

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

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

Томск 2018

Орликов, Леонид Николаевич

Специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники: методические указания к практическим занятиям для студентов направления - «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2018. - 36 с.

Материал пособия составлен так, чтобы он способствовал углублению и закреплению теоретических знаний, а также выработывал навык в решении практических вопросов и задач. Прежде, чем решать задачу или ответить на вопрос, надо понять их сущность, смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу. Очень полезно начертить схему, относящуюся к задаче или вопросу.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению - «Электроника и наноэлектроника» по курсу «Специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники»

© Орликов Леонид Николаевич, 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ЭП

_____ С.М. Шандаров

«__» _____ 2018 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

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

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП

_____ Л.Н.Орликов

_____ 2018 г

Томск 2018

Содержание

Введение.....	6
Тема 1. Процесс получения материалов для приборов квантовой и оптической электроники.....	7
Занятие 1. Расчет вакуумных систем для формирования приборов квантовой и оптической электроники.....	7
Методические рекомендации к занятию	7
Задание	10
Тема 2. Кинетика технологического процесса. Межфазные взаимодействия в технологических процессах	11
Занятие 1. Расчет параметров формирования нанослоев (скорости, толщины, массопереноса)	11
Методические указания по изучению темы	11
Задачи по теме	15
Задание для самостоятельного решения.....	16
Занятие 2. Разработка алгоритма работы вакуумного оборудования	16
Задание	17
Занятие 3. Расчет параметров газофазных реакций, расчет сорбционных и диффузионных процессов	18
Задачи по теме	18
Задание	20
Занятие 4. Составление общей схемы подготовки подложек	20
Задание	20
Тема 3. Вакуумная технология. Электронно-лучевая, ионно-лучевая и плазменная технология.....	21
Занятие 1. Расчет электрофизических параметров электронно и ионно-лучевого оборудования для формирования и обработки эпитаксиальных нанослоев	21
Методические указания.....	21
Задачи по теме	21
Задание	22
Тема 4. Специальные вопросы технологии изготовления приборов и устройств квантовой и оптической электроники.....	22
Занятие 1. Обсуждение конструкторской части индивидуальных работ	22
Методические указания.....	22
Задание	24
Занятие 2. Расчет параметров технологичности.....	24
Методические указания.....	24
Задачи по теме	25
Задание	28

Занятие 3. Решение задач на литографические и термические процессы .	28
Задачи по теме	28
Методические указания и подсказки к решению задач	29
Занятие 4. Решение задач на автоматизацию технологических процессов	30
Задачи по теме	30
Методические указания к решению задач.....	31
Тема 5. Процесс эпитаксиального выращивания структур для приборов квантовой и оптической электроники	33
Занятие 1. Разработка маршрутной карты для формирования эпитаксиальных покрытий в вакууме	33
Задание	33
Занятие 2. Разработка операционных карт	33
Разработка операционных карт формирования оксидных нанослоев на основе цинка	33
Тема 6. Сервисное обслуживание установок эпитаксии.....	35
Методические указания	35
Рекомендуемая литература.....	35

Введение

В результате изучения дисциплины студент должен:

– знать основные проблемы в своей предметной области; тенденции и перспективы развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники; основы Интернет технологий; методы расчета, проектирования, конструирования технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники с использованием систем автоматизированного проектирования и компьютерных средств;

– уметь выбирать и предлагать новые методы и средства решения основных проблем в своей предметной области на основе научных исследований и разработок, разрабатывать технические задания на проектирование технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники; разрабатывать технологические маршруты изготовления изделий электронной техники;

– владеть методами расчета параметров и основных характеристик моделей, используемых в предметной области; практическими навыками работы с программными пакетами математического моделирования; навыками разработки технических заданий на проектирование технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники

Тема 1. Процесс получения материалов для приборов квантовой и оптической электроники

Занятие 1. Расчет вакуумных систем для формирования приборов квантовой и оптической электроники

Методические рекомендации к занятию

Для освоения темы требуется повторить методику расчета откачных средств для традиционных масляных вакуумных систем. Отличие в том, что в систему не напускают газ, в качестве средств откачки применяют безмасляные вакуумные насосы.

Мастер-класс по расчету - 1 час

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

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

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

$$Q = Ag\Omega. \quad (1.1)$$

Величины удельного газовой выделенной 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).

Обычно число вводов в реальной установке больше 10. Поток натекания через такие элементы Q определяется произведением чувствительности течеискателя $\kappa = 10^{-6}$ на число течей N .

$$Q = \kappa N. \quad (1.2)$$

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

$$\sum Q = (Ag\Omega)_k + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (1.3)$$

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.

$$S_n = \sum Q / P_{\text{раб}}. \quad (1.4)$$

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

$$S_{\phi} = \sum Q / P_{\text{вых}}. \quad (1.5)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{\text{вых}} = 10$ Па (0,1 мм рт ст). В большинстве турбомолекулярных $P_{\text{вых}} = 1$ Па. Электроразрядные насосы вообще не имеют выхода на форвакуумный насос.

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 :

$$S_H = \gamma S_O, \quad (1.6)$$

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

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_H} \quad (1.7)$$

где V – объем, откачиваемого объекта;

$V' = 10^3$ – приведенный объем;

P_1, P_2 – начальное и конечное давление.

