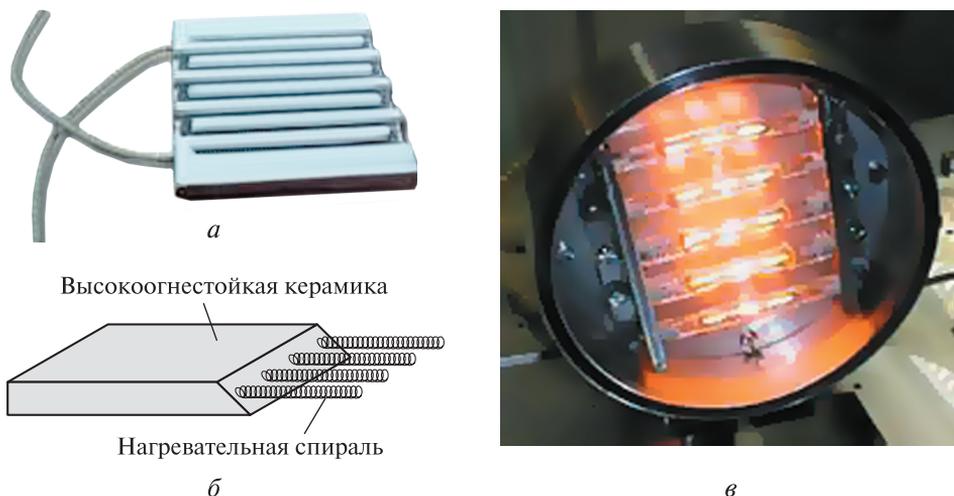


Рис. 1.58. Типовые технологические источники нагрева:

a — резистивный инфракрасный нагреватель (толщина 15 мм, максимальная рабочая температура 1350 °С); *б* — схема плоского керамического нагревателя прямого нагрева (10...12 мм, 700 °С); *в* — галогенная лампа (35 мм, 450 °С)

Нагрев в вакууме осуществляется преимущественно излучением.

Тесты к лекции 1.17

1. В установке вакуумного осаждения тонких пленок магнетронная распылительная система является частью:

- а) технологической системы;
- б) вспомогательной системы;
- в) транспортной системы.

2. Сеточный источник ионов предназначен преимущественно:

- а) для травления микрорельефа;
- б) ассистирования в процессе нанесения покрытия;
- в) ионной имплантации.

3. При использовании галогенных нагревательных элементов нагрев осуществляется:

- а) излучением;
- б) конвекцией;
- в) теплопроводностью.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ И ИЗМЕРЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Цель лабораторной работы: изучение основных методов и средств получения и измерения вакуумной технологической среды для реализации высоковакуумных технологических процессов.

Задание по лабораторной работе

1. Изучить конструкцию и принцип работы вакуумной системы лабораторной установки вакуумного осаждения покрытий.

2. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере СИ1 (рис. 2.1) от времени t при откачке спиральным вакуумным насосом и измерении давления термопарным преобразователем (датчиком низкого вакуума). Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление форвакуумной системы p' .

3. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере СИ1 от времени t при откачке турбомолекулярным вакуумным насосом и измерении давления ионизационным преобразователем (датчиком высокого вакуума). Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление высоковакуумной системы p' .

4. Экспериментально исследовать зависимость давления p от времени t при закрытом затворе. Построить кривую потока газонатекания, определить его значение.

5. Проанализировать результаты лабораторной работы, сформулировать краткие выводы, оформить отчет и представить его к защите.

Теоретическая часть

Для создания требуемого вакуума при проведении высоковакуумных технологических процессов, в частности, при нанесении тонкопленочных покрытий используются различные конфигурации вакуумных насосов, запорной арматуры и вспомогательных элементов вакуумных систем. Их выбор определяется типом процесса, производительностью и размером рабочей камеры вакуумной установки, чистотой вакуумной среды и т. д.

Качество изготовления вакуумной камеры, внутрикамерных элементов, а также качество сборки элементов вакуумной и технологической систем существенно влияют на потоки газовой выделенной и газонатеканной, что, в свою очередь, влияет на качество получаемых тонких пленок.

Описание установки вакуумного нанесения

Вакуумная установка ВУП-11М применяется для формирования тонких пленок методом магнетронного распыления. Формирование пленок происходит в вакууме при давлении 0,2 Па. Для создания вакуума установка ВУП-11М оснащена двумя типами насосов: форвакуумным и высоковакуумным. В качестве форвакуумного используется спиральный насос, он позволяет откачать камеру до среднего вакуума (диапазон давления 10...1 Па), в качестве высоковакуумного — турбомолекулярный насос, позволяющий откачать камеру до высокого вакуума (10^{-3} ... 10^{-4} Па). Установка имеет три вакуумные магистрали: высоковакуумную (соединяет камеру и турбомолекулярный насос), форвакуумную (соединяет турбомолекулярный и спиральный насосы) и байпасную магистраль (соединяет спиральный насос напрямую с камерой, в обход высоковакуумного насоса). В качестве запорной арматуры применяют электромагнитные клапаны на форвакуумной и байпасной магистралях и шиберный затвор на высоковакуумной магистрали. Принципиальная схема вакуумной установки ВУП-11М представлена на рис. 2.1.

Технологический процесс работы на установке ВУП-11М начинается с загрузки образца в рабочую камеру, которая изначально находится под атмосферным давлением. Затем для создания рабочей среды из вакуумной камеры откачивается газ с помощью спирального насоса *NI1* по байпасной магистрали через электромагнитный клапан *VE3*. При достижении давления включения турбомолекулярного насоса ~ 10 Па клапан *VE3* закрывается и открывается клапан *VE1*. Спиральный насос откачивает газ из турбомолекулярного насоса по форвакуумной магистрали, а турбомолекулярный насос откачивает газ из рабочей камеры через затвор *VT1* по высоковакуумной магистрали. При достижении в рабочей камере остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па в камеру подается рабочий газ. С помощью регулировки положения тарелки затвора выставляется рабочее давление в камере и запускается процесс формирования тонкопленочного покрытия методом магнетронного распыления. По завершении процесса нанесения пленки выключается турбомолекулярный насос. После

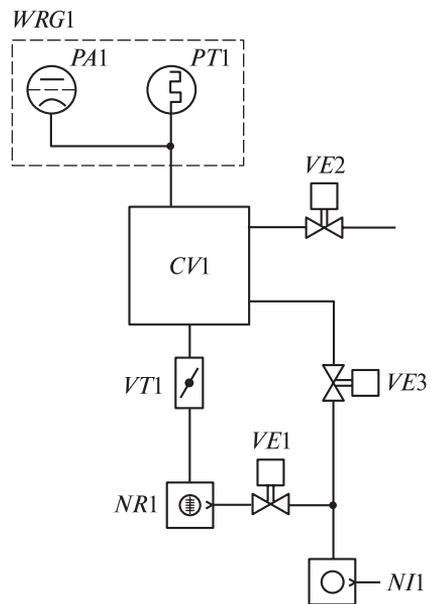


Рис. 2.1. Принципиальная схема вакуумной установки ВУП-11М

остановки турбомолекулярного насоса выключается спиральный насос, закрывается клапан *VE1* и в камеру напускается воздух через клапан напуска *VE2*.

Общий вид установки ВУП-11М приведен на рис. 2.2.

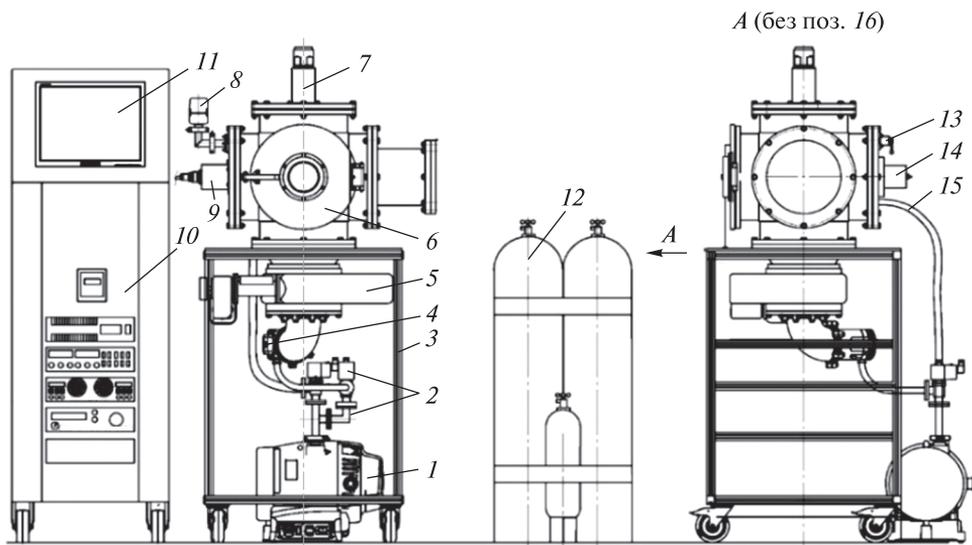


Рис. 2.2. Общий вид вакуумной установки ВУП-11М:

1 — форвакуумный спиральный насос Edwards XDS35i; 2 — электромагнитные клапаны; 3 — рама; 4 — турбомолекулярный насос Edwards nEXT400D; 5 — высоковакуумный затвор; 6 — рабочая камера; 7 — ввод вращения; 8 — датчик измерения вакуума WRG; 9 — магнетрон; 10 — шкаф для блоков питания источников; 11 — компьютер управления; 12 — баллоны с газами; 13 — клапан напуска атмосферы; 14 — автономный источник ионов; 15 — байпасная магистраль

Основными элементами вакуумной системы являются вакуумные насосы, и быстрота откачки рабочей камеры непосредственно зависит от их характеристик. Основные характеристики вакуумных насосов установки ВУП-11М приведены ниже.

Характеристика	Спиральный насос XDS35i	Турбомолекулярный насос nEXT400D
Быстрота действия насоса, л/с	12	N ₂ — 400 Ar — 380 He — 390 H ₂ — 325
Предельное остаточное давление, Па	1	1 · 10 ⁻⁶
Входной фланец ISO	KF40	ISO160-K
Выходной фланец ISO	KF25	KF25
Мощность двигателя, Вт	520	200
Номинальная скорость вращения, об/мин	1500	60 000

Измерение вакуума

Для измерения давления в камере используется широкодиапазонный датчик WRG-S. Датчик WRG-S объединяет в себе два типа преобразователей: низкого вакуума типа Пирани и высокого вакуума инверсно-магнетронного типа. Благодаря этому WRG-S может измерять давление в диапазоне от атмосферного до 10^{-7} Па. Датчик давления имеет линейную логарифмическую выходную характеристику давления в зависимости от напряжения питания.

Характеристики вакуумного датчика WRG-S:

Диапазон измеряемого давления, Па	От 10^5 до 10^{-7}
Относительная погрешность	$\pm 15\%$
Максимальное избыточное давление, кПа	600 (абс.)
Напряжение питания, В	От +14,5 до +36 (DC)
Потребляемая мощность, Вт	2
Выходной сигнал, В	От 1,8 до 10,2 (DC)
Рабочая температура, °C	От +5 до +60

Вакуумный датчик подключают к контроллеру ПИС. Контроллер обеспечивает питание и управление вакуумным датчиком, а также осуществляет индикацию измеренного давления.

Контрольные вопросы

1. Как называется насос для предварительной откачки камеры?

- а) форвакуумный;
- б) высоковакуумный;
- в) байпасный.

2. На какой линии обычно устанавливается вакуумный затвор?

- а) на высоковакуумной;
- б) форвакуумной;
- в) байпасной.

3. Для чего служит байпасная линия откачки?

- а) для предварительной откачки камеры в обход высоковакуумного насоса;
- б) предварительной откачки камеры через высоковакуумный насос;
- в) дублирования форвакуумной линии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

Цель лабораторной работы: изучение влияния параметров обработки плазмой тлеющего разряда на состояние поверхности подложки.

Задание по лабораторной работе

1. Ознакомиться с физическими основами процесса формирования газоразрядной плазмы.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы вакуумной лабораторной установки.
3. Провести обработку образцов при различных параметрах тлеющего разряда.
4. Исследовать состояние поверхности путем проведения измерений краевого угла смачивания.
5. Проанализировать полученные данные, сделать краткие выводы по лабораторной работе.
6. Подготовить отчет и представить его к защите.

Теоретическая часть

При производстве приборов, их составных частей и изделий микроэлектроники одним из первых этапов технологического маршрута является подготовка поверхности изделия. От чистоты поверхности зависит адгезионная прочность наносимого покрытия. Адгезия (лат. *adhaesio* — прилипание, сцепление, притяжение) — поверхностное явление, которое заключается в образовании механической прочности при контакте поверхностей двух разных тел (конденсированных фаз). Адгезия обусловлена молекулярным притяжением контактирующих фаз или их химическим взаимодействием. Адгезия влияет на работоспособность и срок службы приборов.

Виды загрязнений

Для определения режимов очистки поверхности необходимо понимать, с какими видами возможных загрязнений сталкиваются на производстве.

Основными типами загрязнений и их источниками являются:

- волокна — нейлон, целлюлоза и т. д., одежда, ткани, бумажные изделия;
- силикаты — горные породы, песок, почва, зола, пепел;
- оксиды и окалина — продукты окисления некоторых металлов;
- масла и жиры — масла от машинной обработки, отпечатки пальцев, жиры с открытых участков тела, средства для волос, мази, лосьоны;
- силиконы — аэрозоли для волос, кремы, лосьоны после бритья, лосьоны для рук, мыло;

- металлы — порошки и отходы машинной обработки и шлифовки, частицы из металлических контейнеров для хранения;
- ионные примеси — продукты дыхания, отпечатки пальцев (хлорид натрия), примеси из очищающих растворов, некоторые флюсы, примеси от химических операций;
- неионные примеси — неионные детергенты, органические материалы для обработки;
- растворимые примеси — очищающие растворители и растворы.

Распределение основных источников микрочастиц пыли на производстве представлено на рис. 2.3.

Методы очистки

В соответствии с применяемыми средствами очистку подразделяют на жидкостную и сухую. Классификация методов очистки пластин и подложек приведена на рис. 2.4.

Жидкостная очистка выполняется органическими растворителями, разнообразными составами, содержащими щелочи, кислоты, пероксид и другие реактивы. Подобрать жидкое средство, которое одновременно удаляет все поверхностные загрязнения, практически невозможно, поэтому жидкостная

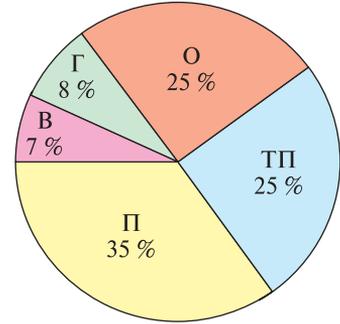


Рис. 2.3. Распределение основных источников микрочастиц пыли:

О — оборудование, оснастка, средства автоматизации; ТП — технологический процесс; П — обслуживающий персонал; В — воздушная среда; Г — газы и химикаты

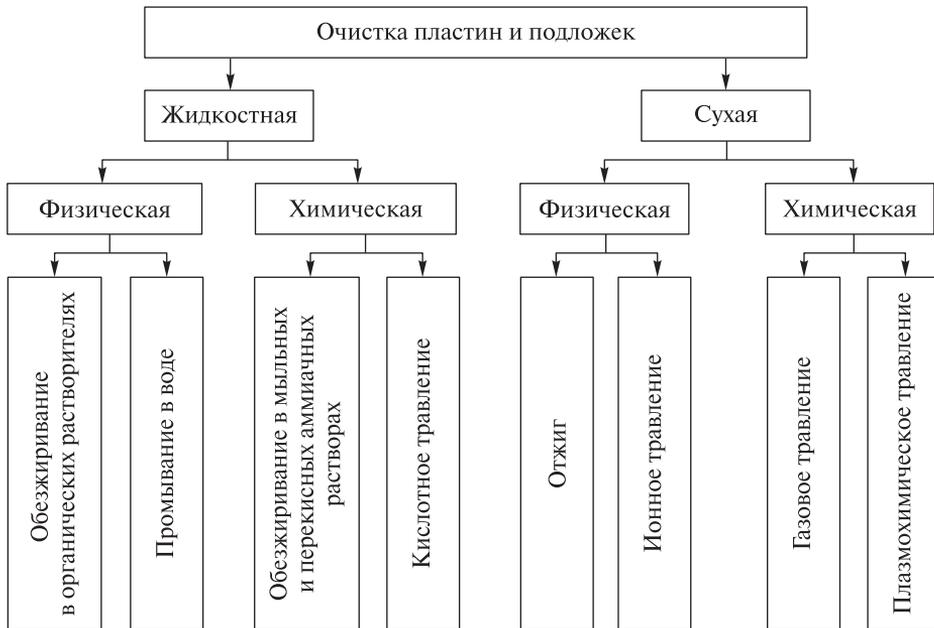


Рис. 2.4. Классификация методов очистки пластин и подложек

очистка включает в себя ряд последовательных операций. После жидкостной очистки на поверхности остаются капли жидкости, которые при высыхании образуют видимые пятна, изменяющие свойства формируемого покрытия. Во избежание этого капли после очистки следует сдувать струей воздуха или удалять центрифугированием, что усложняет процесс.

Эффективным способом очистки является травление, поскольку происходит удаление приповерхностного слоя материала, в котором обычно присутствуют соединения от взаимодействия с окружающей средой. Химическое травление предусматривает разрушение загрязнений или поверхностного слоя очищаемого объекта в результате химических реакций в растворе травителя. Недостатком жидкостного травления является наличие механически нарушенного слоя и вероятность наличия микропримесей после очистки.

Чистыми методами травления являются ионное, газовое и плазмохимическое травление. Эти методы относятся к сухой очистке. По сравнению с жидкостной очисткой сухая является менее трудозатратной и более прецизионной, поскольку очистка идет на молекулярном уровне.

Ионное травление — процесс очистки распылением слоя вещества с находящимися на его поверхности загрязнениями и адсорбированными газами. Травление выполняют в вакуумных установках путем бомбардировки пластин или подложек ускоренными положительными ионами инертных газов. Этот метод травления является наиболее универсальным методом очистки по сравнению с химическими методами травления, поскольку позволяет очищать подложки от загрязнений любого вида и травить поверхности любых материалов. К недостаткам ионного травления следует отнести низкую скорость травления (0,1...1,0 нм/с), значительные тепловые воздействия, вызывающие разрушения контактных масок, деградацию электрофизических параметров структур и необходимость охлаждения изделий при травлении.

Метод контроля чистоты. Оценка качества чистоты поверхности проводится измерением краевого угла смачивания. Краевым углом смачивания

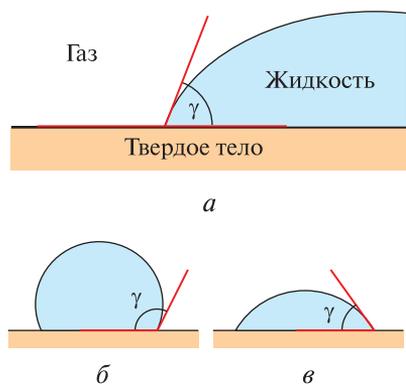


Рис. 2.5. Краевой угол γ смачивания (а), смачивание гидрофобной (б) и гидрофильной (в) поверхностей капель воды

называется угол, который образуется между каплей жидкости на поверхности твердого вещества и данной поверхностью (рис. 2.5). Размер краевого угла между жидкостью и твердым веществом зависит от взаимодействия между веществами на контактной поверхности. Если взаимодействие незначительно, то такие поверхности обладают гидрофобными свойствами и большим краевым углом смачивания. Чем больше краевой угол, тем труднее смочить поверхность и тем меньше приставание чужеродных веществ к поверхности, следовательно, адгезия покрытий к такой поверхности будет низкой. В процессе очистки размер краевого угла уменьшается, поверхность при-

обретает гидрофильные свойства, адгезия покрытий к очищенным поверхностям повышается. Таким образом, чем меньше краевой угол смачивания, тем чище поверхность.

Описание лабораторного оборудования

При проведении лабораторной работы осуществляется ионная очистка стеклянных подложек в высокочастотной плазме низкого давления в среде аргона на специальном лабораторном стенде (рис. 2.6).

