

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика»

2013

Орликов Леонид Николаевич.

Технология приборов оптической электроники и фотоники: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2013. - 27 с.

Целью настоящего пособия является углубление понимания процессов, происходящих при формировании оптических материалов и изделий. Уделяется внимание процессам обеспечения вакуума при формировании нанослоев, процессам подготовки изделий к технологическим операциям. Рассматриваются варианты задач по осаждению пленок и сорбционно-десорбционным процессам, сопровождающим формирование оптических покрытий в вакууме.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования (ПК-14);
- способностью разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы (ПК-20);
- способностью выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПК-21);
- способностью конструировать в соответствии с техническим заданием типовые оптические и оптоинформационные системы с использованием стандартных средств компьютерного проектирования; проводить расчеты (ПК-25).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Технология приборов оптической электроники и фотоники».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____С.М. Шандаров
«__» _____ 2013 г.

Технология приборов оптической электроники и фотоники

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления 200700.62 - «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____Л.Н.Орликов
«__» _____ 2013 г

Содержание

Введение	5
Практическое занятие № 1. Типовые технологические процессы в технологии приборов оптической электроники и фотоники	6
1.1 Цель занятия	6
1.2 Методические указания	6
1.2.1 Конструирование типовой схемы подготовки материалов оптической электроники к технологическим операциям (процессы очистки)	6
1.2.2 Конструирование последовательности технологических операций изготовления оптического волновода	7
1.2.3 Конструирование схемы измерения толщины оптической пленки ..	8
1.3 Задание для самостоятельной проработки темы	8
Практическое занятие № 2. Математическое моделирование и расчет технологических процессов	9
2.1 Цель занятия	9
2.2 Методические указания	9
2.2.1 Математическое моделирование процесса откачки газа для формирования оптического волновода (расчет вакуумной системы)	9
2.2.2 Математическое моделирование процесса формирования оптических пленок методом термического испарения материалов в вакууме	12
2.3 Задание для самостоятельной проработки темы	14
2.4 Задачи по теме	14
Практическое занятие № 3. Расчеты электрофизических параметров технологических процессов	16
3.1 Цель занятия	16
3.2 Методические указания	16
3.2.1 Некоторые соотношения для расчета электрофизических параметров источников частиц	18
3.2.1.1 Исследование плазменного источника электронов	18
3.2.1.2 Исследование процесса нанесения пленок магнетронным способом	19
3.2.1.3 Исследование плазмы газового разряда методом зондов	21
3.2.1.4 Исследование процесса электронно-лучевой обработки материалов в безмасляном вакууме	22
3.2.1.5 Исследование процесса ионной обработки материалов	23
3.2.1.6 Исследование устройства для ионно-плазменного распыления материалов	24
Практическое занятие № 4 Конференция. Презентация электрофизических технологий для изготовления приборов оптической электроники	25
Список литературы	26

Введение

Целью преподавания курса “Технология приборов оптической электроники и фотоники” является необходимость овладения научными основами проектирования и управления сложными технологическими процессами и оборудованием. Изучение дисциплины также определяется тем, что при выполнении практических заданий будущий специалист приобретает навыки рационального подхода к расчету и конструированию приборов с учетом требований того или иного технологического процесса.

В задачи изучения дисциплины входят изучение не только традиционных технологических процессов, но и основ проектирования технологической подготовки производства с применением ЭВМ, а также построение алгоритмов, формализованных и математических моделей процессов и их автоматизация. Студенты должны приобрести навыки проектирования и эксплуатации особо сложного технологического оборудования, умение проводить научные исследования и эксперименты, обрабатывать и анализировать полученные результаты. Основная задача дисциплины – привить студентам навык в подходах к освоению сложных технологических процессов с применением высоких технологий.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследования (ПК-14);
- способностью разрабатывать элементы и устройства фотоники и оптоинформатики на основе существующей элементной базы (ПК-20);
- способностью выбирать необходимое оборудование и способ контроля параметров устройства (ПК-21);
- способностью конструировать в соответствии с техническим заданием типовые оптические и оптоинформационные системы с использованием стандартных средств компьютерного проектирования; проводить расчеты (ПК-25).

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать физические принципы работы приборов электроники и фотоники; основные приемы построения последовательностей технологических операций изготовления приборов электроники и фотоники;

уметь ориентироваться в многообразии современных приборов оптической электроники и фотоники; разрабатывать принципиальные схемы реализации технологий по изготовлению приборов оптической электроники и фотоники; определять экспериментальным или расчетным путем оптимальные технологические режимы формирования электронных приборов; использовать для моделирования отдельных технологических операций стандартные программные продукты.

Практическое занятие № 1. Типовые технологические процессы в технологии приборов оптической электроники и фотоники

1.1 Цель занятия

1. Конструирование типовой схемы подготовки материалов оптической электроники к технологическим операциям (процессы очистки). (ПК-25)
2. Конструирование последовательности технологических операций изготовления оптического волновода (ПК-25).
3. Конструирование оптической схемы измерения толщины пленки «на просвет» (ПК-25).

1.2 Методические указания

1.2.1 Конструирование типовой схемы подготовки материалов оптической электроники к технологическим операциям (процессы очистки)

Необходимость подготовки поверхности изделий под технологические операции вызвана тем, что в приповерхностных слоях материалов располагаются различные солевые и окисные пленки, растворенные газы.

В таблице 1.1 представлена общая схема очистки изделий оптической электроники. В каждой конкретной ситуации в общую схему могут добавляться или исключаться отдельные элементы.