Принимается, что $S_o \approx S_H$

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 (до 10 Па), газовыделением пренебрегают ввиду их малости. В этом случае время откачки определяют по формуле:

$$t = V / S_o (\ln P_1 / P_2). \quad (1.8)$$

Пример расчета вакуумной системы

При объеме камеры $V=50$ литров

По формуле (1.3) найдём поток газа в вакуумную систему:

$\sum Q = 192 \times 10^{-4}$ торл/с

По формуле (1.4) найдём скорость откачки насоса:

$$S_H = 192 \text{ л/с}$$

С коэффициентом запаса два выбираем высоковакуумный безмасляный насос ТМН-500.

Задание

Каждый студент выбирает процесс из банка индивидуальных заданий. Делается эскиз безмасляной вакуумной системы. Согласовывается с преподавателем объем камеры, необходимость напуска рабочего газа. Проводится расчет необходимых откачных средств.

Тема 2. Кинетика технологического процесса. Межфазные взаимодействия в технологических процессах

Занятие 1. Расчет параметров формирования нанослоев (скорости, толщины, массопереноса)

Методические указания по изучению темы

Для успешного освоения темы требуется повторить разделы по термическому испарению материалов в вакууме.

Из условия равновесия пар-твердое тело, пар-жидкость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T}, \quad (2.1)$$

где P_s - давление насыщенного пара, Па;

A и B - постоянные, характеризующие вещество;

T - температура испаряемого вещества, К.

Значения A и B для ряда веществ приведены в [1] или в справочниках по вакуумной технике.

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

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

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

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

m - масса молекулы, кг;

k - постоянная Больцмана;

T - температура испарения, К.

Поток испаренного вещества, приходящийся на единицу телесного угла, есть

$$dM = \frac{M}{4\pi}$$

где M - общее количество вещества, испаренного с испарителя dS_1 за время t , кг.

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

$$dM = \frac{M}{4\pi} d\omega, \quad (2.2)$$

Через любое сечение конуса, ограниченного $d\omega$, проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в dS_1 и радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса $d\omega$. Если нормаль к dS_2 составляет угол φ с осью конуса, а расстояние от dS_1 до площадки dS_2 есть r , то

$$d\omega = \frac{dS_2 \cdot \cos\varphi}{r^2}. \quad (2.3)$$

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности подложки, с учетом выражения (2.12) и (2.13) есть

$$dM = \frac{M}{4\pi} \cdot \frac{\cos\varphi}{r^2} \quad (2.4)$$

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

Толщину пленки можно определить через плотность и объем конденсата на подложке

$$dM = \rho \cdot dV = \rho \cdot dS_2 \cdot d, \quad (2.5)$$

где ρ - плотность конденсата;

V - объем конденсата;

d - толщина пленки на подложке.

С учетом выражения (2.5) и (2.4) получаем выражение для толщины пленки

$$d = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{\cos\varphi}{r^2}, \quad (2.6)$$

Если подложка представляет собой плоскую поверхность, расположенную на расстоянии h от испарителя, то толщина пленки на подложке в любой точке A с координатами X , Y может быть определена по выражению:

$$d(x, y) = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (2.7)$$

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

$$d_o = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (2.8)$$

Отношение толщин в точках A и 0 будет:

$$\frac{d(x, y)}{d_o} = \frac{h^3}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}}. \quad (2.9)$$

Расчет толщины наносимой пленки в случае поверхностного испарителя

Для поверхностного испарителя количество испаряемого вещества зависит от направления испарения. В соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле $d\omega$ по направлению r , образующему угол θ с нормалью к поверхности испарителя, равно

$$dM = \frac{M}{\pi} \cdot \cos\theta \cdot d\omega. \quad (2.10)$$

Используя формулы (2.5 - 2.9) и учитывая формулу (2.10) можно получить выражение для толщины пленки, конденсированной в любой точке A подложки, находящейся параллельно плоскости испарителя

$$d(x, y) = \frac{M}{\pi\rho} \cdot \frac{h^2}{(h^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (2.11)$$

Соответственно отношение толщин пленки в точках A и O будет

$$\frac{d(x, y)}{d_o} = \frac{h^4}{(h^2 + x^2 + y^2)^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}. \quad (2.12)$$

Выражения (2.10) и (2.12) используются для оценки равномерности толщины пленки на подложке при использовании соответствующих испарителей.

Количество газа Q , выделенного или откачанного вакуумной системой объемом V определяется тем, насколько произойдет изменение давления ΔP за время Δt

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

Задачи по теме

Задача 2.1 В процессе термовакуумного испарения испарилась навеска весом 10^{-4} кг. При расстоянии до подложки 0,2 м определить толщину полученной 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: 5 E-5

Задача 2.2. 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.

Решение. 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 ($k = 1,38 \text{ E}^{-23} \text{ Дж/К}$). Ответ: $0,9 \text{ E8 м/с}$

Задача 2.3. Определить количество газа, поглощенного парами титана за время напыления пленки с подложки площадью 1 E-2 м^2 в течение 5 секунд, если давление в системе изменилось от 11 E-2 до 1 E-2 Па. Константа равновесия равна 2. Давление паров титана равно 1 Па.

Решение. $Q = k F t (P_1 - P_2) / \ln(P_1 - P_2)$. Ответ: 0,4

Задача 2.4. Определить изменение давления за время напыления пленки в течение 10 сек в камере объемом $0,1 \text{ м}^3$, если количество поглощенного газа составляет $10^{-2} \text{ Пам}^3/\text{с}$.

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

Задача 2.5. Определить КПД испарения, если испарение происходит с поверхности проволочного испарителя. Площадь подложки S_1 составляет 10^{-3} м^2 . Расстояние до испарителя $r = 0,5 \text{ м}$.

