

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

Кафедра электронных приборов

## **ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Методические указания к практическим занятиям

для студентов направления 200600.62 -«Фотоника и  
оптоинформатика»

2012

## **Орликов Леонид Николаевич.**

Основы технологии оптических материалов и изделий: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 200600.62 – 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, 2012. - 35 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 эпитаксиальному осаждению пленок и сорбционно-десорбционным процессам, сопровождающим формирование оптических покрытий в вакууме.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Основы технологии оптических материалов и изделий».

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  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Методические указания к практическим занятиям

для студентов направления 200600.62 – Фотоника и оптоинформатика

Разработчик  
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

Введение .....	5
Практическое занятие 1.Вакуумная технология .....	5
1.1    Основные понятия .....	5
1.1.1    Единицы измерения давления и потока .....	5
1.1.2    Режимы течения газа .....	6
1.1.3    Проводимость и пропускная способность вакуумных коммуникаций.....	6
1.1.4    Основное уравнение вакуумной техники .....	8
1.1.5    Расчет вакуумных систем .....	8
1.1.6    Согласование откачных средств .....	11
1.2    Примеры решения задач по теме .....	11
1.3    Задачи для проработки темы .....	11
Практическое занятие 2.Подготовка изделий к технологическим операциям	13
2.1    Основные понятия .....	13
2.2    Примеры решения задач по теме .....	14
2.3    Задачи для самостоятельной проработки по теме .....	15
Практическое занятие 3.Пленочная технология, эпитаксия.....	16
3.1    Основные понятия .....	16
3.2    Примеры решения задач по теме .....	17
3.3    Задачи для проработки темы .....	18
Практическое занятие 4. Лучевые технологии (электронно-лучевая, лазерная) .....	19
4.1    Основные понятия .....	19
4.2    Примеры решения задач по теме .....	20
Практическое занятие 5.Технология оптических материалов и изделий .....	22
5.1    Основные понятия .....	22
5.2    Примеры решения задач по теме .....	24
Практическое занятие 6.Основы автоматизации производства оптических материалов и изделий .....	25
6.1    Основные понятия .....	25
6.2    Примеры решения задач по теме .....	25
Практическое занятие 7.Числовое программное управление .....	27
7.1    Основные понятия .....	27
7.2    Примеры решения задач по теме .....	28
Практическое занятие 8.Сертификация, инструкции, последовательности операций .....	29
8.1    Основные понятия .....	29
8.2    Примеры решения задач .....	30
Рекомендуемая литература .....	33

## Введение

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 эпитаксиальному осаждению пленок и сорбционно-десорбционным процессам, сопровождающим формирование оптических покрытий в вакууме.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью выполнять задания в области сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
- способностью разрабатывать инструкции по эксплуатации используемого технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала.

В результате изучения дисциплины студент должен

– *знать*: физические принципы работы приборов электроники и наноэлектроники; основные приемы построения последовательностей технологических операций при формировании и синтезе оптических материалов;

– *уметь*: ориентироваться в многообразии современных технологий, применяемых при производстве приборов электроники и наноэлектроники; разрабатывать принципиальные схемы последовательностей технологических операций; определять экспериментальным или расчетным путем оптимальные режимы проведения технологических операций; использовать для анализа процессов стандартные программные продукты;

– *владеть* основными навыками анализа достоинств и недостатков известных технологий формирования оптических материалов на элементах электроники и наноэлектроники.

## Практическое занятие 1. Вакуумная технология

### 1.1 Основные понятия

#### 1.1.1 Единицы измерения давления и потока

Наиболее распространенными единицами измерения давления считаются Па (Паскаль), мм рт.ст. (миллиметр ртутного столба) и атм. (атмосфера). В научной литературе принято пользоваться международной системой единиц и измерять давление в Паскалях.

1 мм. рт. ст. = 1 торр = 133,3 Па;

1 Па =  $1,3 \cdot 10^{-2}$  торр  $\approx 10^{-2}$  торр;

1 атм = 760 мм рт.ст. =  $1,01 \cdot 10^5$  Па  $\approx 10^5$  Па.

Величина потока газа  $Q$  представляет собой некий объем газа, удаляемого из вакуумной системы при давлении  $P$  со скоростью откачки  $S$ . Величина потока определяется соотношением:

$$Q = PS, \quad (1.1)$$

где  $S$  – скорость откачки единицы объема газа в единицу времени. На практике скорость откачки измеряют в литрах, сантиметрах или кубических метрах в секунду или в час:

1 см<sup>3</sup> атм/с = 0,76 торр л/с;

1 см<sup>3</sup> атм/час =  $2,4 \cdot 10^{-4}$  торр л/с;

1 торр л/с =  $1,32 \cdot 10^{-4}$  Па м<sup>3</sup>/с = 1,32 Вт.

В последнее время в качестве единиц измерения потока газа используется килограмм в секунду и ватт.

### 1.1.2 Режимы течения газа

В вакуумной технике преобладают три режима течения газа в зависимости от давления  $P$  и поперечных размеров  $d$  вакуумных коммуникаций: *вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный*. В таблице 1.1 представлены критерии оценки режимов течения газа.

Таблица 1.1 - Режимы течения газа

Режим	Число Кнудсена	$Pd$ - Па·м, мм рт.ст.·см
Вязкостный	$10^3 - 5 \cdot 10^{-3}$	$Pd > 1,33$
Молекулярно-вязкостный	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5$	$1,33 < Pd < 0,15$
Молекулярный	$> 1,5$	$Pd < 0,015$

Число Кнудсена определяется по соотношению:

$$Kn = \lambda / d, \quad (1.2)$$

где  $\lambda$  – длина свободного пробега молекулы. Если давление выражено в мм рт. ст., то длина свободного пробега в метрах определится соотношением:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-5} / P.$$

### 1.1.3 Проводимость и пропускная способность вакуумных коммуникаций

При уменьшении давления хаотичное, равновероятное движение молекул вызывает сопротивление откачке, снижая пропускную

способность  $U$  вакуумных коммуникаций и скорость откачки объекта  $S_o$ . При последовательном соединении отрезков коммуникаций складываются величины, обратные пропускной способности, сопротивление откачке возрастает (проводимость уменьшается).

$$U = \frac{1}{\sum (1/U_i)} \quad (1.3)$$

При параллельном соединении элементов трассы сопротивление уменьшается (проводимость возрастает).

$$U = \sum U_i$$

Пропускная способность возрастает при увеличении температуры и уменьшается при уменьшении молекулярного веса газа.

$$U = U_o \sqrt{T/m} \quad (1.4)$$

В таблице 1.2 приведены формулы расчета пропускной способности в системе СИ. (Размерность единиц: среднее давление на концах трубопровода  $P^*$  в Па, диаметр  $d$  и длина трубопровода  $L$  в метрах, проводимость в  $\text{м}^3/\text{с}$ ). При молекулярном режиме истечения газа, если диаметр отверстия выражен в сантиметрах, пропускную способность удобно определять по формуле:

$$U_m = 9,1d^2, \quad (1.5)$$

где  $U$  – л/с;  $d$  – см.

Таблица 1.2 – Некоторые соотношения для расчета пропускной способности в системе СИ

Режим	Трубопровод	Отверстие ( $L < 0,1d$ )
Вязкостный $Pd > 1,33$	$U_v = 1,36 \cdot 10^3 P \times d^4/L$	$U_v = 157 d^2$
Молекулярно-вязкостный	$U_{mv} = U_v + 0,8 U_m$	$U_{mv} = U_v + 0,8 U_m$
Молекулярный $Pd < 0,015$	$U_m = 121 d^3/L$	$U_m = 91 d^2$

Для более точных оценок следует пользоваться связью расхода газа  $Q$  с пропускной способностью  $U$  и разностью давлений на концах трубопровода, справедливой для любых режимов течения газа и любых профилей каналов для газа:

$$Q = U(P_1 - P_2). \quad (1.6)$$

Ловушки паров масел могут снижать проводимость наполовину. Для большинства практических случаев пропускная способность стандартных ловушек масел составляет 3 л/с на см<sup>2</sup> площади поверхности.