Таблица 1.1 - Общая схема очистки деталей

Обезжиривание	→ →	Промывка	→ →	Химическая обработка	→ →	Промывка
↑		↑		↑		↑
Растворители		Трихлорэтилен		Кислота, щелочь		Деионизованная вода
Сушка	→ →	Отжиг	→ →	Травление	→ →	Консервация
↑		↑		↑		
Азот		H ₂ , O ₂ вакуум		Плазма, газ		

1.2.2 Конструирование последовательности технологических операций изготовления оптического волновода

подавляющее число приборов оптической электроники изготавливаются по пленочной технологии с путем испарения материалов в вакууме. Для получения приборов важна последовательность технологических операций.

Перед конструированием определяют «участников», наиболее влияющих на процесс. Такими участниками являются: вакуумная камера, испаритель материала, испаряемая навеска, подложка. Вначале из справочников следует получить сведения об участниках процесса (марка, температура испарения, степень чистоты, что делалось в вакуумной камере до настоящего времени).

В таблице 1.2 и 1.3 представлена общая схема технологического процесса изготовления планарного волновода на стекле.

Таблица 1.2 – Первый этап: очистка

Участники	Справка	Очистка	Монтаж
Подложка	Стекло ОП-10	Спирт	Держатели
Навеска	Свинец	Механическая	5 грамм
Испаритель	Железо, лист	Механическая	Для токового нагрева
Камера	УВН-2М	Ацетон	
Термопара	Хромель-копель	-	На подложку
Свидетель	Стекло	Спирт	Визуальный контроль
Трафарет	Полоски никеля	Спирт	Под подложку

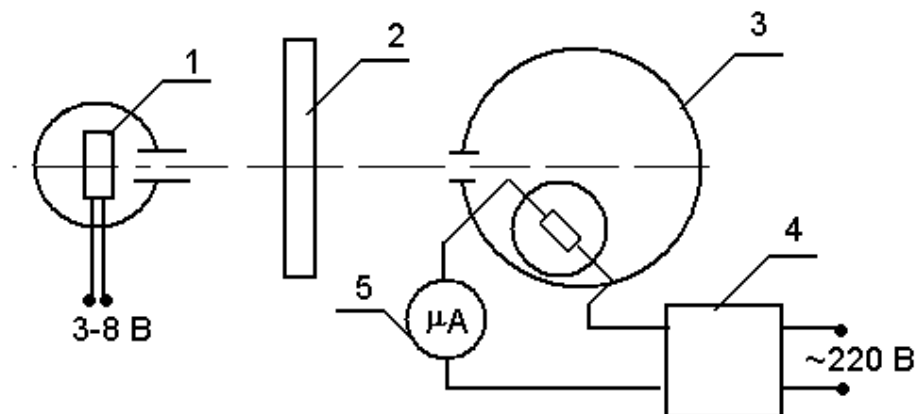
Таблица 1.3 – Второй этап – откачка (Нужен алгоритм включения и выключения установки)

Закрывать все вентили	Запуск форвакуумного насоса	Откачка 10 минут	Запуск диффузионного насоса	Откачка 20 минут
Прогрев подложки до 200 ⁰ С 5 ⁰ /мин	Контроль вакуума (<0,01Па)	Обезгаживание испарителя (200 ⁰ С)	Формирование пленки, 1000 ⁰ С, 5 сек, 0,5 мкм	Отжиг пленки 200 ⁰ , 30 мин

Этап 3 - Выход из технологического процесса (согласно алгоритму выключения установки)

1.2.3 Конструирование схемы измерения толщины оптической пленки

На рис. 1.1 представлена схема оптических измерений толщины пленки «на просвет»



1- светодиод, 2- измеряемый образец, 3- фотометрическая головка, 4- источник питания, 5- индикатор фототока.

Рисунок 1.1 – Схема оптических измерений толщины пленки

Расчет толщины пленки d проводится по формуле:

$$I\lambda = (I_{пад} - I_{отр})e^{-\kappa^1 d}$$

где $I_{пад}$ – интенсивность падающего света;

$I_{отр}$ – интенсивность отраженного света

κ^1 – коэффициент поглощения излучения, зависящий от природы вещества пленки и от длины волны падающих лучей, см^{-1} ;

d – толщина пленки, см.

Значения κ^1 для ряда металлов приведены в табл 1.4. Эти значения получены для излучения с длиной волны 589 нм.

Таблица 1.4 - Коэффициент поглощения излучения

Материал	Алюминий	Медь	Никель	Стекло
κ^1	10^6	$5,6 \times 10^5$	$7,8 \times 10^5$	7×10^{-1}

1.3 Задание для самостоятельной проработки темы

1. Разработать технологический процесс изготовления конкретного оптоэлектронного прибора (ПК-20).

2. Проанализировать известные решения, оценить значимость и перспективы результатов исследований (ПК-14)

3. Обосновать метод решения проблемы и выбрать типовую установку для решения проблемы (ПК-21).

4. Обосновать конкретно: какой материал применяется, какая толщина наносля необходима, какие токи и напряжения используются, какой вакуум. Спроектировать последовательности технологических операций изготовления конкретного прибора оптической электроники. Спроектировать процесс подготовки под технологические операции, спроектировать последовательность формирования пленки. Спроектировать схему измерения толщины и адгезии пленки (ПК-25).

Варианты формирования оптоэлектронных элементов.

1. Планарный волновод на стекле (навеска из свинца)
2. Отражатель света (толщина пленки алюминия 1 мкм)
3. Волновод на стекле на основе оксида цинка
4. Формирование легирующей пленки железа на ниобате лития
5. Формирование полупрозрачного покрытия из титана на ниобате лития
6. Формирование полупрозрачного покрытия на стекле через трафарет
7. Формирование двухслойного покрытия алюминий-медь толщина до 5 мкм
8. Формирование проводящей титановой пленки на органическом диэлектрике.
9. Ионное травление пленки MgF_2 на кристалле калий титанил фосфида.
10. Формирование диэлектрической теплопроводящей пленки для мощного осветительного светодиода.

