

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

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ  
КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления  
«Электроника и наноэлектроника»

Томск 2018

## **Орликов Леонид Николаевич.**

Специальные вопросы технологии приборов квантовой электроники: методические указания к практическим занятиям для студентов направления «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2018. - 38 с.

Целью настоящего пособия является углубление понимания процессов, происходящих при изготовлении приборов квантовой электроники. Уделяется внимание процессам обеспечения условий формирования нанослоев, процессам подготовки изделий к технологическим операциям. Рассматриваются варианты задач по расчету вакуумных систем, элементов и приборов квантовой электроники и инструкции по технологическому обслуживанию оборудования.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника».

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ  
КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления  
«Электроника и наноэлектроника»

Разработчик  
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## Содержание

Введение .....	5
Практическое занятие 1. Проектирование безмасляных вакуумных систем для технологии производства приборов квантовой электроники.....	5
1.1 Основные понятия .....	5
1.2 Примеры решения задач по теме .....	8
1.3 Задачи для проработки темы .....	8
1.4 Ответы к задачам .....	9
Практическое занятие 2. Расчет безмасляной вакуумной системы для технологии приборов квантовой электроники (индивидуальное задание).....	10
2.1 Основные понятия .....	10
2.2 Задачи для проработки темы .....	11
Практическое занятие 3. Проектирование подготовительных операций для технологии приборов квантовой электроники.....	13
3.1 Основные понятия .....	13
3.2 Примеры решения задач по теме .....	15
3.3 Задачи по проработки темы .....	16
3.4 Ответы к задачам .....	17
Практическое занятие 4. Расчет электрофизических параметров источников частиц для технологии приборов квантовой электроники .....	18
4.1 Основные понятия .....	18
4.2 Примеры решения задач по теме .....	19
4.3 Задачи для проработки темы .....	20
4.4 Ответы к задачам .....	21
Практическое занятие 5. Расчет сорбции и десорбции газа для технологии приборов квантовой электроники .....	22
5.1 Основные понятия .....	22
5.2 Примеры решения задач по теме .....	23
5.3 Задачи для проработки темы .....	24
5.4 Ответы к задачам .....	26
Практическое занятие 6. Сертификация (семинар).....	27
6.1 Тесты по теме .....	27
6.2 Вопросы для обсуждения и выступлений на семинаре .....	29
Практическое занятие 7. Рекомендации по разработке инструкций для технологии разработки приборов квантовой электроники.....	30
7.1 Основные понятия .....	30
7.2 Примеры решения задач по теме .....	31
7.3 Задачи для проработки темы .....	32
7.4 Ответы к задачам .....	33
Практическое занятие 8. Расчет параметров технологических операций .....	34
8.1 Основные понятия .....	34
8.2 Примеры решения задач по теме .....	34
8.3 Задачи для решения по теме .....	34
8.4 Ответы к задачам .....	36
Рекомендуемая литература .....	37

## Введение

Рекомендации по решению задач по дисциплине «Специальные вопросы технологии приборов квантовой электроники»: материал пособия составлен так, чтобы он способствовал углублению и закреплению теоретических знаний, а также вырабатывал навык в решении практических вопросов и задач. Прежде, чем решать задачу или ответить на вопрос, надо понять их сущность, смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу. Очень полезно начертить схему, относящуюся к задаче или вопросу. Следует помнить, что для удобства записи в ряде случаев знак «Е» обозначает 10 в степени. Желаем успехов!

### Практическое занятие 1. Проектирование безмасляных вакуумных систем для технологии производства приборов квантовой электроники

#### 1.1 Основные понятия

##### 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.

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 1 \text{ торр} = 133,3 \text{ Па};$$

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

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

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:

$$1 \text{ см}^3 \text{ атм/с} = 0,76 \text{ торр л/с};$$

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

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

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

### 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:

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

### 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 (1.5):

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

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 $Pd < 0,015$	$U_m = 121 d^3/L$	$U_m = 91d^2$

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 (л/с)

P, мм рт ст	R=1	R=2	R=3	R=4
1	30	476	2480	7566
10 <sup>-1</sup>	3,9	54,7	263	826
5·10 <sup>-2</sup>	2,14	26,4	121	362
10 <sup>-2</sup>	1,26	12,4	49,9	137
10 <sup>-3</sup>	0,9	8,23	28,4	69,5

## 1.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.1.** Трубопровод проводимостью  $U= 1 \text{ E-2 м}^3 / \text{с}$  имеет на концах разность давлений 10 Па. Определить поток газа  $Q$  через коммуникацию.