Подсказка. $\text{КПД} = S_{\text{п}}/S_{\text{и}}$; Поверхность шара $S_{\text{и}} = 4\pi r^2$. Ответ: 0,03 %.

Задача 2.6. При измерении толщины титановой пленки «на просвет» показания тока с регистрирующего прибора уменьшились в 2 раза (от 100 до 50 мкА). Определить толщину пленки, если постоянная прибора для титана $k = 10^{-6}$.

Решение. $I = I_0 \exp(-kd)$; $\ln I = -kd \ln I_0$; $d = \ln 100 / 10^6 \ln 50$.

Ответ: $1.1\text{E-}6 \text{ м}$

Задача 2.7. Суммарный поток газовой выделенной в вакуумную камеру ΣQ составляет $0,02 \text{ Па м}^3/\text{с}$. Процесс должен проводиться при давлении $P_{\text{н}} = 10^{-2} \text{ Па}$.

Определить необходимую производительность высоковакуумного насоса S .

Подсказка. $S = \Sigma Q / P_{\text{н}}$

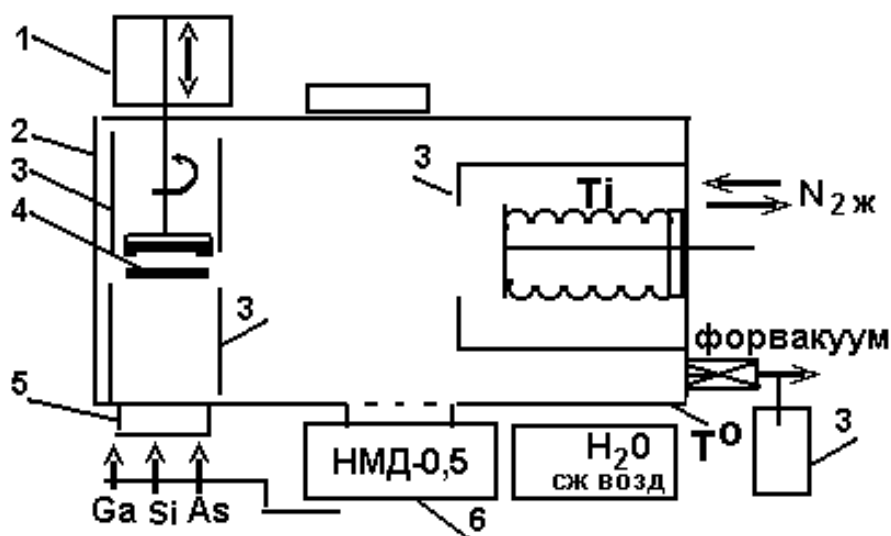
Задание для самостоятельного решения

Провести расчеты массопереноса на подложку и толщины пленки по теме самостоятельного задания.

Занятие 2. Разработка алгоритма работы вакуумного оборудования

На рисунке 2.1 представлена вакуумная схема установки эпитаксии типа «Катунь».

Общая схема запуска установки молекулярно-лучевой эпитаксии представлена в таблице 2.1.



1-манипулятор, 2-вакуумная камера, 3-криосорбционный насос, 4-подложка, 5- испарители, 6-электроразрядный насос.

Рисунок 2.1 – Схема установки МЛЭ

Таблица 2.1 – Общая схема запуска установки молекулярно-лучевой эпитаксии

Закрыть все вентили→	Запуск форвакуумного насоса	Откачка 10 мин. Прогрев вакуумной камеры	Запуск криосорбционных насосов вне камеры	Откачка 20 минут →
Запуск электроразрядного насоса→	Откачка 40 минут	Запуск криосорбционных насосов в камере	Контроль вакуума <0,01Па	Откачка 20 минут→
Прогрев подложки до 200° С 5°/мин→	Запуск Титановых насосов	Обезгаживание испарителя (200°С)	Формирование пленки, 1000°С, 5 сек, 0,5 мкм	Отжиг пленки 200°, 30 мин

Задание

Записать алгоритм включения и выключения вакуумной установки, спроектированной в индивидуальном задании.

Методическое указание. Алгоритм лучше представить в виде построчной таблицы

Занятие 3. Расчет параметров газофазных реакций, расчет сорбционных и диффузионных процессов

Задачи по теме

Задача 2.8. Определить абсолютную величину изобарного потенциала процесса формирования TiO_2 при напылении титана. Температура испарителя 1400^0 К, парциальное давление паров титана 1,1 Па.

Решение. $\Delta Z = -RT \ln P_i$; $R = 8,3$ Дж/мольК. Ответ: 1107,5

Задача 2.9. Определить поток газовой выделения с поверхности 6 экранов, каждое из которых имеет размеры 0,2x0,2 м. Удельные газовой выделения принять равными $4,5E-5$ Па м³/с

Подсказка. $Q = g \cdot A$. Ответ: $40,5 E-5$.

Задача 2.10. За время очистки тоководов методом прокаливания в вакууме в течение 2000 с давление в вакуумной камере объемом 0,1 м³ изменилось от $10 E-3$ до 10 Па. Считая производительность откачных средств постоянной, определить поток десорбции.

Подсказка. $Q = V(dP/dt)$ Ответ: $5E-4$.

Задача 2.11. 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 $6E23$. Коэффициент травления принять равным 10^{-4} .