Практическое занятие № 2. Математическое моделирование и расчет технологических процессов

2.1 Цель занятия

1. Математическое моделирование процесса откачки газа для формирования оптического волновода (расчет вакуумной системы) (ПК-21, ПК-25)
2. Математическое моделирование процесса формирования оптических пленок методом термического испарения материалов в вакууме (ПК-21, ПК-25)

2.2 Методические указания

2.2.1 Математическое моделирование процесса откачки газа для формирования оптического волновода (расчет вакуумной системы)

Расчет вакуумной системы необходим для определения основных ее параметров: требуемой производительности откачных средств и времени откачки до рабочего давления.

Суммарный поток газовой выделенной складывается из газовой выделенной стенок камеры, газовой выделенной из изделий, газовой выделенной из различных

вводов в камеру и потока напускаемого рабочего газа.

Поток газовыделения с поверхности камеры Q определяется произведением площади поверхности A на коэффициент удельного газовыделения g и коэффициент поверхности Ω :

$$Q = Ag\Omega. \quad (2.1)$$

Величины удельного газовыделения приводятся в соответствующей справочной литературе (для стекла и керамики $g=10^{-4}$ Па м³/с с 1м²). Коэффициент поверхности зависит от качества механической обработки материала (для стали достигает 10).

В вакуумной камере всегда имеется много вводов: для датчиков, для термодар, для ввода напряжения и т.д. Обычно число вводов в реальной установке больше 10. Поток натекания через такие элементы Q определяется произведением чувствительности течеискателя $\kappa = 10^{-6}$ на число течей N .

$$Q = \kappa N. \quad (2.2)$$

Таким образом, суммарный поток газов в вакуумной камере определится выражением:

$$\sum Q = (Ag\Omega)_\kappa + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (2.3)$$

где первое слагаемое относится к камере, второе к детали, третье к течеискателю, четвертое к потоку напускаемого газа. Обычно напускаемый поток составляет 30 – 80 см³ атм/час. Поскольку заводы выпускают оборудование с производительностью в литрах в секунду, то выбранную величину напуска газа следует умножить на переводной коэффициент $2,4 \cdot 10^{-4}$, т.е

$$Q_{\text{нап}} = (30-80) \cdot 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ тор л/с.}$$

Необходимая скорость откачки высоковакуумного насоса определится отношением суммарного потока в вакуумной камере Q к рабочему давлению $P_{\text{раб}}$, при котором проводится технологический процесс.

$$S_n = \sum Q / P_{\text{раб}}. \quad (2.4)$$

Скорость откачки высоковакуумного насоса следует согласовывать со скоростью откачки форвакуумного насоса. Скорость откачки форвакуумного насоса определяется как отношение газового потока на выходе диффузионного насоса Q к выходному давлению диффузионного насоса ($P_{\text{вых}}$).

$$S_\phi = \sum Q / P_{\text{вых}}. \quad (2.5)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{\text{вых}} = 10$ Па (0,1 мм рт ст). Следует заметить, что определенная нами скорость откачки насоса меньше паспортной и соответствует производительности при давлении 10 Па. Поэтому, следует проанализировать кривые производительности форвакуумных насосов от давления, и выбрать тот насос, который обеспечивает требуемую скорость откачки при давлении 10 Па.

Из основного уравнения вакуумной техники следует, что скорость откачки объекта S_o всегда меньше скорости откачки насоса S_n . При проектировании систем, если проводимость коммуникаций неизвестна, выбирают скорость насоса с коэффициентом запаса γ :

$$S_n = \gamma S_o, \quad (2.6)$$

где $\gamma = 1,25$ для форвакуумных насосов; $\gamma = 2,00$ для высоковакуумных насосов.

При нестационарном поступлении газа или изменении объема, поток натекания определяется соотношением:

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt. \quad (2.7)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_n} \quad (2.8)$$

где V – объем, откачиваемого объекта;

$V' = 10^3$ – приведенный объем;

P_1, P_2 – начальное и конечное давление.

В расчетах времени откачки в диапазоне давлений, когда существенно возрастают газовыделения (от 10 до 0,01 Па и менее) необходимо учитывать приведенный объем V' , увеличенный пропорционально уменьшению давления. (Например, обеспечение рабочего вакуума от 10 до 0,01 Па соответствует, уменьшению давления на три порядка). Соответственно, приведенный объем составит величину $V' = 10^3$).

При откачке на форвакууме газовыделениями пренебрегают ввиду их малости. В этом случае время откачки определяют по формуле:

$$t = V / S_o (\ln P_1 / P_2). \quad (2.9)$$

При откачке газа в диапазоне от атмосферного давления до 133 Па (1 мм рт. ст.) газ достаточно вязкий и проводимость трассы почти не влияет на эффективную скорость откачки. В этом случае время откачки можно рассчитать по формуле:

$$t = 8V / S_n. \quad (2.10)$$

Корректирующий расчет учитывает особенности работы системы. (Газовыделение при повышении температуры, проницаемость газа через прокладки и т.д.). Обычно время проведения процесса откачки, включая запуск высоковакуумного оборудования не должно превышать 1 час. Если оно мало – следует корректировать коэффициент поверхности или приведенный объем. Если время проведения вакуумного этапа больше 1 часа – следует корректировать напуск газа и производительность откачных средств.

2.2.2 Математическое моделирование процесса формирования оптических пленок методом термического испарения материалов в вакууме

Из условия равновесия пар-твердое тело, пар-жидкость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T}, \quad (2.11)$$

где P_s - давление насыщенного пара, Па;
 A и B - постоянные, характеризующие вещество;
 T - температура испаряемого вещества, К.

Значения A и B для ряда веществ приведены в [1].

