

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

Кафедра электронных приборов

ОСНОВЫ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

2013

Орликов Леонид Николаевич.

Основы вакуумных технологий: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2013. - 29 с.

Целью настоящего пособия является углубление понимания процессов, происходящих при обработке материалов и изделий в вакууме. Уделяется внимание процессам обеспечения условий формирования нанослоев, процессам подготовки изделий к технологическим операциям. Рассматриваются варианты задач по расчету вакуумных систем, элементов вакуумных приборов электроники и наноэлектроники.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – Электроника и наноэлектроника по дисциплине «Основы вакуумных технологий».

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2013 г.

ОСНОВЫ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

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

Содержание

Введение.....	5
Практическое занятие 1. Вакуумная технология.....	6
1.1 Основные понятия.....	6
1.1.1 Единицы измерения давления и потока.....	6
1.1.2 Режимы течения газа.....	6
1.1.3 Проводимость и пропускная способность вакуумных коммуникаций.....	7
1.1.4 Основное уравнение вакуумной техники.....	8
1.1.5 Расчет вакуумных систем.....	9
1.1.6 Согласование откачных средств.....	11
1.2 Примеры решения задач по теме.....	12
1.3 Задачи для проработки темы.....	12
Практическое занятие 2. Подготовка изделий к технологическим операциям.....	13
2.1 Основные понятия.....	14
2.2 Примеры решения задач по теме.....	15
2.3 Задачи для проработки темы.....	16
Практическое занятие 3. Технология электровакуумных приборов.....	17
3.1 Основные понятия.....	17
3.2 Примеры решения задач.....	18
3.3 Задачи для проработки темы.....	19
Практическое занятие 4. Пленочная технология, эпитаксия.....	20
4.1 Основные понятия.....	20
4.2 Примеры решения задач по теме.....	22
4.3 Задачи для проработки темы.....	22
Практическое занятие 5 Сертификация, инструкции, последовательности операций.....	23
5.1 Основные понятия.....	23
5.2 Примеры решения задач.....	24
5.3 Задания для проработки темы.....	26
Рекомендуемая литература.....	27

Введение

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- способностью собирать, анализировать и систематизировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию по тематике исследования в области электроники и нанoeлектроники (ПК-18);
- способностью строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19);
- способностью аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать физические принципы работы приборов электроники и нанoeлектроники; основные приемы построения последовательностей технологических операций при формировании и синтезе оптических материалов;

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

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

Практическое занятие 1. Вакуумная технология

В результате решения задач студент приобретает:

- способность анализировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию по тематике исследования в области электроники и нанoeлектроники (ПК-18);
- способность строить простейшие физические и математические модели приборов различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19);

1.1 Основные понятия

1.1.1 Единицы измерения давления и потока

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

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

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

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

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.

1.1.2 Режимы течения газа

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

Таблица 1.1 - Режимы течения газа

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

Число Кнудсена определяется по соотношению:

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

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

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

1.1.3 Проводимость и пропускная способность вакуумных коммуникаций

При уменьшении давления хаотичное, равновероятное движение молекул вызывает сопротивление откачке, снижая пропускную способность U вакуумных коммуникаций и скорость откачки объекта S_o . При последовательном соединении отрезков коммуникаций складываются величины, обратные пропускной способности, сопротивление откачке возрастает (проводимость уменьшается).

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

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

$$U = \sum U_i$$

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

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

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

диаметр отверстия выражен в сантиметрах, пропускную способность удобно определять по формуле:

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

где U – л/с; d – см.

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

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

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

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

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

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

Таблица 1.3 - Пропускная способность трубопровода

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

1.1.4 Основное уравнение вакуумной техники

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

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

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

1.1.5 Расчет вакуумных систем

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{\text{вых}} = 10 \text{ Па}$ (0,1 мм рт ст). Следует выбрать тот механический насос, который обеспечивает требуемую скорость откачки при давлении 10 Па.

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

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

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

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

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

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

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

где V – объем, откачиваемого объекта;
 $V' = 10^3$ – приведенный объем;
 P_1, P_2 – начальное и конечное давление.