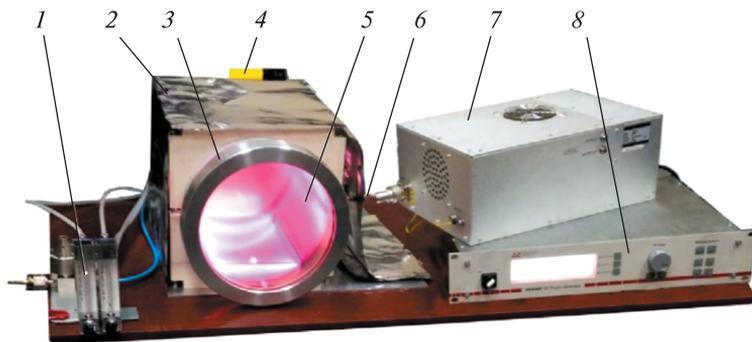


Рис. 2.6. Лабораторный стенд плазменной очистки:

1 — ротаметр; 2 — экран; 3 — крышка; 4 — датчик давления; 5 — рабочая камера с внешними электродами; 6 — кабель для подключения ВЧ-генератора; 7 — согласующее устройство; 8 — ВЧ-генератор

Технические характеристики лабораторного стенда

Объем рабочей камеры, л	11,7
Размер камеры, мм	∅235×300
Материал камеры	Кварцевое стекло
Мощность, max, Вт.....	200
Частота, МГц	13,56
Количество рабочих газов	2

Откачка камеры проводится со стороны задней стенки. На задней стенке расположен датчик давления, диапазон измерения которого $1,0 \cdot 10^5 \dots 1,0 \cdot 10^{-4}$ Торр. Остаточное давление камеры варьируется в диапазоне 20...30 мТорр. Через коаксиальный кабель коммутируются внешние электроды и ВЧ-генератор с согласующим устройством, которое предотвращает потерю мощности. Генерация плазмы в камере осуществляется за счет подачи напряжения питания на внешние электроды. В качестве рабочего газа используется аргон. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 2.7.

Измерение краевого угла смачивания осуществляется на специальном приборе — гониометре.

Гониометр ЛК-1 (рис. 2.8) позволяет получать изображение лежащей на подложке капли с помощью цифровой видеокамеры, экспортировать

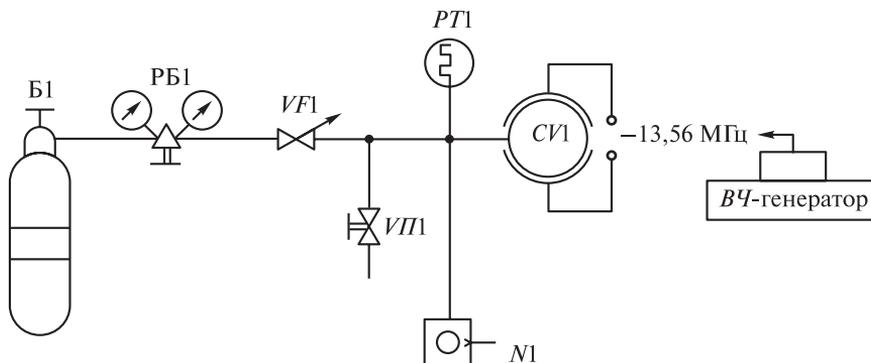


Рис. 2.7. Схема лабораторного стенда:

Б1 — баллон с рабочим газом; РБ1 — баллонный редуктор; VF1 — ротаметр; ВП1 — клапан напуска атмосферы; PT1 — датчик давления; N1 — спиральный на-сос; CV1 — рабочая камера; СУ — система управления

изображение в компьютер, определить краевой угол смачивания методом касательной и на основе уравнения Лапласа описать форму контура капли.

Исследуемую подложку помещают на специальный горизонтальный сто-лик, который закреплен на препаратоводителе. На подложке микрошприцом

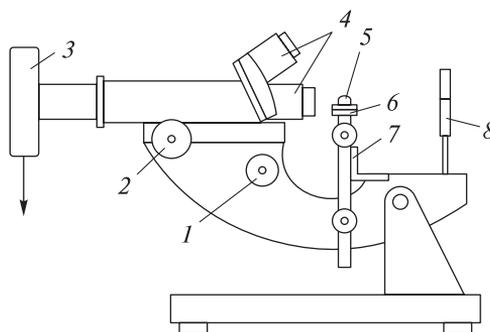


Рис. 2.8. Схема гониометра ЛК-1:

1, 2 — ручки регулировки точной и грубой фокусировки; 3 — видеоокуляр; 4 — объективы; 5 — капля на подложке; 6 — столик; 7 — пре-паратоводитель; 8 — зеркало

формируют каплю воды определенного размера. Препаратоводитель позво-ляет перемещать подложку в горизонтальной и вертикальной плоскости так, чтобы изображение капли на подложке располагалось по центру в поле зре-ния. Фокусировка проводится горизонтальной подачей в режиме непрерыв-ной передачи изображения капли на экран персонального компьютера с по-мощью видеоокуляра. При этом используется объектив с четырехкратным увеличением, подсветка капли оптимизируется вращением зеркала.

Измерение краевого угла смачивания

Последовательность действий при измерении краевого угла смачивания:

1. Подготовить подложку и микрошприц с дистиллированной водой.
2. С рабочего стола компьютера запустить программу **DropShape**.
3. В открывшейся программе создать новый файл (меню **Файл** → **Создать**).
4. Активировать модуль захвата изображений с камеры (меню **Файл** →

Захват).

5. В появившемся окне **Захват изображения** указать путь сохранения изображений каплей, выбрать устройство захвата **UCMOS01300KPA**, разрешение кадра 1280×1024 RGB (выставляется автоматически). Возникает изображение, полученное с видеоокуляра.

6. Поместить подложку (образец) на столик препаратоводителя.

7. Отрегулировать зеркало так, чтобы добиться максимально равномерного освещения объектива.

8. Вращая ручки подачи препаратоводителя, установить подложку в нижней части кадра.

9. При необходимости отрегулировать горизонтальность положения камеры. Для этого повернуть камеру так, чтобы изображение подложки было горизонтальным.

10. Поместить каплю исследуемой жидкости на подложку с помощью дозиметра. Объем капли должен быть 4...10 мкл (выбранный объем капли соблюдать во всей проводимой серии измерений).

11. Сфокусировать микроскоп на каплю с помощью ручек регулировки, используя грубую и точную настройку. При необходимости отрегулировать положение капли и освещение зеркалом.

12. Нажать кнопку **Захват**, при этом изображение появится слева в основном окне программы.

Примечание: желательно выполнять пп. 11, 12 как можно быстрее, так как помещенная на подложку капля быстро высыхает.

13. После захвата изображения можно приступить к измерению краевого угла смачивания. В основном окне программы нажать на изображение для обработки. Оно появится справа, в основной части окна.

14. С помощью команды **Подложка** на панели графических инструментов



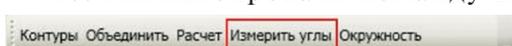
указать положение подложки на изображении. Для этого нажать мышью на точку пересечения подложки и контура капли слева и, удерживая левую клавишу мыши, провести отрезок до правой точки пересечения. При необходимости полученный отрезок можно отредактировать.

15. С помощью команд **Левый контактный угол** и **Правый контактный угол**



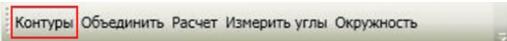
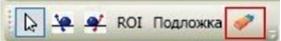
провести касательные к профилю капли в точке пересечения профиля с подложкой слева и справа соответственно.

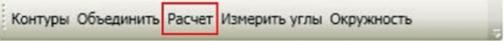
16. Активизировать команду **Измерить углы** на панели команд



. В нижней части основного окна программы появятся значения краевых углов слева и справа, а также среднего краевого угла.

17. Для автоматического определения краевого угла по контуру капли, проведенному на основании уравнения Лапласа, необходимо распознать положение контура капли. Для этого командой **ROI** на панели графических инструментов  выделить участок изображения, содержащий каплю и подложку. По возможности исключить неоднородно освещенные участки фона.

18. Активировать команду **Контур** на панели команд . При плохом качестве распознавания контура удалить ненужные контуры клавишей **Del** и ненужные фрагменты контуров с помощью команды **Ластик** на панели графических инструментов .

19. Для расчета угла по контуру капли активировать команду **Расчет** на панели команд. Рассчитанный краевой угол появится в нижней части основного окна .

20. Результаты обработки могут быть сохранены и заново открыты в основном окне программы (меню **Файл** → **Сохранить** и **Файл** → **Открыть**).

Для каждого образца необходимо провести по три измерения, записать результаты значений краевого угла в таблицу и рассчитать среднее значение краевого угла смачивания.

Ионно-плазменная обработка образцов

Последовательность действий при очистке образцов.

1. Загрузить подложку в камеру.
 2. Закрывать и придерживать крышку камеры.
 3. Включить откачку камеры и отпустить крышку.
 4. Достичь остаточного давления 20...40 мТорр.
 5. Вращать ручку ротаметра до достижения давления 250 мТорр.
 6. Включить питание ВЧ-генератора.
 7. Выставить необходимую мощность.
 8. Включить автоматическую настройку согласующего устройства, нажав кнопку Auto.
 9. Нажать кнопку On.
 10. Провести обработку в течение определенного времени.
 11. Нажать кнопку Off.
 12. Вращать ручку ротаметра до закрытия подачи рабочего газа.
 13. Выключить откачку камеры.
 14. Открыть клапан напуска атмосферы.
 15. Выгрузить образец.
- Повторить пп. 1–5 и 9–15 для остальных образцов.

Контрольные вопросы

1. Основным источником пыли в чистых производственных помещениях является:

- а) персонал;
- б) оборудование;
- в) технологический процесс.

2. Очистка подложек в плазме газового разряда относится к группе методов:

- а) сухой очистки;
- б) жидкостной очистки;
- в) механической очистки.

3. При каком давлении происходит плазменная очистка подложек?

- а) при пониженном давлении (в вакууме);
- б) атмосферном давлении;
- в) давлении выше атмосферного.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Цель лабораторной работы: изучение технологических процессов и оборудования для формирования тонкопленочных покрытий методами термического испарения и магнетронного распыления.

Задание по лабораторной работе

1. Ознакомиться с физическими основами процесса нанесения тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления.
2. Получить у преподавателя задание и таблицу с физическими параметрами испаряемых и распыляемых материалов.
3. Установить в рабочую камеру установки испаритель, испаряемый материал и предварительно очищенные подложки с закрепленными на них масками.
4. Провести осаждение пленки методом термического испарения, замерить время осаждения, записать параметры.
5. Разгерметизировать камеру и извлечь образцы.
6. Установить в рабочую камеру установки мишень распыляемого материала и предварительно очищенные подложки с закрепленными на них масками.
7. Провести осаждение пленки методом магнетронного распыления, замерить время осаждения, записать параметры.
8. На основании выражений для нахождения скоростей выполнить расчеты толщин осажденных пленок.
9. Подготовить отчет и представить его к защите преподавателю.

Теоретическая часть

В лабораторной работе осаждение тонких пленок в вакууме осуществляется методами термического испарения и магнетронного распыления.

Нанесение тонких пленок методом термического испарения

Процесс термического испарения (рис. 2.9) можно разбить на следующие пять этапов.

1. Термовакuumное испарение вещества. Вещества переходят в пар при любой температуре выше абсолютного нуля, но, чтобы увеличить интенсивность парообразования, их нагревают. С увеличением температуры повышается средняя кинетическая энергия атомов и возрастает вероятность разрывов межатомных связей. Атомы отрываются от поверхности и распространяются в свободном пространстве, образуя пар.

Давление пара $p_{\text{нас}}$, соответствующее равновесному состоянию системы, когда число атомов, покидающих поверхность вещества, равно числу возвра-

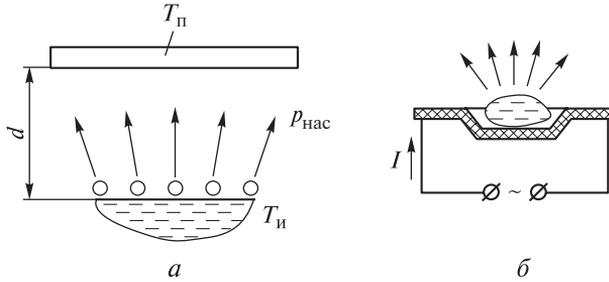


Рис. 2.9. Формирование пленок методом термического испарения (а) и схема резистивного нагрева (б)

шающихся атомов, называют давлением насыщенного пара. Это давление значительно зависит от температуры. Приращение температуры на каждые 5...10 % сверх температуры испарения приводит к увеличению давления насыщенного пара, а следовательно, и скорости испарения на один порядок.

Скорость термического испарения чистого металла (количество вещества в килограммах, покидающее 1 м² поверхности за 1 с)

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M_{\text{м}}}{T_{\text{и}}}}, \quad (2.1)$$

или, в нм/с,

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M_{\text{м}}}{T_{\text{и}}}} \frac{10^9}{\rho}, \quad (2.2)$$

где $p_{\text{нас}}$ — давление пара испаряемого вещества при температуре испарения, Па; $M_{\text{м}}$ — молекулярная масса испаряемого материала, кг/кмоль; $T_{\text{и}}$ — температура испарения, К; ρ — плотность испаряемого вещества.

2. Распространение молекулярного потока испаряемых частиц от испарителя к подложке. Молекулярный поток испаряемых частиц на своем пути встречает молекулы остаточного газа. Возникающие при этом неблагоприятные столкновения, изменяя траектории частиц пара, оказывают влияние на физико-механические свойства осаждаемых пленок, приводят к потерям испаряемого материала за счет нанесения на внутрикамерную оснастку и стенки камеры, уменьшают скорость нанесения пленки. Такие столкновения не происходят, если длина λ свободного пробега молекул пара превышает расстояние d «испаритель — подложка» :

$$\lambda \gg d; \quad (2.3)$$

$$\lambda \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p}, \quad (2.4)$$

где p — давление остаточного газа, Па.

Начиная с давления $p \approx 10^{-3}$ Па средняя длина свободного пробега частиц газа становится больше расстояния от источника до подложки, которое в промышленных установках не превышает 30 см. С этого давления вероятность столкновений в пролетном пространстве с молекулами остаточных газов невелика. Можно считать, что частицы напыляемого вещества беспрепятственно распространяются прямолинейно направленным молекулярным потоком, сохраняя свою энергию до встречи с подложкой.

3. Конденсация пара на поверхности подложки. Конденсация пара зависит от температуры подложки и плотности атомарного потока. Молекулы (атомы) пара, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время отразиться от подложки (реиспарение), адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности окончательно остаться на ней (конденсация).

Конденсация молекул (атомов) происходит, если их энергия связи с подложкой больше средней энергии атомов подложки, в противном случае молекулы отражаются. Если подложка нагрета, энергия ее атомов выше, вероятность конденсации пара ниже. Температура, выше которой при данной плотности потока пара все молекулы отражаются от подложки и пленка не образуется, называется критической температурой конденсации. Она зависит от природы материала пленки и подложки и от состояния поверхности подложки. При определенной температуре подложки, меньшей критической, конденсация пара возможна только при условии пересыщения пара, т. е. для конденсации существует критическая плотность потока. Критической плотностью потока для данной температуры подложки называется наименьшая плотность, при которой молекулы конденсируются на подложке.

4. Образование зародышей. Образование зародышей происходит в результате нахождения молекулами мест сильной связи (сил Ван-дер-Ваальса) с подложкой, соответствующих минимуму свободной энергии системы «молекула — подложка». Если на пути своего движения обладающая избытком энергии молекула встречает место слабой связи с подложкой, происходит реиспарение. Рост зародышей продолжается за счет присоединения новых молекул, мигрирующих по поверхности или попадающих в зародыши непосредственно из пролетного промежутка «источник — подложка».

5. Рост пленки. По мере конденсации зародыши растут, между ними образуются соединяющиеся мостики, зародыши сливаются в крупные островки. После этого наступает стадия слияния островков с образованием единой сетки. Сетка переходит в сплошную пленку, толщина которой растет. С этого момента влияние подложки исключается, и частицы пара от поверхности пленки практически не отражаются.

Скорость осаждения пленки v_0 зависит от скорости испарения, площади испарителя $S_{\text{и}}$, расстояния r между испарителем и подложкой и углов испарения φ и конденсации θ :

$$v_0 = \frac{v_{\text{и}} S_{\text{и}} \cos \varphi \cos \theta}{4\pi r^2} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right], \quad (2.5)$$

где φ — угол между направлением пучка паров и нормалью к поверхности испарителя; θ — угол между направлением потока паров и нормалью к поверхности подложки.

Скорость осаждения пленки и давление остаточных газов в рабочей камере определяют такие параметры пленок, как размер зерна, пористость, удельное сопротивление, оптические свойства и т. п.

Нанесение тонких пленок методом магнетронного распыления

Схема магнетронной распылительной системы (МРС) с плоской мишенью представлена на рис. 2.10. Методика формирования тонких пленок методом магнетронного распыления на установке MANTIS QPREP 500 приведена в прил. П5.

Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или отрицательный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой — поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циркулируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию.

Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности катода. Это, в свою очередь, обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки

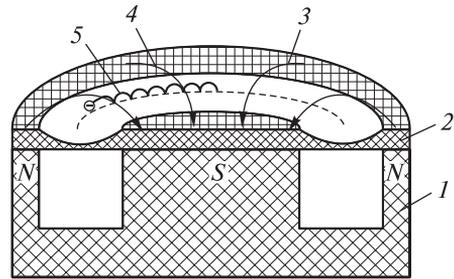


Рис. 2.10. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью:

1 — магнитная система; 2 — катод-мишень; 3 — силовая линия магнитного поля; 4 — зона наибольшей эрозии поверхности катода; 5 — траектория движения электрона

поверхности мишени и значительный рост скорости распыления, а следовательно, и скорости осаждения пленки.

Следует отметить, что плазма разряда существует только в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля.

Одним из достоинств магнетронных распылительных систем является то обстоятельство, что захват вторичных электронов магнитной ловушкой у поверхности мишени препятствует интенсивному перегреву подложки. Это позволяет увеличить скорость распыления материалов, а следовательно, и скорость их осаждения.

Скорость распыления

$$v_p = \frac{j_i S_p M_m \cdot 10^9}{q_e N_A \rho} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right], \quad (2.6)$$

где j_i — плотность ионного тока, А/м²; S_p — коэффициент распыления (КР), атом/ион; q_e — заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Коэффициент распыления S_p зависит от многих факторов, основным из которых является энергия бомбардирующих ионов E_n и угол α падения ионов на поверхность распыляемого материала. С увеличением угла α от 0° (отсчет ведется от нормали к поверхности) до 60...70° наблюдается увеличение S_p .

Для большинства используемых материалов зависимость S_p от α в этой области можно оценить по формуле

$$S_p(\alpha) = \frac{S_p(0)}{\cos \alpha}, \quad (2.7)$$

где $S_p(0)$ — коэффициент распыления при нормальном падении ионов.

Скорость осаждения пленки v_o на подложке зависит от энергетических характеристик источника и его площади распыления S_p , угла распыления φ , угла конденсации θ , расстояния между подложкой и мишенью r , коэффициента прилипания молекул осаждаемого материала к подложке α_m :

$$v_o = \frac{v_p S_p \cos \varphi \cos(\theta) \alpha_m}{\pi r^2} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right]. \quad (2.8)$$

При установившемся процессе осаждения, когда на поверхности подложек образовалась пленка из нескольких атомных слоев, коэффициент прилипания α_m можно считать равным единице.

Контрольные вопросы

1. При каком методе осаждения тонких пленок длина свободного пробега молекул больше?

- а) при термическом испарении;
- б) магнетронном распылении;
- в) одна и та же для обоих методов.

2. Для какого метода осаждения тонких пленок необходимо подавать в камеру рабочий газ?

- а) для магнетронного распыления;
- б) термического испарения;
- в) осаждения взрывом.

3. При каком методе осаждения тонких пленок энергия частиц выше?

- а) при магнетронном распылении;
- б) термическом испарении;
- в) одна и та же для обоих методов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК

Цель лабораторной работы: изучение способов контроля и измерения геометрических (толщина) и физических (адгезия) характеристик тонкопленочных покрытий, сформированных различными методами.

Задание по лабораторной работе

1. Изучить на практике общую конструкцию интерференционного микроскопа МИИ-4М с фотоэлектрическим микрометром и адгезиметра Elcometer.

2. Изучить базовые принципы работы с автоматизированной программой вычисления микроинтерферометра МИИ-4М в режиме измерения толщины тонкопленочного покрытия.

