

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

Кафедра электронных приборов

## **ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

2012

**Орликов Леонид Николаевич.**

Технология материалов и изделий электронной техники: методические указания к практическим занятиям для студентов направления «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» / 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. - 31 с.

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

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность «Электронные приборы и устройства» по дисциплине «Технология материалов и изделий электронной техники».

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.

## Технология материалов и изделий электронной техники

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

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

## Содержание

Введение.....	5
1 Технологичность и проектирование технологий.....	5
1.1 Основные понятия.....	5
1.2 Примеры решения задач по теме.....	6
1.3 Задачи для проработки темы.....	6
2 Вакуумная технология.....	7
2.1 Основные понятия.....	7
2.2 Примеры решения задач.....	8
2.3 Задачи для проработки темы.....	8
3 Подготовка изделий к технологическим операциям.....	9
3.1 Основные понятия.....	9
3.2 Примеры решения задач.....	10
3.3 Задачи для проработки темы.....	10
4 Пленочная технология, эпитаксия.....	11
4.1 Основные понятия.....	11
4.2 Примеры решения задач.....	12
4.3 Задачи для проработки темы.....	13
5 Технология интегральных микросхем, интегральная оптика, литография, термические процессы.....	14
5.1 Основные понятия.....	14
5.2 Примеры решения задач.....	15
5.3 Задачи для проработки темы.....	15
6 Технология электровакуумных приборов.....	16
6.1 Основные понятия.....	16
6.2 Примеры решения задач.....	17
6.3 Задачи для проработки темы.....	18
7 Лучевые технологии (электронно-лучевая, лазерная).....	19
7.1 Основные понятия.....	19
7.2 Примеры решения задач.....	20
7.3 Задачи для проработки темы.....	21
8 Высокие технологии (упрочняющая, плазменная, порошковая).....	22
8.1 Основные понятия.....	22
8.2 Примеры решения задач.....	23
8.3 Задачи для проработки темы.....	23
9 Автоматизация технологических процессов.....	24
9.1 Основные понятия.....	24
9.2 Примеры решения задач.....	25
9.3 Задачи для проработки темы.....	25
10 Числовое программное управление.....	26
10.1 Основные понятия.....	26
10.2 Примеры решения задач.....	27
10.3 Задачи для проработки темы.....	27
Ответы на задачи.....	29

## Введение

Задачи составлены на основе общих закономерностей протекания процессов при изготовлении электронных приборов. Формулы для вычислений взяты из лекционного материала. В ряде случаев рекомендуется проанализировать системы единиц измерения. Это связано с тем, что выпускаемые параметры оборудования тяготеют к измерениям в технических единицах.

## 1 Технологичность и проектирование технологий

### 1.1 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  $M_z$  насчитывается 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  $K_i$ .

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

Коэффициент освоенности изделия есть отношение

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

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  $N_{cm}$

$$K_{cm} = (N_{cm.o} + N_n) / N_{cm}$$

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

$$K_u = N_{чист} / N_{черн}$$

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 « $\bar{\sigma}$ » всех параметров процесса.

$$K_s = \sigma_m / \sum \bar{\sigma}$$

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

$$K_n = (\bar{\sigma}_{са} - \bar{\sigma}_{дон}) / \bar{\sigma} + \bar{\sigma}_{пр}$$

## 1.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 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 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  $N_{нс} = 2$ , общее число деталей в изделии  $N = 95$ , число крепежных стандартных изделий  $N_{cm} = 20$ . Ответ дать в процентах.

Решение

$$K = \sum \text{сторонних деталей} / \sum \text{всех деталей без крепежа}$$

$$K = 10 + 5 + 8 + 2 / 95 - 20 = 0,33; \text{ Ответ } 33\%$$

## 1.3 Задачи для проработки темы

Задача 1.1. Рассчитать коэффициент использования материала при

изготовлении изделия массой 5 кг. При массе аналога 8; 10; 25 кг. Коэффициент изменения размеров  $Kp=2$ .

Задача 1.2. Рассчитать эрготический показатель автоматизации технологического процесса, если при 3 кВт/ч машинных затрат, на ручной труд тратится 2; 1,5; и 1 кВт/ч.

Задача 1.3. 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 1.4. 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  $tk=0,1$  ч, планируемые отказы по организационно-техническим причинам  $T_{от} = 5$  ч. Коэффициент использования оборудования  $Ku=0,5$ .

Задача 1.5. Рассчитать коэффициент освоенности изготовления изделия, если число покупных комплектующих  $Nn=10$ , число стандартных изделий в отрасли  $Nc=5$ , число заимствованных деталей с соседнего завода  $Nz=8$ , число нестандартных деталей  $Nnc=2$ , общее число деталей в изделии  $N=100$ , число стандартных крепежных изделий  $Ncm=20$ . Ответ дать в процентах.