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

При откачке на форвакууме газовыделениями пренебрегают ввиду их малости. В этом случае время откачки определяют по формуле (1.16):

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

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

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

1.1.6 Согласование откачных средств

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

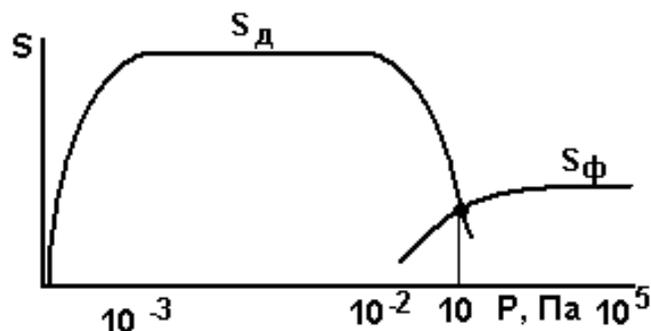


Рисунок 1.1 – Графическое согласование вакуумных насосов

1.2 Примеры решения задач по теме

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

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

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

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

Решение

Следует использовать основное уравнение вакуумной техники

$$1/S_o = 1/S_n + 1/U.$$

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

1.3 Задачи для проработки темы

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

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

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

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

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

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

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

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

Задача 1.8. Проводимость отверстия на вязкостном режиме равна 0,02 м³/с, а на молекулярном режиме – 0,0125 м³/с. Определить проводимость отверстия на молекулярно-вязкостном режиме.

Задача 1.9. Проводимость вакуумной трассы составляет 0,1 м³/с. Производительность насоса составляет 5×10^{-3} м³/с. Найти скорость откачки объекта.

Задача 1.10. Коммуникации проводимостями $U = 0,01; 0,1; 1$ м³/с имеют на концах разность давлений 100 Па. Определить потоки газа, пропускаемые коммуникацией.

Практическое занятие 2. Подготовка изделий к технологическим операциям

В результате решения задач студент приобретает:

- способность собирать и систематизировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию в области электроники и наноэлектроники (ПК-18);
- способность строить простейшие математические модели устройств и установок различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19).

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

2.1 Основные понятия

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

$$Q = g \times A$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$T_{об} = 0,75 T_{пл}.$$

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

$$T_{об} = T_{рек} = 0,4 T_{пл}$$

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

$$T_{в} = 0,5 T_{пл}.$$

2.2 Примеры решения задач по теме

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

Задача 1. За время очистки в течение 1000 с давление в вакуумной камере объемом $0,1 \text{ м}^3$ изменилось от $10 \text{ Е-}3$ до 10 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 2. Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку вакуумной камеры толщиной $5\text{Е-}3 \text{ м}$ и площадью 1 м^2 из атмосферного давления в вакуум с давлением $10\text{Е-}4 \text{ Па}$. Коэффициент диффузии принять равным $10\text{Е-}5 \text{ м}^2 / \text{с}$. Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной $53\text{Е}19$. Убыль концентрации от давления считать линейной.

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

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

Решение.

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

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

Решение

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

2.3 Задачи для проработки темы

Задача 2.1. Определить поток газовой выделения с двухсторонней поверхности 6 зеркал, для трех сортов стекол размером 0,5 x 1,5 м, если удельные газовой выделения составляют 0,1; 0,01; 10^{-5} Па м³/с

Задача 2.2. За время очистки тоководов методом прокаливания в вакууме в течение 2000 сек, давление в вакуумной камере изменилось от 0,01 до 10 Па. Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток откачки при объемах камеры 0,1; 1; 3 м³.

Задача 2.3. Рассчитать скорость травления изделий из стали при использовании в качестве ионообразующего газа аргона с плотностью ионного тока 1 А/м², при ускоряющем напряжении до 10 кВ. Плотность материала принять равной 7,6 г/см³, число Авогадро принять равным 6×10^{23} . Коэффициент травления принять равным 10^{-4} .

Задача 2.4. Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку диффузионного насоса толщиной 5^{-3} м и площадью 1 м² из атмосферного давления в вакуум с давлением 10^{-4} Па. Коэффициент диффузии принять равным 10^{-5} м²/с. Концентрацию паров воды при атмосферном давлении принять равной 53×10^{19} . Убыль концентрации от давления считать линейной.

Задача 2.5. В водородную печь для очистки деталей подается водород с парциальным давлением 200 Па. Какое парциальное давление составляют пары воды, для констант равновесия паров по отношению к водороду 2; 4; 6?