3. На полученных в лабораторной работе № 3 образцах провести измерения толщины и адгезии тонкопленочного покрытия.

4. Выполнить анализ полученных значений адгезии и толщины, сравнение с расчетными значениями, полученными в лабораторной работе № 3.

5. Сформулировать краткие выводы по лабораторной работе, оформить отчет и представить его к защите.

Теоретическая часть

Изучение принципов работы интерференционного микроскопа МИИ-4М

Интерференционный метод позволяет оценить толщину прозрачных и непрозрачных пленок, нанесенных на подложку в диапазоне 100...1000 нм. Интерференционный метод реализуется с помощью микроскопа МИИ-4М (рис. 2.11). Действие прибора основано на многолучевой интерференции света, получаемой разделением пучка лучей, исходящего из одной точки источника света, на два пучка (рис. 2.12). В точках поля, где разность хода кратна половине длины волны, в результате сложения двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы в виде темных линий. Пучок интерферируемого света, попадая на прозрачный слой, приводит к появлению двух групп полос, а попадая на ступеньку из непрозрачного слоя — вызывает искривление системы полос (рис. 2.13).

Толщина прозрачного тонкопленочного покрытия

$$D = k \frac{A}{B} \frac{1}{n}, \quad (2.9)$$

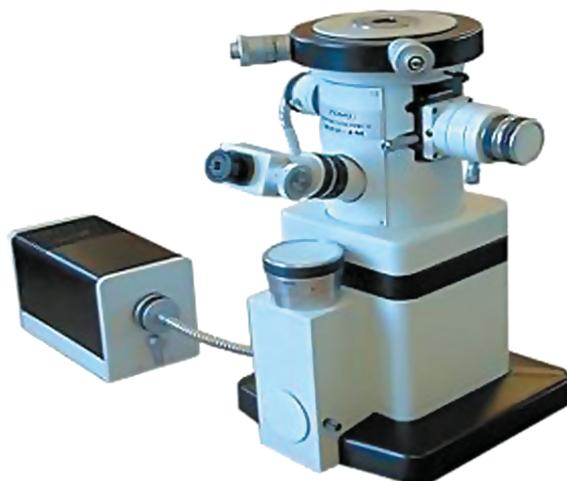


Рис. 2.11. Общий вид интерференционного микроскопа МИИ-4М

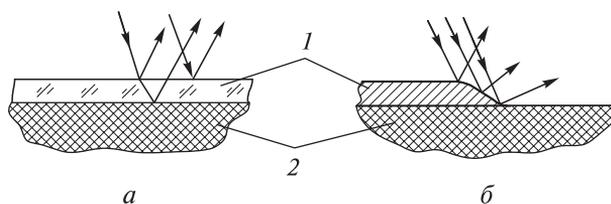


Рис. 2.12. Схема измерения толщины пленок:
a — прозрачных; *б* — непрозрачных; 1 — пленка;
 2 — подложка

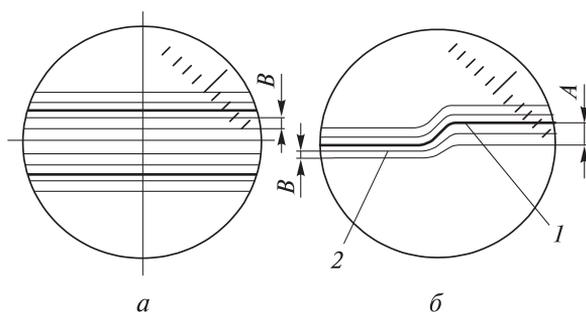


Рис. 2.13. Поле зрения окуляра микроскопа МИИ-4 при измерении толщины пленок:
a — прозрачных; *б* — непрозрачных; 1 — пленка;
 2 — подложка

где k — коэффициент, зависящий от длины волны света; A — расстояние между двумя системами полос; B — расстояние между отдельными полосами; n — показатель преломления пленки.

Толщина непрозрачного тонкопленочного покрытия

$$D = k \frac{A}{B}, \quad (2.10)$$

где A — значение искривления системы полос.

Коэффициент $k = 0,27$ для белого света, $0,295$ — для желтого, $0,265$ — для зеленого.

Методы измерения адгезии

Наиболее распространенные способы контроля адгезии: метод отрыва и метод скрайбирования. Метод отрыва выявляет количественное значение адгезии в МПа, а скрайбирование дает качественную оценку адгезионной прочности.

При исследовании покрытия методом отрыва на образец с пленкой наклеивают специальные элементы — грибочки, которые впоследствии отрывают адгезиметром (рис. 2.14, *а*), в результате чего регистрируют приложенную для отрыва силу.

Метод скрайбирования заключается в нанесении на поверхность пленки серии поперечных насечек движущейся иглой, на которую действует вертикальная нагрузка (рис. 2.14, *б*). Далее на зону с насечками плотно приклеивают клейкую ленту и быстро удаляют. Оставшиеся после отклеивания ленты сегменты пленки показывают качественную картину проведенного

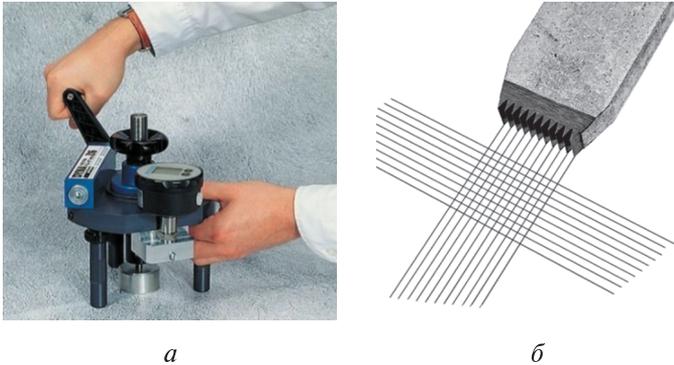


Рис. 2.14. Приспособления для оценки адгезионной прочности покрытий методами отрыва (*а*) и скрайбирования (*б*)

контроля, которую оценивают по классификации ISO. Поскольку метод скрайбирования качественный, для оценки адгезии необходимо провести серию экспериментов, чтобы оценить, в каком случае адгезия выше.

Измерение адгезии

Адгезия измеряется качественным методом скрайбирования адгезиометром Elcometer 107 (рис. 2.15).

Измерение проводится в следующем порядке.

1. При измерении следует поместить режущую кромку адгезиометра перпендикулярно на образец, аккуратно надавить и потянуть инструмент к себе одним плавным движением, чтобы сделать серию параллельных насечек длиной примерно 20 мм (рис. 2.16). Необходимо приложить достаточное усилие, чтобы прорезать покрытие до подложки.



Рис. 2.15. Адгезиометр Elcometer 107

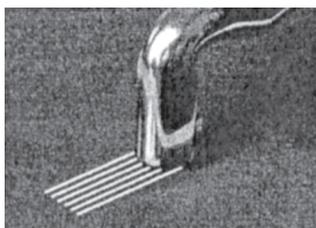


Рис. 2.16. Параллельные насечки

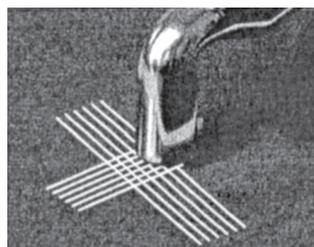


Рис. 2.17. Решетчатый узор на образце

2. Затем поместить режущий инструмент на образец под углом 90° к первому разрезу и создать решетчатый узор на покрытии (рис. 2.17).

3. Далее очистить поверхность щеткой и удалить мусор, проверить, чтобы насечки были нанесены насквозь до подложки (рис. 2.18).

4. Выбрать подходящую клейкую ленту, отрезать кусок длиной примерно 75 мм.

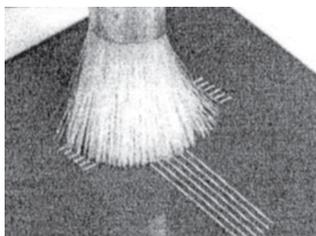


Рис. 2.18. Очистка поверхности образца

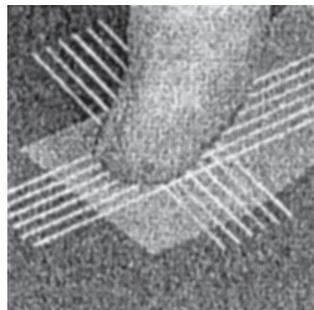


Рис. 2.19. Наклеивание ленты на образец и ее разглаживание

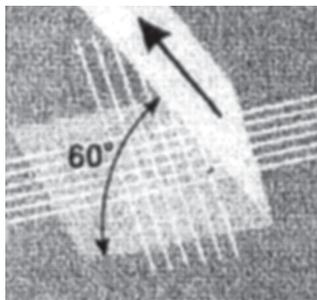


Рис. 2.20. Отклеивание ленты

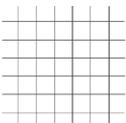
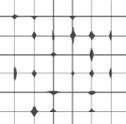
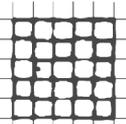
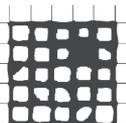
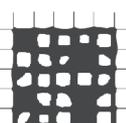
Отцентрировать отрезанный кусок ленты над решеткой и разгладить на месте пальцем (рис. 2.19).

5. Удалить ленту, плавно потянув под углом 60° (рис. 2.20).

6. Оценить адгезию покрытия, сравнив решетку разрезов с классификацией адгезии ISO (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Классификация адгезии ISO

Поверхность	Описание	ISO
	Покрытие полностью осталось на подложке	0
	Не более 5 % покрытия удалено	1
	5–15 % покрытия удалено	2
	15–35 % покрытия удалено	3
	35–65 % покрытия удалено	4
—	Более 65 % покрытия удалено	5

Контрольные вопросы

1. В каком диапазоне толщин тонких пленок возможны измерения интерференционным микроскопом?

- а) 100...1000 нм;
- б) 10...100 нм;
- в) 10...1000 нм.

2. Какой характеристикой является адгезия?

- а) энергетической;
- б) геометрической;
- в) математической.

3. Какой метод дает численное (количественное) значение показателя адгезии?

- а) метод отрыва;
- б) метод скрайбирования;
- в) оба метода.

2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

2.2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

Одним из эффектов, возникающих при взаимодействии ускоренных ионов с веществом и наиболее часто используемым в ионных и плазменных технологиях, является ионное распыление материалов. В зависимости от материала, формы, энергии и удельной мощности ионного пучка при взаимодействии его с веществом происходят процессы направленного изменения геометрических размеров и свойств твердого тела, а также их контроля. Ионный пучок может быть сформирован как из положительных, так и отрицательных ионов, однако наиболее часто используют ионы, несущие положительный заряд, вследствие большей простоты их получения и управления параметрами пучка. В качестве материала ионного пучка могут быть использованы атомы практически всех элементов таблицы Менделеева, включая ионы молекул, что при возможности варьирования величиной заряда делает ионные пучки потенциально более гибким средством воздействия на обрабатываемый или исследуемый объект по сравнению с электронными пучками.

Теоретические основы расчета

Ударяющиеся о поверхность образца ионы связываются с ней за счет адсорбции или хемосорбции, что может быть использовано для получения тонкопленочных слоев. Вероятность того, что ударившийся о поверхность ион останется на ней, рассчитывается с помощью коэффициента аккомодации:

$$\alpha = \frac{E_i - E'_d}{E_i - E''_d} \leq 1, \quad (2.11)$$

где E_i — кинетическая энергия иона; E'_d — энергия десорбированного атома до наступления термодинамического равновесия с подложкой; E''_d — энергия десорбированного атома после установления термодинамического равновесия с подложкой.

Ионное распыление материала происходит при взаимодействии (бомбардировке) ускоренных до энергии 0,5...5 кэВ ионов с веществом, находящимся в твердом или жидком состоянии. Сущность метода (рис. 2.21) заключается в механическом выбивании атомов или молекул материала мишени путем передачи им кинетической энергии ускоренных ионов инертного газа.

Если бомбардирующие поверхность образца ионы передают настолько большой импульс, что полностью освобождают от связей один или несколько атомов, происходит физическое распыление. Это явление наиболее эффективно проявляется при энергии иона 0,5...5 кэВ, а показателем эффективности является КР:

$$S = \frac{N_a}{N_i}, \quad (2.12)$$

где N_a — число распыленных атомов; N_i — число падающих на поверхность мишени ионов. Коэффициент распыления можно рассчитать по формуле

$$S = \frac{N_A z q_e \Delta m}{M J_i t}, \quad (2.13)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; $z q_e$ — заряд иона (z — кратность ионизации), Кл; Δm , M — масса, кг, и молекулярная масса, кг/кмоль, распыляемого вещества; J_i — ионный ток, А; t — время, с.

Коэффициент распыления зависит от максимальной энергии E_{\max} передаваемой атому материала падающим на поверхность мишени ионом (с энергией E_i), коэффициента α , энергии межатомных связей распыляемого материала U_0 и рассчитывается по следующей формуле:

$$S(E) = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{E_{\max}}{U_0}. \quad (2.14)$$

Отношение масс распыленных атомов и падающих ионов M_2/M_1 влияет на коэффициент α , а $U_0 \approx 4H_{\text{субл}}$, где $H_{\text{субл}}$ — энергия сублимации распыляемого материала.

Соотношение между M_2/M_1 и α

M_2/M_1	0,01	1,0	10,0
α	0,17	0,23	5,0

Коэффициент распыления зависит также от угла падения иона:

$$S(\varphi) = \frac{S(0)}{\cos \varphi}, \quad (2.15)$$

где $S(0)$ — коэффициент распыления при падении иона перпендикулярно поверхности мишени, т. е. при $\varphi = 0$.

Увеличение коэффициента распыления при отклонении направления падения иона от перпендикуляра к поверхности объясняется гипотезой о парных упругих столкновениях (рис. 2.22). Согласно этой гипотезе, при столкновении

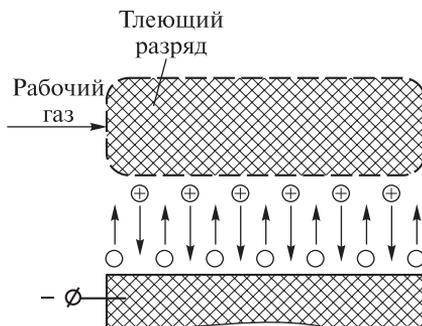


Рис. 2.21. Схема процесса ионно-плазменного распыления

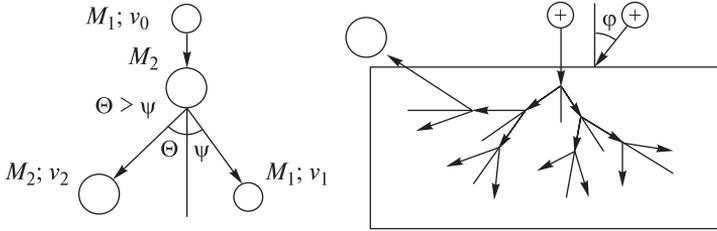


Рис. 2.22. Схемы парных соударений

ускоренного иона с молекулярной массой M_1 с атомом материала мишени с молекулярной массой M_2 угол отклонения иона Ψ меньше угла отклонения атома Θ .

Явление ионного распыления широко используется для строго дозированного удаления вещества с определенных участков обрабатываемого изделия (ионное фрезерование), нанесения тонких пленок в вакууме из большой номенклатуры материалов, анализа распыленных частиц по массам.

Скорость ионного распыления рассчитывается по следующим формулам ($z = 1$):

$$v_p = S \frac{j_i M}{q_e N_A} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right], \quad (2.16)$$

или

$$v_p = S \frac{j_i M 10^9}{q_e N_A \rho} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right], \quad (2.17)$$

где j_i — плотность ионного тока, А/м^2 ; ρ — плотность распыляемого материала, кг/м^3 .

Погрешность травления, т. е. отклонение получаемых размеров от размеров маски, зависит от показателей изотропности травления. Строгая направленность обработки ускоренными частицами (заряженными ионами, нейтральными атомами или молекулами) способствует уменьшению погрешности размеров благодаря преимущественному травлению перпендикулярно поверхности, т. е. в глубь материала (рис. 2.23, а). Травление электрически нейтральными частицами (молекулами, атомами и радикалами), не имеющими преимущественного направления движения, вызывает появление погрешности размеров обработки за счет изотропного травления как перпендикулярно поверхности, т. е. в глубь материала, так и параллельно ей, т. е. под маску (рис. 2.23, б).

При ионном травлении погрешность размеров обработки может появиться при неправильно выбранной толщине маски. Если толщина маски намного больше толщины вытравливаемого слоя, распыляемые атомы осаждаются на боковые стенки маски и изменяют ее размеры (длину, ширину или диаметр окна). При этом соответствующие размеры обрабатываемого слоя уменьшаются. Если толщина маски меньше или равна толщине обрабатываемого слоя, материал маски может стравиться быстрее, чем материал слоя, и его размеры могут стать больше требуемых.

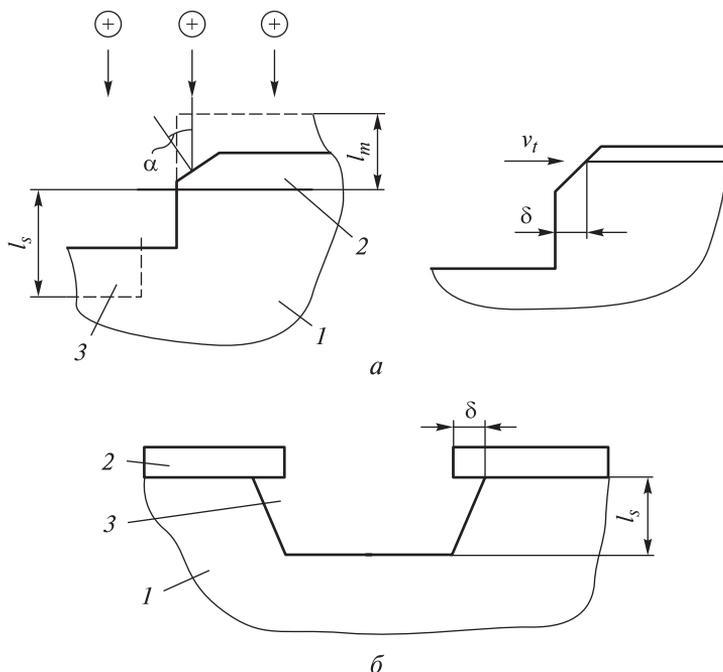


Рис. 2.23. Схема формирования погрешности ионного (а) и ионно-химического (б) травления:

1 — изделие; 2 — маска; 3 — обрабатываемый слой

Оптимальную толщину маски при ионном травлении рассчитывают по следующей методике.

1. Максимальное время травления маски t_1 толщиной l_m без погрешности δ

$$t_1 = \frac{l_m \cos \alpha}{v_m(\alpha)}, \quad (2.18)$$

где $v_m(\alpha) = \frac{v_m(0)}{\cos \alpha}$ — скорость травления маски под углом α , возникающим в результате более интенсивного распыления скругленных кромок маски (см. рис. 2.23, а); $v_m(0)$ — скорость травления маски при $\alpha = 0$.

2. Время травления слоя t на заданную глубину l_s

$$t = \frac{l_s}{v_s(0)}, \quad (2.19)$$

где $v_s(0)$ — скорость травления слоя при $\alpha = 0$.

3. Скорость бокового травления маски

$$v_t = \frac{v_m(\alpha)}{\sin \alpha}. \quad (2.20)$$

4. Погрешность травления

$$\delta = v_t(t - t_1) = \frac{l_s v_m(0)}{(\sin \alpha \cos \alpha) v_s(0)} - \frac{l_m}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.21)$$

5. Оптимальная толщина маски при $\delta = 0$

$$l_m^{\text{опт}} = \frac{l_s v_m(0)}{(\cos^2 \alpha) v_s(0)}. \quad (2.22)$$

К материалам маски при ионном травлении предъявляют следующие требования: высокая разрешающая способность; термостойкость; минимальная скорость травления по отношению к скорости травления слоя. Применяют маски из фольги (трафареты) с минимальным размером рисунка 30...50 мкм и тонкопленочные (контактные) маски с минимальным размером рисунка 100...500 нм.