Задача 1.6. Рассчитать процент стандартизации изделия  $Kcm$ , если число стандартных изделий подобного типа в отрасли  $Ncm.o=8$ , число покупных деталей  $Nn=10$ , а число стандартных изделий без крепежа  $Ncm=60$

Задача 1.7. Рассчитать процент использования прогрессивной технологии при формообразовании изделий, если из 8 кг заготовок чистовые изделия составляют 3; 5; 8 кг.

Задача 1.8. Рассчитать коэффициент повторяемости изделий, если число оригинальных деталей в изделии  $N=2$ , а суммарное число проекций этих изделий в чертежах равно 8.

Задача 1.9. Рассчитать коэффициент стабильности процесса, если дисперсия мгновенного распределения контролируемого параметра  $b_m=0,1$ , а средне квадратичное отклонение всех параметров  $b=0,8$ .

Задача 1.10. Рассчитать коэффициент настроенности линии производства колб радиоламп, если среднеарифметическое значение толщины стенки равно  $b_{ca}=0,6$  мм, средние поля допусков размеров  $b_{дон}=0,18$  мм, среднеквадратичное отклонение всех параметров  $b=0,5$  при цене деления измерительных приборов  $b_{np}= 0,1$ .

## 2 Вакуумная технология

### 2.1 Основные понятия

Задачи по теме вакуумной технологии рассчитаны на закрепление материала в области определения эффективности работы вакуумного оборудования, определения потоков газовой выделенности, проводимости

вакуумных коммуникаций на различных режимах течения газа. Решение задач требует знания закономерностей согласования откачных средств и основного уравнения вакуумной техники.

## 2.2 Примеры решения задач

**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  $1/S_o = 1/25 + 1/0,1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$

## 2.3 Задачи для проработки темы

**Задача 2.1.** 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 2.2.** 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 газовой выделения.

**Задача 2.3.** Суммарный поток газовой выделения в вакуумную камеру составляет  $0,02 \text{ Па м}^3/\text{с}$ . Определить необходимые производительности высоковакуумного насоса при рабочих давлениях 0,01; 0,1; 1 Па.

**Задача 2.4.** 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 2.5.** Определить время откачки сосуда объемом  $0,1 \text{ м}^3$  от давления  $10 \cdot 10^5 \text{ Па}$  до 1 Па, если эффективная скорость откачки насоса в диапазоне от  $10 \cdot 10^5$  до 100 Па составляет 5 л/с., а в диапазоне 50 Па - 3 л/с.

**Задача 2.6.** 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 2.7.** 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 2.8.** 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 на молекулярно-вязкостном режиме.

Задача 2.9. Проводимость вакуумной трассы составляет  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Производительность насоса составляет  $5 \text{ Е-}3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Найти скорость откачки объекта.

Задача 2.10. Коммуникации проводимостями  $U = 0,01; 0,1; 1 \text{ м}^3/\text{с}$  имеют на концах разность давлений  $100 \text{ Па}$ . Определить потоки газа, пропускаемые коммуникацией.

### 3 Подготовка изделий к технологическим операциям

#### 3.1 Основные понятия

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

Основные понятия.

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

$$Q = g \cdot A$$

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

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

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

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

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

Абсолютное число молекул « $g^1$ », проходящих через стенку толщиной  $h$  и площадью  $1 \text{ м}^2$  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  $Kp$  паров (например воды) по отношению к газу (например водороду) определяется через парциальное давление  $P$  соотношением:

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

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:

$$T_{в} = 0,5 T_{пл}.$$

### 3.2 Примеры решения задач

**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.

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

$$\text{Ответ: } 5,3 \text{ Е}15.$$

### 3.3 Задачи для проработки темы

**Задача 3.1.** Определить поток газовой выделения с двухсторонней поверхности 6 зеркал, для трех сортов стекол размером  $0,5 \times 1,5 \text{ м}$ , если удельные газовыделения составляют  $0,1; 0,01; \text{Е-}5 \text{ Па м}^3/\text{с}$

**Задача 3.2.** За время очистки тоководов методом прокаливания в вакууме в течение 2000 сек, давление в вакуумной камере изменилось от  $0,01$  до  $10 \text{ Па}$ . Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток откачки при объемах камеры  $0,1; 1; 3 \text{ м}^3$ .

**Задача 3.3.** 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  $10 \text{ кВ}$ . Плотность

материала принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ , число Авогадро принять равным  $6 \text{ E}23$ . Коэффициент травления принять равным 10-4.

Задача 3.4. Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку диффузионного насоса толщиной  $5 \text{ E-}3 \text{ м}$  и площадью  $1 \text{ м}^2$  из атмосферного давления в вакуум с давлением  $10 \text{ E-}4 \text{ Па}$ . Коэффициент диффузии принять равным  $10 \text{ E-}5 \text{ м}^2 / \text{с}$ . Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной  $53 \text{ E}19$ . Убыль концентрации от давления считать линейной.

Задача 3.5. В водородную печь для очистки деталей подается водород с парциальным давлением  $200 \text{ Па}$ . Какое парциальное давление составляют пары воды, для констант равновесия паров по отношению к водороду 2; 4; 6?

