

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

Кафедра электронных приборов

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ  
ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ ФОТОНИКИ,  
ГОЛОГРАФИИ, ИНТЕГРАЛЬНОЙ И  
ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления 12.04.03 - «Фотоника и  
оптоинформатика»

**Орликов Леонид Николаевич.**

Специальные вопросы технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики: Методические указания к практическим занятиям для студентов направления 12.04.03 - «Фотоника и оптоинформатика» / Л. Н. Орликов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2019. - 23 с.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование у студентов способности собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии; способности осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения; способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения; готовность осуществлять регламентную проверку технического состояния оборудования, его профилактический и текущий ремонт.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 12.04.03 - «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Специальные вопросы технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики».

## Содержание

Введение.....	4
Занятие 1. Типовые технологические процессы в технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики .....	5
1.1. Задание .....	5
1.2 Методические указания .....	5
Занятие 2. Математическое моделирование кинетики технологических процессов .....	5
2.1 Задание.....	5
2.2 Методические указания .....	5
Занятие 3. Формирование пленок.....	7
3.1 Задание.....	7
3.2 Методические указания .....	7
3.3 Примеры решения.....	8
3.4 Задачи по теме.....	11
Занятие 4. Вакуумная технология .....	11
4.1 Задание.....	11
4.2 Методические указания .....	11
Занятие 5. Расчет электрофизических параметров источников .....	13
5.1 Задание.....	13
5.2 Методические указания .....	13
5.3 Примеры решения.....	13
Занятие 6. Технология формирования акустоэлектронных элементов, технология изготовления волноводов.....	19
6.1 Задание.....	19
6.2 Пример решения .....	19
Занятие 7. Конференция по темам индивидуальных заданий.....	20
Список литературы .....	21

## Введение

Целью преподавания дисциплины «Специальные вопросы технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики» является необходимость овладения студентами научными основами технологического проектирования и управления технологическими процессами и оборудованием. Изучение дисциплины также определяется тем, что в процессе освоения дисциплины будущий магистр приобретает навыки рационального подхода к расчету и конструированию приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики с учетом требований того или иного технологического процесса изготовления деталей, узлов и приборов.

В задачи дисциплины входит построение алгоритмов, формализованных и математических моделей процессов и их автоматизация. В результате изучения дисциплины студенты должны приобрести навыки проектирования и эксплуатации технологического оборудования, умение проводить научные исследования и эксперименты, обрабатывать и анализировать полученные результаты. Основная задача дисциплины – привить студентам навык в подходах к решению проблемных технологических задач.

В результате выполнения и обсуждения практических заданий студенты приобретают следующие компетенции:

- способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности;
- готовностью к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы);
- способностью определить цели и план научных исследований; способностью идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере профессиональной деятельности;
- готовностью обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований;
- способностью применять современные системы управления качеством выпускаемой продукции;
- способностью владеть методикой оценки технологических нормативов при производстве новой техники;
- способностью обеспечивать экологическую безопасность производства на предприятиях;
- способностью к разработке методов инженерного прогнозирования и диагностических моделей состояния приборов и систем фотоники в процессе их эксплуатации.

## **Занятие 1. Типовые технологические процессы в технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики**

### **1.1. Задание**

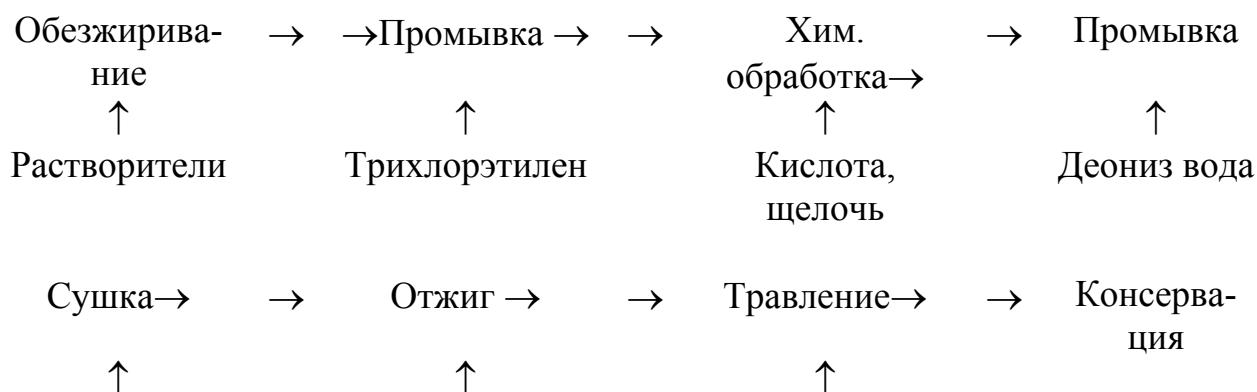
Составить последовательность очистки изделий под технологические операции для темы своей индивидуальной работы.