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

**Задача 1.2.** Проводимость вакуумной трассы  $U = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Производительность насоса составляет  $S_n = 25 \text{ E-3 м}^3/\text{с}$ . 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 11.** Камера сообщается с высоковакуумным затвором через отверстие диаметром 6 см. При коммутации затвора на насос



производительностью 2000 л/с. Определить эффективность использования вакуумной установки, если диаметр входного отверстия насоса равен 26 см.

**Задача 12.** В вакуумной камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$  проводится распыление фторопласта. Изменение давления составляет от 1 до 10 Па за 1 сек. Определить импульсный поток газовыделения.

**Задача 13.** Суммарный поток газовыделения в вакуумную камеру составляет  $0,02 \text{ Па м}^3/\text{с}$ . Процесс должен проводиться при рабочем давлении  $10^{-2}$  Па. Определить необходимую производительность высоковакуумного насоса.

**Задача 14.** Определить время откачки вакуумной камеры объемом  $0,1 \text{ м}^3$  от атмосферного давления до 1 мм рт ст насосом с производительностью 5 л/с.

**Задача 15.** 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 16.** Давление в вакуумной камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$  за время  $t=100 \text{ с}$  уменьшилось в 2,7 раза. Определить эффективную скорость откачки.

**Задача 17.** 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 18.** 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 на молекулярно-вязкостном режиме.

**Задача 19.** Проводимость вакуумной трассы составляет  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Производительность насоса составляет  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Найти скорость откачки объекта.

**Задача 20.** Трубопровод проводимостью  $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  имеет на концах разность давлений 100 Па. Определить поток газа через коммуникацию.

#### 1.4 Ответы к задачам

Тема 1. Вакуумная технология

Задачи	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ответы	0,6	0,9	2	160	281	$1 \cdot 10^{-3}$	0,3	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$

## Практическое занятие 2. Расчет безмасляной вакуумной системы для технологии приборов квантовой электроники (индивидуальное задание)

### 2.1 Основные понятия

Провести анализ вакуумной системы – это значит определить ее возможности для проведения определенной технологической операции. Специфика заключается в лексическом анализе требований заказчика. Часто заказчик просит получить продукт, не понимая возможностей его получения на данном оборудовании. Например, нанести пленку титана на кристалл ниобата лития для получения диффузионного волновода на типовой установке вакуумного напыления, означает, что нужно нанести пленку не титана, а его окисла. В противном случае при проведении диффузии не сформируется волноводный слой. Однако установка не предназначена для работы на кислороде, а напуск кислорода в масляную вакуумную систему имеет специфику.

#### Расчет вакуумных систем

Основные математические соотношения для анализа и расчета вакуумных систем.

Суммарный поток газов в вакуумной камере определится выражением:

$$\sum Q = (Ag\Omega)_k + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{нап} = PS, \quad (2.1)$$

В большинстве процессов вакуумную систему необходимо промывать инертным газом, либо постоянно напускать инертный газ. Поэтому первые три члена уравнения составляют ничтожную величину по сравнению с напуском газа, и ими можно пренебречь. Обычно поток напускаемого газа составляет:

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

Необходимая скорость откачки высоковакуумного насоса  $S_n$  определится отношением суммарного потока в вакуумной камере  $Q$  к рабочему давлению  $P_{раб}$ , которое почти всегда равно  $P_{раб} = 10^{-4}$  мм рт ст

$$S_n = \sum Q / 10^{-4}$$

Скорость откачки форвакуумного насоса  $S_{\phi}$  определяется как отношение газового потока на выходе диффузионного насоса  $Q$  к выходному давлению диффузионного насоса ( $P_{вых}$ ), которое у диффузионных насосов составляет  $P_{вых} = 10 \text{ Па}$  (0,1 мм рт ст).

$$S_{\phi} = \sum Q / 0,1$$

Задаваясь объемом камеры  $V$  при откачке газа в диапазоне от атмосферного давления до 133 Па (1 мм рт. ст.) время откачки можно рассчитать по формуле:

$$t = 8V / S_n$$

Время откачки объекта на высоком вакууме 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

Поскольку высоковакуумный насос пристыкован непосредственно к вакуумной камере, то принимается, что скорость откачки объекта  $S_o$  равна скорости откачки насоса  $S_n$ .

## 2.2 Задачи для проработки темы

**Задание** (многовариантное, фронтальное)

1. Рассчитать вакуумную систему под конкретный технологический процесс, проводимый на типовой вакуумной установке при давлении  $10^{-4}$  мм рт ст.

2. Задаться объемом вакуумной камеры, составить уравнение газового баланса при натекании инертного газа от  $0 - 30 \text{ см}^3 \text{ атм / час}$ .

3. Рассчитать необходимые средства для откачки газа за время не более часа.