Для изготовления тонкопленочных масок используют следующие материалы:

- органические материалы — фото-, электроно-, ионо- и рентгенорезисты, которые могут работать при температуре не выше 423...473 К, что определяет критическую плотность мощности ионного тока на мишени: 0,05 Вт/см² — без охлаждения мишени; 0,5 Вт/см² — с водяным охлаждением без плотного прижатия к мишени; 1 Вт/см² — с водяным охлаждением по всей площади поверхности мишени;

- металлы — Ti, Cr, Mn, V, Mo, Ta и Al, выдерживающие температуру нагрева 620...670 К, скорость травления которых резко уменьшается при напуске кислорода (через такие маски обрабатывают материалы с коэффициентом распыления мало зависящим от парциального давления кислорода: SiO₂, Si₃N₄, Cu, Ag, Au, Pt, GaAs и др.);

- графит, имеющий самый низкий коэффициент распыления в чистом аргоне и выдерживающий большую плотность мощности ионного тока на мишени.

2.2.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Варианты заданий

Для выполнения домашнего задания необходимо решить следующие два задания, пользуясь табл. 2.2.

Задание 1

А. Рассчитать скорость распыления (кг·м⁻²·с⁻¹) мишени из материала (указывается материал) ионами аргона с энергией (указывается в номере варианта) кэВ и плотностью тока (указывается в номере варианта) А/м².

Б. Определить плотность ионного тока $j_{\text{и}}$ (А/м²), необходимую для обеспечения скорости распыления мишени из (указывается материал), равную $v_p =$ (указывается в номере варианта) (нм/с), при энергии ионов аргона

(указывается в номере варианта), Дж. Как изменится $j_{и}$ при распылении мишени из (указывается материал) ионами ксенона?

Задание 2

Рассчитать погрешность δ ионного травления кремниевой микросхемы через маску из фоторезиста в установке диодного типа. Определить, при какой толщине маски погрешность δ будет равна нулю.

В задании 1А для каждого варианта выдают следующие данные:

- распыляемый материал;
- энергию ионов аргона $E_{и}$, кэВ;
- плотность тока $j_{и}$, А/см².

В задании 1Б для каждого варианта выдают следующие данные:

- распыляемый материал;
- скорость распыления материала v_p , нм/с;
- энергию ионов аргона и ксенона $E_{и}$, кэВ.

В задании 2 для каждого варианта выдают следующие данные:

- толщину вытравливаемого слоя кремния l_s , нм;
- скорость травления кремния v_s , нм/с;
- толщину маскирующего слоя фоторезиста l_m , нм;
- скорость травления фоторезиста v_m , нм/с;
- максимальный угол кромки α .

Таблица 2.2

Типовые значения параметров

№ п/п	Материал	Задание 1			Задание 2				
		$E_{и}$, кэВ	$j_{и}$, А/см ²	v_p , нм/с	l_s , нм	v_s , нм/с	l_m , нм	v_m , нм/с	α , град
1	Алюминий	0,5	0,1	1	10	0,2	10	0,1	20
2	Медь	1	0,5	10	50	0,3	50	0,2	25
3	Вольфрам	1,5	1	40	100	0,4	100	0,3	30
4	Хром	2	2	70	200	0,5	200	0,4	35
5	Титан	2,5	3	100	300	0,6	300	0,5	40
6	Золото	3	4	200	400	0,7	400	0,6	45
7	Никель	3,5	5	400	500	0,8	500	0,7	50
8	Молибден	4	6	600	600	0,9	600	0,8	55
9	Серебро	4,5	8	800	800	1,0	800	0,9	60
10	Молибден	5	10	1000	1000	1,1	1000	1,0	65

2.2.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Задание оформляется на листах формата А4 с титульным листом, на котором указывают фамилию студента, группу, название домашнего задания, номер варианта, сроки выдачи домашнего задания и его сдачи. Обязательным является перечень исходных данных задания с указанием размерностей, а также наличие формул, по которым ведется расчет (в символьном и цифровом виде с указанием размерностей). В заключение необходимо дать анализ полученных результатов.

3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

3.1. 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 «Машиностроительные технологии»
Кафедра МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

для направления подготовки (уровень бакалавриата)
12.03.01 «Приборостроение»

Авторы программы:

Михайлов В.П., профессор

Моисеев К.М., доцент

Панфилов Ю.В., профессор

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 с основной профессиональной образовательной программой (ОПОП) и учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана, составленными на основе самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта (СУОС) по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение». При освоении дисциплины планируется формирование компетенций, предусмотренных ОПОП на основе СУОС 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, предусмотренных основной профессиональной образовательной программой.

Цели и задачи дисциплины

Цель дисциплины: получение теоретических знаний и практических навыков расчета параметров высоковакуумных технологических процессов и оборудования, используемых в приборостроении.

Задачами дисциплины являются:

- изучение физических основ протекания высоковакуумных технологических процессов;
- изучение теоретических основ и методов расчета параметров высоковакуумных технологических процессов для конкретных применений;
- изучение типа и состава высоковакуумного технологического оборудования для высоковакуумных технологических процессов.

Изучение данной дисциплины базируется на следующих курсах (разделах курсов):

- «Физика»;
- «Математический анализ».

После освоения данной дисциплины студент подготовлен для изучения следующих курсов учебного плана:

- «Научно-исследовательская работа»;
- «Подготовка и защита ВКРБ»,

а также для выполнения курсовых проектов.

Знания, умения и навыки, получаемые после освоения дисциплины

Студент должен знать:

- назначение и классификацию основных высоковакуумных технологических процессов;
- физические основы высоковакуумных технологических процессов;
- назначение и составные части высоковакуумного технологического оборудования.

Студент должен уметь:

- проводить анализ требований к вакуумным технологическим процессам для их использования в приборостроении;
- рассчитывать параметры и режимы высоковакуумных технологических процессов.

Студент должен иметь навыки:

- расчета параметров и режимов высоковакуумных технологических процессов;
- подбора высоковакуумного технологического оборудования для заданных процессов.

Ниже приведены объем изучаемой дисциплины по семестрам (табл. 3.1), содержание дисциплины (табл. 3.2), часы, отведенные на изучение дисциплины по модулям (табл. 3.3), на лабораторные работы (табл. 3.4), на самостоятельную работу (табл. 3.5) и на курсовую работу и курсовой проект (табл. 3.6).

Таблица 3.1

Объем дисциплины по видам учебных занятий

Вид учебной работы	Объем по семестрам, ч	
	Всего	1-й семестр
Объем дисциплины	85	85
1. Аудиторная работа:	51	51
– лекции (Л)	34	34
– лабораторные работы (ЛР)	17	17
2. Самостоятельная работа обучающихся (СР):	34	34
– проработка учебного материала лекций	8	8
– подготовка к лабораторным работам	8	8
– подготовка к рубежным контролям	9	9
– выполнение домашнего задания	9	9
Вид промежуточной аттестации обучающегося	Распределенный экзамен	

Таблица 3.2

Содержание дисциплины

№	Тема модуля	Л	ЛР	СР
<i>5-й семестр</i>				
1	Вакуумная технологическая среда	14	4	8
2	Физические основы высоковакуумных технологических процессов	14	4	17
3	Методы и оборудование для реализации высоковакуумных технологических процессов	6	9	9
ИТОГО		34	17	34

Таблица 3.3

Модуль, содержание, продолжительность изучения

№	Наименование, содержание	Часы
<i>1-й семестр</i>		
1	Вакуумная технологическая среда	
	<i>Лекции</i>	14
Л1.1	Назначение и место высоковакуумных технологических процессов в приборостроении. Определения. Обезгаживающий прогрев и отжиг. Нанесение пленок. Ионное травление. Электронная и ионная литография	2
Л1.2	Физическая сущность вакуума и его свойства. Давление газа. Тепловые скорости молекул. Объем газа, ударяющийся в единицу времени о единицу поверхности. Длина свободного пробега молекул	2
Л1.3	Термовакuumные процессы. Физические процессы в вакууме при различных температурах. Растворимость газов в твердом теле. Диффузия газов в твердом теле. Законы Фика	2
Л1.4	Создание вакуумной среды. Степени вакуума. Получение вакуума различных степеней. Характеристики вакуума. Режимы течения газа. Основное уравнение вакуумной техники. Расчет времени откачки	2
Л1.5	Низковакуумные средства откачки. Пластинчато-роторные насосы. Спиральные вакуумные насосы. Винтовые вакуумные насосы. Двухроторные вакуумные насосы	2
Л1.6	Высоковакуумные средства откачки. Паромасляные диффузионные насосы. Сорбционные насосы. Турбомолекулярные насосы. Криогенные насосы. Магниторазрядные насосы	2
Л1.7	Средства измерения вакуума и вспомогательные элементы вакуумных систем. Датчики измерения низкого вакуума. Датчики измерения высокого вакуума. Запорная арматура. Фитинги	2
	<i>Лабораторные работы</i>	4
ЛР1.1	Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	4
	<i>Самостоятельная работа</i>	8
СР1.1	Проработка учебного материала лекций	3
СР1.2	Подготовка к лабораторным работам, написание отчета	2
СР1.3	Подготовка к рубежному контролю	3
2	Физические основы высоковакуумных технологических процессов	
	<i>Лекции</i>	14
Л2.1	Формирование электронных потоков. Характеристики электронных пучков. Термоэлектронная эмиссия. Автоэлектронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия	2

Продолжение табл. 3.3

№	Наименование, содержание	Часы
Л2.2	Взаимодействие электронных потоков с материалами. Упругие и неупругие столкновения с атомами вещества. Модель Арчарда. Физические эффекты в объеме твердого тела	2
Л2.3	Формирование ионных потоков и их взаимодействие с материалами. Источники ионов. Эффекты взаимодействия ускоренных ионов с веществом. Глубина проникновения ионов в твердое тело. Коэффициент распыления и эффект парных соударений. Ионная имплантация	2
Л2.4	Формирование атомарных и молекулярных потоков. Термическое испарение. Ионное распыление. Формирование потоков из газовой фазы	2
Л2.5	Взаимодействие атомарных и молекулярных потоков с материалами. Адгезия. Теория зародышеобразования. Тонкие пленки	2
Л2.6	Тлеющий разряд в вакууме. Параметры газоразрядной плазмы. Кривые Пашена. Тлеющий разряд. Переход тлеющего разряда в дуговой. Использование тлеющего разряда	2
Л2.7	Дуговой разряд в вакууме. Параметры дугового разряда. Характеристики вакуумной дуги. Катодные пятна. Использование дугового разряда	2
<i>Лабораторные работы</i>		4
ЛР2.1	Тлеющий разряд в вакууме	4
<i>Самостоятельная работа</i>		17
СР2.1	Проработка учебного материала лекций	3
СР2.2	Подготовка к лабораторным работам, написание отчета	2
СР2.3	Выполнение домашнего задания	9
СР2.4	Подготовка к рубежному контролю	3
3	Методы и оборудование для реализации высоковакуумных технологических процессов	
<i>Лекции</i>		6
Л3.1	Методы нанесения тонких пленок. Классификация. Термическое испарение. Ионное распыление. Дуговое испарение. Реактивное осаждение	2
Л3.2	Геометрические характеристики и физические свойства тонких пленок. Толщина и удельное сопротивление. Неравномерность толщины пленки. Однородность и стехиометрический состав тонкой пленки	2
Л3.3	Вакуумное технологическое оборудование. Составные части, классификация. Технологические источники	2

Окончание табл. 3.3

№	Наименование, содержание	Часы
<i>Лабораторные работы</i>		9
ЛР3.1	Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления. Вариативно: исследование технологических процессов напыления тонких пленок методом магнетронного напыления	5
ЛР3.2	Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок	4
<i>Самостоятельная работа</i>		9
СР3.1	Проработка учебного материала лекций	2
СР3.2	Подготовка к лабораторным работам	4
СР3.3	Подготовка к рубежному контролю	3

Таблица 3.4

Лабораторные работы

№	Тема лабораторной работы	Объем, ч	Литература
<i>5-й семестр</i>			
ЛР1.1	Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	5	[2–5]
ЛР2.2	Тлеющий разряд в вакууме	4	[1, 8]
ЛР3.3	Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления (вариативно)	4	[6, 7]
ЛР3.4	Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок	4	[6, 7]

ЛР1.1. Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров. Изучаются форвакуумные и высоковакуумные средства создания вакуумной среды. Проводится процесс откачки вакуумной камеры, измеряется давление, проводится расчет скоростей откачки. Наблюдается процесс газонатекания со стенок вакуумной камеры, рассчитывается скорость потока газонатекания.

ЛР2.2. Тлеющий разряд в вакууме. Исследуется взаимодействие плазмы тлеющего разряда с подложкой. Изучается влияние параметров тлеющего разряда на состояние поверхности подложки до и после обработки.

ЛР3.3. Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления. Изучается технологическая реализация процессов формирования тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления. Измеряются параметры процессов, рассчитывается толщина получаемых пленок.

ЛР3.4. Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок. Изучаются методы и приборы для исследования геометрических (толщина) и физических (адгезия) характеристик тонких пленок. Проводится их измерение и сравнение с результатами, рассчитанными теоретически.

Таблица 3.5

Самостоятельная работа

№	Тема самостоятельной работы	Объем, ч	Литература
<i>5-й семестр</i>			
1	Самостоятельная проработка курса лекций	8	[1, 2, 6, 8]
2	Подготовка к лабораторным работам, написание отчета	8	[1, 2, 6, 8]
3	Подготовка к рубежным контролям	9	[1, 2, 6, 8]
4	Домашнее задание 1	9	[6, 7]

Самостоятельная проработка курса лекций

Самостоятельная проработка курса лекций проводится по литературе, приведенной в разд. 8.

Подготовка к лабораторным работам, написание отчета

Подготовка проводится по методическим указаниям, приведенным в п. 2.1 настоящего учебного пособия. Оформление отчета проводится по шаблону, приведенному в прил. П1–П4.

Подготовка к рубежным контролям

Подготовка к рубежным контролям проводится по конспекту лекций настоящего учебного пособия, а также по литературе, приведенной в разд. 8.

Домашнее задание

Расчет технологических параметров высоковакуумных процессов для создания объектов приборостроения по варианту задания.

Выдача — 10-я неделя, сдача — 12-я неделя.

Таблица 3.6

Курсовой проект, курсовая работа

№	Тема курсового проектирования, курсовой работы	Объем, ч	Литература
<i>5-й семестр</i>			

Литература

Михайлов В.П. Физические процессы в вакууме и полупроводниковых структурах и их использование в электронных приборах: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022.

Иванов В.И. Вакуумная техника: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2016. [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/91440> (дата обращения: 30.10.2022).

Вакуумная техника: справочник / под ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009.

Деулин Е.А., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Расчет вакуумных систем технологического оборудования: учеб.-метод. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022.

Базиненков А.М., Каменихин А.Т. Технические средства получения и измерения давления вакуумной технологической среды: учеб.-метод. пособие. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.

Панфилов Ю.В. Формирование функциональных слоев: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.

Хоффман Д., Сингх Б., Томас Дж., ред. Справочник по вакуумной технике и технологиям / пер. с англ. под ред. В.А. Романенко, С.Б. Нестерова. М.: Техносфера, 2011.

Физические основы микро- и нанотехнологий / Бычков С.П., Михайлов В.П., Панфилов Ю.В., Цветков Ю.Б. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.

Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. Разд. III. Т. III-8. Технологии оборудования и системы управления в электронном машиностроении. М.: Машиностроение, 2000.

Для демонстрации на лекциях используются следующие пособия

Рекомендуемые наглядные материалы и пособия: буклеты, плакаты, слайды, образцы технологических источников и изделий (приборов).

3.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой варианты экзаменационных билетов, перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий.

3.2.1. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ РЕЙТИНГОВЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

1. Перечислите основные группы высоковакуумных технологических процессов, используемых в приборостроении, и поясните роль вакуума в этих процессах.

2. Какие единицы измерения давления p газа применяются в вакуумных технологиях?

3. Чем определяется максимальная теоретическая быстрота действия вакуумных насосов?

4. Каким образом длина свободного пробега молекул зависит от температуры и давления газа?

5. Назовите критерии степеней вакуума.

6. Как зависит коэффициент S растворимости газа в твердом теле от температуры T ?

7. В каком состоянии — атомарном или молекулярном — растворяется газ в металлах и неметаллах?

8. Как зависит объемная концентрация C газа в твердом теле от температуры T и давления p ?

9. Как взаимосвязаны основные параметры вакуумной системы: быстрота S_0 откачки вакуумной камеры, быстрота S_n действия насоса и проводимость U вакуумного трубопровода?

10. Как зависит удельный поток q' газопроницаемости через тонкую стенку от температуры T и давления p газа?

11. Перечислите основные категории и назначение компонентов вакуумных систем.

12. Как зависит плотность j_e тока термоэлектронной эмиссии от температуры T и работы $e\varphi$ выхода (закон Ричардсона — Дэшмана)?

13. Как можно управлять скоростью испарения материалов в вакууме?

14. В чем состоит особенность испарения сплавов в вакууме (закон Рауля)?

15. Опишите физическую сущность ионного распыления материалов в вакууме.
16. Как можно управлять скоростью ионного распыления материалов в вакууме?
17. Дайте понятие коэффициента распыления материалов под действием ионной бомбардировки.
18. От каких факторов зависит глубина проникновения ускоренных электронов в твердое тело? Опишите модель Арчарда.
19. От каких факторов зависит глубина проникновения ускоренных ионов в твердое тело?
20. Опишите эффект парных соударений при ионном распылении материалов.
21. Чем полная глубина пробега иона в твердом теле отличается от проекционного пробега?
22. В чем суть эффекта каналирования при проникновении ускоренного иона в кристаллический материал?
23. По какому закону распределяются в твердом теле имплантированные атомы?
24. Из каких частиц состоит газоразрядная плазма? Каковы условия, необходимые для ее «зажигания»?
25. От чего зависит минимальное напряжение зажигания газового разряда (закон Пашена)?
26. Опишите дуговой разряд в вакууме: сущность, способ получения, основные характеристики.
27. Поясните процесс образования тонких пленок и перечислите технологические факторы, влияющие на их свойства.
28. От каких факторов зависит равномерность тонкопленочного покрытия? Опишите закон Кнудсена.
29. Как связаны между собой коэффициент загрязнения и коэффициент распыления?
30. Перечислите основные системы, входящие в состав вакуумного технологического оборудования.

3.2.2. ВАРИАНТЫ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ БИЛЕТОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Давление газа. Тепловые скорости молекул. Объем газа, ударяющийся в единицу времени о единицу поверхности.	
2. Низковакуумные средства откачки.	
3. Формирование электронных потоков.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Длина свободного пробега молекул. Степени вакуума.	
2. Высоковакуумные средства откачки.	
3. Формирование ионных потоков.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Получение вакуума. 2. Средства измерения низкого вакуума. 3. Формирование атомарных и молекулярных потоков.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Процессы при обезгаживающем прогреве. 2. Средства измерения высокого вакуума. 3. Взаимодействие электронных потоков с материалами.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Растворимость газов в твердом теле. 2. Оборудование для обезгаживающего прогрева. 3. Взаимодействие ионных потоков с материалами	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

1. Диффузия газов в твердом теле.
2. Оборудование для вакуумного осаждения тонкопленочных покрытий.
3. Взаимодействие атомарных и молекулярных потоков с материалами.

Утверждаю

Ю.В. Панфилов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

1. Законы Фика.
2. Оборудование для вакуумного травления.
3. Параметры газоразрядной плазмы.

Утверждаю

Ю.В. Панфилов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

1. Неравномерность толщины пленки. Закон Кнудсена.
2. Низковакуумные средства откачки.
3. Кривые Пашена.

Утверждаю

Ю.В. Панфилов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Давление газа. Тепловые скорости молекул. Объем газа, ударяющийся в единицу времени о единицу поверхности.	
2. Высоковакуумные средства откачки.	
3. Использование газоразрядной плазмы.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10	
По курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»	
1. Длина свободного пробега молекул. Степени вакуума.	
2. Средства измерения низкого вакуума.	
3. Тлеющий разряд. Дуговой разряд.	
Утверждаю	Ю.В. Панфилов
Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ г.	

3.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ниже приведен типовой пример оформления дидактического материала по дисциплине «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении». На первой лекции необходимо ознакомить студентов с целью и задачами курса, а также привести сведения по структуре курса. Рекомендуемая структура для оформления схемы слайда приведена на рис. 3.1.