Температура вещества, при которой давление насыщенного пара P_s равно 1,33 Па (10^{-2} торр), называют условной температурой испарения.

При P_s меньших 10^{-2} Па и давлении остаточного газа в технологической камере не более 10^{-2} Па скорость испарения, т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется:

$$W = P_s \sqrt{\frac{m}{2\pi k T}},$$

где W - скорость испарения, кг / ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$);
 m - масса молекулы, кг;
 k - постоянная Больцмана;
 T - температура испарения, К.

Поток испаренного вещества, приходящийся на единицу телесного угла, есть

$$dM = \frac{M}{4\pi}$$

где M - общее количество вещества, испаренного с испарителя dS_1 за время t , кг.

В пределах пространственного угла $d\omega$ на площадку dS_2 подложки поступает

$$dM = \frac{M}{4\pi} d\omega, \quad (2.12)$$

Через любое сечение конуса, ограниченного $d\omega$, проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в dS_1 и радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса $d\omega$. Если нормаль к dS_2 составляет угол φ с осью конуса, а расстояние от dS_1 до площадки dS_2 есть r , то

$$d\omega = \frac{dS_2 \cdot \cos \varphi}{r^2}. \quad (2.13)$$

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности подложки, с учетом выражения (2.12) и (2.13) есть:

$$dM = \frac{M}{4\pi} \cdot \frac{\cos \varphi}{r^2} \quad (2.14)$$

Это количество обратно пропорционально квадрату расстояния от испарителя до приемной поверхности (подложки) и прямо пропорционально косинусу угла, составляемого направлением потока с нормалью к подложке.

Толщину пленки можно определить через плотность и объем конденсата на подложке

$$dM = \rho \cdot dV = \rho \cdot dS_2 \cdot d, \quad (2.15)$$

где ρ - плотность конденсата;

d - толщина пленки на подложке;

V - объем конденсата;

С учетом выражения (2.5) и (2.4) получаем выражение для толщины пленки

$$d = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{\cos \varphi}{r^2}, \quad (2.16)$$

Если подложка представляет собой плоскую поверхность, расположенную на расстоянии h от испарителя, то толщина пленки на подложке в любой точке A с координатами X , Y может быть определена по выражению:

$$d(x, y) = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (2.17)$$

Толщина пленки над испарителем (точка 0 при $X=0$, $Y=0$)

$$d_o = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (2.18)$$

Отношение толщин в точках A и 0 будет:

$$\frac{d(x, y)}{d_o} = \frac{h^3}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}}. \quad (2.19)$$

2.2.3. Расчет толщины наносимой пленки в случае поверхностного испарителя

Для поверхностного испарителя количество испаряемого вещества зависит от направления испарения. В соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле $d\omega$ по направлению r , образующему угол θ с нормалью к поверхности испарителя, равно

$$dM = \frac{M}{\pi} \cdot \cos \theta \cdot d\omega. \quad (2.20)$$

Используя формулы (2.5 - 2.9) и учитывая формулу (2.10) можно получить выражение для толщины пленки, конденсированной в любой точке A подложки, находящейся параллельно плоскости испарителя

$$d(x, y) = \frac{M}{\pi\rho} \cdot \frac{h^2}{(h^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (2.21)$$

Соответственно отношение толщин пленки в точках A и 0 будет

$$\frac{d(x, y)}{d_0} = \frac{h^4}{(h^2 + x^2 + y^2)^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}. \quad (2.22)$$

Выражения (2.19) и (2.22) используются для оценки равномерности толщины пленки на подложке при использовании соответствующих испарителей.

Количество газа Q , выделенного или откачанного вакуумной системой объемом V определяется тем, насколько произойдет изменение давления ΔP за время Δt

$$Q = V \Delta P / \Delta t$$

2.3 Задание для самостоятельной проработки темы (ПК-20, ПК-21, ПК-25)

1. Провести расчет вакуумной системы для темы самостоятельного задания.
2. Провести расчеты массопереноса на подложку по теме самостоятельного задания.
3. Провести корректирующий расчет вакуумной системы.
4. Почему скорость откачки газа из объекта всегда меньше скорости откачки насоса?
5. Оцените изменение потока по изменению давления в течение определенного времени для конкретных условий
6. Как аналитически можно оценить равномерность формирования покрытия?
7. Как влияет угол наклона подложки на распределение толщины пленки по подложке?
8. Как оценить КПД процесса формирования пленки?
9. Как меняется толщина формируемой пленки при повышении давления в вакуумной камере от 0,01 до 1 Па?
10. Как определяется толщина пленки «на просвет»?

2.4 Задачи по теме

Задача 2.1. При давлении 1 Па пробег молекулы равен 5 мм. Используя понятие длины свободного пробега молекулы, вычислить взаимное

расположение испарителя и подложки при давлении в камере 0,5 Па.

Задача 2.2. В процессе термовакuumного испарения испарилась навеска весом 10^{-4} кг. При расстоянии до подложки 0,2 м определить толщину напыленной пленки. Плотность материала навески принять равной $7,6 \text{ г/см}^3$.

Задача 2.3. Определить изменение давления за время напыления пленки в течение 10 сек в камере объемом $0,1 \text{ м}^3$, если количество поглощенного газа составляет $10^{-2} \text{ Пам}^3/\text{с}$.

Задача 2.4. Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки S_1 составляет 10^{-3} м^2 . Расстояние до испарителя $r = 0,5 \text{ м}$.

Задача 2.5. При измерении толщины титановой пленки «на просвет» показания тока с регистрирующего прибора уменьшились в 2 раза (от 100 до 50 мкА). Определить толщину пленки, если постоянная прибора для титана $K = 10^{-6}$.