## **Проводимые процессы**

1. Напыление пленок на приборы квантовой электроники
2. Травление кристаллов
3. Получение полупрозрачных покрытий
4. Просветление покрытий методом ионного травления и др.

## **Методические указания по решению**

Методика решения всех предлагаемых задач одинаковая. Задания различаются напуском газа, используемыми материалами, газами и полученными производительностями откачных средств.

## Практическое занятие 3. Проектирование подготовительных операций для технологии приборов квантовой электроники

### 3.1 Основные понятия

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.

Высококачественная очистка приборов квантовой электроники чаще проводится ионными и плазменными методами с применением, так называемых, высоких технологий.

#### Общие сведения по теме

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

$$P = 4aL\rho b/d^2$$

где  $P$  - мощность Вт, 1 Вт = 1 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 ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ), 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:

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

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:

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

где  $n_e$  - концентрация электронов в плазме  $1/\text{m}^3$ ,

$e=1,6 \text{E}19$  Кл- заряд электрона;

$k=1,38\text{E}-23$ -постоянная Больцмана;

$Te$  - температура электронного газа;

$m=9,1\text{E}-31$  кг - масса электрона.

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

$$h1/h2= \sqrt{U1/U2},$$

Скорость испарения материала лазером определяется по формуле:

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

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:

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

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 [ $R$ , мкг/см<sup>2</sup>] иона с энергией  $E$ , имплантируемого атома массой  $M1$  и порядковым номером  $Z1$  в мишень с параметра

$$R = C2 M2 [(Z1)^{1/3} + (Z2)^{1/3}] E / Z1 \times Z2,$$

где  $C2$  - Константа безразмерной энергии взаимодействия ( $C2=0,65$ ).

Размерность  $E$  - кЭв.

### 3.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 3.1.** Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять:  $a = 10E-4$ , 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 Вт

**Задача 3.2.** 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.

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

где  $P$ - давление пара, мм рт ст;  $M = 47$  -молекулярный вес титана.

Ответ: 6E-5.

### 3.3 Задачи по проработки темы

**Задача 31.** Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять:  $\alpha = 10 \text{E-}4$ , энергия испарения  $L = 20 \text{ Дж/см}^2$ , плотность материала  $\rho = 7,6 \text{ г/см}^3$ , диаметр пучка  $d = 0,01 \text{ см}$ , глубина проникновения температуры луча  $b = 0,5 \text{ см}$ .

**Задача 32.** Вычислить глубину проникновения электронов в сталь в процессе электронно-лучевой сварки при напряжении 50 кВ.

**Задача 33.** 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  $\alpha = 10 \text{E-}4$ , плотность материала принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ . Удельная теплота испарения  $L = 20 \text{ Дж/см}^2$ .

**Задача 34.** Рассчитать число ампервитков магнитной линзы для фокусировки электронного пучка с энергией  $U = 20 \text{ кВ}$  в точке с фокусным расстоянием  $f = 0,2 \text{ м}$  от центра линзы. Средний радиус витка принять равным  $R = 5 \text{ см}$ , коэффициент заполнения катушки проводом  $k = 0,6$ .

**Задача 35.** Рассчитать плотность электронного тока, которую можно извлечь из плазмы источника на основе тлеющего разряда с объемной концентрацией  $n_e = 10^{16} \text{ 1/м}^3$ . Температуру электронного газа принять равной  $E4$ .

**Задача 36.** 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 37.** Рассчитать скорость испарения титана лазером при получении нитрида титана в азотной среде. Давление паров титана  $P = 1 \text{ мм рт ст}$  при температуре  $T = 2450^0 \text{ К}$ . Коэффициент испарения  $A = 1$  - как для испарителя идеальной формы.



**Задача 38.** Рассчитать первичный ток электронной пушки с током луча 200 мА и ускоряющим напряжением 20 кВ.

**Задача 39.** Рассчитать напряженность поля в отклоняющей системе, если длина пути электрона в магнитном поле  $L=0,5$  м, анодное напряжение  $U=20$  кВ, угол отклонения луча  $\theta =0,2$  рад

**Задача 40.** 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  $C2=0,65$ .

### 3.4 Ответы к задачам

Задача	31	32	33	34	35
Ответ	30	1,4E-6	15,2	424	70
Задача	36	37	38	39	40
Ответ	6,39	6E-5	2,7E-4	19,1	22,1

## Практическое занятие 4. Расчет электрофизических параметров источников частиц для технологии приборов квантовой электроники

### 4.1 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 кг/м<sup>3</sup> .

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

$$V=f P/\sqrt{2\pi mkT},$$

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  $P1$  до  $P2$  и подчиняется соотношению:

$$Q=kFt(P1 - P2)/ \ln(P1-P2),$$

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/мольК<sup>0</sup>,  $T$  - температура,  $P_i$  - парциальное давление компоненты газа.