В таблице 1.3 приведена пропускная способность трубопровода  $U$  (л/с) в зависимости от давления и радиуса трубы  $R$  (см) для длины  $L=1$  м.

Таблица 1.3 - Пропускная способность трубопровода

P, мм рт ст	R=1	R=2	R=3	R=4
1	30	476	2480	7566
$10^{-1}$	3,9	54,7	263	826
$5 \cdot 10^{-2}$	2,14	26,4	121	362
$10^{-2}$	1,26	12,4	49,9	137
$10^{-3}$	0,9	8,23	28,4	69,5

#### 1.1.4 Основное уравнение вакуумной техники

Основное уравнение вакуумной техники (1.7) гласит, что скорость откачки объекта всегда меньше скорости откачки насоса из-за конечной пропускной способности вакуумных коммуникаций.

$$1/S_o = 1/S_n + 1/U. \quad (1.7)$$

где  $S_o$  – скорость откачки объекта;  
 $S_n$  – скорость откачки насоса;  
 $U$  – пропускная способность вакуумных коммуникаций.

#### 1.1.5 Расчет вакуумных систем

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

Суммарный поток газовой выделения складывается из газовой выделения стенок камеры, газовой выделения из изделий, газовой выделения из различных вводов в камеру и потока напускаемого рабочего газа.

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

$$Q = Ag\Omega. \quad (1.8)$$



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

В вакуумной камере всегда имеется более десятка вводов: для датчиков, для термопар, для ввода напряжения и т.д. Поток натекания через такие элементы  $Q$  определяется произведением чувствительности течеискателя  $\kappa = 10^{-6}$  на их число  $N$ .

$$Q = \kappa N . \quad (1.9)$$

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

$$\sum Q = (Ag\Omega)_\kappa + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}} , \quad (1.10)$$

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  $2,4 \cdot 10^{-4}$ , 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.

$$S_n = \sum Q / P_{\text{раб}} . \quad (1.11)$$

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

$$S_\phi = \sum Q / P_{\text{вых}} . \quad (1.12)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет  $P_{\text{вых}} = 10$  Па (0,1 мм рт ст). Следует выбрать тот механический

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  $\gamma$ :

$$S_n = \gamma S_o, \quad (1.13)$$

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

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

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt. \quad (1.14)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_n}, \quad (1.15)$$

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 (1.16):

$$t = V / S_o (\ln P_1 / P_2). \quad (1.16)$$

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:

$$t = 8V / S_n . \quad (1.17)$$

### 1.1.6 Согласование откачных средств

На практике согласование проводят графически, строя зависимости производительности откачных средств от давления. На рис. 1.1 представлен вариант графического согласования диффузионного и механического вакуумных насосов. В точке согласования выходное давление высоковакуумного насоса равно входному давлению форвакуумного насоса, а скорость откачки форвакуумного насоса меньше паспортной, поскольку она зависит от давления.

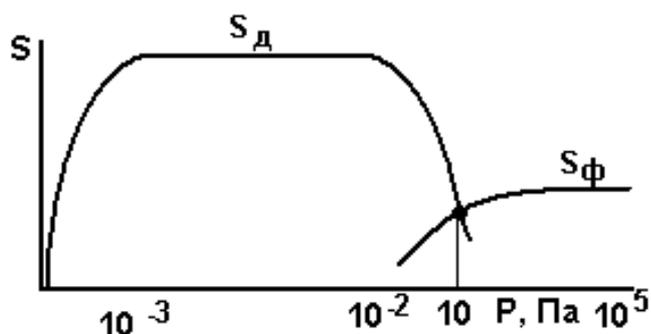


Рисунок. 1.1 – Графическое согласование вакуумных насосов

## 1.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Трубопровод проводимостью  $U = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  имеет на концах разность давлений 10 Па. Определить поток газа  $Q$  через коммуникацию.

Решение.  $Q = U(P_1 - P_2)$ ;  $Q = 0,01 \times (10) = 0,1 \text{ Па м}^3/\text{с}$

**Задача 2.** Проводимость вакуумной трассы  $U = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Производительность насоса составляет  $S_n = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Найти скорость откачки объекта.

Решение

Следует использовать основное уравнение вакуумной техники  $1/S_o = 1/S_n + 1/U$ . Тогда  $1/S_o = 1/25 + 1/0,1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$

## 1.3 Задачи для проработки темы

**Задача 1.1.** Камера сообщается с высоковакуумным затвором через сменную диафрагму с отверстием диаметром 1, 10, 14 см. При коммутации затвора на насос производительностью  $S_n = 2000 \text{ л/с}$ .

Определить эффективность использования вакуумной установки ( $U/S_n$ ), для каждой диафрагмы.

**Задача 1.2.** Вакуумная камера откачивается высоковакуумным насосом Н-5С и форвакуумным насосом 2НВР-5 ДМ до давления 0,01 Па. Определить скорость откачки форвакуумного насоса в точке согласования откачных средств.

**Задача 1.3.** Объем вакуумной камеры составляет 50 литров, площадь подложки  $10 \text{ см}^2$ , чувствительность течеискателя  $10^{-6}$  торл/с, число вводов в камеру равно 10. Поток напуска газа составляет  $70 \times 10^{-4}$  торл/с. Определить необходимую скорость откачки высоковакуумного насоса.

**Задача 1.4.** Определить время откачки вакуумной камеры объемом  $0,1 \text{ м}^3$  от атмосферного давления до 1 мм рт ст для насосов с производительностью 1 л/с, 2 л/с,  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ .

**Задача 1.5.** Определить время откачки сосуда объемом  $0,1 \text{ м}^3$  от давления  $10^5$  Па до 1 Па, если эффективная скорость откачки насоса в диапазоне от  $10^5$  до 100 Па составляет 5 л/с, а в диапазоне 50 Па - 3 л/с.

**Задача 1.6.** Давление в вакуумной камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$  за время  $t=100$  с уменьшилось в 2,7 раза. Определить эффективную скорость откачки.

**Задача 1.7.** Вакуумная трасса состоит из двух последовательных участков с пропускными способностями соответственно 5 и 10 л/с и двух параллельных участков с такими же параметрами. Определить суммарную проводимость трассы.

**Задача 1.8.** Проводимость отверстия на вязкостном режиме равна  $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ , а на молекулярном режиме –  $0,0125 \text{ м}^3/\text{с}$ . Определить проводимость отверстия на молекулярно-вязкостном режиме.

**Задача 1.9.** Проводимость вакуумной трассы составляет  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Производительность насоса составляет  $5 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Найти скорость откачки объекта.

**Задача 2.0.** Коммуникации проводимостями  $U = 0,01; 0,1; 1 \text{ м}^3/\text{с}$  имеют на концах разность давлений 100 Па. Определить потоки газа, пропускаемые коммуникацией.

## Практическое занятие 2. Подготовка изделий к технологическим операциям

Необходимость подготовки поверхности изделий под технологические операции вызвана тем, что в приповерхностных слоях материалов располагаются различные солевые и окисные пленки, примеси посторонних веществ, микроорганизмы. Значительная часть загрязнений заносится из предшествующих заготовительных операций. Прежде чем проводить технологические операции следует узнать свойства материала, его марку, определить способы очистки. Затем необходимо составить последовательность технологических операций по подготовке и проведению процессов, оценить режимы и возможности оборудования.