Задача 3.6. 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 3.7. 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  $10 \text{ с}$ . Коэффициент диффузии принять равным  $10 \text{ E-}7 \text{ м}^2 / \text{с}$

Задача 3.8. В вакуумной камере должно проводиться обезгаживание свинцового испарителя. Определить максимальную температуру обезгаживания, если температура плавления свинца составляет  $343^0 \text{ C}$

Задача 3.9. Температура плавления вольфрама составляет  $2800^0 \text{ C}$ . Учитывая, что вольфрам подвержен рекристаллизации, определить максимальную температуру обезгаживания.

Задача 3.10. Рассчитать температуру восстановительного отжига кристалла ниобата лития для снятия дислокаций после ионного травления, если температура плавления кристалла равна  $1400^0 \text{ K}$ .

## 4 Пленочная технология, эпитаксия

### 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:

$$L=0,63\text{E-}3 / P ;$$

где  $P$  - в Па, а  $L$  - м.;

Толщина образующейся пленки при термовакуумном напылении определяется по формуле:

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

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

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

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

где  $f$  - коэффициент конденсации,  $P$  - давление паров испаряемого материала,  $m$  - молекулярный вес конденсируемого материала,  $K$  - постоянная Больцмана ( $K=1,38 \cdot 10^{-23}$  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:

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

где  $k$  = константа равновесия

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

$$\Delta Z = -R T \ln P_i,$$

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  $S_n$  ко всей площади разлета пара.

Скорость термовакuumного напыления выражается соотношением:

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

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 приборной (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

**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  $S_n$  составляет  $1\text{E-3} \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,4 \text{ м}$ .

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 4.1. 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 4.2. В процессе термовакuumного испарения испарилась навеска из железа весом  $1\text{E-4} \text{ кг}$ . При расстоянии до подложки  $0,2 \text{ м}$  определить толщину напыленной пленки. Плотность материала навески принять равной  $7,6 \text{ г/см}^3$ .

Задача 4.3. 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 4.4. 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 4.5. Определить абсолютную величину изобарного потенциала процесса формирования  $\text{TiO}_2$  при напылении титана. Температура испарителя  $1400^\circ \text{ К}$ , парциальное давление паров титана  $1,1 \text{ Па}$ .

Задача 4.6. Определить изменение давления в каждой камере за время напыления пленки в течение  $10 \text{ сек}$ , если количество поглощенного газа составляет  $0,01 \text{ Пам}^3 / \text{с}$ , а объем камер составляет  $0,1$ ;  $1$ ;  $2 \text{ м}^3$ .

Задача 4.7. Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки  $S_n$  составляет  $1\text{E-3}$ ;  $0,01$ ;  $0,1 \text{ м}^2$ . Расстояние до испарителя  $r = 0,5 \text{ м}$ .

Задача 4.8. 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  $K = 1\text{E}6$ .

Задача 4.9. Определить удельную скорость испарения углерода ( $\text{г/с с } 1 \text{ см}^2$ ) при температуре  $1200$ ;  $1300$ ;  $1400 \text{ К}$

Задача 4.10. Определить толщину конденсата пленки  $d$ , если скорость

испарения  $\omega=6E-10$ кг/сек с  $1 \text{ м}^2$ , плотность потока  $\gamma=10E7 \text{ 1/м}^3$  при расстоянии до подложки  $r=1$ м. Угол осаждения конденсата  $45^0$ .

## 5 Технология интегральных микросхем, интегральная оптика, литография, термические процессы

### 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  $Rn$  по соотношению

$$R= Rn \cdot L/b.$$

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.

$$E\phi= hc/\lambda, \text{ (Дж)}$$

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  $1$  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:

$$D=D_0 (-\exp Ea/KT)$$

1 эВ=1,6E-19 Дж;  $K= 1,38E-23$ – постоянная Больцмана.

При электронолитографии начальный диаметр электронного пучка “ $d_0$ ” может увеличиться на величину “ $d\delta$ ” за счет дифракции на фотошаблоне. Увеличение диаметра пучка за счет дифракции определяется выражением:

$$d\delta=7,5 /b\sqrt{U},$$

где  $b$ - угол сходимости пучка ( рад)

$U$ - ускоряющее напряжение

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

$$B= J \times eU/\pi KT,$$

где  $J$ - плотность тока эмиссии ( $\text{А}/\text{м}^2$ ) при температуре катода  $T$  при ускоряющем напряжении  $U$ ,

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

## 5.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Рассчитать время сканирования электронорезиста с числом элементов  $N=10E9$  при плотности тока  $J=1 \text{ А}/\text{см}^2$ . 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  $Rn=80$  ом/квadrat.

Решение.  $R= RnL/b$ . Ответ: 6,2E-3

## 5.3 Задачи для проработки темы

Задача 5.1. Рассчитать время сканирования электронорезиста с числом элементов  $10E8$  при плотности тока  $1 \text{ А}/\text{см}^2$  для коэффициентов

чувствительности E-6, E-5; E-4.