Лекция № 1

Название лекции

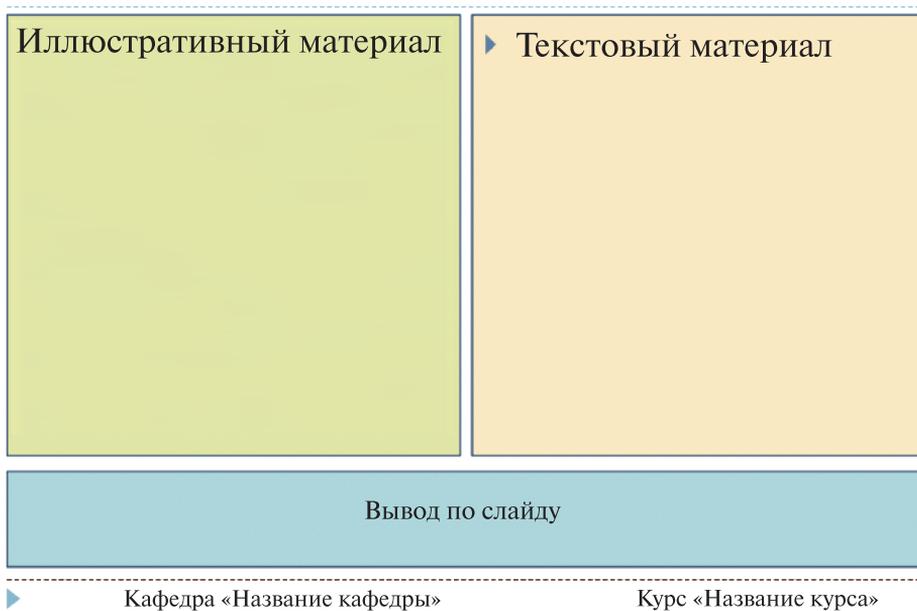


Рис. 3.1. Концептуальная схема слайда к лекции

В типовую структуру слайда рекомендуется включать название лекции, название кафедры, университета. Спецификация слайдов к лекциям приведена в табл. 3.1, примеры — на рис. 3.2–3.5. С мультимедийными материалами к лекции можно ознакомиться на портале e-learning.bmstu.ru

Таблица 3.1

Спецификация слайдов к лекциям

№ п/п	Название раздела	Количество, шт.
1	Назначение и место высоковакуумных технологических процессов в приборостроении	14
2	Физическая сущность вакуума и его свойства	16
3	Термовакuumные процессы	12
4	Создание вакуумной среды	15
5	Низковакуумные средства откачки	16
6	Высоковакуумные средства откачки	18
7	Средства измерения вакуума и вспомогательные элементы вакуумных систем	17
8	Формирование электронных потоков	16
9	Взаимодействие электронных потоков с материалами	18
10	Формирование ионных потоков и их взаимодействие с материалами	18
11	Формирование атомарных и молекулярных потоков	16
12	Взаимодействие атомарных и молекулярных потоков с материалами	17
13	Глеющий разряд в вакууме	16
14	Дуговой разряд в вакууме	15
15	Методы нанесения тонких пленок	19
16	Геометрические характеристики и физические свойства тонких пленок	18
17	Вакуумное технологическое оборудование	16



Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении

Михайлов В.П., Моисеев К.М., Панфилов Ю.В.

Кафедра МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении»

Рис. 3.2. Пример начального слайда к курсу

Лекция № 13

Тлеющий разряд в вакууме



- ▶ Цель лекции:
 - ▶ Изучение газоразрядной плазмы в вакууме, ее назначения, параметров и способов ее возбуждения

- ▶ План лекции:
 - ▶ Классификация разрядных процессов
 - ▶ Применение газоразрядной плазмы
 - ▶ Параметры газоразрядной плазмы
 - ▶ Способы возбуждения тлеющего разряда

Рис. 3.3. Пример начального слайда к лекции

Лекция № 13

Тлеющий разряд в вакууме



► Классификация разрядных процессов

Частотный диапазон приложенного поля	Состояние ионизованного газа		
	<i>Пробой</i>	<i>Неравновесная плазма</i>	<i>Равновесная плазма</i>
Постоянное или низкочастотное электрическое поле	Зажигание тлеющего разряда в трубке	Положительный столб тлеющего разряда	Положительный столб дуги высокого давления
Высокие частоты	Зажигание ВЧ-разряда в средах с разреженным газом	ВЧ-емкостные разряды в разреженных газах	Индукционная плазменная горелка
СВЧ-диапазон	Пробой в волноводах и резонаторах	СВЧ-разряды в разреженных газах	СВЧ-плазмотрон
Оптический диапазон	Пробой газов лазерным излучением	Завершающая стадия оптического пробоя	Непрерывный оптический разряд

► Кафедра МТ-11 Курс «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

Рис. 3.4. Пример информационного слайда к лекции

Лекция № 13

Тлеющий разряд в вакууме



▶ Параметры газоразрядной плазмы

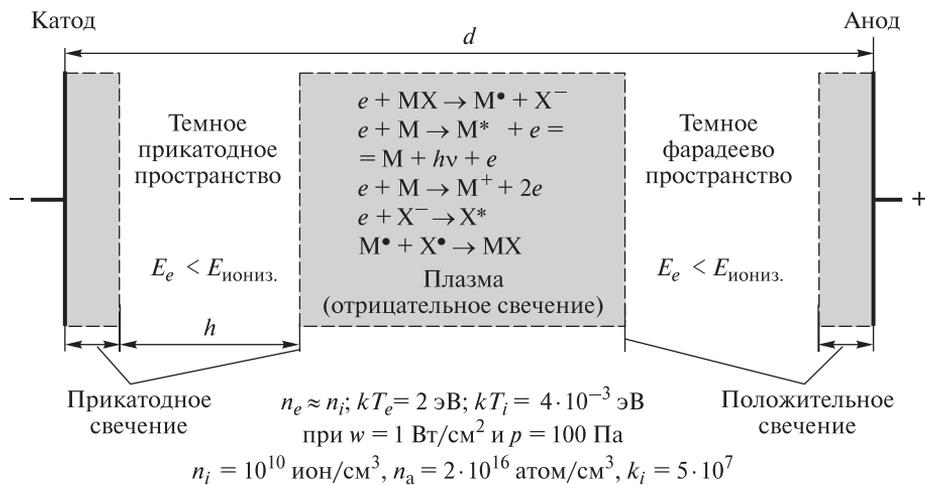


Рис. 3.5. Пример информационного слайда к лекции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе единой концепции созданы методические материалы по дисциплине «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении». Методические материалы содержат нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций и лабораторных работ, перечень слайдов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава по данной дисциплине.

Цель дисциплины — формирование в процессе освоения дисциплины компетенций, предусмотренных ОПОП на основе СУОС по направлению подготовки, выполнение домашнего задания, в виде проекта, и приобретение студентом базовых знаний в области высоковакуумных технологических процессов, используемых при производстве изделий приборостроения, а также оборудования для их реализации.

Задачи дисциплины — получение теоретических и практических навыков расчета и выбора параметров высоковакуумных технологических процессов и оборудования для их реализации.

Методологически дисциплину необходимо строить на основе оптимального соотношения теоретических и прикладных вопросов с обязательным участием студентов в самостоятельном исследовании особенностей проведения высоковакуумных процессов.

Теоретические материалы следует излагать в такой мере, чтобы показать общие принципы основных высоковакуумных технологических процессов, их особенности, достоинства и недостатки. Содержание соответствующих тем разделов должно быть направлено на усиление роли фундаментальных знаний в теоретической и профессиональной подготовке студента, способствовать формированию у студента фундаментальных системных знаний, развивать творческие способности будущего специалиста.

Прикладные вопросы должны ориентировать студентов на решение задач анализа и выбора требуемых высоковакуумных процессов при производстве объектов приборостроения, выбор необходимого технологического оборудования, обладающего максимальной эффективностью. Поэтому во всех разделах предусмотрены темы, содержание которых связано с формированием и развитием у будущих специалистов практических навыков решения прикладных задач.

Дисциплина «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении» входит в физико-технологический цикл дисциплин специальности и охватывает основные физические и технологические основы формирования элементной базы объектов приборостроения. Кроме того, высоковакуумные процессы являются основной технологической базой для нанотехнологий,

в которой в качестве обрабатывающего и измерительного инструмента используются электронный и ионный лучи, газоразрядная плазма, атомарные и молекулярные пучки, а также электромагнитное излучение разной длины волны — от рентгеновского до инфракрасного.

Дисциплина базируется на физико-математическом и общепрофессиональном циклах дисциплин образовательного стандарта и полностью ему соответствует. Такие разделы физики, как электричество и магнетизм, теплота и механика, атомная и ядерная физика, лежат в основе изучения принципов работы оборудования и процессов электронно-лучевой обработки, термического испарения и ионного распыления материалов, а также других процессов, изучаемых в данной дисциплине.

Дисциплина включает в себя домашнее задание, при выполнении которого студенты проводят технологический анализ изделия, выбирают наиболее рациональный метод элионной обработки, рассчитывают технологические режимы и параметры оборудования.

Лабораторные работы, включенные в состав дисциплины «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении», спланированы таким образом, чтобы студенты могли осознать, закрепить и расширить знания, полученные на предшествующих лекциях, а также самостоятельно выполнить некоторые операции по осуществлению и измерению объектов микро- и нанотехнологий широко распространенными методами.

Лабораторные работы ориентируют студентов на более глубокое осознание сущности процессов, лежащих в основе микро- и нанотехнологий, на решение типовых задач исследования и анализа объектов приборостроения, возникающих при производстве элементной базы электронной аппаратуры, выбор соответствующих поставленной задаче методов и методик проведения измерений, обладающих максимальной эффективностью. Темы лабораторных работ и их содержание связаны с формированием и развитием у будущих специалистов практических навыков реализации высоковакуумных технологических процессов, анализа результатов измерений и формулирования выводов по наиболее эффективному применению высоковакуумных технологических процессов в приборостроении.

Лекции по данной дисциплине читаются в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Данный УМК разработан кафедрой МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» 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».

ЛИТЕРАТУРА

Михайлов В.П. Физические процессы в вакууме и полупроводниковых структурах и их использование в электронных приборах: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022.

Иванов В.И. Вакуумная техника: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2016. [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/91440> (дата обращения: 30.10.2022).

Вакуумная техника: справочник / под ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009.

Деулин Е.А., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Расчет вакуумных систем технологического оборудования: учеб.-метод. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022.

Базиненков А.М., Каменихин А.Т. Технические средства получения и измерения давления вакуумной технологической среды: учеб.-метод. пособие. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.

Панфилов Ю.В. Формирование функциональных слоев: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.

Хоффман Д., Сингх Б., Томас Дж., ред. Справочник по вакуумной технике и технологиям / пер. с англ. под ред. В.А. Романенко, С.Б. Нестерова. М.: Техносфера, 2011.

Физические основы микро- и нанотехнологий / Бычков С.П., Михайлов В.П., Панфилов Ю.В., Цветков Ю.Б. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.

Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. Разд. III. Т. III-8. Технологии оборудования и системы управления в электронном машиностроении. М.: Машиностроение, 2000.

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Кафедра МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении»
Учебно-методическое обеспечение для подготовки бакалавров
по направлению «Приборостроение»

ЖУРНАЛ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

по курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»

Для студентов приборостроительных специальностей

20____ / ____ учебный год

Студент _____ (ФИО) Группа _____

Преподаватель _____ Допуск к экзамену (зачету) _____

Подпись _____ (ФИО) _____ (число)

Москва _____

П1. ЛР № 1. ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СРЕДЫ И ИЗМЕРЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Цель работы: изучение основных методов и средств получения и измерения вакуумной технологической среды для реализации высоковакуумных технологических процессов.

Решаемые задачи

1. Изучить конструкцию и принцип работы вакуумной системы лабораторной установки вакуумного осаждения покрытий.

2. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере СИ (см. рис. 2.1) от времени t при откачке спиральным вакуумным насосом и измерении давления термодатчиком преобразователем (датчиком низкого вакуума). Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление форвакуумной системы p' .

3. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере СИ (см. рис. 2.1) от времени t при откачке турбомолекулярным вакуумным насосом и измерении давления ионизационным преобразователем (датчиком высокого вакуума). Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление высоковакуумной системы p' .

4. Экспериментально исследовать зависимость давления p от времени t при закрытом затворе. Построить кривую потока газонатекания, определить его значение.

5. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

Методические указания

Прежде чем приступить к работе со средствами измерения и получения вакуума, а также с высоковакуумным стендом, следует изучить их описание.

Техника безопасности

Высоковакуумный стенд управляется напряжением 380 В. Эксплуатацию экспериментального стенда следует проводить в соответствии с ПТЭ электроустановок потребителей и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей для электроустановок напряжением до 380 В.

Краткий конспект теоретической части

Изучение теоретической части проводится по методическим указаниям к лабораторным работам по курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении».

Подготовка к проведению лабораторной работы (выполняется преподавателем или инженером)

Подготовка высоковакуумного стенда.

Проведение лабораторной работы

1. Изучить на практике конструкции спирального и турбомолекулярного насосов.

2. Изучить принцип работы широкодиапазонного датчика WRG-S.

3. Изучить принцип работы вакуумного стенда.

4. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере *CVI* (см. рис. 2.1) от времени t при откачке спиральным вакуумным насосом Edwards XDS35i и измерении давления широкодиапазонным датчиком WRG-S. Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление форвакуумной системы p' .

5. Провести экспериментальные исследования зависимости давления p в вакуумной камере *CVI* (см. рис. 2.1) от времени t при откачке турбомолекулярным вакуумным насосом Edwards nEXT400D и измерении давления широкодиапазонным датчиком WRG-S. Построить график зависимости $p(t)$, определить предельное давление высоковакуумной системы p' .

6. Экспериментально исследовать зависимость давления p от времени t при закрытом затворе. Построить кривую потока газонатекания, определить его значение.

7. Проанализировать результаты работы, сформулировать краткие выводы по работе, оформить отчет и представить его к защите.

5. Контрольные вопросы

1. Какой насос используется для предварительной откачки камеры?

- а) спиральный;
- б) турбомолекулярный;
- в) криосорбционный.

2. Какой насос используется для высоковакуумной откачки камеры?

- а) турбомолекулярный;
- б) спиральный;
- в) диафрагменный.

3. За счет чего широкодиапазонный датчик вакуума измеряет давление от атмосферного до сверхвысокого вакуума?

- а) за счет объединения в едином корпусе датчиков двух типов;
- б) вследствие уникального типа чувствительного элемента датчика;
- в) за счет наличия обратной связи по давлению.

П2. ЛР № 2. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ

Цель работы: изучение влияния режимов обработки плазмой тлеющего разряда на состояние поверхности подложки.

Решаемые задачи

1. Ознакомление с физическими основами формирования газоразрядной плазмы.
2. Ознакомление с конструкцией и принципом работы вакуумной лабораторной установки.
3. Обработка образцов при разных режимах тлеющего разряда.
4. Исследование состояния поверхности путем проведения измерений краевого угла смачивания.
5. Анализ полученных данных.
6. Оформление отчета и представление его к защите.

Методические указания

Прежде чем приступить к работе на вакуумной лабораторной установке, следует изучить инструкцию по эксплуатации установки (для электроустановок напряжением до 220 В).

Техника безопасности

Вакуумная лабораторная установка управляется напряжением 220 В. Эксплуатацию вакуумной лабораторной установки следует проводить в соответствии с ПТЭ электроустановок потребителей и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей для электроустановок напряжением до 220 В.

Краткий конспект теоретической части

Изучение теоретической части проводится по методическим указаниям к лабораторным работам по курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении».

Подготовка к проведению лабораторной работы (выполняется преподавателем или инженером)

Подготовка вакуумной лабораторной установки к работе.

Проведение лабораторной работы

1. Ознакомиться с физическими основами формирования газоразрядной плазмы.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы гониометра и вакуумной лабораторной установки.
3. Подготовить девять стеклянных подложек. Протереть подложки безворсовой тканью, смоченной в спирте.

4. Провести по три измерения краевого угла смачивания на каждом образце. Результаты измерений записать в таблицу.

5. Провести очистку каждого образца в высокочастотной плазме низкого давления при мощности разряда 50, 100 и 200 Вт и времени очистки 30, 60 и 90 с.

6. Провести по три измерения краевого угла смачивания на каждом очищенном образце. Результаты измерений записать в таблицу.

7. Построить график зависимости краевого угла смачивания от времени обработки. Проанализировать полученные данные, сделать краткие выводы по работе.

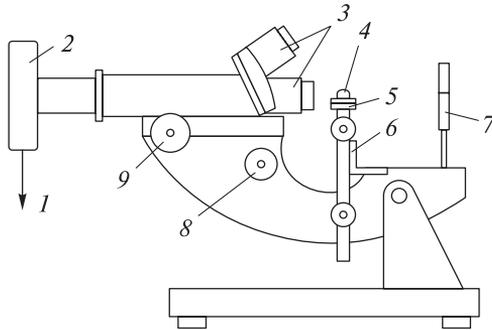
8. Подготовить отчет и представить его к защите.

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА КАФЕДРА МТ-11
«ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Отчет по лабораторной работе № 2 «Тлеющий разряд в вакууме»			
ФИО студента	Группа	Дата выполнения	Подпись студента
Оценка (max 5)	Бонус за сложность	Дата защиты	Подпись преподавателя

1. Краткий конспект теоретической части

Подпишите составные части гониометра.



- 1 — _____
- 2 — _____
- 3 — _____
- 4 — _____
- 5 — _____
- 6 — _____
- 7 — _____
- 8 — _____
- 9 — _____

Перечислите основные параметры газоразрядной плазмы.

2. Результаты измерений

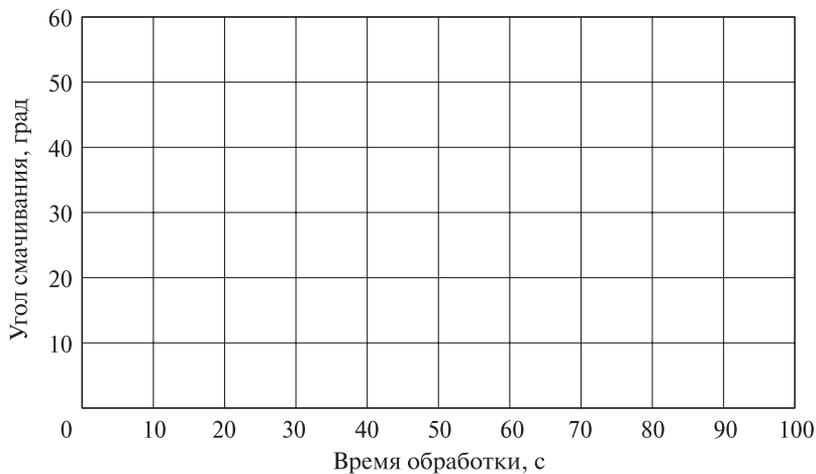
Числовые значения краевого угла смачивания до обработки

№ п/п	Измерение № 1	Измерение № 2	Измерение № 3	Среднее значение
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Числовые значения краевого угла смачивания после обработки

№ п/п	Мощность, Вт	Время, с	Измерение № 1	Измерение № 2	Измерение № 3	Среднее значение
1	50	30				
2	50	60				
3	50	90				
4	100	30				
5	100	60				
6	100	90				
7	200	30				
8	200	60				
9	200	90				

3. Построение экспериментальной зависимости краевого угла смачивания от времени обработки



4. Анализ результатов

Проанализируйте влияние:

1) времени обработки на гидрофильное свойство поверхности

2) мощности на гидрофильное свойство поверхности

ПЗ. ЛР № 3. ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Цель работы: изучение технологических процессов и оборудования для формирования тонкопленочных покрытий методами термического испарения и магнетронного распыления.

Решаемые задачи

1. Ознакомление с физическими основами процесса нанесения тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления.
2. Формирование пленки на подложке методом термического испарения, контроль времени осаждения, запись параметров.
3. Формирование пленки на подложке методом магнетронного распыления, контроль времени осаждения, запись параметров.
4. Расчеты толщин сформированных пленок.
5. Анализ полученных данных.
6. Оформление отчета и представление его к защите.

Методические указания

Прежде чем приступить к работе на вакуумной универсальной установке, следует изучить инструкцию по эксплуатации установки.

Техника безопасности

Вакуумная универсальная установка управляется напряжением 380 В. Эксплуатацию вакуумной универсальной установки следует проводить в соответствии с ПТЭ электроустановок потребителей и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей для электроустановок напряжением до 380 В.

Краткий конспект теоретической части

Изучение теоретической части проводится по методическим указаниям к лабораторным работам по курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении».

Подготовка к проведению лабораторной работы (выполняется преподавателем или инженером)

1. Выбор материала для термического испарителя и его установка в испаритель.
2. Выбор мишени для магнетронной распылительной системы и ее установка в магнетрон.
3. Подготовка универсальной вакуумной установки к работе.