### 2.1 Основные понятия

Поток газовой выделения с поверхности площадью «А» определяется через коэффициент удельного газовой выделения «g» соотношением:

$$Q = g \times A$$

Поток газовой выделения, десорбции или откачки  $Q$ , за время  $dt$  из объема  $V$  определяется выражением:

$$Q = V (dP / dt)$$

Скорость ионного травления материалов (м/с) с плотностью ионного тока  $J$ , при ускоряющем напряжении до 10 кВ. рассчитывается по формуле:

$$V = (6,23 \times 10^{25} \times J \times K \times M_i) / (N \times \rho),$$

где  $J$  - плотность тока ( $A/m^2$ ),  $N$  - число Авогадро  $N=6 \times 10^{23}$ ,  $\rho$  - плотность материала  $kg/m^3$ ,  $M_i$  - масса иона (для аргона  $M_i=40$ ),  $K$  - коэффициент травления.

Абсолютное число молекул « $g^1$ », проходящих через стенку толщиной  $h$  и площадью  $1 m^2$  из атмосферного давления в вакуум пропорционально коэффициенту диффузии  $D$  и убыли концентрации « $n$ » и определяется выражением:

$$g^1 = -D(n_1 - n_2) / 2h = 10^{-5} (0,53 \times 10^{19} - 0,53 \times 10^{10}) / 2 \times 0,005$$

Константа равновесия  $K_p$  паров (например воды) по отношению к газу (например водороду) определяется через парциальное давление  $P$  соотношением:

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

Показатель анизотропии при травлении материалов показывает, насколько скорость травления вглубь  $V_1$  превышает скорость травления  $V_2$  вдоль поверхности. Т.е.  $K = V_1/V_2$ .

Глубина очистки  $h$ , за время  $t$  пребывания материала под пучком ионов пропорциональна коэффициенту диффузии и определяется выражением:

$$h = 2\sqrt{Dt}$$

Максимальная температура обезгаживания  $T_{об}$  при нагреве определяется через температуру плавления  $T_{пл}$  выражением:

$$T_{об} = 0,75 T_{пл}$$

В случае возможной рекристаллизации материала (вольфрам, сплавы алюминия и др) температура обезгаживания снижается до  $0,4 T_{пл}$

$$T_{об} = T_{рек} = 0,4 T_{пл}$$

Для нормализации изделий (снятия дислокаций или внутренних напряжений) температура восстановительного отжига определяется соотношением:

$$T_{в} = 0,5 T_{пл}$$

## 2.2 Примеры решения задач по теме

Задачи по этой теме рассчитаны на закрепление знаний по технологии очистки и термической обработки материалов.

**Задача 1.** За время очистки в течение 1000 с давление в вакуумной камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$  изменилось от  $10 \text{ Е-}3$  до  $10 \text{ Па}$ . Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток десорбции.

$$\text{Решение: } Q = V(dP / dt) = 0,1(10 - 0,001) / 1000 = 10\text{Е-}4$$

**Задача 2.** Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку вакуумной камеры толщиной  $5\text{Е-}3 \text{ м}$  и площадью  $1 \text{ м}^2$  из атмосферного давления в вакуум с давлением  $10\text{Е-}4 \text{ Па}$ . Коэффициент диффузии принять равным  $10\text{Е-}5 \text{ м}^2/\text{с}$ . Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной  $53\text{Е}19$ . Убыль концентрации от давления считать линейной.

Решение.  $g^1 = -D(n_1 - n_2) / 2h = 10^{-5} (0,53 \times 10^{19} - 0,53 \times 10^{10}) / 2 \times 0,005 = 5,3 \times 10^{15}$ .

**Задача 3.** Составить последовательность технологических операций подготовки испарителя для испарения алюминия методом термического испарения в вакууме.

Решение.

Теория испарения материалов	Выбор марки вольфрама	Механическая очистка от аквадага	Очистка от углерода в щелочи	Монтаж в вакуумной камере
-----------------------------	-----------------------	----------------------------------	------------------------------	---------------------------

**Задача 4.** Составьте последовательность операций по очистке стеклянной подложки перед напылением пленки.

Решение

Сведения о стекле и цели применения	Выбор метода очистки	Выбор химикатов	Очистка, промывка, сушка	Сушка
-------------------------------------	----------------------	-----------------	--------------------------	-------

### 2.3 Задачи для самостоятельной проработки по теме

**Задача 2.1.** Определить поток газовой выделения с двухсторонней поверхности 6 зеркал, для трех сортов стекол размером 0,5 x 1,5 м, если удельные газовой выделения составляют 0,1; 0,01;  $10^{-5}$  Па м<sup>3</sup>/с

**Задача 2.2.** За время очистки тоководов методом прокаливания в вакууме в течение 2000 сек, давление в вакуумной камере изменилось от 0,01 до 10 Па. Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток откачки при объемах камеры 0,1; 1; 3 м<sup>3</sup>.

**Задача 2.3.** Рассчитать скорость травления изделий из стали при использовании в качестве ионообразующего газа аргона с плотностью ионного тока 1 А/м<sup>2</sup>, при ускоряющем напряжении до 10 кВ. Плотность материала принять равной 7,6 г/см<sup>3</sup>, число Авогадро принять равным  $6 \times 10^{23}$ . Коэффициент травления принять равным  $10^{-4}$ .

**Задача 2.4.** Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку диффузионного насоса толщиной  $5^{-3}$  м и площадью 1 м<sup>2</sup> из атмосферного давления в вакуум с давлением  $10^{-4}$  Па. Коэффициент диффузии принять равным  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной  $53 \times 10^{19}$ . Убыль концентрации от давления считать линейной.

**Задача 2.5.** В водородную печь для очистки деталей подается водород с парциальным давлением 200 Па. Какое парциальное давление

составляют пары воды, для констант равновесия паров по отношению к водороду 2; 4; 6?

**Задача 2.6** Скорость травления поверхности вглубь при очистке превышает скорость травления вдоль поверхности в 1,5; 1,7; 2 раза. Определить показатель анизотропии для каждого случая.

**Задача 2.7.** В вакуумной камере стальная проволока перематывается с барабана на барабан через ионный поток, проводящий ее очистку от газов. Определить глубину очистки, если время пребывания проволоки под пучком ионов составляет 10 сек. Коэффициент диффузии принять равным  $10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$

**Задача 2.8.** В вакуумной камере должно проводиться обезгаживание свинцового испарителя. Определить максимальную температуру обезгаживания, если температура плавления свинца составляет 343 С.

**Задача 2.9.** Составьте последовательность технологических операций по формированию волноводного слоя из окиси цинка на стекле.

**Задача 3.0.** После формирования алюминиевого покрытия выяснилось, что пленка не полупрозрачная, а непрозрачная. Напишите инструкцию, как снять эту пленку.

### Практическое занятие 3. Пленочная технология, эпитаксия

#### 3.1 Основные понятия

Давление в вакуумной среде « $P$ » влияет на длину свободного пробега молекул « $L$ », вследствие этого расстояние от испарителя до подложки должно быть соизмеримо с пробегом молекул и определяется соотношением:

$$L = 0,63E-3 / P ,$$

где  $P$  - в Па, а  $L$  - м;

Толщина образующейся пленки при термовакuumном напылении определяется по формуле:

$$d = G/4 \pi L \rho$$

где  $G$  - вес испарившегося вещества,  $L$  - расстояние между испарителем и подложкой,  $\rho$  - плотность материала  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

$$V = f P / \sqrt{2 \pi m k T},$$



где  $f$  - коэффициент конденсации,  $P$  - давление паров испаряемого материала,  $m$  - молекулярный вес конденсируемого материала,  $K$  - постоянная Больцмана ( $K=1,38E-23$  Дж/К).