Задача 5.2. При ширине резистора 0,5 мм, рассчитать длину диффузионного резистора для толсто пленочной микросхемы для получения резистора с сопротивлением 1 кОм. Удельное поверхностное сопротивление принять равным  $R_n=80$  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 фотолитографии на длине волны 0,4; 0,45; 0,5 мкм.

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

Задача 5.6. Рассчитайте длины волн, соответствующие электрону при проведении процесса электролитографии 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  $N_0=10^{17}$  1/см<sup>3</sup>. Значение вероятности диффузии равно 0,8, коэффициент диффузии  $D=10E7$  1/см<sup>2</sup>

Задача 5.8. Рассчитайте коэффициент диффузии титана в танталат висмута при температуре 1000<sup>0</sup> К. Энергия активации процесса  $E_a=4,2$  эВ, Коэффициент стационарной диффузии  $D_0=1E10$ .

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

Задача 5.10. Рассчитать яркость электронного пучка для электролитографии, если плотность тока эмиссии при температуре катода 2000<sup>0</sup> К равна 1А/м<sup>2</sup> при ускоряющем напряжении 10 кВ

## 6 Технология электровакуумных приборов

### 6.1 Основные понятия

Коэффициент обратимости геттера  $R$  — это отношение количества газа при прогреве геттера к количеству газа, поглощаемого геттером в первоначальном состоянии:

$$R=Q_{\text{выд}}/Q_{\text{погл}}$$

Константа проницаемости  $K_0$  газа в металле определяется произведением коэффициента диффузии газа в металле  $D_0$  на константу растворимости газа в металле  $S_0$ , Пам<sup>3</sup>/кг.

$$K_0=D_0S_0.$$

Для масспектрометра типа омегатрона произведение разрешающей

способности прибора  $R$  на регистрируемое массовое число  $M$  - есть величина постоянная ( $RM=\text{const}$ ). Разрешающая способность по массовому числу  $\Delta M = M/R$ .

Температура отжига паяных изделий составляет 75% от температуры плавления припоя ( $T_{отж}=0,75 T_{пл. \text{ припоя}}$ )

Давление  $P$  ( мкм рт ст), которое установится в электровакуумном приборе в процессе работы геттера, определяется соотношением:

$$P=G/kS,$$

где  $G$ -скорость объемного поглощения, лмкм/с,  $k$  - коэффициент поглощения,  $S$ - площадь геттера, см<sup>2</sup>

Количество газа  $Q$ , поглощенного геттером, пропорционально константе растворимости газа в геттере, площади геттера  $S$ , времени  $t$  и давлению  $P$  и определяется соотношением

$$Q=kSPt.$$

Величина смещения торца керамики относительно металла в металлокерамическом спае радиусом  $R$  при температуре  $T$  пропорциональна разности температурных коэффициентов линейного расширения материалов  $\alpha$  и определяется соотношением:

$$\Delta = \alpha \Delta TR, [\text{м}],$$

где  $\Delta$  где  $\Delta T$ - разность температур от точки твердения припоя до комнатной.

Толщина стенки колбы  $S$  электровакуумного прибора диаметром  $D$  рассчитывается из условия прочности и давления в окружающей среде. При допустимом напряжении разрушения "б" толщина стенки прибора и допуске на отклонение толщины "С" определяется выражением:

$$S= (P_{окр} \times D/2\delta) + C,$$

где  $P_{окр}$ - окружающее давление, [атм]

$$D-[\text{м}], \delta -[\text{кг/мм}^2]$$

Скорость поглощения газа геттером "V" пропорциональна константе поглощения "k" а также корню квадратному от давления и определяется соотношением:

$$V=k\sqrt{P}$$

Критический коэффициент температурного расширения керамики "б<sub>T</sub>", спаянной с металлом, при относительном удлинении  $\varepsilon$  и модуле упругости "E" определяется выражением:

$$\delta_T = \varepsilon E;$$

## 6.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Геттером электродугового насоса поглощено газа в количестве  $Q_{погл}=6E-5$  Па м<sup>3</sup>/с. При прогреве насоса стационарный поток поглощения составил  $Q_{погл}= 2E-5$ . Рассчитать коэффициент обратимости геттера относительно исходного состояния.

Решение  $R=Q_{\text{выд}}/Q_{\text{погл}}$ ;  $Q_{\text{выд}}=Q_{\text{погл1}}-Q_{\text{погл2}}=(6-2)E-5=4E-5$   
 Ответ:  $R=(4E-5)/(6E-5)=0,66$ .