Подсказка. При ускоряющих напряжениях до 10 кВ скорость травления рассчитывается по формуле:

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

где J- плотность тока (А/м²), N-число Авогадро $N = 6 \times 10^{23}$, ρ - плотность материала кг/м³, M_i -масса иона (для аргона $M_i = 40$) Ответ: $52 E-6$

Задача 2.12. Определить абсолютное число молекул воды, проходящих через стенку вакуумной камеры толщиной $5E-3$ м и площадью 1 м² из атмосферного давления в вакуум с давлением $10 E-4$ 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.

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

Ответ: $5,3 \text{ E}15$.

Задача 2.13. В водородную печь для очистки деталей подается водород с парциальным давлением 200 Па . Какое парциальное давление составляют пары воды, если константа равновесия паров по отношению к водороду равна двум.

Подсказка. $K_p = P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{H}_2}$ Ответ: 400 Па .

Задача 2.14 Скорость травления поверхности вглубь при очистке в $1,5$ раза превышает скорость травления вдоль поверхности. Определить показатель анизотропии.

Подсказка. $K = V_{\downarrow}/V_{\rightarrow}$; Ответ: $1,5$

Задача 2.15. В вакуумной камере стальная проволока перематывается с барабана на барабан через ионный поток, проводящий ее очистку от газов. Определить глубину очистки, если время пребывания проволоки под пучком ионов составляет 10 сек . Коэффициент диффузии принять равным $10 \text{ E-7 } \text{ м}^2 / \text{с}$.

Подсказка. $h = 2 \sqrt{Dt}$ Ответ: 2 E-3

Задача 2.16. В вакуумной камере должно проводиться обезгаживание свинцового испарителя. Определить максимальную температуру обезгаживания, если температура плавления свинца составляет 343° C .

Подсказка. $T_{\text{об}} = 0,75 T_{\text{пл}}$. Ответ: 262

Задача 2.17. Температура плавления вольфрама составляет 2800° C . Учитывая, что вольфрам подвержен рекристаллизации, определить максимальную температуру обезгаживания.

Подсказка. $T_{\text{об}} = T_{\text{рек}} = 0,4 T_{\text{пл}}$ Ответ: 700

Задача 2.18. Рассчитать температуру восстановительного отжига кристалла ниобата лития для снятия дислокаций после ионного травления, если температура плавления кристалла равна 1400°K .

Подсказка. Температура восстановительного отжига определяется соотношением: $T_{\text{в}} = 0,5 T_{\text{пл}}$. Ответ: 700

Задание

На примерах приведенных задач провести математическую проработку процесса из самостоятельного задания.

Занятие 4. Составление общей схемы подготовки подложек

На рисунке 2.2 представлена общая схема подготовки подложек (очистка). В каждой конкретной ситуации в общую схему могут добавляться или исключаться отдельные элементы

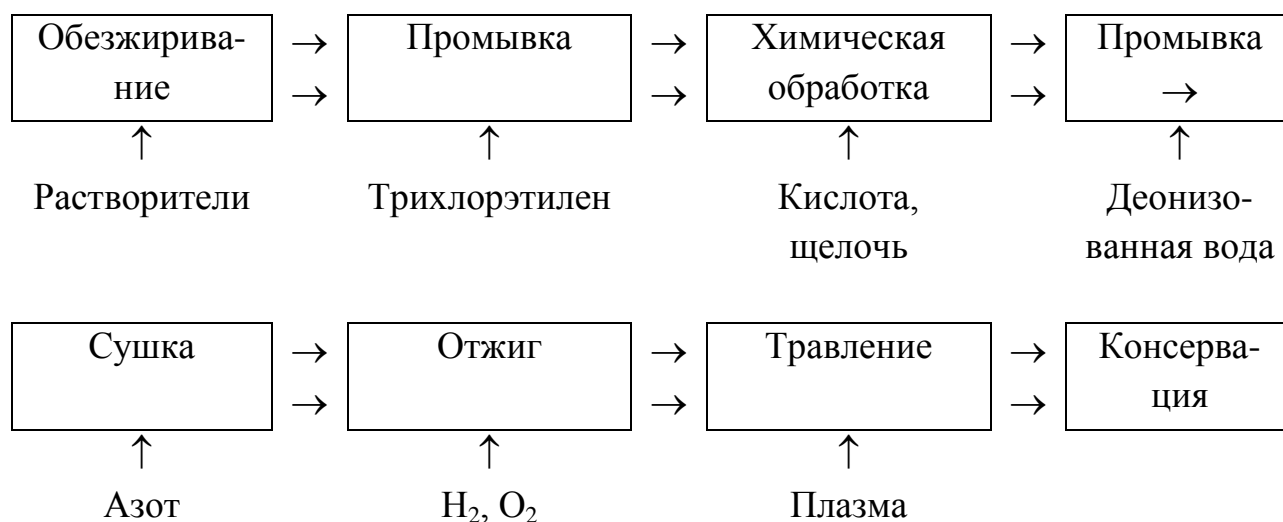


Рисунок 2.2 – Общая схема подготовки подложек

Задание

Составить схему подготовки подложек к своему заданию.