### **1.2 Методические указания**

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

Таблица 1 - Общая схема очистки деталей



## **Занятие 2. Математическое моделирование кинетики технологических процессов**

### **2.1 Задание**

Математическое моделирование кинетики технологических процессов.

### **2.2 Методические указания**

Элементарный технологический процесс характеризует уравнение сохранения потока массы, потока энергии, импульса

Например, при проведении откачки газа из вакуумной системы имеет место уравнение газового баланса:

$$\Sigma Q = Q_k + Q_u + Q_m + Q_{\text{нап}},$$

где  $\Sigma Q$  – суммарный поток откачиваемого газа;

$Q_k$  – поток газов, выделяющихся в вакуум из поверхности вакуумной камеры и ее конструктивных элементов;

$Q_u$  – поток газа, выделяющийся из изделий, подвергаемых обработке;

$Q_m$  – поток газов через уплотнения;

$Q_{\text{нап}}$  – поток напускаемого рабочего газа.

При испарении материалов выполняется баланс между числом испаренных ( $N_u$ ) и конденсированных ( $N_k$ ) молекул и площадью, с которой происходит испарение ( $S_u$ ) и площадью подложки ( $S_n$ ):

$$N_k S_n = N_u S_u;$$

$$КПД = S_n / S_u$$

Число испаренных молекул может быть определено через поверхностную плотность атомов  $N_s$  и энергию испарения ( $E$ ) по соотношению:

$$N_u = N_s e^{-E/kT},$$

где  $k$  - постоянная Больцмана.

Для металлов поверхностная плотность атомов при температуре испарения  $N_s = 10^{15}$  1/см<sup>2</sup>. Энергии испарения являются табличными величинами (для алюминия  $E=3$  эВ). Удельную скорость испарения материала  $V$ , (г/с с 1 см<sup>2</sup>) можно определить по формуле:

$$V = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{m/T},$$

где  $m$  - молекулярный вес;  $T$  - температура.

Концентрация молекул газа в остаточной среде в вакуумной камере может быть определена по соотношению:

$$n = P_2 / (2\pi m k T)^{0,5}$$

Расчет показывает, что при температуре испарения при давлении в камере  $10^{-3}$  Па концентрация газа составляет:  $n \sim 10^{14}$  1/см<sup>3</sup> (т.е. близка к концентрации испаряемых паров).

Даже незначительное увеличение температуры испарения (на 10%) значительно (на порядок) изменяет концентрацию испаренных атомов.

Скорость конденсации пленки при термическом испарении пропорциональна концентрации паров и определяется выражением:

$$V = f \cdot P / (2\pi mkT)^{0,5},$$

где  $f$  - коэффициент конденсации;  $P$  - давление паров испаряемого материала;  $m$  - молекулярный вес конденсируемого материала;  $k$  - постоянная Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К).

Толщина образующейся пленки  $d$  определяется по формуле:

$$d = G / 4\pi r \rho,$$

где  $G$  - вес испарившегося вещества;  $r$  - расстояние между испарителем и подложкой;  $\rho$  - плотность материала кг/м<sup>3</sup>.

Можно определить толщину конденсата пленки  $d$ , если известна скорость испарения  $V$  (кг/сек с 1 м<sup>2</sup>), концентрация потока  $n = 1/\text{м}^3$  и расстояние до подложки  $r$ :

$$d = V \cos \delta / 4\pi n r^2,$$

где  $\delta$  – угол осаждения конденсата в градусах.