**Задача 2.** Измеритель парциальных давлений типа омегатрон подсоединен к приемно-усилительной лампе. Определить разрешающую способность по массовому числу омегатрона ( $\Delta M$ ) в области 44 массового числа ( $\text{CO}_2$ ), если известно, что для  $M=18$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) разрешающая способность прибора  $R=22$

Решение. Из уравнений для омегатрона известно, что  $RM=\text{const}$ . Подставляя значения имеем  $RM=22 \times 18 = \text{const} = 396$ , тогда для  $\text{H}_2\text{O}$   $\Delta M = M/R = 18/22 = 0,81$ .

Для случая  $\text{CO}_2$  имеем  $R_2 M_2 = \text{const} = 396$  находим  $R_2 = 396/44 = 9$ ;

В итоге имеем  $\Delta M = 44/9 = 4,8$  Ответ: 4,8.

### 6.3 Задачи для проработки темы

Задача 6.1. Геттером электродугового насоса поглощено газа в количестве  $8E-5$  Па м<sup>3</sup>/с. При прогреве геттера поток поглощения составил  $2E-5$  для геттера №1,  $4E-5$  для №2 и  $6E-5$  для №3. Рассчитать коэффициенты обратимости геттеров.

Задача 6.2. Определить коэффициент диффузии водорода в железном аноде приемно-усилительной лампы. Если константа проницаемости  $K_0 = 3,4E-8$ , а растворимость водорода в железе составляет  $S_0 = 0,17$  Пам<sup>3</sup>/кг

Задача 6.3. Измеритель парциальных давлений типа омегатрон подсоединен к приемно-усилительной лампе. Определить разрешающую способность по массовому числу омегатрона ( $\Delta M$ ) в области 44 массового числа ( $\text{CO}_2$ ), если известно, что для  $M=18$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) разрешающая способность прибора  $R=20$

Задача 6.4. Определить температуру отжига паяных металлокерамических ламп, если они спаяны медносеребряным припоем с температурой плавления  $1000^0$  К.

Задача 6.5. Какое остаточное давление установится в колбе радиолампы, если по истечении очень длительного времени работы геттера на площади  $S=10$  см<sup>2</sup> скорость объемного поглощения  $G=E-6$  лмк/с.? Константа поглощения  $K=1$ . Какое давление установится для  $G = 12$  и  $18$  лмк/с. Ответ дать в мм рт ст.

Задача 6.6. Определить количество газа, поглощенного геттером площадью  $E-2$  м<sup>2</sup> за 20 сек при давлении  $E-4$ ,  $E-3$ ,  $0,01$  Па. Скорость поглощения газа считать линейной с константой растворимости  $K=1$ .

Задача 6.7. Найти величину смещения торца керамики относительно металла в металлокерамическом спае радиусом  $R=0,1$ м при температуре  $1800^0$  К, если разность температурных коэффициентов линейного расширения материалов равна  $3E-7$  1/град

Задача 6.8. Рассчитайте толщину  $S$  стенки колбы радиолампы диаметром  $D=1$  см из условия прочности, если лампа работает в барокамере

с давлением  $P_{окр} = 0,8$  атм. Допустимое напряжение на разрушение  $\bar{\sigma} = 12 \text{ кг/мм}^2$ . Технологический допуск на отклонение толщины  $C = 0,1$  мм.

Задача 6.9. Насколько увеличится скорость поглощения газа титановым геттером, если начальное давление в колбе увеличится в 10, 100, 1000 раз. Константу скорости поглощения считать постоянной.

Задача 6.10. Рассчитать критический коэффициент температурного расширения керамики спаянной с металлом, если относительное удлинение  $\varepsilon = 20\%$  при модуле упругости  $E = E-3 \text{ кг/мм}^2$ .

## 7 Лучевые технологии (электронно-лучевая, лазерная)

### 7.1 Основные понятия

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 " $\bar{\sigma}$ " и диаметра луча " $d$ ". Например, для операций испарения мощность электронного источника рассчитывается по соотношению:

$$P = 4aL\rho\bar{\sigma}/d^2$$

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 ( $\text{Вт/см}^2$ ), 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:

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

Где  $n_e$  - концентрация электронов в плазме  $1/\text{м}^3$ ,  
 $e=1,6 \text{ E}19$  Кл- заряд электрона;  $\kappa= 1,38\text{E}-23$ -постоянная Больцмана;  $T$ - 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:

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

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:

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

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

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

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  $M1$  и порядковым номером  $Z1$  в мишень с параметрами  $(M2, Z2)$  определяется соотношением:

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

где  $C2$ - константа безразмерной энергии взаимодействия ( $C2=0,65$ ).  
 размерность  $E$ -кЭв.

## 7.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять:  $a= 10\text{E}-4$ , 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.  $V=4,4 \times 10^{-4} A P \sqrt{M/T}$  [г/см<sup>2</sup>с], где  $P$ - давление пара, мм рт ст;

$M=47$  -молекулярный вес титана. Ответ:  $6E-5$ .

### 7.3 Задачи для проработки темы

Задача 7.1. 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 7.2. 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 7.3. 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 7.4. 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 7.5. 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 7.6. 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 7.7. 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 7.8. Рассчитать первеансы электронной пушки с током луча 200, 400, 600 мА и ускоряющим напряжением 20 кВ.