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

Скорость термовакuumного напыления выражается соотношением:

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

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:

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

$$d = \ln I_1 / 10^6 \ln I_2.$$

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.

## 4.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 4.1.** 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 кг/м<sup>3</sup> .

Ответ: 1E-4

**Задача 4.2.** Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_n$  составляет 1E-3 м<sup>2</sup>. Расстояние до испарителя  $r=0,4$  м.

Решение.  $\text{КПД} = S_n/S_u$ ; Поверхность шара  $S_u = 4\pi r^2$ .

Ответ: 0,05%

### 4.3 Задачи для проработки темы

**Задача 41.** Используя понятие длины свободного пробега молекул, вычислить насколько нужно уменьшить расстояние от испарителя до подложки при изменении давления в камере от 10E-3 до 10E-2 Па

**Задача 42.** В процессе термовакuumного испарения испарилась навеска из железа весом 1E-4 кг. При расстоянии до подложки 0,2м определить толщину напыленной пленки. Плотность материала навески принять равной 7,6 г/см<sup>3</sup>.

**Задача 43.** Оценить удельную скорость конденсации пленки углерода с парциальным давлением 1 Па при проведении процесса эпитаксии, если температура подложки составляет 500 градусов Кельвина. Коэффициент конденсации принять равным 0,2.

**Задача 44.** Определить количество газа, поглощенного парами титана за время напыления пленки с подложки площадью 1E-2 м<sup>2</sup> в течение 5 секунд, если давление в системе изменилось от 11E-2 до 1E-2 Па. Константа равновесия равна 2. Давление паров титана равно 1 Па.

**Задача 45.** Определить абсолютную величину изобарного потенциала процесса формирования  $TiO_2$  при напылении титана . Температура испарителя 1400<sup>0</sup> К, парциальное давление паров титана 1,1 Па.

**Задача 46.** Определить изменение давления за время напыления пленки в течение 10 сек в камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$ , если количество поглощенного газа составляет  $1 \text{ Е-}2 \text{ Пам}^3 / \text{с}$

**Задача 47.** Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_n$  составляет  $1 \text{ Е-}3 \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,5 \text{ м}$ .

**Задача 48.** 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  $K = 1 \text{ Е}6$ .

**Задача 49.** Определить удельную скорость испарения углерода ( $\text{г/с с } 1 \text{ см}^2$ ) при температуре  $1200^0 \text{ К}$

**Задача 50.** Определить толщину конденсата пленки  $d$ , если скорость испарения  $\omega = 6 \text{ Е-}10 \text{ кг/сек с } 1 \text{ м}^2$ , плотность потока  $\gamma = 10 \text{ Е}7 \text{ } 1/\text{м}^3$  при расстоянии до подложки  $r = 1 \text{ м}$ . Угол осаждения конденсата  $45^0$ .

#### 4.4 Ответы к задачам

Задача	41	42	43	44	45
Ответ	0,58	$5 \text{ Е-}5$	$90,9 \text{ Е}8$	0,4	1107,5
Задача	46	47	48	49	50
Ответ	1	0,03	$1,1 \text{ Е-}6$	$6 \text{ Е-}5$	$3 \text{ Е-}8$

## Практическое занятие 5. Расчет сорбции и десорбции газа для технологии приборов квантовой электроники

### 5.1 Основные понятия

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

Поток газовой выделенности с поверхности площадью « $A$ » определяется через коэффициент удельной газовой выделенности « $g$ » соотношением:

$$Q = g \times A$$

Поток газовой выделенности, 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

$$K = V_1/V_2 \quad .$$

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:

$$T_{в} = 0,5 T_{пл} \quad .$$

## 5.2 Примеры решения задач по теме

Задачи по этой теме рассчитаны на закрепление знаний по технологии анализа сорбционных процессов при обработке материалов.

**Задача 5.1.** 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.

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

**Задача 5.2.** Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку вакуумной камеры толщиной  $5 \times 10^{-3}$  м и площадью  $1 \text{ м}^2$  из атмосферного давления в вакуум с давлением  $10 \times 10^{-4}$  Па. Коэффициент диффузии принять равным  $10 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной  $53 \times 10^{19}$ . 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 5.3.** 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 5.4.** 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
-------------------------------------	----------------------	-----------------	--------------------------	-------

### 5.3 Задачи для проработки темы

**Задача 51.** Определить поток газовой выделения с поверхности 6 зеркал, каждое из которых имеет размеры  $0,5 \times 1,5$  м. Удельные газовой выделения принять равными  $4,5 \times 10^{-5} \text{ Па м}^3/\text{с}$

**Задача 52.** За время очистки токовводов методом прокаливания в вакууме в течение 2000 с давление в вакуумной камере объемом  $0,1 \text{ м}^3$  изменилось от  $10 \times 10^{-3}$  до  $10 \text{ Па}$ . Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток десорбции.