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

Задача 2.7. В вакуумной камере стальная проволока перематывается с барабана на барабан через ионный поток, проводящий ее очистку от газов. Определить глубину очистки, если время пребывания проволоки под

пучком ионов составляет 10 сек. Коэффициент диффузии принять равным $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

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

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

Задача 2.10. После формирования алюминиевого покрытия выяснилось, что пленка не полупрозрачная, а непрозрачная. Напишите инструкцию, как снять эту пленку.

Практическое занятие 3. Технология электривакуумных приборов

В результате решения задач студент приобретает способность строить простейшие физические и математические модели приборов электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19).

3.1 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 Ko газа в металле определяется произведением коэффициента диффузии газа в металле Do на константу растворимости газа в металле So , Пам³/кг.

$$Ko = DoSo.$$

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 ($T_{\text{отж}} = 0,75 T_{\text{пл. припоя}}$)

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

$$P=G/kS,$$

где G -скорость объемного поглощения, лкм/с, k - коэффициент поглощения, S - площадь геттера, см²

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 α и определяется соотношением:

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

где ΔT - 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 " σ " толщина стенки прибора и допуске на отклонение толщины " C " определяется выражением:

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

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

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

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 " σ_T ", спаянной с металлом, при относительном удлинении ε и модуле упругости " E " определяется выражением:

$$\sigma_T= \varepsilon E;$$

3.2 Примеры решения задач

Задача 1. Геттером электродугового насоса поглощено газа в количестве $Q_{погл}=6E-5$ Па м³/с. При прогреве насоса стационарный поток поглощения составил $Q_{погл}= 2E-5$. Рассчитать коэффициент обратимости геттера относительно исходного состояния.

$$\text{Решение } R=Q_{выд}/Q_{погл}; \quad Q_{выд}=Q_{погл1}-Q_{погл2}=(6-2)E-5=4E-5$$

$$\text{Ответ: } R=(4E-5)/(6E-5)=0,66.$$

Задача 2. Измеритель парциальных давлений типа омегатрон подсоединен к приемно-усилительной лампе. Определить разрешающую способность по массовому числу омегатрона (ΔM) в области 44 массового

числа (CO_2), если известно, что для $M=18$ (H_2O) разрешающая способность прибора $R=22$

Решение. Из уравнений для омегатрона известно, что $RM=const$. Подставляя значения имеем $RM=22 \times 18 = const = 396$, тогда для H_2O $\Delta M = M/R = 18/22 = 0,81$.

Для случая CO_2 имеем $R_2 M_2 = const = 396$ находим $R_2 = 396/44 = 9$;

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

3.3 Задачи для проработки темы

Задача 3.1. Геттером электродугового насоса поглощено газа в количестве $8\text{E}-5$ Па м³/с. При прогреве геттера поток поглощения составил $2\text{E}-5$ для геттера №1, $4\text{E}-5$ для №2 и $6\text{E}-5$ для №3. Рассчитать коэффициенты обратимости геттеров.

Задача 3.2. Определить коэффициент диффузии водорода в железном аноде приемно-усилительной лампы. Если константа проницаемости $K_0 = 3,4\text{E}-8$, а растворимость водорода в железе составляет $S_0 = 0,17$ Пам³/кг

Задача 3.3. Измеритель парциальных давлений типа омегатрон подсоединен к приемно-усилительной лампе. Определить разрешающую способность по массовому числу омегатрона (ΔM) в области 44 массового числа (CO_2), если известно, что для $M=18$ (H_2O) разрешающая способность прибора $R=20$

Задача 3.4. Определить температуру отжига паяных металлокерамических ламп, если они спаяны медносеребряным припоем с температурой плавления 1000^0 К.

Задача 3.5. Какое остаточное давление установится в колбе радиолампы, если по истечении очень длительного времени работы геттера на площади $S=10$ см² скорость объемного поглощения $G=\text{E}-6$ лмк/с.? Константа поглощения $K=1$. Какое давление установится для $G = 12$ и 18 лмк/с. Ответ дать в мм рт ст.

Задача 3.6. Определить количество газа, поглощенного геттером площадью $\text{E}-2$ м² за 20 сек при давлении $\text{E}-4$, $\text{E}-3$, $0,01$ Па. Скорость поглощения газа считать линейной с константой растворимости $K=1$.