Тема 3. Вакуумная технология. Электронно-лучевая, ионно-лучевая и плазменная технология

Занятие 1. Расчет электрофизических параметров электронно и ионно-лучевого оборудования для формирования и обработки эпитаксиальных нанослоев

Методические указания

Некоторые соотношения для расчета электрофизических параметров приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

	Параметр	Формула
	1	2
1	Скорость электрона или иона в электрическом поле в вакууме	$V_e = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$
2	Электронная температура (T_e)	$\frac{3}{2} kT_e = eU_i$
3	Плотность электрического тока	$J=I/S$
4	Плотность эмиссионного тока	$J=I/S_s$
5	Напряженность поля	$E=U/d$
6	Концентрация плазмы	$J=en_e V_e$
7	Пробег молекулы газа ($\lambda_{газ}$)	$(\lambda_{газ})=5 \cdot 10^{-5}/P$
8	Пробег иона	$\lambda_i = \sqrt{2} \lambda_{газ}$
9	Пробег электрона	$\lambda_e = 4 \sqrt{2} \lambda_{газ}$
10	Дебаевский радиус	$r = 5 \sqrt{\frac{T_e}{n}}$ см
11	Напряжение пробоя (B=300, A=15, d=4 см)	$U = \frac{Bpd}{\ln[Apd / \ln(1/\gamma)]}$
12	Диаметр электронного пучка	$d = (I/U)^{3/8}$

Задачи по теме

Задача 3.1. Рассчитайте мощность электронного источника для изготовления отверстий в подложках микросхем. Принять : $a= 10E-4$, энергия испарения $L=20$ Дж/см², плотность материала $\rho=7,6$ г/см³, диаметр пучка $d= 0.01$ см, глубина проникновения температуры луча $b= 0,5$ см.

Указания. $P = 4aL\rho b/d^2 = 4 \times 10^{-4} \times 20 \times 7,6 \times 0,5 / 0,01$. Примечание: 1 Вт = 1 Дж/сек. Ответ: 30 Вт

Задача 3.2. Вычислить глубину проникновения электронов в сталь в процессе электронно-лучевой сварки при напряжении 50 кВ.

Подсказка. $R = 2,2 \times 10E-12 \times UE^2 / \rho$. Ответ: 1,4E-6

Задача 3.3. 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/см³. Удельная теплота испарения $L = 20$ Дж/см².

Методическое указание. Критическая плотность мощности определяется по формуле:

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

где t - длительность импульса. Ответ: 15,2 Вт/см²

Задание

Оценить мощность электронно-ионного источника применительно к своему индивидуальному заданию.

Тема 4. Специальные вопросы технологии изготовления приборов и устройств квантовой и оптической электроники

Занятие 1. Обсуждение конструкторской части индивидуальных работ

Методические указания

Студент вправе выбрать любую деталь для представления конструкторской части, имеющую отношение к индивидуальному заданию. Основное требование: отсутствие сканерных устройств, наличие эскизов на каждую деталь и спецификации. На рис. 4.1 представлены некоторые варианты эскизов.

