

## 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

**Цель курса** — получение теоретических знаний и практических навыков расчета и выбора параметров высоковакуумных технологических процессов и оборудования, используемых в приборостроении.

### **Задачи курса:**

- 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 одним из основных направлений приборостроения.

Согласно определению 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 газовыделения в процессе эксплуатации электровакуумных 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 <sub>2</sub> , Al+ZrO <sub>2</sub> , Al+SiO <sub>2</sub> , Cu, Cu+SiO <sub>2</sub> , Cu+ZrO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 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.
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 другие	Сувенирная и другая продукция, в которой покрытия осуществляют декоративные функции; элементы интерьеров и т. д.
Адгезионные и «зародышевые» слои	Ti, Cr, Ni и др.	Применяются для улучшения адгезионных свойств в случаях, когда при непосредственном нанесении требуемых материалов на поверхность объекта не удается обеспечить необходимую адгезию и механические характеристики покрытия, а также для использования в качестве «зародышевого слоя» при необходимости осаждения покрытий гальваническими или химическими методами на поверхность диэлектрических объектов
Маскирующее	Al, Ni, SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> и др.	Имеют в несколько раз более низкую скорость травления, чем маскируемый материал, применяются 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 монокристаллическом, так и в тонкопленочном виде. В качестве инструмента травления используются: газоразрядная плазма (инертные и химически активные газы); ионный луч ( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Kr}^+$ ,  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{F}^+$  и др.); атомный и молекулярный пучок ( $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  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 по 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)	
	Плазмо-химическое (ПХТ)	

Примечание. 1 — подложка; 2 — слой толщиной  $h$ ; 3 — маска;  $\delta$  — 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 электронная проекция 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 по всей поверхности 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 (ЭЛЛ) 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. 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 газовыделения из материала;
- б) нагреть материал до заданной температуры в вакууме;
- в) очистить поверхность материала от загрязнений.

### **3. Что собой представляет 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) для формирования сфокусированного электронного пучка.