Проведение лабораторной работы

1. Ознакомиться с физическими основами процесса нанесения тонких пленок методом термического испарения.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы термического испарителя.
3. Установить в рабочую камеру установки испаритель, испаряемый материал и предварительно очищенные подложки.
4. Провести осаждение пленки методом термического испарения, замерить время осаждения, записать параметры.
5. Разгерметизировать камеру и извлечь образцы после термического испарения.
6. Установить в рабочую камеру установки мишень в магнетрон и предварительно очищенные подложки.
7. Провести осаждение пленки методом магнетронного распыления, замерить время осаждения, записать параметры.
8. На основании выражений для нахождения скоростей выполнить расчеты толщин осажденных пленок.
9. Проанализировать полученные данные, сделать краткие выводы по работе.
10. Подготовить отчет и представить его к защите.

2. Формирование покрытия методом термического испарения

Испаряемый материал и его характеристики

1. Материал покрытия — _____.
2. Молярная масса материала M — _____, кг/кмоль
3. Плотность материала ρ — _____, кг/м³
4. Коэффициент прилипания α_m — _____.

Параметры процесса испарения

1. Температура испарения T_i — _____, К
2. Давление пара материала $p_{\text{нас}}$ — _____, Па
3. Рабочее давление процесса p — _____, Па
4. Площадь испарителя S_i — _____, м²
5. Длительность процесса t — _____, с

Параметры геометрии системы

1. Расстояние от источника до подложки r_1 — _____, м
2. Косинус угла испарения $\cos \varphi$ — _____.
3. Косинус угла конденсации $\cos \theta$ — _____.

Расчет значения толщины покрытия

1. Скорость испарения $v_i =$ _____

2. Скорость осаждения $v_o =$ _____

3. Толщина покрытия $h_n =$ _____

3. Формирование покрытия методом магнетронного распыления

Распыляемый материал и его характеристики

1. Материал покрытия — _____.
2. Молярная масса материала M — _____, кг/кмоль
3. Плотность материала ρ — _____, кг/м³
4. Заряд электрона qe — _____, Кл
5. Число Авогадро N_A — _____, кмоль⁻¹
6. Коэффициент прилипания α_m — _____.

Параметры процесса распыления

1. Ток разряда I — _____, А
2. Напряжение разряда U — _____, В
3. Рабочее давление процесса p — _____, Па
4. Площадь зоны распыления $S_{\text{п}}$ — _____, м²
5. Плотность ионного тока j — _____, А/м²
6. Энергия ионов аргона E — _____, кэВ
7. Коэффициент распыления S_p — _____, атом/ион
8. Длительность процесса t — _____, с

Параметры геометрии системы

1. Расстояние от источника до подложки r_1 — _____, м
2. Косинус угла распыления $\cos \varphi$ — _____
3. Косинус угла конденсации $\cos \theta$ — _____

Расчет значения толщины покрытия

1. Скорость распыления $v_p =$ _____

2. Скорость осаждения $v_o =$ _____

3. Толщина покрытия $h_p =$ _____

4. Выводы

5. Контрольные вопросы

1. Для осуществления процесса термического испарения необходимо:

- а) нагреть материал до температуры, обеспечивающей давление насыщенных паров данного материала;
- б) нагреть материал до температуры испарения;
- в) нагреть материал до температуры плавления.

2. Для осуществления процесса магнетронного распыления необходимо:

- а) подать в камеру рабочий газ;
- б) подать небольшое напряжение на подложкодержатель с установленными на нем подложками;
- в) использовать дополнительный источник генерации ионов рабочего газа.

3. Число частиц, приходящих от технологического источника на подложку, зависит от:

- а) расстояния между технологическим источником и подложкой;
- б) энергии частиц;
- в) материала подложки.

П4. ЛР № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК

Цель работы: изучение способов контроля и измерения геометрических (толщина) и физических (адгезия) характеристик тонкопленочных покрытий, сформированных разными методами.

Решаемые задачи

1. Изучение конструкции интерференционного микроскопа МИИ-4М с фотоэлектрическим микрометром и адгезиметра Elcometer.
2. Изучение базовых принципов работы с автоматизированной программой вычисления микроинтерферометра МИИ-4М в режиме измерения толщины тонкопленочного покрытия.
3. Проведение измерений толщины тонкопленочного покрытия на образцах, подготовленных в лабораторной работе № 3.
4. Проведение измерений адгезии образцов, сформированных методами термического испарения и магнетронного распыления.
5. Сравнительный анализ измеренных толщин на микроскопе МИИ-4М и рассчитанных в лабораторной работе № 3.
6. Оформление отчета и представление его к защите.

Методические указания

Прежде чем приступить к работе на универсальной вакуумной установке, следует изучить инструкцию по ее эксплуатации.

Техника безопасности

Интерференционный микроскоп МИИ-4М управляется напряжением 220 В. Эксплуатацию микроскопа МИИ-4М следует проводить в соответствии с ПТЭ электроустановок потребителей и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей для электроустановок напряжением до 220 В.

Краткий конспект теоретической части

Изучение теоретической части проводится по методическим указаниям к лабораторным работам по курсу «Высоковакуумные технологические процессы в приборостроении»).

Подготовка к проведению лабораторной работы (выполняется преподавателем или инженером)

1. Выбор материала катода для дугового испарителя и его установка в испаритель.
2. Подготовка универсальной вакуумной установки к работе.

Проведение лабораторной работы

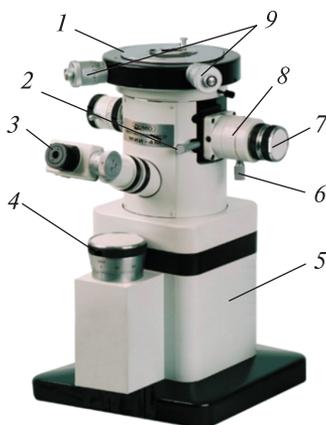
1. Ознакомиться с принципом измерения толщины на интерференционном микроскопе МИИ-4М.
2. Ознакомиться с принципом измерения адгезии с помощью адгезиметра Elcometer.
3. Измерить толщину покрытий, полученных методами термического испарения и магнетронного распыления в лабораторной работе № 3.
4. Сравнить измеренную толщину на микроскопе МИИ-4М с рассчитанной толщиной.
5. Измерить адгезию покрытий, сформированных методами термического испарения и магнетронного распыления.
6. Проанализировать полученные результаты.
7. Подготовить отчет и представить его к защите.

МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА КАФЕДРА МТ-11
«ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Отчет по лабораторной работе № 4 «Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок»			
ФИО студента	Группа	Дата выполнения	Подпись студента
Оценка (max 5)	Бонус за сложность	Дата защиты	Подпись преподавателя

1. Краткий конспект теоретической части

Из каких основных элементов состоит интерференционный микроскоп МИИ-4М?



- 1 — _____
- 2 — _____
- 3 — _____
- 4 — _____
- 5 — _____
- 6 — _____
- 7 — _____
- 8 — _____
- 9 — _____

3. Сравнение измеренной и рассчитанной толщины

Факторы, повлиявшие на расхождение измеренного и расчетного значений толщины покрытия:

4. Результаты измерения адгезии

№ образца	Термическое испарение	Магнетронное распыление	Оценка адгезии
1			
2			
3			

5. Сравнение значений адгезии тонкопленочных покрытий, полученных разными методами

Факторы, повлиявшие на различие значений адгезионной прочности тонкопленочных покрытий, полученных методами термического испарения и магнетронного распыления:

П5. ЛР № 5. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ MANTIS QPREP 500

Вакуумное технологическое оборудование широко применяется в приборостроении и микроэлектронике, в энергетической, аэрокосмической, пищевой, химической, фармацевтической отраслях промышленности, в металлургии, медицине и др.

Большинство вакуумных технологических установок включают в себя следующие системы:

- технологическую (источники частиц, нагреватели и т. д.) — реализует технологическое воздействие на обрабатываемые изделия;

- вакуумную — обеспечивает требуемые условия для проведения технологического процесса;

- газовую (система подачи газов) — обеспечивает необходимый состав газовой среды в рабочей камере в соответствии с технологическим процессом;

- транспортную — осуществляет ввод (вывод) изделий в рабочую камеру и зону технологического процесса, а также их ориентацию относительно технологических источников;

- вспомогательную (экраны, заслонки, средства контроля) — осуществляет контроль качества и удобство проведения технологического процесса и межпроцессных работ;

- систему питания и управления — обеспечивает электропитание элементов установки и осуществляет требуемый уровень контроля и автоматизации ее работы.

Вакуумная технологическая установка MANTIS QPREP 500. Принципы эксплуатации

Установка QPREP 500 (Mantis Deposition Limited) предназначена для напыления тонких пленок металлов и их нитридов в аргоне и его смеси с азотом на подложку диаметром до 150 мм методом магнетронного распыления (рис. П5.1).

Области применения установки:

- полупроводниковые пленки;
- оксидные (и другие) диэлектрики;
- наноструктурные пленки;
- мультислои;
- сложные полупроводники;
- металлизация устройств;
- сверхтонкие пленки.

Вакуумная камера установки со смонтированным на ней турбомолекулярным насосом представляет собой самостоятельный модуль. Технологические люки в камере обеспечивают герметичное присоединение шлюза дополнительного вакуумного оборудования или ввод в камеру оснастки с целью расширения технологических возможностей. Данный модуль легко встраивается в технологическую линейку вакуумного оборудования. В состав установки входят основной вакуумный модуль, форвакуумный насос, пульт управления, система охлаждения и система подачи рабочего газа (аргона или азота). С помощью форвакуумного насоса осуществляется предварительная откачка вакуумной камеры и турбомолекулярного насоса до 10^{-2} мбар (2 Па). Замкнутая система охлаждения состоит из чиллера и системы трубопроводов, обеспечивающих охлаждение магнетронов, подшипников шагового двигателя и двигателя турбомолекулярного насоса. В систему подачи газа входят газовый баллон, редуктор, электромагнитный клапан и вентили подачи газа в область магнетронов.



Рис. П5.1. Общий вид вакуумной технологической установки MANTIS QPREP 500

Вакуумная камера

Модульная система осаждения QPREP 500 предназначена для нанесения тонких пленок в сверхчистых условиях. Она основана на системе высокого вакуума с использованием фланца ConFlat. Это позволяет создавать в рабочей камере высокий вакуум. Общий вид вакуумной камеры приведен на рис. П5.2.

По центру крышки (см. рис. П5.2, поз. 1) вмонтирован герметичный ввод перемещения устройства крепления подложки по вертикали и по кругу с помощью шагового двигателя (поз. 2). В днище вварены три люка. В люке (поз. 6) вмонтирован магнетрон для высокочастотного напыления, в люке (поз. 5) — магнетрон для напыления постоянным током, в люке (поз. 4) — магнетрон для очистки поверхности подложки. Турбомолекулярный насос (поз. 7) герметично соединен фланцем с корпусом камеры. Установка подложки и мишеней в магнетроны проводится через люк (поз. 3). Визуальное наблюдение за процессом в камере осуществляются через смотровое окно (поз. 9). Герметичный вакуумный ввод (поз. 8) обеспечивает при наличии сиффона горизонтальное перемещение в зоне напыления кристалла-сенсора для контроля толщины напыляемой пленки.

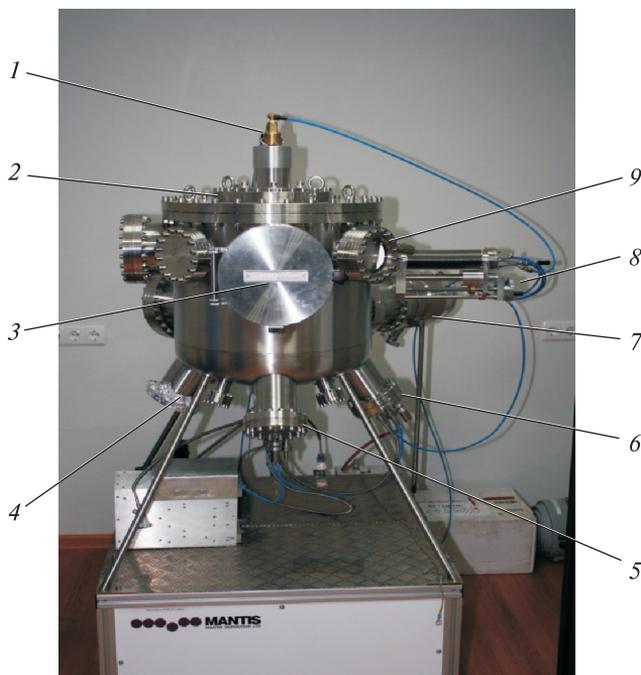


Рис. П5.2. Общий вид вакуумной камеры

Для предварительной откачки камеры и турбомолекулярного насоса используется форвакуумный насос (рис. П5.3, поз. 2), соединенный гибким шлангом (поз. 1) через прямоотчный клапан (поз. 2) с турбомолекулярным насосом (поз. 3). Подключение турбомолекулярного (а) и форвакуумного (б) насосов приведено на рис. П5.3.

Вид внутренней полости вакуумной камеры представлен на рис. П5.4.

Давление $2 \cdot 10^{-7}$ мбар ($2 \cdot 10^{-5}$ Па) в камере достигается включением турбомолекулярного насоса (рис. П5.5). Поскольку для поджога плазмы необходимо запустить механизм ионизации рабочего газа в электрическом поле и создать определенную плотность ионизированных частиц, следует повысить давление в камере. Для создания в камере требуемого давления необходимо уменьшить скорость откачки турбомолекулярного насоса. Для этого между турбомолекулярным насосом и вакуумной камерой смонтирован вакуумный затвор поворотного типа. Открытие и закрытие затвора осуществляются рукояткой. Магнетроны закрыты крышками. Открытие и закрытие крышек осуществляются с помощью рукояток, что позволяет напылять на подложку слои пленки разного состава.

Процесс формирования пленки происходит при комнатной температуре, но на поверхности магнетрона при работе плазмы температура повышается, что требует принудительного охлаждения. Для охлаждения подшипников шагового двигателя и турбомолекулярного насоса служит система охлаждения,

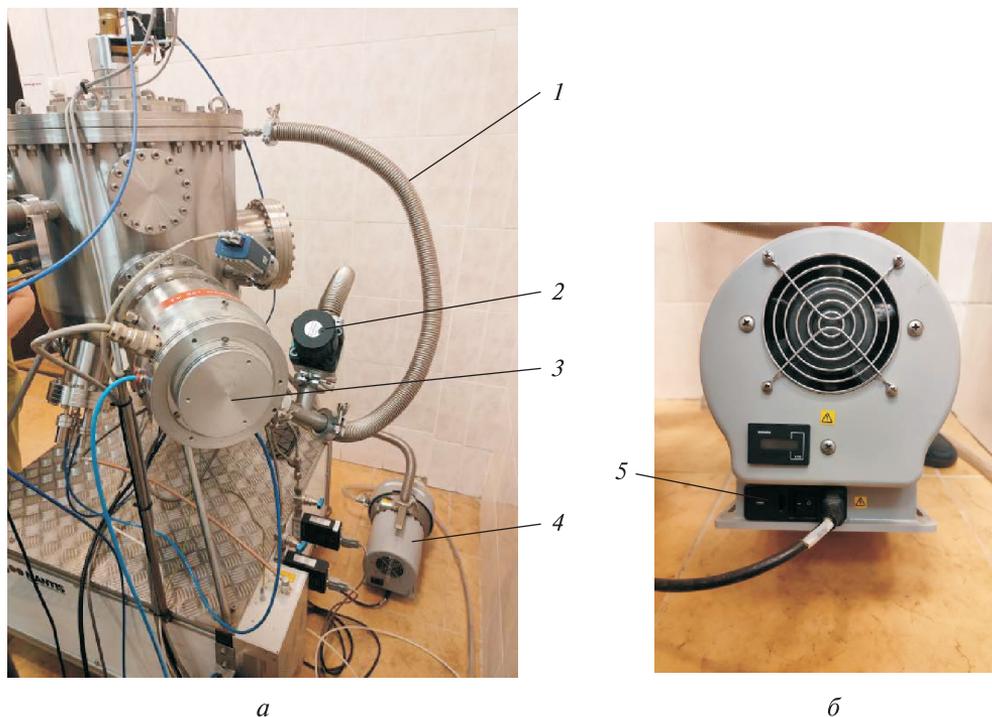
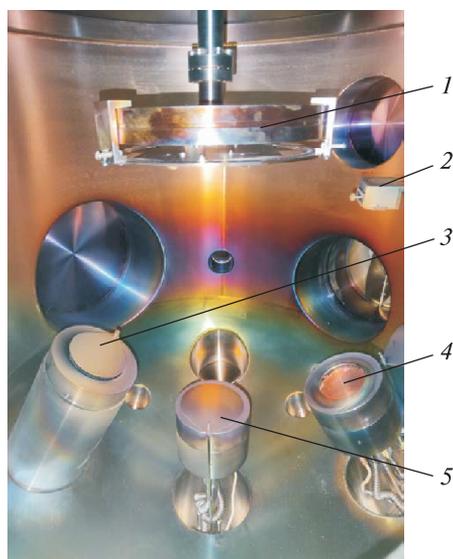


Рис. П5.3. Подключение турбомолекулярного (а) и форвакуумного (б) насосов: 1 — гибкий шланг; 2 — прямооточный клапан; 3 — турбомолекулярный насос; 4 — форвакуумный насос; 5 — тумблер включения форвакуумного насоса

Рис. П5.4. Вид внутренней полости вакуумной камеры:

1 — фиксатор подложки; 2 — кристалл-сенсор для контроля толщины пленки; 3 — магнетрон для очистки; 4 — магнетрон для ВЧ-напыления; 5 — магнетрон для напыления постоянным током



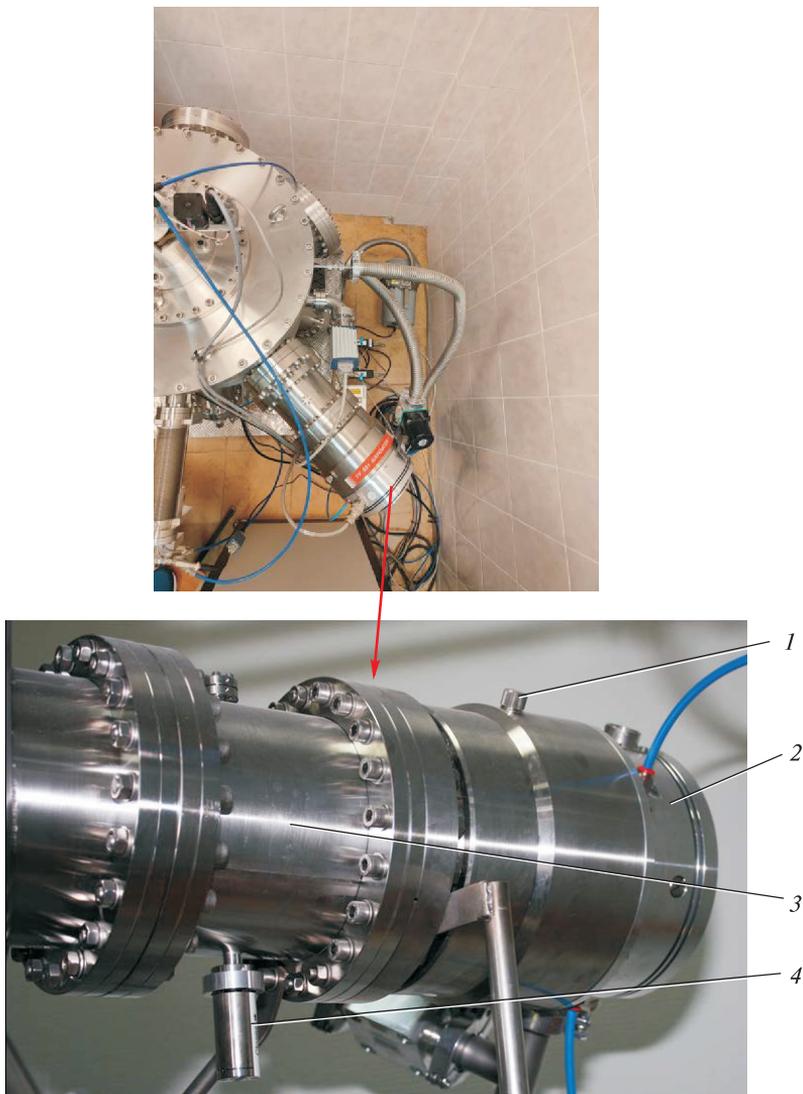


Рис. П5.5. Турбомолекулярный насос:

a — вид сверху; *б* — увеличенный вид со стороны смотрового окна; 1 — пробка для подачи атмосферного воздуха в камеру; 2 — корпус насоса; 3 — вакуумный затвор поворотного типа; 4 — рукоятка регулировки затвора

состоящая из холодильника-чиллера (рис. П5.6) и системы трубопроводов. Тумблер включения чиллера в сеть расположен на его панели, там же находится указатель уровня воды «минимум» — «максимум».