**Задача 53.** Рассчитать скорость травления изделий из стали при использовании в качестве ионообразующего газа аргона с плотностью ионного тока  $1 \text{ А/м}^2$ , при ускоряющем напряжении до 10 кВ. Плотность материала принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ , число Авогадро принять равным  $6 \text{ Е}23$ . Коэффициент травления принять равным  $10^{-4}$ .

**Задача 54.** Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку диффузионного насоса 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.

**Задача 55.** В водородную печь для очистки деталей подается водород с парциальным давлением  $200 \text{ Па}$ . Какое парциальное давление составляют пары воды, если константа равновесия паров по отношению к водороду равна двум?

**Задача 56.** Скорость травления поверхности вглубь при очистке в 1,5 раза превышает скорость травления вдоль поверхности. Определить показатель анизотропии.

**Задача 57.** 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  $10 \text{ Е}^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

**Задача 58.** В вакуумной камере должно проводиться обезгаживание свинцового испарителя. Определить максимальную температуру обезгаживания, если температура плавления свинца составляет  $343^{\circ} \text{ С}$

**Задача 59.** Температура плавления вольфрама составляет  $2800^{\circ} \text{ С}$ . Учитывая, что вольфрам подвержен рекристаллизации, определить максимальную температуру обезгаживания.

**Задача 60.** Рассчитать температуру восстановительного отжига кристалла ниобата лития для снятия дислокаций после ионного травления, если температура плавления кристалла равна  $1400^{\circ} \text{ К}$ .

#### 5.4 Ответы к задачам

Задача	51	52	53	54	55
Ответ	40,5E-5	5E-4	52E-6	5,3E15	400
Задача	56	57	58	59	60
Ответ	1,5	2E-3	462	700	700

## Практическое занятие 6. Сертификация (семинар)

### 6.1 Тесты по теме

1. Сертификация – это...
  - а) форма подтверждения соответствия определенным требованиям;
  - б) форма отчетности;
  - в) сертификат участника мероприятия;
  - г) процедура выявления контрафакта.
2. Сертификат соответствия – это..
  - а) документ соответствия;
  - б) документ с чертежами;
  - в) документ о форме изделия;
  - г) документ о материале изделия.
3. Система сертификации – это ....
  - а) система правил;
  - б) система допусков на изделие;
  - в) система сопряжения изделий;
  - г) система качеств.
5. Декларация о соответствии - это ...
  - а) документ, в котором исполнитель удостоверяет соответствие свойств товара;
  - б) удостоверение соответствия формы;
  - в) удостоверение соответствия личности продавца;
  - г) декларация о намерениях производителя.
6. Знак соответствия – это ....
  - а) знак, зарегистрированный в установленном порядке;
  - б) штамп производителя;
  - в) штамп контролера;
  - г) акцизная марка.
7. Госстандарт РФ – это орган ...
  - а) руководящий, координирующий и контролирующий;
  - б) исполнительный;
  - в) обучающий;
  - г) систематизирующий.
8. Главная функция Центрального органа системы сертификации - это..
  - а) руководство и координация деятельности органов по сертификации и испытательных лабораторий;

- б) предписывающая;
  - в) контролирующая;
  - г) законодательная.
9. Аккредитация – это ...
- а) документ на право определенной деятельности;
  - б) патент на право деятельности;
  - в) документ, дающий право выдавать сертификаты;
  - г) протокол согласования направления деятельности.
10. Сертификат качества – это ...
- а) документ о соответствии товара определенным стандартам или техническим условиям;
  - б) документ о состоянии фрагмента изделия;
  - в) документ о внешнем виде изделия;
  - г) документ о качестве услуг.
11. Госстандарт - это орган ...
- а) метрологии;
  - б) статистики;
  - в) предписания;
  - г) обучения
12. Какая группа товаров подлежит сертификации по показателям энергоэффективности?
- а) пищевая;
  - б) электротехническая;
  - в) сельхозпродукция;
  - г) товары народного потребления.
13. Добровольная сертификация проводится на условиях:
- а) договора между заявителем и органом по сертификации;
  - б) протокола намерений;
  - в) акта приема-передачи;
  - г) акта выполненных работ.
14. Лицензирование – это ...
- а) выдача прав на выдачу определенных документов о деятельности;
  - б) покупка прав на пользование продукцией;
  - в) покупка патента на пользование;
  - г) процедура отзыва прав пользования
15. Регламент – это ...
- а) сумма технических требований к объектам стандартизации;
  - б) свод договоренностей с заказчиком;
  - в) перечень терминологии;

г) перечень обязательств заказчика.