Задача 7.9. 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 7.10. Рассчитать проекционный пробег [мкг/см<sup>2</sup>] 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  $C2=0,65$ .

## 8 Высокие технологии (упрочняющая, плазменная, порошковая)

### 8.1 Основные понятия

Унос массы "m" при эрозии электродов определяется соотношением:

$$m = GIt,$$

где  $G$ -удельная эрозия материала;  $I$ -ток в амперах;  $t$ -время, секунды

Унос массы пропорционален объему эрозии  $V$ :

$$m = \rho V$$

Энерговклад  $Q$  от действия пучка, измеряемый калориметрированием, определяется соотношением:

$$Q = Cm \Delta T,$$

где  $C$ - удельная теплоемкость материала калориметра (для меди  $C=0,38$ ),  $m$ - масса калориметра,  $\Delta T$ -изменение температуры калориметра вследствие воздействия пучка. Энерговклад от действия пучка, оцениваемый электрическим способом (по осциллограмме), рассчитывается по соотношению:

$$Q = UI \Delta t,$$

где  $t$  - длительность импульса.

Ларморовский радиус траектории электрона рассчитывается по формуле:

$$R = V' m / e z B,$$

где  $V'$  - скорость, перпендикулярная линиям магнитного поля.

$$V' = 5,9E5 \sqrt{U},$$

$Z$  - кратность заряда (в первом приближении  $Z=1$ ),  $e$ - заряд электрона,  $e=1,6E-19$  кл.

Диаметр зерна порошка ( $d$  мкм) по занимаемой им удельной поверхности  $S$  (см<sup>2</sup>/г) и плотности " $\bar{\sigma}$ " (г/см<sup>3</sup>) определяется по соотношению:

$$d = 6000 / S \times \bar{\sigma}$$

Условную пористость плазмонапыленного покрытия в относительных единицах ( $P(отн)$ ) можно определить, зная массу сухого образца в воздухе  $Mс$ , массу образца в пиктометрической жидкости  $Mж$ , массу насыщенного образца в воздухе  $Mн$  используя соотношение:

$$P(отн) = Mс / Mн - Mж$$

Расход воды  $G$  (л/с) для охлаждения плазмотрона при разности ее температур на входе и выходе ( $T2-T1$ ) рассчитывается по соотношению:

$$G = Q / C(T2-T1),$$

где  $Q$ - тепловой поток в стенку плазмотрона, Вт

$C$  - удельная теплоемкость воды.  $C=4,2E3$  Дж/кг град.

Масса материала " $m$ ", уносимая с катода за время  $t$  при горении дуги определяется скоростью эрозии  $Vэ$  и плотностью материала  $\rho$ :

$$m = \rho Vэ t$$

Время (ресурс) работы катода дугового распылительного устройства определяется соотношением:

$$t = m/IG,$$

где  $m$  - унос массы,  $I$  - рабочий ток,  $G$  - удельная эрозия  
Баланс энергии плазмотрона определяется выражением:

$$UI\eta = G(h1-h2),$$

где  $\eta = (0,6-0,75)$  - энергетический КПД плазменной струи;  
 $h1, h2$  - теплосодержание продуктов до и после плазмотрона (Дж/кг).  
 $G$  - расход газа (кг).

## 8.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Рассчитать срок службы медного катода вакуумно-дугового источника ионов для установки типа "Булат" для тока 100 А, если он ограничен уносом массы 20% от первоначальной. Принять удельную эрозию меди  $G=7E-12$  кг/кулон. Объем эрозии  $2E-7$  м<sup>3</sup>.

Решение. Унос массы " $m$ " при эрозии электродов определяется соотношением:

$$m = GI t, \quad (8.11)$$

где  $G$ -удельная эрозия материала;  $I$ -ток в амперах;  $t$ -время, секунды  
Унос массы пропорционален объему эрозии  $V$ :

$$m = \rho V \quad (8.2)$$

Выражая время из (8.1) и подставляя 0,2 от массы, определенной по уравнению (8.2), находим время в секундах и переводим его в часы

Ответ: 100 часов.

**Задача 2.** Рассчитать Ларморовский радиус траектории электрона в магнетроне с магнитной индукцией 0,1 Тл, работающем при напряжении 5 кВ.

Решение. Ларморовский радиус траектории электрона рассчитывается по формуле:  $R = V'm/ezB$ , где  $V'$ -скорость, перпендикулярная линиям магнитного поля.  $V' = 5,9E5 \sqrt{U}$ ,  $Z$ -кратность заряда (в первом приближении  $Z=1$ ),  $e$  - заряд электрона,  $e=1,6E-19$  кл. Ответ:  $4E-3$

## 8.3 Задачи для проработки темы

Задача 8.1. Рассчитать срок службы медного катода вакуумно-

дугового источника ионов для установки типа “Булат” для тока 100 А, если он ограничен уносом массы 20% от первоначальной. Принять удельную эрозию меди  $G=7E-12$  кг/кулон. Объем эрозии  $2E-7$  м<sup>3</sup>.