### **Занятие 3. Формирование пленок**

#### **3.1 Задание**

Решение задач на формирование пленок.

#### **3.2 Методические указания**

При термическом испарении материалов частицам сообщается тепловая энергия

$$E = \frac{3}{2} kT$$

Например, применительно к очистке деталей от воды в водородной печи константа равновесия имеет вид:

$$K_p = P_{H_2O} / P_{H_2}.$$

Константа равновесия почти экспоненциально зависит от температуры. (Например, для стекла применительно к обезгаживанию от воды при температуре 100° С –  $K_p = 0,1$ , а при температуре 200° С –  $K_p = 1$ ).

Процессы изотропной диффузии описываются с помощью первого и второго законов Фика устанавливающих, что плотность потока диффундирующих атомов  $J$  пропорциональна концентрации примеси  $N \sim (J \sim N)$  и что скорость накопления примеси во времени пропорциональна потоку ( $dN/dt \sim d(J)$ ). Связь плотности потока атомов  $J$  с коэффициентом диффузии  $D$ , концентрацией атомов  $N$  примеси и временем диффузии  $t$  в направлении  $x$  выражается соотношениями:

$$J = -dN / dx + \mu n \varepsilon \quad (\text{первый закон Фика}),$$

$$dN / dt = d / dx(d \cdot dN / dx) \quad (\text{второй закон Фика}),$$

где  $n$  – собственная концентрация;  $\mu$  – подвижность примеси;

$\varepsilon$  – напряженность электрического поля.

Размерность величин:  $J$  – моль/(м<sup>2</sup>·с);  $dN/dx$  – моль/(м<sup>3</sup>·с);  $D$  – (м<sup>2</sup>·с).

Решением уравнения диффузии будет выражение для концентрации в виде:

$$N_x = N_0 \operatorname{erfc} = \frac{x}{2\sqrt{Dt}},$$

где  $x$  – расстояние (м);  $\operatorname{erfc}$  – функция ошибок (эрф-функция). Физически эрф-функция представляет собой вероятность диффузии и определяется таблично из условий проведения диффузии. (Чаще  $\operatorname{erfc} \sim 0,5$ ).

Зависимость коэффициента диффузии от параметров процесса выглядит следующим образом:

$$D = D_0 \exp(-E_a / kT),$$

### 3.3 Примеры решения

**Пример 1.** 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

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

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 справочниках.



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

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

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

где  $W$  - скорость испарения,  $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$m$  - масса молекулы,  $\text{кг}$ ;

$k$  - постоянная Больцмана;

$T$  - температура испарения,  $\text{К}$ .

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  $t$ ,  $\text{кг}$ .

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

$$dM = \frac{M}{4\pi} d\omega,$$

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  $\varphi$  с осью конуса, а расстояние от  $dS_1$  до площадки  $dS_2$  есть  $r$ , то

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

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности подложки, с учетом этих выражений есть:

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

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

Толщину пленки можно определить через плотность и объем конденсата на подложке

$$dM = \rho \cdot dV = \rho \cdot dS_2 \cdot d,$$

где  $\rho$  - плотность конденсата;

$V$  - объем конденсата;

$d$  - толщина пленки на подложке.

В итоге получаем выражение для толщины пленки

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

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:

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

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

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

Отношение толщин в точках  $A$  и  $O$  будет:

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

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  $\theta$  с нормалью к поверхности испарителя, равно

$$dM = \frac{M}{\pi} \cdot \cos\theta \cdot d\omega.$$

Можно получить выражение для толщины пленки, конденсированной в любой точке  $A$  подложки, находящейся параллельно плоскости испарителя

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

Соответственно отношение толщин пленки в точках  $A$  и  $O$  будет

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

Эти выражения 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  $\Delta P$  за время  $\Delta t$

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

### 3.4 Задачи по теме

Задача 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. 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 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 4. Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_1$  составляет  $10^{-3} \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,5 \text{ м}$ .

Задача 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  $K = 10^{-6}$ .