Задача 2.6. Суммарный поток газовой выделения в вакуумную камеру составляет $0,02 \text{ Па м}^3/\text{с}$. Процесс должен проводиться при давлении 10^{-2} Па . Определить необходимую производительность высоковакуумного насоса.

Задача 2.7. Камера сообщается с высоковакуумным насосом производительностью 2000 л/с через отверстие диаметром 6 см. Определить эффективность использования насоса.

Задача 2.8. Рассчитать мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять: коэффициент теплопроводности $a = 10^{-4}$, энергия испарения $L = 20 \text{ Дж/см}^2$, плотность материала $\rho = 7,6 \text{ г/см}^3$, диаметр пучка $d = 0,1 \text{ см}$, глубина проплавления температуры от луча $b = 0,5 \text{ см}$.

Задача 2.9. Рассчитать Ларморовский радиус траектории электрона в магнетроне с магнитной индукцией 0,2 Тл, работающем при напряжении 5 кВ.

Задача 2.10. Рассчитать плотность электронного потока, которую можно извлечь из плазмы источника на основе тлеющего разряда с объемной концентрацией $n_e = 10^{16} \text{ 1/м}^3$. Температуру электронного газа принять равной 10^4 К .

Практическое занятие № 3. Расчеты электрофизических параметров технологических процессов

3.1 Цель занятия

Освоение электрофизических расчетов (ПК- 21, ПК-25)

1. Расчет мощности источника заряженных частиц
2. Расчет температур, скоростей и концентраций частиц
3. Расчет пробегов частиц
4. Расчет коэффициентов ионизации
5. Расчет параметров источников частиц по творческому заданию: расчет электрофизических параметров электронного или ионного источника для конкретной технологической цели.

3.2 Методические указания

Расчет электрофизических параметров можно продемонстрировать на примере расчета магнетрона, в котором расположен термокатод. Расчет лучше вести в виде таблицы. Исходные параметры: $U=1000$ В, $I= 0,5$ А, расстояние между катодом и анодом $d =1$ см

Параметр	Формула	Значение
1	2	3
Скорость электрона в электрическом поле в вакууме	$V_e = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$	$2,6 \cdot 10^7$ м/с
Скорость иона в электрическом поле	V_i	$6 \cdot 10^5$ м/с
Сечение столкновения	$\delta = 3 \cdot 10^5 / T_e$	$\delta = 10^{-6}$ – дуга
Температура газа	$T = P/nk$	319К
Электронная температура (T_e)	$\frac{3}{2} kT_e = eU_i$	$1,1 \cdot 10^5$ К
Энергия, получаемая электроном на участке пробега	$\Delta W = eE\lambda_e$	$1,8 \cdot 10^{-19}$ Дж
Энергия теплового движения электрона	$W_T = 3/2 kT_e$	$2,67 \cdot 10^{-19}$ Дж
Коэффициент термического равновесия	$\Delta W / W_T$	0,67
Плотность электрического тока	$J = I/S_s$	$5 \cdot 10^{-4}$ А/см ²
Напряженность поля	$E = U/d$	$2 \cdot 10^4$ В/м
Концентрация плазмы	$J = en_e V_e$	$1,2 \cdot 10^8$ 1/см ³

Продолжение таблицы

1	2	3
Частота столкновений электронов	$v_e = (ne^2/\pi m)^{1/2} = 8980n^{1/2}$	10^{12} Гц
Пробег молекулы газа ($\lambda_{газ}$)	$(\lambda_{газ}) = 5 \cdot 10^{-5}/P$	10^{-3} м
Пробег иона	$\lambda_i = \sqrt{2} \lambda_{газ}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$ м
Пробег электрона	$\lambda_e = 4 \sqrt{2} \lambda_{газ}$	$5,64 \cdot 10^{-3}$ м
Время пробега электрона	$\tau_{es} = \lambda_e/v_e = 1/V_e n_e Q_e$	$0,83 \cdot 10^{-3}$ сек
Газокинетический параметр	$\delta = (r_1 + r_2)$	$r = 1,7 \cdot 10^{-8}$ см N_2, O_2, H_2
Пробег после соударения	$\lambda_{п} = 1/n\delta$	
Сечение рассеяния	$Q = 1/\lambda_{п}$	
Минимальное сеч взаимодействия	$S_e = n_e Q_e$	10^{-6} 1/см
Коэффициент амбиполярной диффузии	$D = 1/3 v_i \cdot \lambda_i$	$2,79 \cdot 10^2$ м ² /с
Подвижность электронов	$\mu_e = V_e/E$	$1,3 \cdot 10^3$ м ² /В·с
Подвижность ионов	$\mu_i = v_i/E$	30 м ² /В·с
Дебаевский радиус	$r = 5 \sqrt{\frac{T_e}{n}}$ см	$1,7 \cdot 10^{-1}$ см
Степень термической ионизации (СИ) ($T=2500$ К)	$\alpha = 0,2 \cdot 10^{-7} \frac{a}{\sqrt{P}} T^{5/4} \exp(-\frac{5800U_i}{T_e})$	0,7
Коэффициент вторичной эмиссии	$\gamma e^{\alpha d} = 1$	$\gamma = 2,9 \cdot 10^{-3}$
Напряжение пробоя (В=300, А=15, d=4 см)	$U = \frac{Bpd}{\ln[Apd / \ln(1/\gamma)]}$	760 В
Проводимость плазмы	$\delta = n_e e V_e / E$	25 ом/м ²
Кулоновский логарифм	$\Lambda = 23,4 - 1,15 \lg n - 3,45 \lg T_e$	$8,4 < 50$
Ленгмюровская (плазменная) частота	$\omega_0 = (\frac{4\pi n e^2}{m_e})^{1/2}$	$5,94 \cdot 10^3$
Время существования области декомпенсации зарядов	$\tau_D = 1/\omega_0$	$1,6 \cdot 10^{-2}$ сек