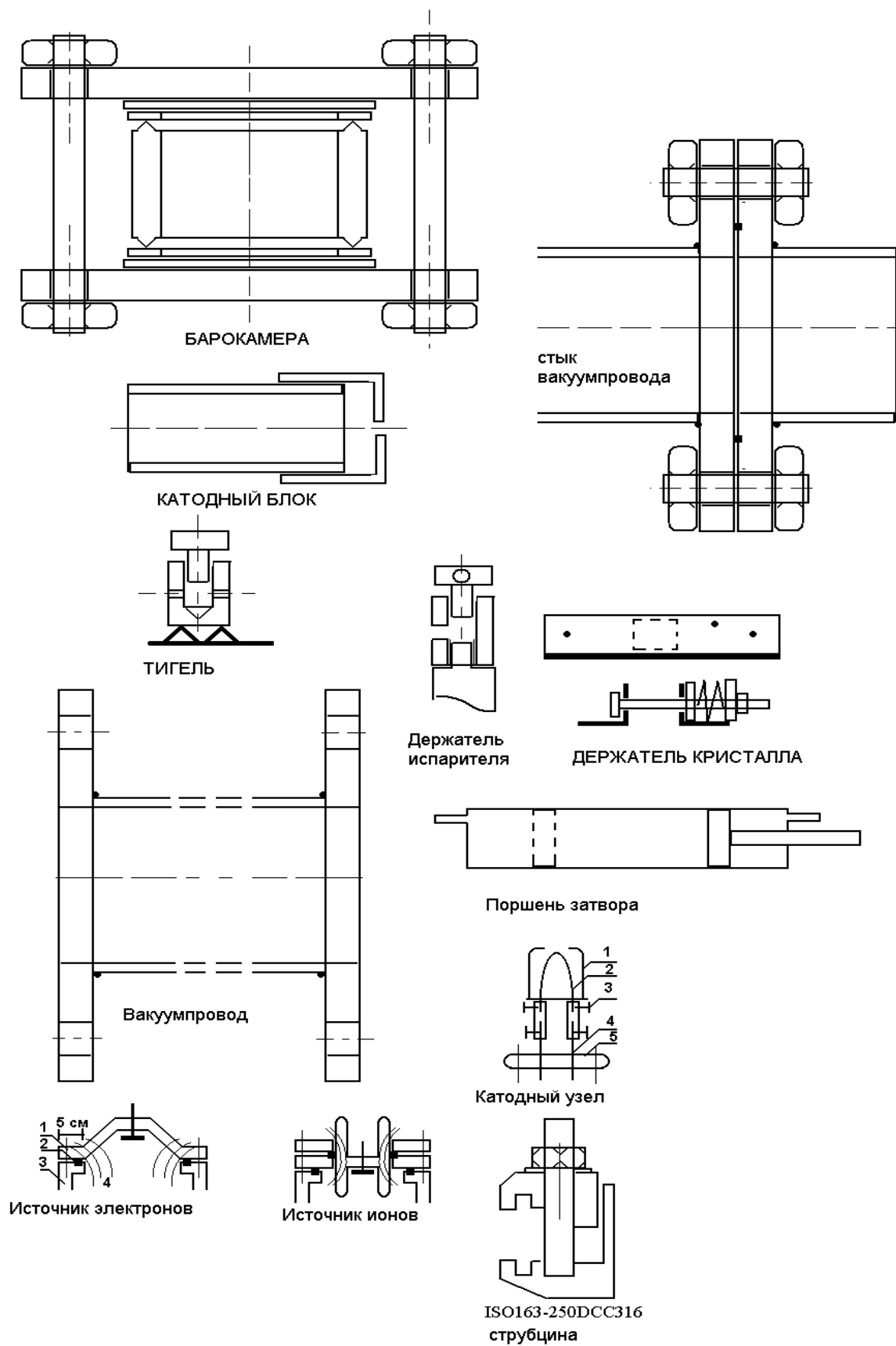


Рисунок 4.1.– Варианты эскизов для конструкторской части

Задание

Сформировать конструкторскую часть задания

Занятие 2. Расчет параметров технологичности

Методические указания

Для освоения данной темы полезно ознакомиться с литературой по оценке технологичности и ее международному обозначению. Например: Заготовительные операции выполняются первыми и обозначаются шестизначным кодом 000001, сварка – 000005 и тд. Класс точности повышается с применением более точного оборудования. Например: литье -7 класс, токарные работы - 3 класс, координатные работы -1 класс

В таблице 4.1 представлены показатели стандартизации, унификации, технологичности и готовности к проведению процесса эпитаксии.

Таблица 4.1 – Показатели стандартизации, унификации и технологичности

Параметр	Формула
1	2
1 Класс точности: требуемый класс точности/точность оборудования	$K_T = K_{TP} / K_{об}$
2 Коэффициент новизны: число принципиально новых деталей N/ общее число деталей N_0	$K_H = N / N_0$
3 Коэффициент сложности: число разработанных деталей/ число подобных в аналоге	$K_{сл} = N / N_a$
4 Коэффициент использования материала: масса детали/масса заготовки	$K_M = M_d / M_з$
5 Коэффициент прогрессивной технологии: количество изготовленных за один прием N_1 /количество переходов n	$K = N_1 / n$
6 Масса заготовки по аналогу: масса аналога x коэффициент размера	$M_з = M_a \cdot K_p$
7 Эрготический показатель: машинные затраты энергии или времени /Машинные + Ручные	$K = \sum \mathcal{E}_{маш} / (\sum \mathcal{E}_{маш} + \sum \mathcal{E}_{руч})$
8 Коэффициент параллельности K_{11} – отношение времени параллельной работы над деталью t_{11} / к времени всего процесса T.	$K_{11} = t_{11} / T$

Окончание таблицы 4.1

	1	2
9	Коэффициент освоенности K_o – отношение числа деталей, приобретенных «на стороне» N_c к сумме всех деталей изделия N без крепежа	$K_o = \sum N_c / \sum N$
10	Коэффициент стандартизации изделия K_{cm} : число, стандартных деталей $N_{cm.o}$ к числу покупных N_n :	$K_{cm} = (N_{cm.o} + N_n) / N$
11	Коэффициент повторяемости: (K_n) – отношение числа оригинальных деталей N_{op} , к числу проекций	$K_n = N_{op} / N_{np}$
12	Коэффициент стабильности процесса K_c – отношение мгновенного отклонения контролируемого параметра δ_m к средне квадратичному отклонению всех параметров δ	$K_c = \delta_m / \sum \delta$
13	Коэффициент настроенности K_n – отношение среднеарифметического параметра δ_{ca} без допуска на отклонение размеров δ_{don} к среднеквадратичному отклонению всех параметров δ , включая цену деления измерительных приборов δ_{np} :	$K_n = (\delta_{ca} - \delta_{don}) / \delta + \delta_{np}$
14	Коэффициент прямоточности K_{npm} : отношение общего числа связей (станков) S_m к сумме общих и обратных S_n связей	$K_{npm} = S_m / (S_m + S_n)$
15	Средний коэффициент общей готовности: 1-по инструменту; 2- по документации; 3- по оснастке для каждой операции	$K_H = N / N_o$

Задачи по теме

Задача 4.1 Рассчитать коэффициент использования материала при изготовлении изделия массой 5 кг. Масса аналога 10 кг. Коэффициент изменения размеров $K_p=2$.

Решение. Коэффициент использования материала в изделии массой M_i относительно массы заготовки M_z насчитывается по формуле: $K_i = M_i / M_z$; Масса заготовки с учетом базовых показателей технологичности может быть рассчитана по массе аналога M_a через коэффициент изменения размеров K_p : $M_z = M_a K_p$.

Находим $M_z = 10 \times 2 = 20$; $K_i = 5 / 20 = 0,25$

Ответ: 0,25

Задача 4.2. Рассчитать эрготический показатель автоматизации технологического процесса, если при его выполнении тратится 3 кВтч машинных затрат и 2кВтч на ручной труд.

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

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

Ответ: 0,6.

Задача 4.3. 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.

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

Ответ: 25.

Задача 4.4. Рассчитать время изготовления партии микросхем в количестве 100 шт, если время подготовки оборудования составляет $T_{\text{подг}}=10$ ч, время изготовления каждой микросхемы $t_i= 0,5$ часа, время контроля $t_k= 0,1$ ч, планируемые отказы по организационно-техническим причинам $T_{\text{от}}= 5$ ч. Коэффициент использования оборудования $K_i=0,5$.