Количество газа  $Q$ , поглощенного парами испаряемого материала за время напыления пленки  $t$  с подложки площадью  $F$ , приводит к изменению давления газа в вакуумной камере от  $P_1$  до  $P_2$  и подчиняется соотношению:

$$Q = k F t (P_1 - P_2) / \ln(P_1 - P_2),$$

где  $K$  - константа равновесия

Величина изобарного потенциала  $\Delta Z$  при формировании газофазной реакции в процессе напыления пленок определяется выражением:

$$\Delta Z = -RT \ln P_i,$$

где  $R = 8,3$  Дж/моль $K^0$ ,  $T$  - температура,  $P_i$  - парциальное давление компоненты газа.

Коэффициент полезного действия при испарении материалов определяется отношением площади подложки  $S_p$  ко всей площади разлета пара.

Скорость термовакuumного напыления выражается соотношением:

$$V = 6 \times 10^{-4} \sqrt{M/T}; \text{ г/с (с } 1 \text{ см}^2\text{)}$$

где  $M$  - молекулярный вес,  $T$  - температура.

При измерении толщины пленки "на просвет" показания тока с регистрирующего прибора уменьшаются от  $I_1$  до  $I_2$  (в несколько раз). Для определения толщины пленки при постоянной приборе (близкой к  $K=1E6$ ) используется выражение:

$$I_2 = I_1 \exp(-kd); \ln I_2 = -kd \ln I_1;$$

где  $d = \ln I_1 / 10^6 \ln I_2$ .

Толщина конденсата пленки  $d$  может быть определена через скорость испарения  $\omega$  с  $1 \text{ м}^2$ , плотность потока  $\gamma$  ( $1/\text{м}^3$ ) и расстояние до подложки  $r$  с помощью выражения:

$$d = V \cos \beta / 4 \pi \gamma r^2,$$

где  $\beta$  - угол осаждения конденсата.

### 3.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** В процессе термовакuumного испарения испарилась навеска из железа весом  $1E-4$  кг. При расстоянии до подложки  $0,1$  м

определить толщину напыленной пленки. Плотность материала навески принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ .

Решение. Толщина образующейся пленки определяется по формуле:

$$d = G/4\pi L\rho$$

где  $G$  - вес испарившегося вещества,  $L$  - расстояние между испарителем и подложкой,  $\rho$  - плотность материала  $\text{кг/м}^3$ . Ответ:  $1\text{E-4}$

**Задача 2.** Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_p$  составляет  $1\text{E-3} \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,4 \text{ м}$ .

Решение.  $\text{КПД} = S_p/S_i$ ; Поверхность шара  $S_i = 4\pi r^2$ . Ответ:  $0,05\%$

### 3.3 Задачи для проработки темы

**Задача 3.1.** Используя понятие длины свободного пробега молекул, вычислить, какое расстояние от испарителя до подложки можно выбрать при давлениях в камере  $10\text{E-3}$ ;  $0,01$ ;  $0,1$ ;  $1 \text{ Па}$ .

**Задача 3.2.** В процессе термовакuumного испарения испарилась навеска из железа весом  $10^{-4} \text{ кг}$ . При расстоянии до подложки  $0,2 \text{ м}$  определить толщину напыленной пленки. Плотность материала навески принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ .

**Задача 3.3.** Оценить удельную скорость конденсации пленки углерода с парциальным давлением  $1 \text{ Па}$  при проведении процесса эпитаксии, если температура подложки составляет  $500$  градусов Кельвина. Коэффициент конденсации принять равным  $0,2$ .

**Задача 3.4.** Определить количество газа, поглощенного парами титана за время напыления пленки с подложки площадью  $1\text{E-2} \text{ м}^2$  в течение  $5$  секунд, если давление в системе изменилось от  $11\text{E-2}$  до  $1\text{E-2} \text{ Па}$ . Константа равновесия равна  $2$ . Давление паров титана равно  $1 \text{ Па}$ .

**Задача 3.5.** Определить абсолютную величину изобарного потенциала процесса формирования  $\text{TiO}_2$  при напылении титана. Температура испарителя  $1400^0 \text{ К}$ , парциальное давление паров титана  $1,1 \text{ Па}$ .

**Задача 3.6.** Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_p$  составляет  $1\text{E-3}$ ;  $0,01$ ;  $0,1 \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,5 \text{ м}$ .

**Задача 3.7.** При измерении толщины алюминиевой пленки «на просвет» показания тока с регистрирующего прибора уменьшились в

2 раза (от 100 до 50 микроампер). Определить толщину пленки, если постоянная прибора для алюминия  $K = 1E6$ .

**Задача 3.8.** Определить удельную скорость испарения углерода (г/с с  $1 \text{ см}^2$ ) при температуре 1200; 1300; 1400 К

**Задача 3.9.** Определить толщину конденсата пленки  $d$ , если скорость испарения  $\omega = 6E-10 \text{ кг/сек с } 1 \text{ м}^2$ , плотность потока  $\gamma = 10E7 \text{ 1/м}^3$  при расстоянии до подложки  $r = 1 \text{ м}$ . Угол осаждения конденсата  $45^\circ$ .

## Практическое занятие 4. Лучевые технологии (электронно-лучевая, лазерная)

### 4.1 Основные понятия

Мощность электронного источника ( $P$ , Вт) для проведения технологических операций рассчитывается из удельной энергии "L", необходимой для проведения операции, глубины проникновения температуры луча "б" и диаметра луча "d". Например, для операций испарения мощность электронного источника рассчитывается по соотношению:

$$P = 4aL\rho\delta/d^2,$$

где  $P$  – мощность Вт,  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ дж/сек}$

$a$  – коэффициент температуропроводности.

Глубина проникновения электронов "R" в материал плотностью  $\rho$  в процессе электронно-лучевой сварки при напряжении  $U$  вычисляется по формуле:

$$R = 2,2 \times 10^{-12} \times U^2 / \rho.$$

Для импульсного режима критическая плотность мощности ( $\text{Вт/см}^2$ ), необходимая для проведения технологической операции определяется по формуле:

$$g = \rho L \sqrt{a/t},$$

где  $t$  – длительность импульса.

Число ампервитков ( $NI$ ) магнитной линзы для фокусировки электронного пучка рассчитывается по уравнению:

$$NI = 10 k \sqrt{UR/f},$$

где  $k$  – коэффициент заполнения катушки проводом

$R$  – средний радиус витка

$f$  – фокусное расстояние.

Максимальная плотность электронного тока, которую можно извлечь с границы плазмы определяется по формуле:

$$J = \frac{1}{4} n_e e \sqrt{8kTe / \pi m} ; [A/cm^2],$$

где  $n_e$  – концентрация электронов в плазме  $1/m^3$ ,

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  - постоянная Больцмана;

$Te$  – температура электронного газа;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг - масса электрона.

Изменение глубины проплавления материала электронным лучом пропорционально корню квадратному от изменения ускоряющего напряжения:

$$h_1/h_2 = \sqrt{U_1/U_2}.$$

Скорость испарения материала лазером определяется по формуле:

$$V = 4,4 \times 10^{-4} AP \sqrt{M/T} [г/см^2с],$$

где  $P$  - давление пара, мм рт ст;

$M = 47$  -молекулярный вес испаряемого материала.

$A$  - коэффициент испарения ( $A=1$ - для испарителя идеальной формы).