## **6.2 Вопросы для обсуждения и выступлений на семинаре**

1. На какие цели направлена сертификация
2. Основные понятия в области сертификации
3. Каковы принципы сертификации
4. Какие структуры входят в «Систему ГОСТ Р»
5. Добровольная и обязательная сертификации для приборов квантовой электроники
6. Сертификация оборудования
7. Какие преимущества дает производителю наличие сертификата
8. Сертификация – как балансир между качеством продукции и возможностями производства.
9. Стандартизация как нормативно-методическая база сертификации и товарной экспертизы
10. Нормативные документы стандартизации
11. Обязательные требования государственных стандартов

## Практическое занятие 7. Рекомендации по разработке инструкций для технологии разработки приборов квантовой электроники

### 7.1 Основные понятия

Задачи этого раздела рассчитаны на закрепление материала по энергоемкости, стандартизации и материалоемкости процессов, по определению показателя параллельности процессов, по оптимизации последовательностей технологических операций.

Коэффициент использования материала в изделии массой  $M_i$  относительно массы заготовки  $M_z$  рассчитывается по формуле:

$$K_u = M_i / M_z.$$

Масса заготовки с учетом базовых показателей технологичности может быть рассчитана по массе аналога  $M_a$  через коэффициент изменения размеров  $K_p$ :

$$M_z = M_a K_p.$$

Эрготический показатель - это показатель автоматизации, рассчитываемый по объему машинных и ручных работ.

$$K = \sum \text{Эмаш} / (\sum \text{Эмаш} + \sum \text{Эруч})$$

Коэффициент параллельности – это отношение времени параллельной работы к времени всего процесса

Время изготовления  $T_{изг}$  партии деталей определенного количества “ $m$ ” складывается из времени подготовки оборудования  $T_{подг}$ , времени изготовления каждой детали  $t_i$ , время контроля  $T_k$ , планируемых отказов по организационно-техническим причинам  $T_{от}$ . При этом учитывается коэффициент использования оборудования  $K_u$ .

$$T_{изг} = T_{подг} + \sum_m t_i / k_i \times m + T_k \times m + T_{от}$$

Коэффициент освоенности изделия есть отношение

$K = \frac{\sum \text{сторонних деталей}}{\sum \text{всех деталей без учета крепежных деталей}}$

Процент стандартизации изделия  $K_{ст}$ , есть сумма числа стандартных изделий в отрасли  $N_{ст.о}$  и числа покупных деталей  $N_n$ , отнесенная к числу стандартных изделий без крепежа  $N_{ст}$

$$K_{ст} = (N_{ст.о} + N_n) / N_{ст}$$

Коэффициент использования прогрессивной технологии есть отношение массы чистовой детали к массе черновой заготовки

$$K_{и} = N_{чист} / N_{черн}$$

Коэффициент повторяемости изделий, есть отношение числа оригинальных деталей в изделии к суммарному числу проекций этих изделий в чертежах.

Коэффициент стабильности процесса, есть отношение дисперсии мгновенного распределения контролируемого параметра  $\sigma_m$  к средне квадратичному отклонению «б» всех параметров процесса.

$$K_c = \sigma_m / \sum \sigma$$

Коэффициент настроенности линии  $K_n$  есть отношение среднеарифметического значение параметра  $\sigma_{са}$  без поля допуска размеров  $\sigma_{доп}$  к сумме среднеквадратичного отклонения всех параметров  $\sigma$ , включая среднюю цену деления измерительных приборов  $\sigma_{пр}$ .

$$K_n = (\sigma_{са} - \sigma_{доп}) / \sigma + \sigma_{пр}$$

## 7.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 7.1.** Определить показатель параллельности процесса при термовакуумном напылении пленок, если весь процесс напыления длился 4 часа, а суммарное время параллельно включенных блоков составило 2 часа. Ответ дать в процентах.

Решение. Коэффициент параллельности – это отношение времени параллельной работы к времени всего процесса

$$K = 2/4 = 0,5 = 50\%$$

**Задача 7.2.** Рассчитать коэффициент освоенности изготовления изделия, если число покупных комплектующих  $N_n=10$ , число стандартных изделий в отрасли  $N_c=5$ , число заимствованных деталей с соседнего завода  $N_z=8$ , число нестандартных деталей  $N_{nc}=2$ , общее число деталей в изделии  $N=95$ , число крепежных стандартных изделий  $N_{cm}=20$ . Ответ дать в процентах.