Решение.

$$T_{\text{изг}} = T_{\text{подг}} + \sum_m t_i / k_i + T_k \times m + T_{\text{от}} = 10 + (0,5 \times 100) / 0,5 + (0,1 \times 100) + 5 = 125$$

Ответ: 125.

Задача 4.5 Рассчитать коэффициент освоенности изготовления изделия, если число покупных комплектующих $N_p=10$, число стандартных изделий в отрасли $N_c=5$, число заимствованных деталей с соседнего завода $N_z=8$, число нестандартных деталей $N_{nc}=2$, общее число деталей в изделии

$N=100$, число крепежных стандартных изделий $N_{ст}=20$. Ответ дать в процентах.

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

$$K = 10+5+8+2/100-20=0,25$$

Ответ: 25%.

Задача 4.6 Рассчитать процент стандартизации изделия $K_{ст}$, если число стандартных изделий подобного типа в отрасли $N_{ст.о} = 8$, число покупных деталей $N_{п}=10$, а число стандартных изделий без крепежа $N_{ст}=60$

$$\text{Решение. } K_{ст} = (N_{ст.о} + N_{п}) / N_{ст};$$

$$K = (10+8)/60=0,3 \quad \text{Ответ: 30\%}$$

Задача 4.7. Рассчитать процент использования прогрессивной технологии при формообразовании изделий, если из 8 кг заготовок 3 кг составляют чистовые.

$$\text{Решение. } K_{и} = N_{чист} / N_{черн}; \quad K_{и} = 3/5 = 0,6 \quad \text{Ответ: 60\%}$$

Задача 4.8. Рассчитать коэффициент повторяемости изделий, если число оригинальных деталей в изделии $N=2$, а суммарное число проекций этих изделий в чертежах равно 8.

$$\text{Решение. } K = 2/8 = 0,25 \quad \text{Ответ: 0,25}$$

Задача 4.9. Рассчитать коэффициент стабильности процесса, если дисперсия мгновенного распределения контролируемого параметра $\sigma_m = 0,1$, а средне квадратичное отклонение всех параметров $\sigma = 0,8$.

$$\text{Решение. } K_{с} = \sigma_m / \sigma; \quad \text{Ответ: 0,125}$$

Задача 4.10. Рассчитать коэффициент настроенности линии производства радиоплат, если среднеарифметическое значение толщины стенки равна $\sigma_{са} = 0,6$ мм, средние поля допусков размеров $\sigma_{доп} = 0,18$ мм, среднеквадратичное отклонение всех параметров $\sigma = 0,5$ при цене деления измерительных приборов $\sigma_{пр} = 0,1$.

$$\text{Решение. } K_{н} = (\sigma_{са} - \sigma_{доп}) / \sigma + \sigma_{пр}; \quad \text{Ответ: 0,7.}$$

Расчет параметров технологичности процесса эпитаксиального формирования нанослоев

Задание

Проанализировать технологичность конструкции из Вашего индивидуального задания.

Занятие 3. Решение задач на литографические и термические процессы

Задачи по теме

Задача 4.11. Рассчитать время сканирования электронорезиста с числом элементов $10E8$ при плотности тока 1 A/cm^2 . Коэффициент чувствительности принять равным $10E-6$.

Задача 4.12. При ширине резистора $0,5 \text{ мм}$, рассчитать длину диффузионного резистора для толсто пленочной микросхемы для получения резистора с сопротивлением 1 кОм . Удельное поверхностное сопротивление принять равным $R_{\text{п}}=80 \text{ ом/квadrat}$.

Задача 4.13. 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 4.14. Рассчитать энергию фотона для проведения процесса фотолитографии на длине волны $0,4 \text{ мкм}$.

Задача 4.15. Рассчитать энергию электрона для проведения процесса электролитографии при напряжении 15 кВ .

Задача 4.16. Рассчитайте длину волны, соответствующую электрону при проведении процесса электролитографии на напряжении 20 кВ .

Задача 4.17. Рассчитайте концентрацию примеси на расстоянии 1 см от поверхности через 2 часа диффузии из напыленной пленки, если поверхностная концентрация $N_0=10^{17} \text{ 1/см}^3$. Значение вероятности диффузии равно $0,8$, коэффициент диффузии $D=10E7 \text{ 1/см}^2$

Задача 4.18. Рассчитайте коэффициент диффузии титана в танталат висмута при температуре 1000^0 К . Энергия активации процесса $E_a=4,2 \text{ эВ}$, Коэффициент стационарной диффузии $D_0=1E10$.

Задача 4.19. Диаметр электронного пучка для литографии составляет $d_0=10,25 \text{ мкм}$. Рассчитать возможный диаметр пучка с учетом дифракции электронов на фотошаблоне. Угол сходимости пучка $\beta= 0,1 \text{ рад}$. Ускоряющее напряжение равно 10 кВ .