Первеанс характеризует вольтамперную характеристику электронного источника и определяется выражением:

$$P = I / U^{3/2} [ампер/вольт^{3/2}]$$

Угол отклонения электронного луча “ $\theta$ ” в отклоняющей системе определяется выражением:

$$\theta = 2,96HL / \sqrt{U} ; (\text{рад})$$

где  $L$  – длина пути электрона в магнитном поле, (м)

$H$  - напряженность магнитного поля, (А/м)

Проекционный пробег  $[R, \text{мкг/см}^2]$  иона с энергией  $E$ , имплантируемого атома массой  $M_1$  и порядковым номером  $Z_1$  в мишень с параметрами  $(M_2, Z_2)$  определяется соотношением:

$$R = C_2 M_2 [(Z_1)^{1/3} + (Z_2)^{1/3}] E / Z_1 \times Z_2,$$

где  $C_2$  - константа безразмерной энергии взаимодействия ( $C_2=0,65$ ), размерность  $E$  - кЭв.

## 4.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять:  $a = 10 \cdot 10^{-4}$ ,

энергия испарения  $L=40$  Дж/см<sup>2</sup>, плотность материала  $\rho=7,6$  г/см<sup>3</sup>, диаметр пучка  $d=0,01$  см, глубина проникновения луча  $b=0,5$  см.

Решение.

$$P=4aL\rho b/d^2=4\times 10^{-4}\times 40\times 7,6\times 0,5/0,01=60\text{ Вт. Ответ: }60\text{ Вт}$$

**Задача 2.** Рассчитать скорость испарения титана лазером при получении оксида титана в кислородно-аргоновой среде. Давление паров титана  $P=1$  мм рт ст при температуре  $T=2450^0$  К. Коэффициент испарения  $A=1$ - как для испарителя идеальной формы.

Решение.

$V=4,4\times 10^{-4}AP\sqrt{M/T}$  [г/см<sup>2</sup>с], где  $P$ - давление пара, мм рт ст;  $M=47$  -молекулярный вес титана. Ответ:  $6E-5$ .

### 4.3 Задачи для проработки темы

**Задача 4.1.** Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять:  $a=10E-4$ , энергия испарения  $L=20$  Дж/см<sup>2</sup>, плотность материала  $\rho=7,6$  г/см<sup>3</sup>, диаметр пучка  $d=0,01$  см, глубина проникновения температуры луча  $b=0,5$  см.

**Задача 4.2.** Вычислить глубину проникновения электронов в сталь ( $\rho=7,6$ ), алюминий ( $\rho=2,7$ ), медь ( $\rho=8,9$ ) в процессе электронно-лучевой сварки при напряжении 50 кВ.

**Задача 4.3.** Рассчитайте критическую плотность мощности, которую необходимо развить электронно-лучевому источнику с длительностью импульса 10 мс для начала процесса испарения стали при размерной обработке материала. Принять коэффициент температуропроводности  $a=10E-4$ , плотность материала принять равной  $7,6$  г/см<sup>3</sup>. Удельная теплота испарения  $L=20$  Дж/см<sup>2</sup>.

**Задача 4.4.** Рассчитать число ампервитков магнитной линзы для фокусировки электронного пучка с энергией  $U=20, 30, 40$  кВ в точке с фокусным расстоянием  $f=0,2$ м от центра линзы. Средний радиус витка принять равным  $R=5$  см, коэффициент заполнения катушки проводом  $k=0,6$ .

**Задача 4.5.** Рассчитать плотность электронного тока, которую можно извлечь из плазмы источника на основе тлеющего разряда с объемной концентрацией  $n_e=10^{16}$  1/м<sup>3</sup>. Температуру электронного газа принять равной  $E4$ .

**Задача 4.6.** В режиме кинжального проплавления алюминия толщиной 5 мм ускоряющее напряжение возросло от 30 до 50 кВ. Считая ширину сварного шва постоянной, определить глубину проплавления.

**Задача 4.7.** Рассчитать скорость испарения титана лазером при получении нитрида титана в азотной среде. Давление паров титана  $P=1$  мм рт ст при температуре  $T=2450^0$  К. Коэффициент испарения  $A=1$ - как для испарителя идеальной формы.

**Задача 4.8.** Рассчитать первеансы электронной пушки с током луча 200, 400, 600 мА и ускоряющим напряжением 20 кВ.

**Задача 4.9.** Рассчитать напряженность поля в отклоняющей системе, если длина пути электрона в магнитном поле  $L=0,5$ м, для анодных напряжений  $U=20,30, 40$  кВ, угол отклонения луча  $\theta =0,2$  рад.

**Задача 4.10.** Рассчитать проекционный пробег  $[\text{мкг}/\text{см}^2]$  иона с энергией 100 кэВ при имплантации атомов мышьяка ( $M1=74$ , порядковый номер  $Z1=33$ ) в кремниевую мишень ( $M2=28$ ,  $Z2=14$ ). Константа безразмерной энергии взаимодействия  $C2=0,65$ .

## Практическое занятие 5. Технология оптических материалов и изделий

### 5.1 Основные понятия

Решение задач цикла связано с теоретическим материалом этой темы.

Время сканирования одного элемента электронорезиста при плотности тока  $J$  и коэффициенте чувствительности « $k$ » определяется выражением.

$$T = k/J,$$

где  $J$  - А/см<sup>2</sup>

Длина диффузионного резистора  $L$ , или ширина “ $b$ ” в мм для требуемого сопротивления  $R$  рассчитываются через поверхностное сопротивление  $R_p$  по соотношению

$$R = R_p \times L / b.$$

Глубина залегания P-n перехода определяется соотношением

$$h = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln N_0/N_p}.$$

где  $D$  - коэффициент диффузии.

При различии концентраций в 3 порядка эта формула преобразуется к виду:  $h=2\sqrt{Dt} \times 5,6$ .

Энергия фотона для проведения процесса фотолитографии на определенной длине волны рассчитывается по соотношению.

$$E_{\text{ф}} = hc/\lambda, \text{ (Дж)}$$

где  $h=6,62 \text{ E-34}$  вт/с- постоянная Планка,

$c = 3 \text{ E8}$  м/с - скорость света. Фотолитография чаще проводится в ультрафиолетовом свете на длине волны  $0,4 \text{ мкм} = 4\text{E5}$  м.

Энергия электрона, необходимая для проведения процесса электролитографии при напряжении “U”, определяется выражением:

$$E = m_e c^2 + eU \text{ [Дж]} .$$

Длина волны, соответствующая энергии электрона при проведении процесса электролитографии при напряжении U определяется соотношением:

$$\lambda = 1,27/\sqrt{U} \text{ [нм]}.$$

Диффузию часто проводят из пленки, напыленной термовакuumным способом, что соответствует бесконечному источнику. Концентрацию примеси на расстоянии l см от поверхности через время t диффузии из напыленной пленки можно определить по соотношению:

$$N = N_0 \operatorname{erf} X/2 \sqrt{Dt} ;$$

где  $N_0$  - поверхностная концентрация,  $1/\text{см}^3$ ,

$\operatorname{erf}$  - коэффициент вероятности диффузии

$D$  - коэффициент диффузии,  $1/\text{см}^2$ .

Коэффициент диффузии одного материала в другой рассчитывается через энергия активацию процесса ( $E_a$ , эВ) и коэффициент стационарной диффузии  $D_0$  по соотношению:

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

где  $1\text{эВ}=1,6\text{E-19}$  Дж;  $K= 1,38\text{E-23}$  – постоянная Больцмана.