## Занятие 4. Вакуумная технология

### 4.1 Задание

Рассчитать вакуумную систему для своего индивидуального задания, согласование откачных средств.

### 4.2 Методические указания

Поток газовой выделенной с поверхности камеры  $Q$  определяется произведением площади поверхности  $A$  на коэффициент удельного газовой выделения  $g$  и коэффициент поверхности  $\Omega$ :

$$Q = Ag\Omega.$$

Величины удельного газовой выделения приводятся в соответствующей справочной литературе (для стекла и керамики  $g = 10^{-4} \text{ Па м}^3/\text{с с } 1\text{м}^2$ ). Коэффициент поверхности зависит от качества механической обработки материала (для стали достигает 10).

В вакуумной камере всегда имеется много вводов: для датчиков, для термопар, 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  $N$ .

$$Q = \kappa N.$$

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

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

где первое слагаемое относится к камере, второе к детали, третье к течеискателю, четвертое к потоку напускаемого газа. Обычно напускаемый поток составляет 30 – 80 см<sup>3</sup> атм/час. Поскольку заводы выпускают оборудование с производительностью в литрах в секунду, то выбранную величину напуска газа следует умножить на переводной коэффициент  $2,4 \times 10^{-4}$ , 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.

$$S_H = \sum Q / P_{\text{раб}}. \quad (4.1)$$

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 ( $P_{\text{вых}}$ ).

$$S_{\phi} = \sum Q / P_{\text{вых}}. \quad (4.2)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет  $P_{\text{вых}} = 10 \text{ Па}$  (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  $S_H$ . При проектировании систем, если проводимость коммуникаций неизвестна, выбирают скорость насоса с коэффициентом запаса  $\gamma$ :

$$S_H = \gamma S_o,$$

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

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

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

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_o}$$

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  $V' = 10^3$ ).

## Занятие 5. Расчет электрофизических параметров источников

### 5.1 Задание

Рассчитать некоторые электрофизические параметры источников из тем индивидуальных заданий.

### 5.2 Методические указания

Кинетическая энергия частицы зарядом  $e$  определяется через массу  $m$ , скорость  $V$  и ускоряющее напряжение  $U$

$$\frac{mV^2}{2} = eU$$

Электронная температура  $T_e$  определяется через потенциал ионизации  $U_i$  и постоянную Больцмана  $k$

$$\frac{3}{2}kT_e = eU_i$$

Для воздуха  $U_i = 15$  В.

Концентрация частиц  $n$  может быть определена через плотность тока  $J = I/S$  с площади эмиссии  $S$

$$J = Vne$$

### 5.3 Примеры решения

**Пример 1.** Некоторые соотношения для расчета электрофизических параметров плазменного источника электронов

1 Максимальная плотность тока в сфокусированном пучке:

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

где  $j_0$  – плотность тока эмиссии;

$T_e$  – электронная температура

Если  $eU/kT_e \gg 1$  соотношение 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  $\Delta I$  - 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):

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

7 Связь между протяженностью 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, м<sup>2</sup>;

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

**Пример 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/м<sup>3</sup>].

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  $\theta = 5^0 = 0,0872$  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;

$\tau_e$  – 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;

$$n = l / X_0$$

**Пример 3.** 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;

$\rho$  - плотность материала, г/см<sup>3</sup>;

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

2 Максимум энергосвечения 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  $\Delta t$  требуется затратить количество энергии:

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

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

$\Delta T$  – разность температур.

#### Пример 4. 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  $\beta$  – 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 ( $4 \times 10^3$ );  
 $M, m$  – масса материала и иона;  
 $U_i$  – потенциал ионизации (для воздуха  $U_i=15$  В, для гелия  $U_i=20$ В).

**Пример 5.** 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,  $\text{см}^{-3}$ ;  
 $e$  – 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/м<sup>2</sup>;  
 $n_i$  – концентрация ионов в плазме,  $\text{м}^{-3}$ ;  
 $T_e$  – электронная температура, 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;  
 $\Delta m$  – масса удаленных с поверхности атомов, г;  
 $z$  – кратность заряда ионов;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $A$  – атомный вес материала, г/моль<sup>-1</sup>;  
 $Q$  – 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,  $\text{см}^2$ .