Задача 8.2. Рассчитать коэффициент пересчета между измерением энерговклада калориметрическим и электрическим способом. Форму импульса принять прямоугольной. Ускоряющее напряжение 100 кВ, ток ионов 1 кА, длительность импульса 10 мкс. Масса калориметра 0,366 кг, удельная теплоемкость калориметра 0,39. Изменение температуры калориметра 7 градусов.

Задача 8.3. Рассчитать Ларморовские радиусы траектории электрона в магнетроне с магнитной индукцией 0,2 Тл, работающем при напряжениях 1; 3; 5 кВ.

Задача 8.4. Рассчитайте диаметр зерна ( $d$ , мкм) испытуемого порошка, если при плотности порошка  $\bar{\rho}=3$  г/см<sup>3</sup> он занял удельную поверхность  $S=0,5E3$  см<sup>2</sup>/г

Задача 8.5. В относительных единицах рассчитайте условную пористость плазмонапыленного покрытия, если масса сухого образца в воздухе  $M_c=100$  г, масса образца в пиктометрической жидкости  $M_{жс}=50$ г, масса насыщенного образца в воздухе  $M_n=70$  г.

Задача 8.6. Рассчитать тепловой поток на катод плазмотрона из гафния для токов 100, 200, 300 А, если его величина описывается уравнением:

$$Q = 585 + 2,6 I \text{ (Вт)}$$

Задача 8.7. Тепловой поток в стенку плазмотрона составляет  $Q = 25$  Вт. Рассчитать расход воды  $G$  (л/с) для охлаждения при разности температур на входе и выходе 20 градусов. Удельная теплоемкость воды  $C=4,2E3$  Дж/кг град.

Задача 8.8. Определить массу материала, уносимого с медного анода плазмотрона за 1 час работы, если скорость эрозии за это время составила  $V_{\text{э}}=1,3E-8$  кг/м<sup>3</sup> в секунду. Плотность меди  $\rho=8,9E3$  кг/м<sup>3</sup>.

Задача 8.9. Рассчитать ресурс работы катода плазмотрона, если унос материала составил  $m=0,116$  кг при удельной эрозии  $G=5E-10$  кг и токе 250 А.

Задача 8.10. Рассчитать необходимые расходы газа в плазмотрон, обеспечивающий энергию струи  $UI\eta=6,6E5; 10E5; 15E5$  Дж с потерей теплосодержания “ $h$ ” от  $4E6$  Дж/кг до  $E6$  Дж/кг.

## 9 Автоматизация технологических процессов

### 9.1 Основные понятия

Общие подходы к решению задач

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”.

## 9.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** 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 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:  $0,2$  сек

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

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

## 9.3 Задачи для проработки темы

**Задача 9.1.** 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 9.2.** 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 9.3.** Рассчитать число мест, которые может обслужить робот, если уровень автоматизации операции без робота составлял  $a=0,8$ . Коэффициенты использования робота  $Kp=0,05; 0,3; 0,8$ . Уравнение мест:  $n=1/(1-a+Kp)$ .

**Задача 9.4.** 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 9.5.** Система децентрализованного управления первого уровня отключает плазмотрон при повышении потерь на катоде  $Q > 1000\text{ Вт}$ . 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 9.6. 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 9.7. Изодромное звено сглаживает и опережает сигнал по функции:

$$Kc = -0,2U + 0,1U - 0,4U + 0,7U$$

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

Задача 9.8. Найти координату смещения руки робота осуществляемой по функции:  $U_{см} = X_0 + (X \cdot ti / (X + 5))N$ , если  $X_0 = 200$ ,  $X = 20$ ,  $ti = 2,5$  - цена импульса смещения,  $N = 10$  - число корректирующих шагов.

Задача 9.9. 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 9.10. 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?

## 10 Числовое программное управление

### 10.1 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.

## 10.2 Примеры решения задач

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

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

Находим радиус окружности как квадратный корень из  $R$ . При  $X=3$  и  $U=3$  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:  $X=bx t$ ;  $U=by t$ . При координате  $X=250$  приращение  $bx=0,5$  мм. Считая интерполятор двухкоординатным, определить координату « $U$ », если ее приращение  $by=0,2$ .

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

## 10.3 Задачи для проработки темы

Задача 10.1. Обработка торца детали на станке ЧПУ проводится по третьему члену полинома Лагранжа, имеющему вид шаровой функции:  $U(x)=0,5(5X^3-3x)$ . Определить значение координат выхода резца из детали при  $x=2$ ; 3; 4, если выполняется программа с непрерывным изменением аргумента.

Задача 10.2. На токарном станке с ЧПУ выполняется программа линейной обработки детали по базовой координате  $U=4$  мм. Начиная с координаты  $X=200$  мм путем перезадавания координаты « $X$ » и « $U$ » кратно 1 мм выполняется подпрограмма оформления отрезки по уравнению окружности  $X^2+U^2=R^2$ . На какой координате « $X$ » деталь будет перерезана?