При электролитографии начальный диаметр электронного пучка “ $d_0$ ” может увеличиться на величину “ $d_d$ ” за счет дифракции на фотошаблоне. Увеличение диаметра пучка за счет дифракции определяется выражением:

$$d_d = 7,5 / \beta \sqrt{U} ,$$

где  $\beta$ - угол сходимости пучка ( рад)

$U$  - ускоряющее напряжение

Яркость электронного пучка ( $\text{кд}/ \text{м}^2$ ) для электролитографии рассчитывается по соотношению:

$$V = J \times eU / \pi kT,$$

где  $J$  - плотность тока эмиссии ( $A/m^2$ ) при температуре катода  $T$  при ускоряющем напряжении  $U$ ,

$K$  - постоянная Больцмана,  $K = 1,38E-23$

## 5.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Рассчитать время сканирования электронорезиста с числом элементов  $N = 10E9$  при плотности тока  $J = 1 A/cm^2$ . Коэффициент чувствительности принять равным  $k = 10E-6$ .

Решение.  $T = Nk/J$ . Ответ: 1000 с.

**Задача 2.** При ширине резистора  $b = 5$  мм, рассчитать длину  $L$  диффузионного резистора для толстопленочной микросхемы для получения резистора с сопротивлением 100 Ом. Удельное поверхностное сопротивление принять равным  $R_{\Pi} = 80$  ом/квадрат.

Решение.  $R = R_{\Pi} * L/b$ . Ответ:  $6,2E-3$

## 5.3 Задачи для проработки темы

**Задача 5.1.** Рассчитать время сканирования электронорезиста с числом элементов  $10E8$  при плотности тока  $1 A/cm^2$  для коэффициентов чувствительности  $E-6$ ,  $E-5$ ;  $E-4$ .

**Задача 5.2.** При ширине резистора 0,5 мм, рассчитать длину диффузионного резистора для толстопленочной микросхемы для получения резистора с сопротивлением 1 кОм. Удельное поверхностное сопротивление принять равным  $R_{\Pi} = 80$  ом/квадрат.

**Задача 5.3.** Определить глубину легирования полупроводника примесью за время 4 часа при коэффициенте диффузии  $E-7$ . Допустить, что отношение поверхностной концентрации основных носителей  $N_0$  к концентрации примеси  $N_p$  составляет два порядка. Ответ округлить.

**Задача 5.4.** Рассчитать энергию фотона для проведения процесса фотолиитографии на длине волны 0,4; 0,45; 0,5 мкм.

**Задача 5.5.** Рассчитать энергию электрона для проведения процесса электронолитографии при напряжении 15 кВ.

**Задача 5.6.** Рассчитайте длины волн, соответствующие электрону при проведении процесса электронолитографии на напряжении 20, 30, 40 кВ.



**Задача 5.7.** Рассчитайте концентрацию примеси на расстоянии 1 см от поверхности через 2 часа диффузии из напыленной пленки, если поверхностная концентрация  $N_0 = 10^{17} \text{ 1/см}^3$ . Значение вероятности диффузии равно 0,8, коэффициент диффузии  $D = 10^{-7} \text{ 1/см}^2$

**Задача 5.8.** Рассчитайте коэффициент диффузии титана в танталат висмута при температуре  $1000^\circ \text{ К}$ . Энергия активации процесса  $E_a = 4,2 \text{ эВ}$ , Коэффициент стационарной диффузии  $D_0 = 10^{10}$ .

**Задача 5.9.** Диаметр электронного пучка для литографии составляет  $d_0 = 10,25 \text{ мкм}$ . Рассчитать возможный диаметр пучка с учетом дифракции электронов на фотошаблоне. Угол сходимости пучка  $\beta = 0,1 \text{ рад}$ . Ускоряющее напряжение равно 10 кВ.

**Задача 5.10.** Рассчитать яркость электронного пучка для электронолитографии, если плотность тока эмиссии при температуре катода  $2000^\circ \text{ К}$  равна  $1 \text{ А/м}^2$  при ускоряющем напряжении 10 кВ

## **Практическое занятие 6. Основы автоматизации производства оптических материалов и изделий**

### **6.1 Основные понятия**

При решении задач рекомендуется просмотреть теоретический материал по теме, построить график процесса, проанализировать известные и неизвестные величины уравнения отслеживаемого параметра. Полезно подставить в исходное уравнение известные величины, проанализировать и сопоставить значения остальных величин. Следует обратить внимание на соблюдение единиц измерения. Если единицы измерения не приводятся, то следует применять систему “СИ”.

### **6.2 Примеры решения задач по теме**

**Задача 1.** Вакуумное реле выполняет команду отключения ионизационного датчика при выполнении параметра давления  $P = 0,1 \text{ Па}$ . В вакуумной камере объемом  $V = 1 \text{ м}^3$ , откачиваемой насосом с производительностью  $S = 0,2 \text{ м}^3$  до давления 0,01 Па образовалась течь. Определите, через какое время включится реле. Уравнение потока откачки:  $Q = PS$ . Уравнение натекания:  $Q = V \int dP/dt = V \Delta P / \Delta t$

Решение. Поток откачки определится уравнением  $Q = PS$ ; Поток натекания определится:  $Q = V \int dP/dt = V \Delta P / \Delta t$ . Ответ: 0,2сек

**Задача 2.** Закон регулирования напряжения генератора на частоте 50 Гц задан функциями:  $x = A \sin \omega t + 0,5$ ;  $Y = dx/dt$ . Определить значение  $Y$  при амплитуде сигнала  $A = 2$  В и угловой частоте  $\omega t = \pi/4$ .

Решение Значение  $Y$  это производная от первого уравнения. Цифра 2 в первом уравнении есть амплитуда сигнала. Дифференцируя исходное уравнение получим:  $Y = A \omega \cos \omega t = 2 \times 314 \times \cos 45^\circ = 444$ .

### 6.3 Задачи для проработки темы

**Задача 6.1.** При входе в процесс диффузии в системе время-параметр через 20 минут температура прогрева образца составила 200 градусов. Через сколько минут следует перейти на систему время-команда, чтобы отключить прогрев при достижении 1000, 1100, 1200 градусов.

**Задача 6.2.** Вакуумное реле выполняет команду отключения ионизационного датчика при выполнении параметра давления  $P = 0,1$  Па. В вакуумной камере объемом  $V = 1 \text{ м}^3$ , откачиваемой насосом с производительностью  $S = 0,2 \text{ м}^3$  до давления 0,01 Па образовалась течь. Определите, через какое время реле отключит вакуумный насос. Уравнение потока откачки:  $Q = PS$ . Уравнение натекания:  $Q = V \int dP/dt = V \Delta P / \Delta t$

**Задача 6.3.** Рассчитать число мест, которые может обслужить робот, если уровень автоматизации операции без робота составлял  $a = 0,8$ . Коэффициенты использования робота  $K_p = 0,05; 0,3; 0,8$ . Уравнение мест:  $n = 1/(1-a+K_p)$ .

**Задача 6.4.** Автомат предотвращает температурную деформацию сопла плазмотрона путем отслеживания напряженности электрического поля по уравнению:  $E = 4,8 I^{0,5} \times P^{0,5}$ ;  $E$ -в/м,  $I$ -амперы,  $P$  - Па. Определить значение контролируемого параметра при токе 100 А и атмосферном давлении в канале плазмотрона.

**Задача 6.5.** Система децентрализованного управления первого уровня отключает плазмотрон при повышении потерь на катоде  $Q > 1000$  Вт. При каком токе система отключит плазмотрон с вольфрамовым катодом, если тепловой поток на катод  $Q$  описывается уравнением:

$$Q = 585 + 3,8 \times I, \text{ Вт?}$$

**Задача 6.6.** Определить яркость свечения люминофора на фотодиод в системе автоматического управления, если ускоряющее напряжение  $U = 10$  кВ, а плотность тока  $J = 5 \text{ А/м}^2$ . Пороговая энергия возбуждения

люминофора  $U_0=500$  В. Управление осуществляется по уравнению  $V=kJ(U-U_0)^n$ , где  $k=1$  постоянная системы,  $J$ -плотность тока,  $n=0,5$ -характеристика люминофора.