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,  $\text{мА/см}^2$ ;

$S$  – коэффициент распыления, атом/ион;

$\rho$  – плотность распыляемого материала,  $\text{г/см}^3$ .

## Занятие 6. Технология формирования акустоэлектронных элементов, технология изготовления волноводов.

### 6.1 Задание

Составить общую схему технологического процесса изготовления прибора для своего индивидуального задания.

### 6.2 Пример решения

В таблице 6.1 представлена общая схема технологического процесса изготовления планарного волновода на стекле.

Таблица 6.1 – 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

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

Таблица 6.2 - Последовательность процесса откачки

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

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

### **Занятие 7. Конференция по темам индивидуальных заданий**

Конференции проводятся по результатам защиты самостоятельных работ. Желательно присутствие коллектива поддержки или ученых. Индивидуальное задание спроектировано так, чтобы студент показал знания, умения, навыки, а также освоение компетенций по анализу достижений в технологии, умению строить последовательности технологических операций, умению проводить расчеты, умению выбрать сертифицированное оборудование для реализации своего задания.

#### **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 результат защиты индивидуального задания. 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.

Оценка отражает учебную (5 балла), творческую (5 баллов) и исследовательскую (7 баллов) часть.

### Список литературы

1. Александров С. Е., Греков Ф. Ф. Технология полупроводниковых материалов: Учебное пособие. 2 е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 240 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1290 7

2. Основы физики плазмы: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. - СПб.: Издательство "Лань", 2011. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6.

3. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с. : ил., табл. - Библиогр.: с. 310-313. - ISBN 5-86889-244-5

4. Задачник по электронным приборам : Учебное пособие для вузов / В. А. Терехов. - 3-е изд., перераб и доп. - СПб. : Лань, 2003. - 276[12] с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 276-277. - ISBN 5-8114-0503-0

5. Процессы и установки электронно-ионной технологии : учебное пособие для вузов / В. Ф. Попов, Ю. Н. Горин. - М. : Высшая школа, 1988. - 256 с. : ил. - Библиогр.: с. 250-251. - Предм. указ.: с. 252-253. - ISBN 5-06-001480-0.

6. Физико-химические процессы в технологии РЭА : Учебник для вузов / Владимир Николаевич Черняев. - М. : Высшая школа, 1987. - 375[1] с. : ил.

7. Молекулярно-лучевая эпитаксия : учебное пособие / Л. Н. Орликов ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2007. - 107 с. : ил.,

8. Специальные вопросы технологии: учебное пособие / Л. Н. Орликов; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2007. - 229 с. : ил.,

9. Приборы и техника эксперимента / Российская Академия Наук (М.), Институт физических проблем им. П.Л. Капицы. - М.: Наука. - Выходит раз в два месяца. - ISSN 0032-8162 с 2008 по 2012 г.г.

10. Известия ВУЗов: научный журнал. Физика / Министерство образования Российской Федерации (Томск), Томский государственный университет. - Томск : СФТИ. - URL: <http://wkap.nl/journals/rupj>. - Выходит

ежемесячно. - ISSN 0021-3411 с 2008 по 2012 г.г.

11. Известия ВУЗов: научно-технический журнал. Электроника / Министерство образования Российской Федерации (М.), Московский государственный институт электронной техники. - М. : МИЭТ, 1996 - . - Выходит раз в два месяца. - ISSN 1561-5405 с 2008 по 2019 г.г.

12. Электроника: Реферативный журнал. - М. : ВИНТИ. - С 1998 г. на CD-ROM. - ISSN 0206-5452 с 2008 по 2019 г.г.

13. Орликов Л. Н. Специальные вопросы технологии приборов фотоники, голографии, интегральной и волоконной оптики: Методические указания по самостоятельной работе – Томск: ТУСУР, 2019. – 35 с. Препринт. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications>

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы технологии приборов фотоники, голографии,  
интегральной и волоконной оптики

Методические указания к практическим занятиям

Усл. печ. л. 1,5 . Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40