Окончание таблицы

1	2	3
Ларморовский радиус ($B=0,3$ Тл)	$R=mV/eB$	$5,68 \cdot 10^{-6}$ м
Ларморовская частота	$f=gH/mc$	$2,55 \cdot 10^{-2}$
Ларморовская круговая частота вращения	$\omega=2\pi f=1/T$	$5,6 \cdot 10^9$
Период вращения электрона	$T=2\pi m/eB$	$178,4 \cdot 10^{-12}$
Мера замагниченности	λ/R	10^2
Коэффициент диффузии ($B=0$)	$D_0=\lambda_e V_e/3$	$4,88 \cdot 10^4$
Параметр Холла	$\omega_e \tau_e$	4,93
Коэффициент анизотропии	D_0/D_{\perp}	$2,6 \cdot 10^{13}$
Эквивалентное давление	$P_E = P_0 \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$	$30 \cdot 10^6$

3.2.1 Некоторые соотношения для расчета электрофизических параметров источников частиц

3.2.1.1 Исследование плазменного источника электронов

1. Максимальная плотность тока в сфокусированном пучке:

$$j_{\max} = j_0 \cdot [(e \cdot U / k \cdot T_e) + 1], \quad (3.1)$$

где j_0 – плотность тока эмиссии;
 T_e – электронная температура

Если $eU/kT_e \gg 1$ соотношение (3.1) можно представить в виде:

$$j_{\max} = e^2 \cdot n_e \cdot U / (\pi \cdot n \cdot k \cdot T_e)^{1/2},$$

где n_e – концентрация плазмы.

2. Глубина ВЧ – модуляции тока пучка:

$$Km = 2 \cdot \Delta I / I_{\max},$$

где ΔI - амплитуда переменной составляющей тока;
 I_{\max} - максимальный ток пучка.

3. Параметр эффективности извлечения:

$$\alpha = I / I_p,$$

где I_p - ток разряда.

4. Энергетическая эффективность характеризует экономичность эмиттера:

$$H = I / P_{\text{э}},$$

где I – ток электронной эмиссии, мА;

$P_{\text{э}}$ – мощность, затраченная на его получение, Вт.

$$H = \alpha / U_p,$$

где U_p – напряжение горения разряда

5. Потенциальная энергия электронов в плазме определяется их кулоновским взаимодействием с ионами:

$$W = K \cdot T_e / (6 \cdot V_d \cdot n_e),$$

где V_d – объем Дебаевской сферы.

6. Плотность тока, извлекаемого из плазмы (в случае $V_d \cdot n_e \gg 1$, т.е. плазма ведет себя как идеальный газ):

$$j = e \cdot n_e [k \cdot T_e / (2 \cdot \pi \cdot m)]^{1/2} = 2.1 \cdot 10^{-16} \cdot n_e \cdot \sqrt{T_e}$$

7. Связь между протяженностью слоя d , извлеченным из плазмы электронным током I извлекающим напряжением U определяется законом «степени 3/2»:

$$I = (4 \cdot \varepsilon_0 / 9) \cdot \sqrt{2 \cdot e / m} \cdot (U^{3/2} / d^2) \cdot S \cdot f(r),$$

где S – площадь плазменного катода, м²;

$f(r) \geq 1$ – коэффициент, зависящий от геометрии извлекаемого промежутка.

3.2.1.2 Исследование процесса нанесения пленок магнетронным способом

1. Дебаевский радиус экранирования:

$$\lambda_d = 49 \cdot (T / n)^{1/2},$$

где T – температура плазмы

n – концентрация ионов или электронов [1/м³].

2. Число частиц в Дебаевской сфере:

$$N_d = (4 \cdot \pi / 3) \cdot n \cdot \lambda_d^3$$

3. Ларморовский радиус траектории электрона:

$$R_L = V_{\perp} \cdot m / (e \cdot z \cdot B),$$

где m – масса электрона;

e – заряд электрона;

z – кратность заряда частицы, в первом приближении в условиях работы магнетрона, равна 1.

$$V_{\perp} = V \cdot \sin \theta = 5.9 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U}$$

В первом приближении ориентировочно $\theta = 5^\circ = 0,0872$ рад

4. Кинетическая энергия электрона:

$$W = m \cdot V^2 / 2 = e \cdot U$$

5. Минимальная магнитная индукция магнитного поля, необходимая для магнетрона:

$$B_{\min} = V_{\perp} \cdot m / e \cdot z \cdot R_L$$

6. Вольт-амперные характеристики магнетронных систем в первом приближении описываются выражением:

$$I = kU^{nB}$$

где I – ток разряда;

k – коэффициент пропорциональности;

n – показатель, зависящий от эффективности улавливания электронов ($n=5-9$);

B – индукция магнитного поля.

7. Зависимость напряжения зажигания магнитного поля магнетрона:

$$U = k \cdot B^S,$$

где S для слабых полей равно от 1 до 2;

S для сильных полей – от 0,3 до 0,5.

8. Эквивалентное давление:

$$P_{\text{Э}} = P_0 [1 + (w_e \cdot \tau_e)^2]^{1/2},$$

где P_0 – рабочее давление в отсутствие магнитного поля;

τ_e – время между столкновениями электронов с частицами газа;

w_e – циклотронная частота, определяемая соотношением:

$$w_e = z \cdot e \cdot B / m$$

9. Скорость распыления материала определяется выражением:

$$V_p = 6.25 \cdot 10^{27} \cdot K_0 \cdot j_i,$$

где K_0 – коэффициент объемного распыления;

j_i – плотность ионного тока.