Задача 3.7. 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 $3\text{E}-7$ 1/град

Задача 3.8. 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 $\sigma=12$ кг/мм². Технологический допуск на отклонение толщины $C=0,1$ мм.

Задача 3.9. Насколько увеличится скорость поглощения газа титановым геттером, если начальное давление в колбе увеличится в 10, 100, 1000 раз. Константу скорости поглощения считать постоянной.

Задача 3.10. Рассчитать критический коэффициент температурного расширения керамики спаянной с металлом, если относительное удлинение $\varepsilon=20\%$ при модуле упругости $E=Е-3$ кг/мм².

Практическое занятие 4. Пленочная технология, эпитаксия

В результате решения задач студент приобретает:

- способность строить простейшие физические и математические модели схем, установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-19);
- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

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 термовакуумном напылении определяется по формуле:

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

где G - вес испарившегося вещества, L - расстояние между испарителем и подложкой, ρ - плотность материала кг/м³.

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

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

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

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

где K - константа равновесия

Величина изобарного потенциала ΔZ при формировании газофазной реакции в процессе напыления пленок определяется выражением:

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

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

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

Скорость термовакuumного напыления выражается соотношением:

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

где M - молекулярный вес, T - температура.

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

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

где $d = \ln I_1 / 10^6 \ln I_2$.

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

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

где β - угол осаждения конденсата.

4.2 Примеры решения задач по теме

Задача 1. В процессе термовакуумного испарения испарилась навеска из железа весом $1\text{E-}4$ 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, ρ - плотность материала кг/м^3 . Ответ: $1\text{E-}4$

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

Решение. $\text{КПД} = S_p/S_i$; Поверхность шара $S_i = 4\pi r^2$. 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 Па.

Задача 4.2. В процессе термовакуумного испарения испарилась навеска из железа весом 10^{-4} 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 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 $1\text{E-}2$ Па. Константа равновесия равна 2 . Давление паров титана равно 1 Па.

Задача 4.5. Определить абсолютную величину изобарного потенциала процесса формирования TiO_2 при напылении титана. Температура испарителя 1400^0 К , парциальное давление паров титана $1,1$ Па.

Задача 4.6. Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки S_p составляет $1E-3; 0,01; 0,1 \text{ м}^2$. Расстояние до испарителя $r = 0,5 \text{ м}$.

Задача 4.7. При измерении толщины алюминиевой пленки «на просвет» показания тока с регистрирующего прибора уменьшились в 2 раза (от 100 до 50 микроампер). Определить толщину пленки, если постоянная прибора для алюминия $K = 1E6$.

Задача 4.8. Определить удельную скорость испарения углерода ($\text{г/с с } 1 \text{ см}^2$) при температуре 1200; 1300; 1400 К

Задача 4.9. Определить толщину конденсата пленки d , если скорость испарения $\omega = 6E-10 \text{ кг/сек с } 1 \text{ м}^2$, плотность потока $\gamma = 10E7 \text{ л/м}^3$ при расстоянии до подложки $r = 1 \text{ м}$. Угол осаждения конденсата 45° .

Практическое занятие 5 Сертификация, инструкции, последовательности операций

В результате решения задач студент приобретает:

- способность анализировать и систематизировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию по тематике исследования в области электроники и наноэлектроники (ПК-18);
- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем различного функционального назначения (ПК-20).

5.1 Основные понятия

Под сертификацией технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов понимается соответствие ГОСТ определенного параметра технического средства, процесса, оборудования или материала. Завод имеет право выпускать только сертифицированную продукцию. Такая продукция сопровождается техническим паспортом. В случае выхода из строя сертифицированный элемент может быть закуплен и заменён.

Разработка инструкций по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала позволяет организовывать безопасные и эффективные приемы эксплуатации оборудования. Инструкцией по эксплуатации может быть алгоритм включения и выключения вакуумной установки,

последовательность операций подготовки к формированию покрытий, последовательность действий при проведении измерения какого-то параметра материала, по сути это моделирование предстоящей работы.

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

5.2 Примеры решения задач

Примеры решения задач по сертификации

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

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

Ответ: насос не соответствует сертификации.

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

Ответ: нельзя, потому что не заводское изделие.

Задача 3. Разработайте инструкцию по включению установки на форвакууме.