Система подачи рабочего газа приведена на рис. П5.7. Газ из газового баллона редуктора, кран быстрого сброса давления из магистрали, гибкий шланг подачи газа на вход электромагнитного клапана, далее через кран



Рис. П5.6. Чиллер с панелью управления:
1 — воронка для залива воды; 2 — контроль давления воды; 3 — дисплей установки температуры; 4 — тумблер включения

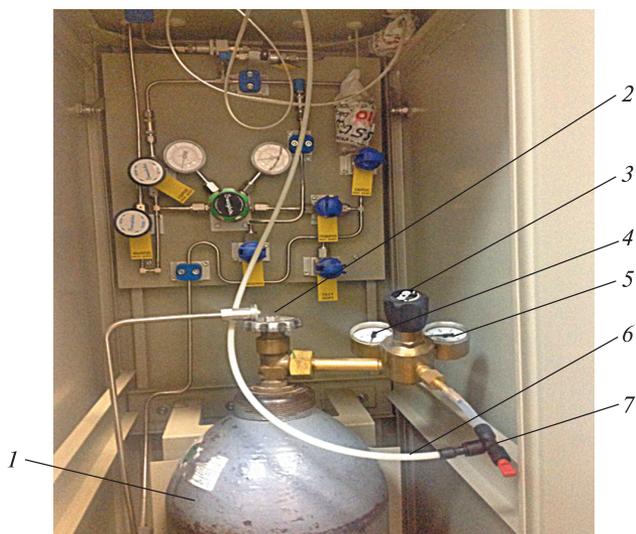


Рис. П5.7. Система подачи рабочего газа:
1 — газовый баллон; 2 — вентиль высокого давления; 3 — редуктор; 4 — манометр высокого давления; 5 — манометр низкого давления; 6 — трубопровод подачи газа в вакуумную камеру; 7 — предохранительный клапан

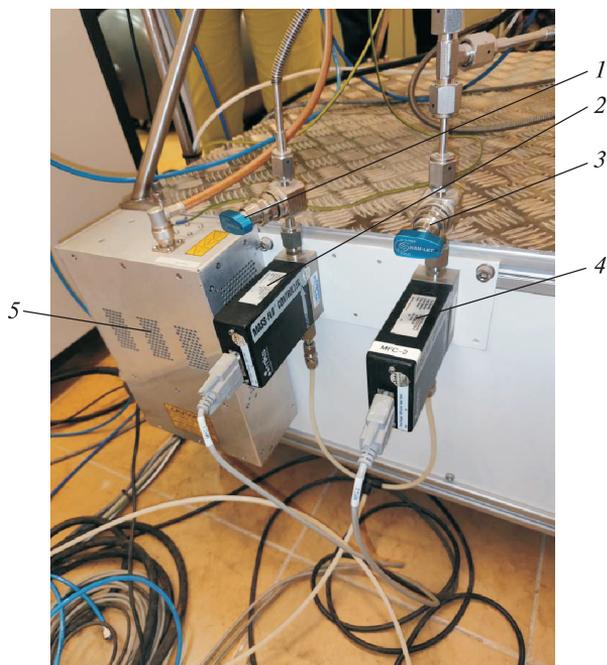


Рис. П5.8. Схема подачи газа в камеру:

1 — кран подачи газа на магнетрон очистки; 2 — электромагнитный клапан регулировки подачи газа на магнетрон очистки; 3 — кран подачи газа на магнетрон напыления; 4 — электромагнитный клапан регулировки подачи газа на магнетрон напыления; 5 — совместитель импедансов нагрузок

поступает на тройник (см. рис. П5.7) и по гибким шлангам к магнетронам (рис. П5.8). Функционирование электромагнитного клапана контролируется контроллером управления.

Основным блоком включения установки в работу является пульт управления (рис. П5.9), с помощью которого устанавливают рабочие технологические параметры, контроль за соблюдением заданных параметров и контроль за безопасной эксплуатацией. Включение пульта в работу проводят поворотом выключателя (рис. П5.10, а) по ходу часовой стрелки.

Материалы и оснастка, необходимые для проведения процесса напыления в режиме постоянного тока:

1) подложка — пластина из ситалла, пластика, кремния и т. п., размером 60×60 мм.

2) мишень, изготовленная из металла или оксида металла, который необходимо напылить на поверхность подложки (табл. П5.1). Размер мишени: диаметр 50 мм; толщина 4 мм;

3) для крепления подложки в устройство фиксации подложки следует вырезать из стальной фольги две заготовки с диаметром, равным диаметру отверстия в устройстве фиксации, добавив 5 мм. Затем в центре одной заготовки вырезать окно размером 50×50 мм.

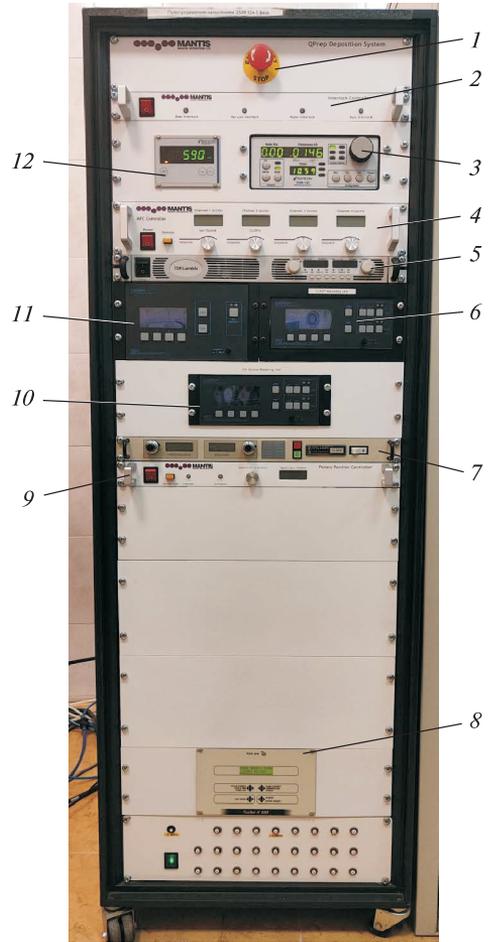
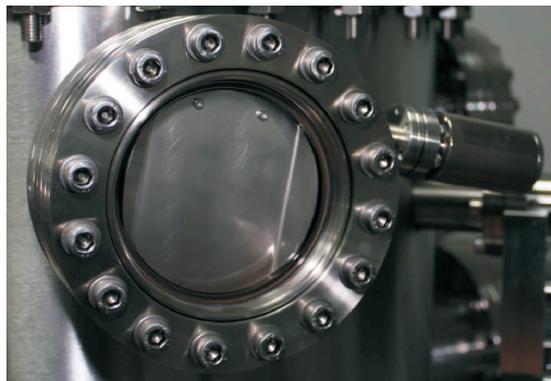


Рис. П5.9. Передняя панель пульта управления:

1 — аварийное отключение питания; 2 — панель контроля; 3 — контроллер параметров напыления; 4 — контроллер управления расходом рабочего газа; 5 — блок питания магнетрона постоянного тока; 6 — контроллер управления блока согласования импедансов системы ВЧ-напыления; 7 — блок питания магнетрона очистки; 8 — контроллер управления турбомолекулярным насосом; 9 — блок питания шагового двигателя вращения подложки; 10 — контроллер управления блока согласования импедансов системы; 11 — блок ВЧ-питания; 12 — панель контроля давления в камере



а



б

Рис. П5.10. Выключатель пульта управления — положение «ОТКЛ.» (а) и окно наблюдения за режимом плазмы (б)

Таблица П5.1

Параметры настройки процесса магнетронного напыления для материалов, указанных согласно спецификации на установку магнетронного напыления

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
Ag	10,500	0,529	Silver
AgBr	6,470	1,180	Silver Bromide
AgCl	5,560	1,320	Silver Chloride
Al	2,700	1,080	Aluminum
Al ₂ O ₃	3,970	0,336	Aluminum Oxide
Al ₄ C ₃	2,360	*1,000	Aluminum Carbide
AlF ₃	3,070	*1,000	Aluminum Fluoride
AlN	3,260	*1,000	Aluminum Nitride
AlSb	4,360	0,743	Aluminum Antimonide
As	5,730	0,966	Arsenic
As ₂ Se ₃	4,750	*1,000	Arsenic Selenide
Au	19,300	0,381	Gold
B	2,370	0,389	Boron
B ₂ O ₃	1,820	*1,000	Boron Oxide
B ₄ C	2,370	*1,000	Boron Carbide
Ba	3,500	2,100	Barium
BaF ₂	4,886	0,793	Barium Fluoride
BaN ₂ O ₆	3,244	1,261	Barium Nitrate
BaO	5,720	*1,000	Barium Oxide
BaTiO ₃	5,999	0,464	Barium Titanate (Tetr)
BaTiO ₃	6,035	0,412	Barium Titanate (Cibic)
Be	1,850	0,543	Beryllium
BeF ₂	1,990	*1,000	Beryllium Fluoride
BeO	3,010	*1,000	Beryllium Oxide
Bi	9,800	0,790	Bismuth
Bi ₂ O ₃	8,900	*1,000	Bismuth Oxide
Bi ₂ S ₃	7,390	*1,000	Bismuth Trisulphide
Bi ₂ Se ₃	6,820	*1,000	Bismuth Selenide
Bi ₂ Te ₃	7,700	*1,000	Bismuth Telluride
BiF ₃	5,320	*1,000	Bismuth Fluoride
BN	1,860	*1,000	Boron Nitride
C	2,250	3,260	Carbon (Graphite)
C	3,520	0,220	Carbon (Diamond)
Ca	1,550	2,620	Calcium
CaF ₂	3,180	0,775	Calcium Fluoride

Продолжение табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
CaO	3,350	*1,000	Calcium Oxide
CaO-SiO ₂	2,900	*1,000	Calcium Silicate (3)
CaSO ₄	2,962	0,955	Calcium Sulfate
CaTiO ₃	4,100	~*10	Calcium Titanate
CaWO ₄	6,060	*1,000	Calcium Tungstate
Cd	8,640	0,682	Cadmium
CdF ₂	6,640	*1,000	Cadmium Fluoride
CdO	8,150	*1,000	Cadmium Oxide
CdS	4,830	1,020	Cadmium Sulfide
CdSe	5,810	*1,000	Cadmium Selenide
CdTe	6,200	0,980	Cadmium Telluride
Ce	6,780	*1,000	Cerium
CeF ₃	6,160	*1,000	Cerium (III) Fluoride
CeO ₂	7,130	*1,000	Cerium (IV) Dioxide
Co	8,900	0,343	Cobalt
CoO	6,440	0,412	Cobalt Oxide
Cr	7,200	0,305	Chromium
Cr ₂ O ₃	5,210	*1,000	Chromium (III) Oxide
Cr ₃ C ₂	6,680	*1,000	Chromium Carbide
CrB	6,170	*1,000	Chromium Boride
Cs	1,870	*1,000	Cesium
Cs ₂ SO ₄	4,243	1,212	Cesium Sulfate
CsBr	4,456	1,410	Cesium Bromide
CsCl	3,988	1,399	Cesium Chloride
CsI	4,516	1,542	Cesium Iodide
Cu	8,930	0,437	Copper
Cu ₂ O	6,000	*1,000	Copper Oxide
Cu ₂ S	5,600	0,690	Copper (I) Sulfide (Alpha)
Cu ₂ S	5,800	0,670	Copper (I) Sulfide (Beta)
CuS	4,600	0,820	Copper (II) Sulfide
Dy	8,550	0,600	Dysprosium
Dy ₂ O ₃	7,810	*1,000	Dysprosium Oxide
Er	9,050	0,740	Erbium
Er ₂ O ₃	8,640	*1,000	Erbium Oxide
Eu	5,260	*1,000	Europium
EuF ₂	6,500	*1,000	Europium Fluoride
Fe	7,860	0,349	Iron

Продолжение табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
Fe ₂ O ₃	5,240	*1,000	Iron Oxide III
FeO	5,700	*1,000	Iron Oxide II
FeS	4,840	*1,000	Iron Sulphide
Ga	5,930	0,593	Gallium
Ga ₂ O ₃	5,880	*1,000	Gallium Oxide (B)
GaAs	5,310	1,590	Gallium Arsenide
GaN	6,100	*1,000	Gallium Nitride
GaP	4,100	*1,000	Gallium Phosphide
GaSb	5,600	*1,000	Gallium Antimonide
Gd	7,890	0,670	Gadolinium
Gd ₂ O ₃	7,410	*1,000	Gadolinium Oxide
Ge	5,350	0,516	Germanium
Ge ₃ N ₂	5,200	*1,000	Germanium Nitride
GeO ₂	6,240	*1,000	Germanium Oxide
GeTe	6,200	*1,000	Germanium Telluride
Hf	13,090	0,360	Hafnium
HfB ₂	10,500	*1,000	Hafnium Boride
HfC	12,200	*1,000	Hafnium Carbide
HfN	13,800	*1,000	Hafnium Nitride
HfO ₂	9,680	*1,000	Hafnium Oxide
HfSi ₂	7,200	*1,000	Hafnium Silicide
Hg	13,460	0,740	Mercury
Ho	8,800	0,580	Holmium
Ho ₂ O ₃	8,410	*1,000	Holmium Oxide
In	7,300	0,841	Indium
In ₂ O ₃	7,180	*1,000	Indium Sesquioxide
In ₂ Se ₃	5,700	*1,000	Indium Selenide
In ₂ Te ₃	5,800	*1,000	Indium Telluride
InAs	5,700	*1,000	Indium Arsenide
InP	4,800	*1,000	Indium Phosphide
InSb	5,760	0,769	Indium Antimonide
Ir	22,400	0,129	Iridium
K	0,860	10,189	Potassium
KBr	2,750	1,893	Potassium Bromide
KCl	1,980	2,050	Potassium Chloride
KF	2,480	*1,000	Potassium Fluoride
KI	3,128	2,077	Potassium Iodide

Продолжение табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
La	6,170	0,920	Lanthanum
La ₂ O ₃	6,510	*1,000	Lanthanum Oxide
LaB ₆	2,610	*1,000	Lanthanum Boride
LaF ₃	5,940	*1,000	Lanthanum Fluoride
Li	0,530	5,900	Lithium
LiBr	3,470	1,230	Lithium Bromide
LiF	2,638	0,778	Lithium Fluoride
LiNbO ₃	4,700	0,463	Lithium Niobate
Lu	9,840	*1,000	Lutetium
Mg	1,740	1,610	Magnesium
MgAl ₂ O ₄	3,600	*1,000	Magnesium Aluminate
MgAl ₂ O ₆	8,000	*1,000	Spinel
MgF ₂	3,180	0,637	Magnesium Fluoride
MgO	3,580	0,411	Magnesium Oxide
Mn	7,200	0,377	Manganese
MnO	5,390	0,467	Manganese Oxide
MnS	3,990	0,940	Manganese (II) Sulfide
Mo	10,200	0,257	Molybdenum
Mo ₂ C	9,180	*1,000	Molybdenum Carbide
MoB ₂	7,120	*1,000	Molybdenum Boride
MoO ₃	4,700	*1,000	Molybdenum Trioxide
MoS ₂	4,800	*1,000	Molybdenum Disulfide
Na	0,970	4,800	Sodium
Na ₃ AlF ₆	2,900	*1,000	Cryolite
Na ₅ Al ₃ F ₁₄	2,900	*1,000	Chiolite
NaBr	3,200	*1,000	Sodium Bromide
NaCl	2,170	1,570	Sodium Chloride
NaClO ₃	2,164	1,565	Sodium Chlorate
NaF	2,558	0,949	Sodium Fluoride
NaNO ₃	2,270	1,194	Sodium Nitrate
Nb	8,578	0,492	Niobium (Columbium)
Nb ₂ O ₃	7,500	*1,000	Niobium Trioxide
Nb ₂ O ₅	4,470	*1,000	Niobium (V) Oxide
NbB ₂	6,970	*1,000	Niobium Boride
NbC	7,820	*1,000	Niobium Carbide
NbN	8,400	*1,000	Niobium Nitride
Nd	7,000	*1,000	Neodymium

Продолжение табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
Nd ₂ O ₃	7,240	*1,000	Neodymium Oxide
NdF ₃	6,506	*1,000	Neodymium Fluoride
Ni	8,910	0,331	Nickel
NiCr	8,500	*1,000	Nichrome
NiCrFe	8,500	*1,000	Inconel
NiFe	8,700	*1,000	Permalloy
NiFeMo	8,900	*1,000	Supermalloy
NiO	7,450	*1,000	Nickel Oxide
P ₃ N ₅	2,510	*1,000	Phosphorus Nitride
Pb	11,300	1,130	Lead
PbCl ₂	5,850	*1,000	Lead Chloride
PbF ₂	8,240	0,661	Lead Fluoride
PbO	9,530	*1,000	Lead Oxide
PbS	7,500	0,566	Lead Sulfide
PbSe	8,100	*1,000	Lead Selenide
PbSnO ₃	8,100	*1,000	Lead Stannate
PbTe	8,160	0,651	Lead Telluride
Pd	12,038	0,357	Palladium
PdO	8,310	*1,000	Palladium Oxide
Po	9,400	*1,000	Polonium
Pr	6,780	*1,000	Praseodymium
Pr ₂ O ₃	6,880	*1,000	Praseodymium Oxide
Pt	21,400	0,245	Platinum
PtO ₂	10,200	*1,000	Platinum Oxide
Ra	5,000	*1,000	Radium
Rb	1,530	2,540	Rubidium
RbI	3,550	*1,000	Rubidium Iodide
Re	21,040	0,150	Rhenium
Rh	12,410	0,210	Rhodium
Ru	12,362	0,182	Ruthenium
S ₈	2,070	2,290	Sulphur
Sb	6,620	0,768	Antimony
Sb ₂ O ₃	5,200	*1,000	Antimony Trioxide
Sb ₂ S ₃	4,640	*1,000	Antimony Trisulfide
Sc	3,000	0,910	Scandium
Sc ₂ O ₃	3,860	*1,000	Scandium Oxide
Se	4,810	0,864	Selenium

Продолжение табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
Si	2,320	0,712	Silicon
Si ₃ N ₄	3,440	*1,000	Silicon Nitride
SiC	3,220	*1,000	Silicon Carbide
SiO	2,130	0,870	Silicon (II) Oxide
SiO ₂	2,648	1,000	Silicon Dioxide
Sm	7,540	0,890	Samarium
Sm ₂ O ₃	7,430	*1,000	Samarium Oxide
Sn	7,300	0,724	Tin
SnO ₂	6,950	*1,000	Tin Oxide
SnS	5,080	*1,000	Tin Silfide
SnSe	6,180	*1,000	Tin Selenide
SnTe	6,440	*1,000	Tin Telluride
Sr	2,600	*1,000	Strontium
SrF ₂	4,277	0,727	Strontium Fluoride
SrO	4,990	0,517	Strontium Oxide
Ta	16,600	0,262	Tantalum
Ta ₂ O ₅	8,200	0,300	Tantalum (V) Oxide
TaB ₂	11,150	*1,000	Tantalum Boride
TaC	13,900	*1,000	Tantalum Carbide
TaN	16,300	*1,000	Tantalum Nitride
Tb	8,270	0,660	Terbium
Tc	11,500	*1,000	Technetium
Te	6,250	0,900	Tellurium
TeO ₂	5,990	0,862	Tellurium Oxide
Th	11,694	0,484	Thorium
ThF ₄	6,320	*1,000	Thorium (IV) Fluoride
ThO ₂	9,860	0,284	Thorium Dioxide
ThOF ₂	9,100	*1,000	Thorium Oxyfluoride
Ti	4,500	0,628	Titanium
Ti ₂ O ₃	4,600	*1,000	Titanium Sesquioxide
TiB ₂	4,500	*1,000	Titanium Boride
TiC	4,930	*1,000	Titanium Carbide
TiN	5,430	*1,000	Titanium Nitride
TiO	4,900	*1,000	Titanium Oxide
TiO ₂	4,260	0,400	Titanium (IV) Oxide
Tl	11,850	1,550	Thallium
TlBr	7,560	*1,000	Thallium Bromide

Окончание табл. П5.1

Материал	Плотность	Z-Ratio	Наименование материала согласно спецификации регламента
TlCl	7,000	*1,000	Thallium Chloride
TlI	7,090	*1,00	Thallium Iodide (B)
U	19,050	0,238	Uranium
U ₂ O ₈	8,300	*1,000	Tri Uranium Octoxide
U ₄ O ₉	10,969	0,348	Uranium Oxide
UO ₂	10,970	0,286	Uranium Dioxide
V	5,960	0,530	Vanadium
V ₂ O ₅	3,360	*1,000	Vanadium Pentoxide
VB ₂	5,100	*1,000	Vanadium Boride
VC	5,770	*1,000	Vanadium Carbide
VN	6,130	*1,000	Vanadium Nitride
VO ₂	4,340	*1,000	Vanadium Dioxide
W	19,300	0,163	Tungsten
WB ₂	10,770	*1,000	Tungsten Boride
WC	15,600	0,151	Tungsten Carbide
WO ₃	7,160	*1,000	Tungsten Trioxide
WS ₂	7,500	*1,000	Tungsten Disulphide
WSi ₂	9,400	*1,000	Tungsten Silicide
Y	4,340	0,835	Yttrium
Y ₂ O ₃	5,010	*1,000	Yttrium Oxide
Yb	6,980	1,130	Ytterbium
Yb ₂ O ₃	9,170	*1,000	Ytterbium Oxide
Zn	7,040	0,514	Zinc
Zn ₃ Sb ₂	6,300	*1,000	Zinc Antimonide
ZnF ₂	4,950	*1,000	Zinc Fluoride
ZnO	5,610	0,556	Zinc Oxide
ZnS	4,090	0,775	Zinc Sulfide
ZnSe	5,260	0,722	Zinc Selenide
ZnTe	6,340	0,770	Zinc Telluride
Zr	6,490	0,600	Zirconium
ZrB ₂	6,080	*1,000	Zirconium Boride
ZrC	6,730	0,264	Zirconium Carbide
ZrN	7,090	*1,000	Zirconium Nitride
ZrO ₂	5,600	*1,000	Zirconium Oxide

Примечания: 1. *1,000 — установить номинальное значение (100 %). 2. Z-Ratio — коэффициент напыления, устанавливаемый на установке.