10. Длину катодного падения потенциала в тлеющем разряде можно найти из соотношений:

$$d_k = 4.7 \cdot 10^{11} \cdot U_k^{3/4} / (m_i \cdot j_i^2)^{1/4}$$

$$d_k = 2.61 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{U_k / B_k},$$

где m_i - масса иона;
 j_i - плотность ионного тока на катоде;
 B_k - индукция магнитного поля в катодном падении.

11. Скорость дрейфа частицы в присутствии электрического и магнитного полей:

$$V_H = E / B$$

12. Анод магнетронной системы должен располагаться от центра зоны распыления на расстоянии менее X_0 :

$$X_0 = 2 \cdot m_e \cdot E \cdot U / w_0 \cdot B^2 \approx 2.25 \cdot 10^{-7} \cdot U_p \cdot \frac{\sqrt{U}}{B},$$

где w_0 - средняя энергия ионов в магнетронной системе:

$$w_0 = 0.7 \cdot e \cdot U_p$$

13. Радиус условной цилиндрической поверхности анода R_0 :

$$R_0 = X_0 \cdot (n^2 + 1) / 2,$$

где n - половина ширины зоны распыления;

$$n = l / X_0$$

3.2.1.3 Исследование плазмы газового разряда методом зондов

1. Для вычисления зондового тока справедливо выражение:

$$j = j_0 \cdot \exp\left[-\frac{e \cdot U(R_0)}{k \cdot T_e}\right],$$

где $j_0 = e \cdot n_0 [k \cdot T_e / (2 \cdot \pi \cdot m_e)]^{1/2}$;

$U(R_0) = U_0$ - потенциал зонда;

n_0 - концентрация электронов в невозмущенной зоне.

2. Концентрацию ионов можно вычислить по формуле Бома:

$$I_i = 0.4 \cdot S_i \cdot e \cdot n_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot k \cdot T_e}{M_i}\right)^{1/2},$$

где $S_i = 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot l_3$ - площадь поверхности ионного слоя;

M_i - масса иона;

R_i - радиус ионного слоя;

l_3 - длина зонда.

3. Для цилиндрического зонда радиусом R_0 с радиусом эмитирующей поверхности R_i имеем:

$$I_i = 2/9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot e}{M_e}} \cdot \frac{U^{3/2}}{R_0 \cdot \beta^2 \left(\frac{R_i}{R_0}\right)} \cdot l_3,$$

где $\beta^2(\frac{Ri}{Ro})$ - табулированная функция, приведенная в таблице 3.1.

Таблица 3.1

$\frac{Ri}{Ro}$	β^2	$\frac{Ri}{Ro}$	β^2	$\frac{Ri}{Ro}$	β^2
1,00	0,0000	1,6	0,3233	2,8	2,4708
1,10	0,0098	1,8	0,5572	3,2	3,5693
1,20	0,0385	2,0	0,8454	3,6	4,7298
1,30	0,0850	2,2	1,1840	3,8	5,3795

3.2.1.4 Исследование процесса электронно-лучевой обработки материалов в безмасляном вакууме

1. Электроны проникают в материал на глубину так называемого проекционного пробега:

$$R = U^2 / \rho \cdot b,$$

где U – ускоряющее напряжение, В;

ρ – плотность материала, г/см³;

b – константа, зависящая от материала (для металлов $b = 2,1 \times 10^{-12}$).

2. Максимум энерговыделения происходит на глубине:

$$\delta = (0,2 \div 0,4) \cdot R$$

3. Диаметр электронного пучка (в первом приближении):

$$d = S \cdot (I / U)^{3/8},$$

где S – постоянная электронно-оптической системы.

4. Критическая мощность источника электронов, необходимая для испарения вещества:

$$W = 4 \cdot a \cdot L \cdot \rho \cdot \delta / d^2 = U \cdot I,$$

где a – теплопроводность материала; $a = 10^{-4}$

L – удельная энергия испарения вещества, калл/моль.

5. Удельная энергия испарения вещества:

$$L = 1,9 \cdot T_k \cdot \ln(82 \cdot T_k),$$

где T_k – температура кипения материала.

6. Для нагрева детали массой m в течение времени Δt требуется затратить количество энергии:

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T = U \cdot I \cdot \Delta T,$$

где C – удельная теплоемкость материала (для стали $C = 0,164$);

ΔT - разность температур.

3.2.1.5 Исследование процесса ионной обработки материалов

1. Энергетическая эффективность ионного распыления:

$$\eta = m / W ,$$

где m – масса вещества, распыляемого в единицу времени с единицы площади; W – мощность разряда.

2. Коэффициент ионного распыления материалов:

$$S = N_p / N_n ,$$

где N_p – количество распыленных атомов;
 N_n – количество падающих ионов.

3. Коэффициент ионного распыления по теории Зигмунда:

$$S = \frac{3 \cdot \beta \cdot M_a \cdot M_i \cdot E}{\pi^2 (M_a + M_i)^2 \cdot 2 \cdot E_{sub}} ,$$

где β – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения массы материала и массы иона;

E – энергия падающего иона;

E_{sub} – энергия сублимации (для металлов 5 Дж/моль).

4. Скорость распыления (травления) материала:

$$V_{mp} = h / t ,$$

где h – глубина распыляемого (стравливаемого) материала;
 t – время распыления.

5. Скорость ионного распыления по теории Р. Бериша:

$$V_{mp} = 6.25 \cdot 10^{25} \cdot j \cdot S \cdot M_2 / N_a \cdot \rho ,$$

где j – плотность ионного тока,

M_2 – атомная масса распыляемого материала, г/моль,

N_a – число Авогадро.

6. Величина ускоряющего напряжения для перехода в режим ионного травления должна удовлетворять следующему условию:

$$U = C \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{M}{m} \cdot U_i ,$$

где C – константа системы (4×10^3);

M, m – масса материала и иона;

U_i – потенциал ионизации (для воздуха $U_i=15$ В, для гелия $U_i=20$ В).