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

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

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

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

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

Примеры решения задач по программному обеспечению

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

Ответ: «Время-команда».

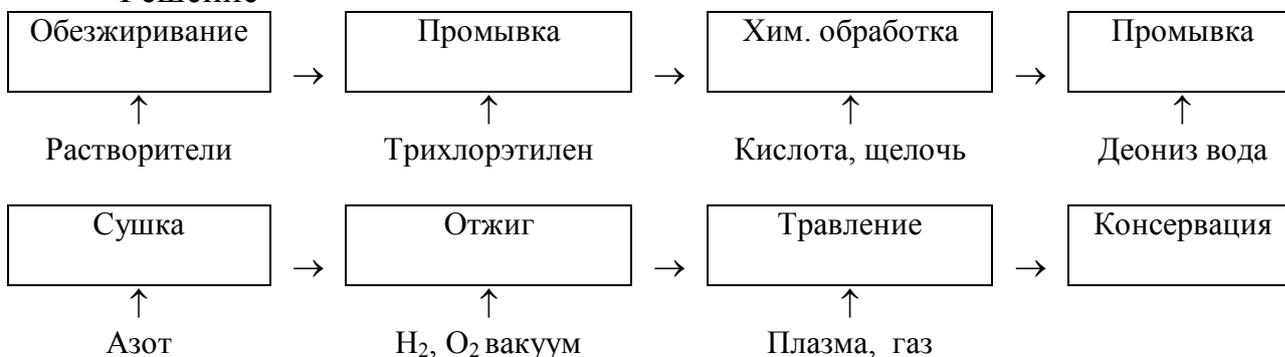
Задача 6. Процесс изготовления фотоэлектронных умножителей связан с необходимостью распыления материалов при давлении 10^{-3} Па. Какой язык пользователя наиболее предпочтителен для управления процессом откачки?

Ответ: «Время- параметр»

Примеры решения задач по составлению последовательностей технологических операций

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

Решение



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

Решение.

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

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

Решение.

Вначале определяют «участников», наиболее влияющих на процесс.

Таковыми участниками являются: вакуумная камера, испаритель материала, испаряемая навеска, подложка. Вначале из справочников следует получить сведения об участниках процесса (марка, температура испарения, степень чистоты, что делалось в вакуумной камере до настоящего времени).

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

Первый этап: очистка.

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

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

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

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

5.3 Задания для проработки темы

Задание 5.1. Для проведения исследований закуплен этиловый спирт. При высыхании спирта на подложке остались радужные пленки. Сертифицируйте спирт по чистоте.

Задание 5.2. Составьте последовательность операций по очистке стеклянной подложки перед напылением пленки.

Задание 5.3. Составьте последовательность технологических операций по формированию волноводного слоя из окиси цинка на стекле

Задание 5.4 После формирования алюминиевого покрытия выяснилось, что пленка не полупрозрачная, а непрозрачная. Напишите инструкцию, как снять эту пленку.

Задание 5.5. Составить общую схему последовательностей технологических операций подготовки стеклянной подложки для формирования на ней алюминиевого покрытия толщиной 1 мкм.

Задание 5.6. Составить последовательность технологических операций обезгаживания приповерхностных слоев кристалла ниобата лития.

Задание 5.7. Внезапно отключилась электроэнергия, питающая установку. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

Задание 5.8. Внезапно прекратилась подача воды на установку, работающую на высоковакуумном режиме. Составьте инструкцию, как действовать в такой ситуации.

Задание 5.9. По истечении 10 минут нагрева высоковакуумного насоса выяснилось, что забыли открыть воду для охлаждения установки. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

Задание 5.10. При выключении вакуумного насоса НВЗ-20 не произвели напуск газа в насос. Составить инструкцию по последовательности действий в этой ситуации.

Рекомендуемая литература

1. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А. А. Барыбин - М.: Физматлит, 2006. – 423 с.
2. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро - и нанотехнологий. Томск, 2005, 400 с.
3. Данилина Т.И. Технология СБИС : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, - Томск : ТУСУР, 2007. - 287 с..
4. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 525 с. ISBN 5-03-003432-3

Периодическая литература (за последние 5 лет).

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

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Основы вакуумных технологий

Методические указания к практическим занятиям

Усл. печ. л. 1,81 . Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40