**Задача 6.7.** Изодромное звено сглаживает и опережает сигнал по функции:  $K_c = -0,2U + 0,1U - 0,4U + 0,7U$

Определить коэффициент сглаживания, если  $U=1; 2; 3$ .

**Задача 6.8.** Найти координату смещения руки робота осуществляемой по функции:

$U_{см} = X_0 + (X \cdot t_i / (X+5))N$ , если  $X_0=200$ ,  $X=20$ ,  $t_i=2,5$ -цена импульса смещения,  $N=10$ -число корректирующих шагов.

**Задача 6.9.** Закон регулирования напряжения генератора на частоте 50 Гц задан функциями:  $X = A \sin \omega t + 0,5$ ;  $Y = dx/dt$ . Определить значение  $Y$  при амплитудах сигнала  $A=2; 4; 6$  В и угловой частоте  $\omega t = \pi/4$ .

**Задача 6.10.** Сигнал с ионизационного датчика давления обслуживается линейным интегратором с ценой импульса 2 мВ. При давлении 0,001 Па отсчет соответствует 10000 импульсов. Какое давление установилось в системе, если напряжение на выходе интегратора 1 В.?

## Практическое занятие 7. Числовое программное управление

### 7.1 Основные понятия

Для решения задач этой темы рекомендуется составить масштабный эскиз выполнения операции, проанализировать значения функций при изменении координат. Желательно провести оценку координат траектории при изменении параметров системы. Целесообразно провести анализ типа средств пересчета координат: круговой или линейный интерполятор, функциональный преобразователь и т.д. Круг задач, решаемых системами числового программного управления подобен друг другу. Например, задачи, решаемые системой кругового интерполятора подобны решениям векторов в полярной системе координат, а задачи с использованием цифрового дифференциального анализатора подобны задачам на приращения значений функций. Полезно проанализировать тип выполняемой программы. Например: программа с непрерывным изменением аргумента - это отрезка детали или ее проточка в виде цилиндра. Программа с подпрограммой - это две операции. Координата начала второй операции начнет отсчитываться после выполнения первой операции. Таким образом, выполнится перебазировка координат под вторую операцию. Рекомендуются геометрические построения заданных уравнений. При расчете поправок установки координат следует помнить, что общая погрешность вычисляется как квадратный корень из сумм

квадратов отдельных погрешностей.

## 7.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** На токарном станке с ЧПУ выполняется программа линейной обработки детали по базовой координате  $Y=4$  мм. Начиная с координаты  $X=200$  мм путем перезадавания координаты «X» и «Y» кратно 1 мм выполняется подпрограмма оформления отрезки по уравнению окружности  $X^2+Y^2=R^2$ . На какой координате «X» деталь будет перерезана?

Решение. Проводим перебазировку координат относительно поверхности. Подставляя в уравнение значения  $X=0, Y=0$ ;  $X=1, Y=1$ ;  $X=2, Y=2$ ;  $X=3, Y=3$ .

Находим радиус окружности как квадратный корень из  $R$ . При  $X=3$  и  $Y=3$  находим, что  $\sqrt{R} > 4$ .

Следовательно, деталь будет перерезана при  $X=200+3=203$  мм.  
 Ответ: 203.

**Задача 2.** Точка прихода руки робота выполнена по программе линейного интерполятора на цифровом дифференциальном анализаторе (ЦДА) и реализует зависимости типа:  $X=b_x t$ ;  $Y=b_y t$ . При координате  $X=250$  приращение  $b_x=0,5$  мм. Считая интерполятор двухкоординатным, определить координату «Y», если ее приращение  $b_y=0,2$ .

Решение. По координате  $X$  определяется значение общего параметра «t».  $t=250/0,5=500$ ;  $Y=0,2 \times 500=100$ . Ответ: 100.

## 7.3 Задачи для проработки темы

**Задача 7.1.** Обработка торца детали на станке ЧПУ проводится по третьему члену полинома Лагранжа, имеющему вид шаровой функции:

$Y(x)=0,5(5X^3-3x)$ . Определить значение координат выхода резца из детали при  $x=2;3;4$ , если выполняется программа с непрерывным изменением аргумента.

**Задача 7.2.** На токарном станке с ЧПУ выполняется программа линейной обработки детали по базовой координате  $Y=4$  мм. Начиная с координаты  $X=200$  мм путем перезадавания координаты «X» и «Y» кратно 1 мм выполняется подпрограмма оформления отрезки по уравнению окружности  $X^2+Y^2=R^2$ . На какой координате «X» деталь будет перерезана?

**Задача 7.3.** Токарный станок с ЧПУ проводит изготовление конусов с углом при вершине 90 градусов из прутка диаметром 50 мм. Пренебрегая толщиной реза, определить константу перебазировки координаты «X»

**Задача 7.4.** Рассчитать поправку коррекции программы, если погрешность настройки инструмента  $\delta_1=0,02$  мм, погрешность

перебазировки координат  $b_2=0,01$  мм, погрешность обработки  $b_3=0,04$  мм.

**Задача 7.5.** На станке с ЧПУ изготавливаются детали диаметром 50 мм длиной 500 мм. После координаты  $X=500$  производится отрезка под углом 45 градусов. Определить координату перебазировки “X”, когда деталь полностью отрезается.

**Задача 7.6.** Точка прихода пальца робота выполнена по программе линейного интерполятора на цифровом дифференциальном анализаторе (ЦДА) и реализует зависимости типа:  $X=b_x t$ ;  $Y=b_y t$ . При координате  $X=250$  приращение  $b_x=0,5$  мм. Считая интерполятор двух координатным, определить координату “Y”, если ее приращение  $b_y=0,1; 0,2; 0,3$ .

**Задача 7.7.** Вычислить координату “Y” конечной точки вектора, если цена импульса аргумента  $\omega = \pi/4$ , а число импульсов аргумента  $t=2$ . Программа реализована по принципу кругового интерполятора на цифровом дифференциальном анализаторе (ЦДА) для вектора длиной  $R=100$  мм.

**Задача 7.8.** Приращение координаты руки робота задается оценочной функцией:  $bz=x^2 + Y^2 + 4$ . Вычислить общую длину вектора, если значение общего параметра  $z=5; 10; 15$  при шаге координат  $X=2, Y=3$ .

**Задача 7.9.** Управление скоростью резания осуществляется по формуле  $n=f/kR$ , где  $n$ -об/мин,  $f$ - тактовая частота, гц;  $k$  - коэффициент деления сумматора;  $R$ -радиус резания, мм. Определить число оборотов шпинделя токарного станка на расстоянии 2 мм от оси вращения, если тактовая частота управляющих импульсов  $f=1000$ гц, а коэффициент деления сумматора  $K=2$ .

**Задача 7.10.** Настройка фрезерного станка на прямоугольный отрез выполняется при координатах:  $X=20, Y=30$  и заканчивается, когда выполняется теорема Пифагора ( $r^2=x^2+Y^2$ ).

Определить время настройки фрезерного станка на прямоугольный отрез, если тактовая частота генератора  $t_i=1$ кГц, а коэффициент деления сумматора  $K=2$ .

## **Практическое занятие 8. Сертификация, инструкции, последовательности операций**

### **8.1 Основные понятия**

Под сертификацией технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов понимается соответствие ГОСТ определенного параметра технического средства, процесса, оборудования или материала.