3.2.1.6 Исследование устройства для ионно-плазменного распыления материалов

1. В плазме область существования электрического поля вокруг заряженной частицы ограничена Дебаевской сферой радиуса:

$$\delta = \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{4 \cdot \pi \cdot n_e \cdot e^2}} = 7430 \cdot \sqrt{\frac{T}{n_e}},$$

где T – средняя температура равновесной плазмы, К;
 k – постоянная Больцмана;
 n_e – концентрация электронов в плазме, см⁻³;
 e – заряд электрона.

2. Плотность ионного тока, отбираемого на зонд Легмюра:

$$j_e = 0.4 \cdot e \cdot n_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T_e}{m_i}} = 8 \cdot 10^{-16} \cdot n_i \cdot \sqrt{\frac{T_e}{M}},$$

где j_e – плотность ионного тока на мишень, А/м²;
 n_i – концентрация ионов в плазме, м⁻³;
 T_e – температура электронов в плазме, К;
 M – молекулярный вес иона по отношению к водороду ($M = 1$ для водорода).

3. Коэффициент распыления материалов:

$$S = N_p / N_n = \frac{N_a \cdot \Delta m \cdot z \cdot e}{A \cdot Q} = 96495 \cdot \frac{\Delta m \cdot z}{A \cdot Q},$$

где N_p – число распыленных атомов мишени;
 N_n – число бомбардирующих ионов;
 N_a – число Авогадро;
 Δm – масса удаленных с поверхности атомов, г;
 z – кратность заряда ионов;
 e – заряд электрона;
 A – атомный вес материала, г/моль⁻¹;
 Q – общий заряд ионов, пришедших на мишень, Кл.

4. Общий заряд ионов, пришедших на мишень:

$$Q = I_i \cdot t,$$

где I_i – ионный ток;
 t – время обработки.

5. Производительность системы ионно-плазменного распыления:

$$Q_n = K_u \cdot V_p \cdot F,$$

где Q_n – кол-во материала, наносимого на поверхность подложки в единицу времени, $\text{нм см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

K_u – коэффициент использования распыленного материала с мишени ($K_u \leq 0.8$);

V_p – скорость распыления с единицы поверхности материала мишени, $\text{нм} \cdot \text{см}^{-1}$;

F – площадь мишени, см^2 .

6. Скорость распыления может быть определена по соотношению:

$$V_p = 6.25 \cdot 10^{22} \cdot j_i \cdot S \cdot A \cdot Na^{-1} \cdot \rho^{-1},$$

где A – атомный вес материала, г/моль;

j_i – плотность ионного тока на мишень, мА/см^2 ;

S – коэффициент распыления, атом/ион;

ρ – плотность распыляемого материала, г/см^3 .

Практическое занятие № 4 Конференция. Презентация электрофизических технологий для изготовления приборов оптической электроники

Интерактивно занятие – конференция

Конференция проводится по результатам защиты самостоятельных работ. Желательно присутствие коллектива поддержки или ученых. Самостоятельная работа спроектирована так, чтобы студент показал знания, умения, навыки, а также освоение компетенций по анализу достижений в технологии (ПК 14), умению строить последовательности технологических операций (ПК20), умению проводить расчеты (ПК21), умению выбрать сертифицированное оборудование для реализации своего задания (ПК25).

Технология подготовки конференции

1. Преподаватель проверяет работу, отмечает ошибки и ставит дату приема.

2. Оргкомитет (старосты групп в потоке) – собирают презентации докладов для просмотра

3. Затем следует проверка ошибок и выносится решение о допуске к конференции.

Защита включает доклад студента (5-7 минут) и ответы на вопросы (5 мин). В докладе сообщается тема задания, техническое задание, краткое содержание работы. Необходимо обосновать актуальность темы, метод выбранных инженерных решений. Особое внимание в докладе следует уделить самостоятельным творческим разработкам, их технико-экономическому обоснованию. По окончании доклада студенту задаются вопросы, позволяющие оценить, насколько глубоко проработан материал.

В процессе защиты учитываются: самостоятельность работы, оригинальность и тщательность проработки технических решений, качество

оформления чертежей и расчетно-пояснительной записки, выполнение ГОСТ, использование ЭВМ в расчетах, полнота и четкость доклада, правильность ответов на вопросы, планомерность работы над заданием и срок защиты (досрочно, в срок, после срока без уважительных причин).

После конференции студентам сообщается оценка. При этом дается краткий анализ задания и доклада, отмечаются достоинства и недостатки задания, высказываются критические замечания и пожелания. Если задание защищается после срока без уважительных причин, то оценка снижается.

Список литературы

Рекомендуемая литература

1. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: Учебное пособие для вузов / А. А. Барыбин. - М. : Физматлит, 2006. - 423 с.- ISBN 5-9221-0679-1 :
2. Данилина Т.И. Смирнов С.В. Ионно-плазменная технология в производстве СБИС. – Томск: ТУСУР, 2000. – 140 с.
3. Терехов В.Н. Сборник задач по электронным приборам – М.: Энергия, 1987. – 200 с

Дополнительная литература

В качестве дополнительной литературы может служить любая литература с ключевыми словами: технология, материалы, плазма, вакуум, оптическая электроника, эпитаксия, нанотехнология.

Периодическая литература (за последние 5 лет): журналы: “Физика и химия обработки материалов”, “Приборы и техника эксперимента”, “Компьютер пресс”; Известия ВУЗов, серия Физика.

Реферативные журналы: ”Электроника”, “Физика”, “Химия”;

Описания патентов и авторских свидетельств по классам H01J, H01S, H05H, C23C.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Технология приборов оптической электроники и фотоники

Методические указания к практическим занятиям

Усл. печ. л. _____. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40