Решение

$$K = \frac{\sum \text{сторонних деталей}}{\sum \text{всех деталей без крепежа}}$$
$$K = 10 + 5 + 8 + 2 / 95 - 20 = 0,33.$$

Ответ 33%

### 7.3 Задачи для проработки темы

**Задача 71.** Рассчитать коэффициент использования материала при изготовлении изделия массой 5 кг. Масса аналога 10 кг. Коэффициент изменения размеров  $K_p=2$ .

**Задача 72.** Рассчитать эрготический показатель автоматизации технологического процесса, если при его выполнении тратится 3 квт·ч машинных затрат и 2 квт·ч на ручной труд.

**Задача 73.** Определить показатель параллельности процесса при термовакуумном напылении пленок, если весь процесс напыления длился 4 часа, а суммарное время параллельно включенных блоков составило 1 час. Ответ дать в процентах.

**Задача 74.** Рассчитать время изготовления партии микросхем в количестве 100 шт., если время подготовки оборудования составляет  $T_{подг}=10$  ч, время изготовления каждой микросхемы  $t_i = 0,5$  часа, время контроля  $t_k = 0,1$ ч, планируемые отказы по организационно-техническим причинам  $T_{от} = 5$  ч. Коэффициент использования оборудования  $K_u=0,5$ .



**Задача 75.** Рассчитать коэффициент освоенности изготовления изделия, если число покупных комплектующих  $N_n=10$ , число стандартных изделий в отрасли  $N_c=5$ , число заимствованных деталей с соседнего завода  $N_z=8$ , число нестандартных деталей  $N_{nc}=2$ , общее число деталей в изделии  $N=100$ , число стандартных крепежных изделий  $N_{cm}=20$ . Ответ дать в процентах.

**Задача 76.** Рассчитать процент стандартизации изделия  $K_{cm}$ , если число стандартных изделий подобного типа в отрасли  $N_{cm.o}=8$ , число покупных деталей  $N_n=10$ , а число стандартных изделий без крепежа  $N_{cm}=60$

**Задача 77.** Рассчитать процент использования прогрессивной технологии при формообразовании изделий, если из 8 кг заготовок 3 кг составляют чистовые.

**Задача 78.** Рассчитать коэффициент повторяемости изделий, если число оригинальных деталей в изделии  $N=2$ , а суммарное число проекций этих изделий в чертежах равно 8.

**Задача 79.** Рассчитать коэффициент стабильности процесса, если дисперсия мгновенного распределения контролируемого параметра  $\sigma_m=0,1$ , а средне квадратичное отклонение всех параметров  $\sigma=0,8$ .

**Задача 80.** Рассчитать коэффициент настроенности линии производства колб радиоламп, если среднеарифметическое значение толщины стенки равно  $\bar{b}_{ca}=0,6$  мм, средние поля допусков размеров  $\bar{b}_{don}=0,18$  мм, среднеквадратичное отклонение всех параметров  $\sigma=0,5$  при цене деления измерительных приборов  $b_{np}=0,1$ .

#### 7.4 Ответы к задачам

Задачи	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Ответы	0,25	0,6	25	125	25	30	60	0,25	0,125	0,7

## Практическое занятие 8. Расчет параметров технологических операций

### 8.1 Основные понятия

Задачи этой темы содержат практические количественные данные об исходных параметрах процесса. Следует отметить, что область задач не преследует охват широкого круга сведений о параметрах процессов, а развивает методы получения сведений о процессах. При рассмотрении заданий этой темы важно проанализировать тип первичного устройства для регистрации параметра, принцип преобразования сигнала, передающую функцию цепи, в которой происходит измерение сигнала. При анализе уравнений, описывающих процесс важно определить уровень описания процесса. При описании процесса уравнениями первого порядка простота уравнений оборачивается неустойчивостью системы из-за необходимости рассмотрения процесса по частям. Более устойчивы те системы, которые описываются уравнениями второго и третьего порядка.

### 8.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 8.1.** Измеритель парциальных давлений типа омегатрон подсоединен к приемно-усилительной лампе. Определить разрешающую способность по массовому числу омегатрона ( $\Delta M = M/R$ ) в области 44 массового числа ( $CO_2$ ), если известно, что для  $M=18$  ( $H_2O$ ) разрешающая способность прибора  $R=20$ . Принять  $RM = const$

Решение. Так как  $RM = 20 \times 18 = const = 360$ .

Тогда для  $H_2O$   $\Delta M = M/R = 18/20 = 0,95$ .