Задача 10.3. Токарный станок с ЧПУ проводит изготовление конусов с углом при вершине 90 градусов из прутка диаметром 50 мм. Пренебрегая толщиной реза, определить константу перебазирунки координаты « $X$ »

Задача 10.4. Рассчитать поправку коррекции программы, если погрешность настройки инструмента  $b_1=0,02$  мм, погрешность перебазирунки координат  $b_2=0,01$  мм, погрешность обработки  $b_3=0,04$  мм.

Задача 10.5. На станке с ЧПУ изготавливаются детали диаметром 50 мм длиной 500 мм. После координаты  $X=500$  производится отрезка под углом

5 градусов. Определить координату перебазирования “X”, когда деталь полностью отрезется.

Задача 10.6. Точка прихода пальца робота выполнена по программе линейного интерполятора на цифровом дифференциальном анализаторе (ЦДА) и реализует зависимости типа:  $X = \bar{b}_x t$ ;  $Y = \bar{b}_y t$ . При координате  $X=250$  приращение  $\bar{b}_x=0,5$  мм. Считая интерполятор двух координатным, определить координату “Y”, если ее приращение  $\bar{b}_y=0,1; 0,2; 0,3$ .

Задача 10.7. 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 10.8. Приращение координаты руки робота задается оценочной функцией:  $\bar{b}_z = x^2 + Y^2 + 4$ . Вычислить общую длину вектора, если значение общего параметра  $z=5; 10; 15$  при шаге координат  $X=2, Y=3$ .

Задача 10.9. 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 10.10. 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  $ti=1$ кГц, а коэффициент деления сумматора  $K=2$ .

## Ответы на задачи

### Тема 1 Технологичность и проектирование технологий.

Задачи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ответ	0,31 0,25 0,1	0,6 10,5 12	25	125	25	30	37 62,5 100	0,25	0,125	0,7

### Тема 2. Вакуумная технология

Задачи	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10
Ответ	0,0045, 0,45; 0,89	0,9	2 0,2 0,02	800 400 160	281	1E-3	0,3	3E-2	3E-2	1; 10; 100

### Тема 3. Подготовка изделий к технологическим операциям

Задача	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Ответ	0,9; 0,09, 9E-5	0,002; 0,005; 0,015	52E-6	5,3E15	400; 800; 1200
Задача	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Ответ	1,5; 1,7; 2	2E-3	462	700	700

### Тема 4. Пленочная технология

Задача	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Ответ	5; 0,5; 0,05; 0,005	5E-5	90,9E8	0,4	1107,5
Задача	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
Ответ	1; 0,1; 0,05	0,03; 0,3; 3	1,1E-6	6E-5; 6,36E-5 6,5E-5	3E-8

### Тема 5. Технология интегральных микросхем, интегральная оптика,

Задача	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5
Ответ	1000; 100; 10	6,2E-3	0,35	4,95E-21; 4,41E-21 3,9E-21	8,33E-14
Задача	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
Ответ	8,9E-3; 14,9 E-3; 18E-3	1,5E11	1,26E12	11	1,8E3

### Тема 6. Технология электровакуумных приборов

Задача	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
Ответ	0,25; 0,5; 0,75	2E-7, 4E-7, 8E-7	0,95	750	E-8
Задача	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10
Ответ	2E-4; 2E-3; 2E-2	3E-6	0,8	3,16; 10, 31,6	2E-4

## Тема 7. Лучевые технологии (электронно-лучевая, лазерная)

Задача	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5
Ответ	30	1,4E-6; 3,94E-6; 1,2E-6	15,2	424; 520; 638	70
Задача	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10
Ответ	6,39	6E-5	2,7E-4; 5,4E-4; 8,1E-4	19,1; 23,43; 28,5	22,1

## Тема 8. Высокие технологии (упрочняющая, плазменная, порошковая)

Задача	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
Ответ	100; 50; 33	1000	0,89 E-3; 1,53 E-3; 2E-3;	4	4
Задача	8.6	8.7	8.8	8.9	8.10
Ответ	845; 1105; 1365	0,295	0,0694	258	1,4E-2; 2,28E-2 3,43E-2

## Тема 9. Автоматизация технологических процессов

Задача	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5
Ответ	100; 110; 120	0,2	4; 2; 1	1,5E4	109,2
Задача	9.6	9.7	9.8	9.9	9.10
Ответ	487	0,2; 0,4; 0,6	210	444; 888; 1332	1,1

## Тема 10. Числовое программное управление

Задача	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5
Ответ	17; 63; 154	203	35,3	4,5E-2	525
Задача	96	97	98	99	100
Ответ	100; 150; 200	100	85; 170; 255	250	2,6

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Методические указания к практическим занятиям  
по дисциплине «Технология материалов и изделий электронной техники»

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