Завод имеет право выпускать только сертифицированную продукцию. Такая продукция сопровождается техническим паспортом. В случае выхода из строя сертифицированный элемент может быть закуплен и заменён.

Разработка инструкций по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала позволяет организовывать безопасные и эффективные приемы эксплуатации оборудования. Инструкцией по эксплуатации может быть алгоритм включения и выключения вакуумной установки, последовательность операций подготовки к формированию покрытий, последовательность действий при проведении измерения какого-то параметра материала, по сути это моделирование предстоящей работы.

Многообразие технических приемов, параметров материалов и инструментов, историй технологических операций и т.п. может быть оптимизировано на программном уровне. Существует большое количество программных продуктов, предназначенных для технологии (так называемые языки пользователя для программирования электрофизических установок). Наиболее простым и достаточно распространенным программным обеспечением являются программы подачи команд включения или выключения в определенное время или при достижении определенного параметра. Это программы типа «Время – команда», «Время – параметр».

## 8.2 Примеры решения задач

### *Примеры решения задач по сертификации*

**Задача 1.** Приобретен новый вакуумный насос марки НВПР 16-066. По паспорту насос должен давать вакуум на уровне 1 Па. Фактически насос развивает вакуум 5 Па. Соответствуют ли параметры требованиям сертификации.

*Решение.* Давление 5 Па гораздо выше, чем давление 1 Па. Такой насос не может обеспечить ряд технологических операций при давлении менее 5 Па.

Ответ: насос не соответствует сертификации.

**Задача 2.** Мастер Самоделкин сам изготовил и установил на установку программируемый регулятор напряжения. Можно ли считать изделие сертифицированным?

Ответ: нельзя, потому что не заводское изделие.

**Задача 3.** Разработайте инструкцию по включению установки на форвакууме.

*Решение.* Алгоритм включения любой вакуумной установки на форвакуумном режиме состоит в следующем.

Изучить паспорт установки	Закрывать все вентили	Включить форвакуумный насос	Откачка газа в течение 3-5 минут	Измерить вакуум
---------------------------	-----------------------	-----------------------------	----------------------------------	-----------------

**Задача 4.** Разработайте инструкцию по выключению установки, работающей на форвакууме.

*Решение.* Алгоритм выключения любой вакуумной установки, работающей при форвакуумном давлении, состоит в следующем.

Выключить вакуумметры	Закрывать все вентили	Выключить форвакуумный насос	Открыть напуск газа в насос	Отключить рубильник
-----------------------	-----------------------	------------------------------	-----------------------------	---------------------

*Примеры решения задач по программному обеспечению*

**Задача 5.** Производится нагрев кристалла со скоростью 2 градуса в минуту. Какой язык пользователя наиболее предпочтителен для управления регулятором нагревателя?

Ответ: «Время-команда».

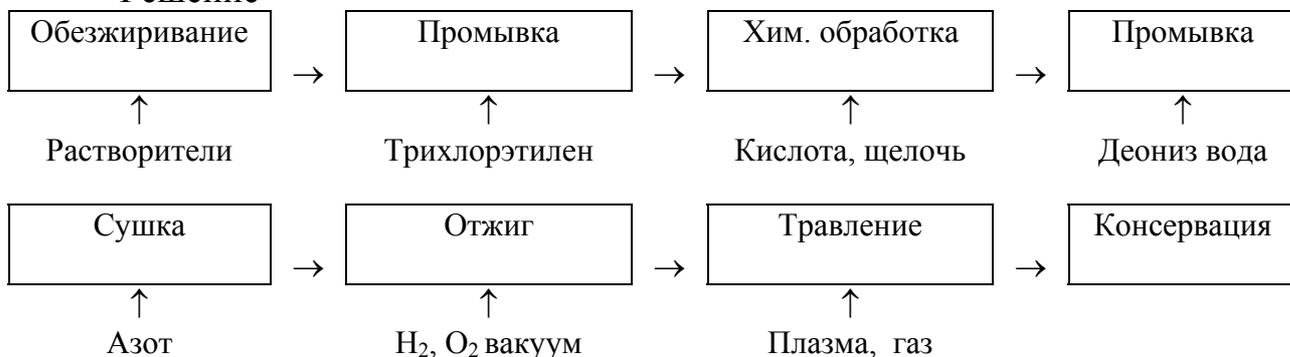
**Задача 6.** Процесс изготовления фотоэлектронных умножителей связан с необходимостью распыления материалов при давлении  $10^{-3}$  Па. Какой язык пользователя наиболее предпочтителен для управления процессом откачки?

Ответ: «Время- параметр»

*Примеры решения задач по составлению последовательностей технологических операций*

**Задача 7.** Составить общую схему последовательности технологических операций по очистке стеклянных изделий.

*Решение*



**Задача 8.** Составить последовательность технологических операций подготовки испарителя для испарения алюминия методом термического испарения в вакууме.

*Решение.*

Теория испарения материалов	Выбор марки вольфрама	Механическая очистка от аквадага	Очистка от углерода в щелочи	Монтаж в вакуумной камере
-----------------------------	-----------------------	----------------------------------	------------------------------	---------------------------

**Задача 9.** Составить последовательность технологических операций для формирования волновода на стекле

Решение.

Вначале 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 представлена общая схема технологического процесса изготовления планарного волновода на стекле.

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)

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

Третий этап - выход из технологического процесса (согласно алгоритму выключения установки)

### 8.3 Задания для проработки темы

**Задание 8.1.** Для проведения исследований закуплен этиловый спирт. При высыхании спирта на подложке остались радужные пленки. Сертифицируйте спирт по чистоте.



**Задание 4.2.** Составьте последовательность операций по очистке стеклянной подложки перед напылением пленки.

**Задание 4.3.** Составьте последовательность технологических операций по формированию волноводного слоя из окиси цинка на стекле

**Задание 4.4** После формирования алюминиевого покрытия выяснилось, что пленка не полупрозрачная, а непрозрачная. Напишите инструкцию, как снять эту пленку.

**Задание 4.5.** Составить общую схему последовательностей технологических операций подготовки стеклянной подложки для формирования на ней алюминиевого покрытия толщиной 1 мкм.

**Задание 4.6.** Составить последовательность технологических операций обезгаживания приповерхностных слоев кристалла ниобата лития.

**Задание 4.7.** Внезапно отключилась электроэнергия, питающая установку. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

**Задание 4.8.** Внезапно прекратилась подача воды на установку, работающую на высоковакуумном режиме. Составьте инструкцию, как действовать в такой ситуации.

**Задание 4.9.** По истечению 10 минут нагрева высоковакуумного насоса выяснилось, что забыли открыть воду для охлаждения установки. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

**Задание 4.10.** При выключении вакуумного насоса НВЗ-20 не произвели напуск газа в насос. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

### **Рекомендуемая литература**

1. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А. А. Барыбин - М.: Физматлит, 2006. – 423 с.

2. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро - и нанотехнологий. Томск, 2005, 400 с.

3. Данилина Т.И. Технология СБИС : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, - Томск : ТУСУР, 2007. - 287 с..

4. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 525 с. ISBN 5-03-003432-3

**Периодическая литература** (за последние 5 лет).

Журналы: “Физика и химия обработки материалов” , “Известия вузов, серия физика”, “Автоматика и вычислительная техника” и др. Реферативные журналы: ”Электроника”, “Физика”, “Химия”, описания патентов и авторских свидетельств по классам H01J, H01S, H05H, C23C.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Основы технологии оптических материалов и изделий  
Методические указания к практическим занятиям

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