Для случая  $CO_2$  имеем  $R_2 M_2 = const = 360$  находим  $R_2 = 360/44 = 8,18$ ;

В итоге имеем  $\Delta M = 44/8,18 = 5,37$ . Ответ: 5,4.

**Задача 8.2.** В вакуумной камере объемом  $V = 0,1 \text{ м}^3$  при импульсном распылении полимера электронным лучом изменение давления “ $dP$ ” составляет от 1 до 10 Па за 1 сек. Определить поток газовой выделенной, если он определяется соотношением:  $Q = d(PV)/dt = P dV/dt + V dP/dt$

Решение. При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым. Ответ: 0,9

### 8.3 Задачи для решения по теме

**Задача 81.** 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?

**Задача 82.** Таймер времени построен по принципу отсчета импульсов от сети 50 Гц. Какое время прошло с начала технологической операции, если отсчет составил 1000 импульсов.

**Задача 83.** Рассчитать время работы таймера  $T$  для сканирования электронорезиста с числом элементов  $10E8$  при плотности тока  $J=1$  А/см<sup>2</sup> и коэффициенте чувствительности  $k= 10E-6$ , если время сканирования определяется выражением:  $T=k/J$ . Размерность  $J$  - А/см<sup>2</sup>.

**Задача 84.** В автоматизированной системе ввода информации в ЭВМ используется сглаживающий фильтр. Коэффициент пульсаций на входе  $K_{вх}=10$ , а коэффициент пульсаций на выходе  $K_{вых}=2$ . Определить коэффициент сглаживания  $K_{сг} = K_{вх}/K_{вых}$

**Задача 85.** Для изготовления микросхем используется двухстадийная диффузия (загонка и разгонка примеси). Определить время разгонки (секунды), если оно выражается уравнением:  $t=X^2/(4D \ln N_n/N_{исх})$ .  $X=2,7$  мкм – глубина залегания  $p-n$  перехода,  $D=9,3E-13$  см<sup>2</sup>/с – коэффициент диффузии (при температуре 1423 К),  $N_n=2 \times 10E19$  – поверхностная концентрация,  $N_{исх}=E17$  – исходная концентрация.

**Задача 86.** Единичное перемещение светового пера системы ввода информации  $\Delta X=\Delta Y=0,2$  мм. Число адресуемых точек равно 100. Определить площадь экрана для управления системой.

**Задача 87.** Рассчитать напряженность магнитного поля  $H$  (А/м) в отклоняющей системе, если длина пути электрона в магнитном поле  $L=0,5$ м, анодное напряжение  $U=20$  кВ, угол отклонения луча  $\theta =0,2$  рад. Зависимость угла отклонения от параметров системы определяется выражением:  $\theta =2,96HL/\sqrt{U}$ .

**Задача 88.** Определить необходимую производительность  $V$  (бит/с) координирующей ЭВМ технологического процесса, если она определяется выражением:  $V=1/(N_k/N_c)+T_k$ , где  $N_k=2$  – соответственно число слов в задаче,  $N_c=1$  – скорость ввода с учетом ожидания опроса,  $T_k=1$  – время тестового

контроля.

**Задача 89.** Импульсный фильтр подает сигналы счета осциллограмм по номерам дискретного момента времени  $n$ , с входным сигналом  $U[n]$  и выходным сигналом  $u[n]$ . Он выполняет операцию дифференцирования методом конечной разности, которая описывается уравнением  $U[n]=u[n]-u[n-i]$  до тех пор пока интенсивность сигнала осциллограммы  $i>0$ . Определить число шагов дифференцирования, если шаг дифференцирования равен  $\delta=0,05$ , а интенсивность сигнала обрабатываемой осциллограммы  $i=10$

**Задача 90.** Время задержки  $T$  (сек) включения диффузионного насоса после запуска механического насоса определяется функцией:

$$T=2t+20,$$

где  $t=8V/S$ . Определить время задержки, если  $V=100$  литров,  $S=4$  л/с

#### 8.4 Ответы к задачам

Задача 81.  $10^{-3}$  Па дает 10000 имп  $\times 2 \times 10^{-3} = 20$  В. Рекомендуется составить пропорцию. Ответ: 1,1

Задача 82. Ответ: 20 секунд

Задача 83. Ответ: 100сек

Задача 84. Ответ: 5.

Задача 85.  $3,7 \times 10^3$  сек  $\approx$  1 час

Задача 86. Ответ: 20мм.

Задача 87. Ответ: 19,1 А/м.

Задача 88. Ответ: 0,33 бит/с

Задача 89. Ответ: 200

Задача 90. Ответ: 420

## 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 микрoэлектронных 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.

Учебно-методическое пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы технологии приборов квантовой электроники  
Методические указания к практическим занятиям

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