Подготовка подложки к процессу напыления

Порядок подготовки подложки:

- 1) тщательно промыть поверхность подложки ацетоном класса не ниже ХЧ с помощью бязевой салфетки;
- 2) заготовки из фольги также протереть ацетоном;
- 3) поместить подложку в центр круга из фольги без отверстия, зафиксировав ее в четырех точках по углам каплями клея «Момент»;
- 4) положить сверху аккуратно заготовку с отверстием и по диаметру в нескольких точках прихватить точечно клеем «Момент»;
- 5) промыть поверхность мишени ацетоном с помощью щетинной кисти и выдержать на воздухе не менее 15 мин.

Установка подложки и мишени в вакуумную камеру

Порядок установки:

- 1) аккуратно отвинтить пробку (поз. 1) на турбомолекулярном насосе (см. рис. П5.5);
- 2) открыть вакуумный затвор: поставить рукоятку (рис. П5.11) в положение «ореп»;
- 3) заполнить вакуумную камеру атмосферным воздухом до атмосферного давления. Люк для загрузки откроется;
- 4) оснастку с подложкой установить в захват устройства для фиксации.

Внимание! Работы по установке подложки и мишени выполнять в перчатках.

- 5) установить мишень в магнетрон (см. рис. П5.11). Крышка на магнетроне открывается и закрывается с помощью рукоятки, находящейся на крышке люка магнетрона.

Одна риска расположена на корпусе рукоятки, вторая риска находится на вращающейся части. Совмещение рисков означает, что крышка закрыта.

Внимание! После установки мишени в магнетрон убедитесь, что крышки двух соседних магнетронов закрыты.

- 6) вращая рукоятку вакуумного ввода (см. рис. П5.2, поз. 8), ввести в закрытую зону подложки сенсор-кристалл (см. рис. П5.4, поз. 2).
- 7) закрыть крышку загрузочного люка и закрутить гайку-барашек.
- 8) плотно завинтить пробку в отверстии корпуса турбомолекулярного насоса.
- 9) повернуть выключатель пульта управления на 90° по ходу часовой стрелки.
- 10) включить форвакуумный насос (выключатель на корпусе насоса).



Рис. П5.11. Рукоятка регулирования положения затвора

11) открыть клапан (см. рис. П5.3, поз. 3): при положении «открыто» отчетливо видна красная полоса на корпусе клапана;

12) на дисплее контроллера датчика давления (см. рис. П5.9, поз. 12) видно, что давление начинает медленно падать. Откачивать до давления 10^{-2} мбар;

13) включить чиллер (см. рис. П5.6). Выключатель «ВКЛ/ВЫКЛ» питания находится на задней панели. Затем нажать кнопку выключателя (см. рис. П5.6, поз. 4), ручкой (см. рис. П5.6, поз. 3) установить температуру воды $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; давление воды 50 кПа устанавливается автоматически;

14) на панели пульта (см. рис. П5.9) включить выключатели блоков (поз. 2, 4, 5);

15) на панели пульта (см. рис. П5.9, поз. 2) должны загореться зеленые светодиоды 1, 2, 3 (вакуум, вода, герметичность);

16) при достижении давления 10^{-2} мбар на панели пульта включить турбомолекулярный насос; нажать кнопку (см. рис. П5.9, поз. 8);

17) откачать давление до 10^{-7} мбар;

18) задать параметры напыления на контроллере измерителя толщины и скорости напыления пленок (рис. П5.12):

- нажать кнопку Zero;
- нажать кнопку Program и, вращая ручку, установить значение Film1;
- нажатием кнопки Next выбрать параметр Density (плотность) и, вращая ручку, установить значение 8,930; нажать ручку, чтобы сохранить значение параметра; нажать кнопку Next;
- нажатием кнопки Next выбрать параметр Z-Factor, вращая ручку, установить значение 0,437; нажать ручку; нажать кнопку Next;
- нажать кнопку Program — выход из режима программирования;



Рис. П5.12. Измеритель толщины и скорости напыления пленок

19) если в процессе программирования параметры введены правильно, то в окошке Cristal Status будет светиться зеленый светодиод и можно переходить к стадии напыления. Если светодиод мигает, следовательно, или произошел какой-то сбой при программировании, или кристалл выработал свой ресурс. В первом случае повторить процедуру ввода значений параметров, во втором — заменить сенсор-кристалл;

20) нажать кнопку Zero — обнулить все значения на дисплеях;

21) открыть вентиль на баллоне с аргоном (см. рис. П5.7, поз. 2);

22) открыть редуктор (см. рис. П5.7, поз. 3) и выставить давление 5 мбар на манометре (см. рис. П5.7, поз. 4);

24) открыть кран (см. рис. П5.8, поз. 2);

25) включить контроллер регулировки газа (см. рис. П5.9, поз. 4; рис. П5.13) и блок питания постоянного тока (см. рис. П5.9, поз. 5).

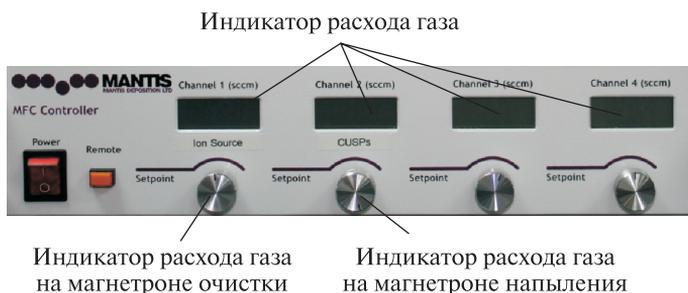


Рис. П5.13. Вид индикатора блока управления регулировки подачи газа

25) открыть вентиль CUSPs (см. рис. П5.13) и обеспечить подачу газа в пределах 60 делений;

26) прикрыть затвор турбомолекулярного насоса таким образом, чтобы давление в вакуумной камере повысилось до $1 \cdot 10^{-2}$ мбар.

27) установить напряжение 630 В и ток 0,1 А на блоке питания и нажать кнопку OUT.

Если все параметры установлены правильно, должны начаться поджог плазмы и процесс напыления пленки.

Определить это можно следующим образом:

— поджог плазмы заметен визуально в смотровом окне вакуумной камеры (рис. П5.10, б);

— начало процесса напыления фиксируется на дисплее (см. рис. П5.12): появляются цифры скорости напыления в его левой части и толщины пленки — в правой.

28) закончить процесс через 20 мин. Время продолжительности процесса фиксируется на дисплее.

Процесс выключения установки

Выключение установки осуществляется в следующем порядке:

1) закрыть вентиль CUSPs (см. рис. П5.13);

- 2) выключить выключатели контроллера регулировки подачи газа и блока питания (см. рис. П5.9, поз. 5);
- 3) закрыть кран подачи газа в вакуумную камеру (см. рис. П5.8, поз. 2);
- 4) закрыть редуктор газового баллона и вентиль баллона;
- 5) закрыть затвор турбомолекулярного насоса, для этого рукоятку (см. рис. П5.8, поз. 3) поставить в положение, при котором надпись «Closed» на рукоятке совместится с риской на корпусе;
- 6) выключить форвакуумный насос;
- 7) закрыть клапан (см. рис. П5.7, поз. 2);
- 8) отключить турбомолекулярный насос: нажать кнопку (см. рис. П5.9, поз. 8) и дождаться остановки турбины насоса;

ВНИМАНИЕ! Запрещается подавать атмосферный воздух в корпус турбомолекулярного насоса до полной остановки турбины. Есть опасность разрушения турбины!

- 9) выключить чиллер: нажать кнопку «ВКЛ/ВЫКЛ» на передней панели и выключатель питания на задней панели;
- 10) открыть вакуумный затвор на турбомолекулярном насосе: поставить рукоятку (см. рис. П5.7, поз. 4) в положение, при котором надпись «Open» совместится с риской на корпусе;
- 11) открыть заглушку на турбомолекулярном насосе (см. рис. П5.5, поз. 1) и напустить в вакуумную камеру атмосферный воздух;
- 12) открыть загрузочный люк и аккуратно извлечь приспособление с подложкой;
- 13) закрыть люк, закрыть заглушку на турбомолекулярном насосе, включить форвакуумный насос, открыть клапан и откачать воздух до давления $1 \cdot 10^{-2}$ мбар;
- 14) закрыть вакуумный затвор на турбомолекулярном насосе, совместив надпись на рукоятке «Closed» с риской на корпусе;
- 15) выключить форвакуумный насос и закрыть клапан;
- 16) отключить выключатель контрольного блока (рис. П5.5);
- 17) проверить отключение всех выключателей на передней панели пульта и вернуть выключатель на задней панели пульта в исходное положение, повернув его на 90° против хода часовой стрелки.

Порядок выполнения практической части

Последовательность процесса напыления.

1. Изучить принцип работы установки нанесения тонкопленочных покрытий MANTIS QPREP 500.
2. Получить от преподавателя «мишень» напыляемого материала (см. табл. П5.1) и подложку.
3. Подготовить подложку к напылению согласно инструкции в теоретической части.
4. Для крепления подложки в устройстве фиксации подложки вырезать из стальной фольги две заготовки с диаметром, равным устройству фиксации, добавив 5 мм. Затем в центре одной заготовки вырезать окно размером 50×50 мм.

5. Закрепить подложку в устройстве фиксации, вставить собранную конструкцию в вакуумную камеру и расположить ее на фиксаторе держателя подложки.

6. Установить мишень в вакуумную камеру.

7. Закрывать крышку загрузочного люка и закрутить гайку-барашек.

8. Подготовить установку магнетронного напыления к запуску.

Запуск установки осуществлять только по разрешению преподавателя и в его присутствии!

9. Запустить установку магнетронного напыления согласно алгоритму, приведенному в теоретической части. Если все параметры установлены правильно, должны начаться поджог плазмы и процесс напыления пленки.

10. Контролировать состояние плазмы. Поджог плазмы заметен визуально в смотровом окне вакуумной камеры, начало процесса напыления фиксируется на дисплее (см. рис. П5.12): появляются цифры скорости напыления в его левой части и толщины пленки — в правой.

11. Занести в табл. П5.2 режимы напыления:

Таблица П5.2

Режимы напыления

Материал	Наименование слоя	Характеристики напыления			
		Скорость напыления	Толщина пленки	Время напыления	Примечание
1					
2					
...					

12. Завершить процесс напыления и остановить установку согласно алгоритму, изложенному в теоретической части. **Остановить установку можно только по разрешению преподавателя и в его присутствии!**

ВНИМАНИЕ! Запрещается подавать атмосферный воздух в корпус турбомолекулярного насоса до полной остановки турбины. Есть опасность разрушения турбины!

13. Проверить отключение всех выключателей на передней панели пульта и вернуть выключатель на задней панели пульта в исходное положение, повернув его на 90° против хода часовой стрелки.

14. Открыть вакуумную камеру, через люк извлечь устройство фиксации подложки вместе с подложкой, снять подложку с устройства фиксации.

15. По указанию преподавателя определить характеристики сформированной пленки (см. ЛР4).

16. Записать выводы по результатам напыления.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Список сокращений.	7
Термины и определения	7
1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ	9
1.1. Назначение и место высоковакуумных технологических процессов в приборостроении	10
1.1.1. Обезгаживающий прогрев и отжиг	10
1.1.2. Осаждение тонкопленочных покрытий	11
1.1.3. Ионное травление	12
1.1.4. Электронная и ионная литография.	13
Тесты к лекции 1.1	14
1.2. Физическая сущность вакуума и его свойства	16
1.2.1. Давление газа. Тепловые скорости молекул.	16
1.2.2. Объем газа, ударяющегося о единицу поверхности в единицу времени	17
1.2.3. Длина свободного пробега молекул	18
1.2.4. Степени вакуума.	19
Тесты к лекции 1.2	20
1.3. Термовакuumные процессы.	21
1.3.1. Физические процессы в вакууме	21
1.3.2. Растворимость газов в твердом теле	21
1.3.3. Диффузия газов в твердых телах. Законы Фика	22
Тесты к лекции 1.3	24
1.4. Создание вакуумной среды	25
1.4.1. Получение вакуума различных степеней	25
1.4.2. Основное уравнение вакуумной техники.	26
1.4.3. Определение времени откачки.	27
1.4.4. Дополнительные источники газа в вакуумной системе	29
Тесты к лекции 1.4	30
1.5. Низковакуумные средства откачки.	31
1.5.1. Пластинчато-роторные насосы	31
1.5.2. Спиральные вакуумные насосы.	32
1.5.3. Винтовые насосы	34
1.5.4. Двухроторные насосы (насосы Рутса).	34
Тесты к лекции 1.5	36
1.6. Высоковакуумные средства откачки.	37
1.6.1. Диффузионные насосы	37
1.6.2. Молекулярные насосы.	39
1.6.3. Сорбционные насосы	40
1.6.4. Криосорбционные насосы	41
1.6.5. Ионные насосы.	43

Тесты к лекции 1.6	45
1.7. Средства измерения вакуума и вспомогательные элементы вакуумных систем	46
1.7.1. Средства измерения вакуума	46
1.7.2. Вспомогательные элементы вакуумных систем	48
Тесты к лекции 1.7	53
1.8. Формирование электронных потоков	54
1.8.1. Электронные пучки	54
1.8.2. Термоэлектронная эмиссия	56
1.8.3. Фотоэлектронная эмиссия	57
1.8.4. Автоэлектронная эмиссия.	57
Тесты к лекции 1.8	58
1.9. Взаимодействие электронных потоков с материалами	59
1.9.1. Эффекты взаимодействия электронных пучков с материалом	59
1.9.2. Параметры электронных пучков	63
Тесты к лекции 1.9	64
1.10. Формирование ионных потоков и их взаимодействие с материалами	65
1.10.1. Ионные источники	65
1.10.2. Взаимодействие ионных пучков с материалами	67
Тесты к лекции 1.10	71
1.11. Формирование атомарных и молекулярных потоков	73
1.11.1. Формирование атомарных и молекулярных потоков испарением	73
1.11.2. Формирование атомарных и молекулярных потоков ионным распылением	74
Тесты к лекции 1.11	75
1.12. Взаимодействие атомарных и молекулярных потоков с материалами	77
1.12.1. Адгезия	77
1.12.2. Тонкопленочные покрытия	77
Тесты к лекции 1.12	81
1.13. Тлеющий разряд в вакууме	82
1.13.1. Применение газоразрядной плазмы	82
1.13.2. Параметры газоразрядной плазмы	83
1.13.3. Кривые Пашена	85
Тесты к лекции 1.13	86
1.14. Дуговой разряд в вакууме	87
1.14.1. Переход из тлеющего разряда в дуговой	87
1.14.2. Параметры дугового разряда	88
Тесты к лекции 1.14	91
1.15. Методы нанесения тонких пленок	92
1.15.1. Классификация методов нанесения тонких пленок	92
1.15.2. Характеристики методов нанесения тонких пленок	95

Тесты к лекции 1.15	99
1.16. Геометрические характеристики и физические свойства тонких пленок	100
1.16.1. Толщина пленки и ее неравномерность по диаметру подложки	100
1.16.2. Неравномерность толщины пленки. Закон Кнудсена	101
1.16.3. Однородность состава тонкопленочного покрытия	102
Тесты к лекции 1.16	104
1.17. Вакуумное технологическое оборудование	105
1.17.1. Составные части типового вакуумного технологического оборудования	105
1.17.2. Оборудование для вакуумного осаждения тонкопленочных покрытий	106
1.17.3. Оборудование для ионного травления	108
1.17.4. Оборудование для обезгаживающего прогрева и отжига	109
Тесты к лекции 1.17	109
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	110
2.1. Методические указания по выполнению лабораторных работ	110
Лабораторная работа № 1. Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	110
Контрольные вопросы	113
Лабораторная работа № 2. Тлеющий разряд в вакууме	114
Контрольные вопросы	121
Лабораторная работа № 3. Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления	122
Контрольные вопросы	127
Лабораторная работа № 4. Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок	128
Контрольные вопросы	133
2.2. Методические указания по выполнению домашнего задания	134
2.2.1. Теоретическая часть	134
2.2.2. Практическая часть	138
2.2.3. Методические указания по оформлению домашнего задания	140
3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ	141
3.1. Примерная базовая программа дисциплины	141
3.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине	149
3.2.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий	149
3.2.2. Варианты экзаменационных билетов	151
3.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов плакатов и других дидактических материалов	155
Заключение	161
Литература	163

Приложение. Рабочая тетрадь	164
П1. ЛР № 1. Формирование вакуумной среды и измерение ее параметров	165
1. Краткий конспект теоретической части	167
2. Результаты измерений	169
3. Анализ экспериментальных данных	169
4. Выводы	169
5. Контрольные вопросы	170
П2. ЛР № 2. Тлеющий разряд в вакууме	171
1. Краткий конспект теоретической части	173
2. Результаты измерений	174
3. Построение экспериментальной зависимости краевого угла смачивания от времени обработки	175
4. Анализ результатов	175
5. Выводы	176
6. Контрольные вопросы	176
П3. ЛР № 3. Формирование тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления	177
1. Краткий конспект теоретической части	179
2. Формирование покрытия методом термического испарения	181
3. Формирование покрытия методом магнетронного распыления	182
4. Выводы	183
5. Контрольные вопросы	183
П4. ЛР № 4. Исследование геометрических и физических характеристик тонких пленок	184
1. Краткий конспект теоретической части	186
2. Результаты измерений	187
3. Сравнение измеренной и рассчитанной толщины	188
4. Результаты измерения адгезии	188
5. Сравнение значений адгезии тонкопленочных покрытий, полученных разными методами	188
6. Выводы	189
7. Контрольные вопросы	189
П5. ЛР № 5. Методика формирования тонких пленок методом магнетронного распыления на установке MANTIS QPREP 500	190

Учебное издание

Михайлов Валерий Павлович
Моисеев Константин Михайлович
Панфилов Юрий Васильевич

**ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Л.В. Забродина*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
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 27.11.2023. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. 17,39 л. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com