Задача 4.20. Рассчитать яркость электронного пучка для электронолитографии, если плотность тока эмиссии при температуре катода 2000^0 К равна 1 А/м^2 при ускоряющем напряжении 10 кВ

Методические указания и подсказки к решению задач

Задача 4.11 $T=k/J$, где $J\text{-А/см}^2$. Ответ: 100 сек

Задача 4.12 $R= R_{п} \times L/b$. Ответ: $6,2E-3$

Задача 4.13. Глубина залегания Р-п перехода определяется соотношением: $h=2 \sqrt{Dt} \sqrt{\ln N_0/N_p}$. Ответ: $0,35$

Задача 4.14. $E_{ф}= hc/\lambda$, $h=6,62 \text{ Е-34 вт/с}$ - постоянная Планка, $C= 3 \text{ Е8 м/с}$ - скорость света, $0,4 \text{ мкм}= 4E-5 \text{ м}$. Ответ: $5E-20 \text{ Дж}$.

Задача 4.15. $E=m_e C^2 + eU$ [Дж]; Ответ: $E= 8,33 \text{ Е-14 Дж}$.

Задача 4.16. $\lambda =1,27/\sqrt{U}$ [нм]. Ответ: $8,9E-3$

Задача 4.17. Случай соответствует бесконечному источнику.

$N=N_0 \text{ erf } X/2 \sqrt{Dt}$; Ответ: $1,5 \text{ Е11}$.

Задача 4.18. $D=D_0 (-\exp E_a/kT)$, $1\text{эВ}=1,6E-19 \text{ Дж}$; $K= 1,38E-23$ – постоянная Больцмана. Подставляя имеем:

$D=10E10 \times 2,7E4,87=10E10 \times 126,1=1,26E12$

Ответ: $1,26E12$

Задача 4.19. $d=d_0+d_{д}$ $d_{д}=7,5 /6 \sqrt{U}$. Ответ: 11 мкм .

Задача 4.20. $B= J \times eU/\pi kT$ Ответ : $1,8 \text{ Е3 кд/м}^2$

Занятие 4. Решение задач на автоматизацию технологических процессов

Задачи по теме

Задача 4.21. 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 градусов.

Задача 4.22. 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 сработает реле. Уравнение потока откачки: $Q = PS$. Уравнение натекания: $Q = V \int dP/dt = V \Delta P / \Delta t$

Задача 4.23. Рассчитать число мест, которые может обслужить робот, если уровень автоматизации операции без робота составлял $a = 80\%$. Коэффициент использования робота $K_p = 30\%$. Уравнение мест:

$$n = 1 / (1 - a + K_p).$$

Задача 4.24. Автомат предотвращает прожиг сопла плазмотрона путем отслеживания напряженности электрического поля по уравнению:

$$E = 4,8 I^{0,5} \times P^{0,5}; \quad E - \text{в/м}, I - \text{амперы}, P - \text{Па}.$$

Определить значение контролируемого параметра при токе 100 А и атмосферном давлении в канале плазмотрона.

Задача 4.25. 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 4.26. 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 $U_0=500\text{ В}$. Управление осуществляется по уравнению

$$V=kJ(U-U_0)^n,$$

где $k=1$ постоянная системы, J -плотность тока, $n=0,5$ -характеристика люминофора.

Задача 4.27. Изодромное звено сглаживает и опережает сигнал по функции:

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

Определить коэффициент сглаживания, если $U=1$.

Задача 4.28. Найти координату смещения руки робота осуществляемой по функции:

$$U_{см}=X_0+(X_{ti}/(X+5))N,$$

если $X_0=200$, $X=20$, $t_i=2,5$ - цена импульса смещения, $N=10$ -число корректирующих шагов.

Задача 4.29. Закон регулирования напряжения генератора на частоте 50 Гц задан функциями: $x=A\sin \omega t+0,5$; $Y=dx/dt$. Определить значение Y при амплитуде сигнала $A=2\text{ В}$ и угловой частоте $\omega t = \pi/4$

Задача 4.30. 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.?

Методические указания к решению задач

Задача 4.21. Рекомендуется построить график проведения процесса. Скорость подъема температуры составила 10 град/мин. Ответ: 100

Задача 4.22. Решение. Поток откачки определится уравнением $Q=PS$; Поток натекания определится: $Q=V \int dP/dt=V \Delta P/\Delta t$. Ответ: 0,2 сек (наверное ответ 50)

Задача 4.23. Решение. Число мест, обслуживаемых роботом, определяется выражением: $n=1/(1-a+K_p)$, где a -уровень автоматизации до

использования работа, K_r - коэффициент использования работа, относительно общего времени технологического процесса. Ответ: 2

Задача 4.24. $P(\text{атм})=10^5$ Па. Ответ: $1,5E4$ в/м.

Задача 4.25. Ответ: 109,2

Задача 4.26. Система автоматической поддержки яркости свечения люминофора на экране осциллографа обрабатывает по уравнению:

$$V=kJ(U-U_0)^n,$$

где $k=1$ постоянная системы, J -плотность тока, $n=0,5$ -характеристика люминофора, U -ускоряющее напряжение, U_0 =пороговое напряжение возбуждения люминофора. Ответ: 487 кд.

Задача 4.27. Ответ: 0,2

Задача 4.28. Ответ: 210.

Задача 4.29. Значение U это производная от первого уравнения. Цифра 2 в первом уравнении есть амплитуда сигнала. Дифференцируя исходное уравнение, получим: $U=A\omega \cos \omega t$. Ответ: 444

Задача 4.30. 10^{-3} Па дает 10000 имп $\times 2 \times 10^{-3} = 20$ В. Рекомендуется составить пропорцию. Ответ: 1,1

Тема 5. Процесс эпитаксиального выращивания структур для приборов квантовой и оптической электроники

Занятие 1. Разработка маршрутной карты для формирования эпитаксиальных покрытий в вакууме

Построим последовательность предварительных операций

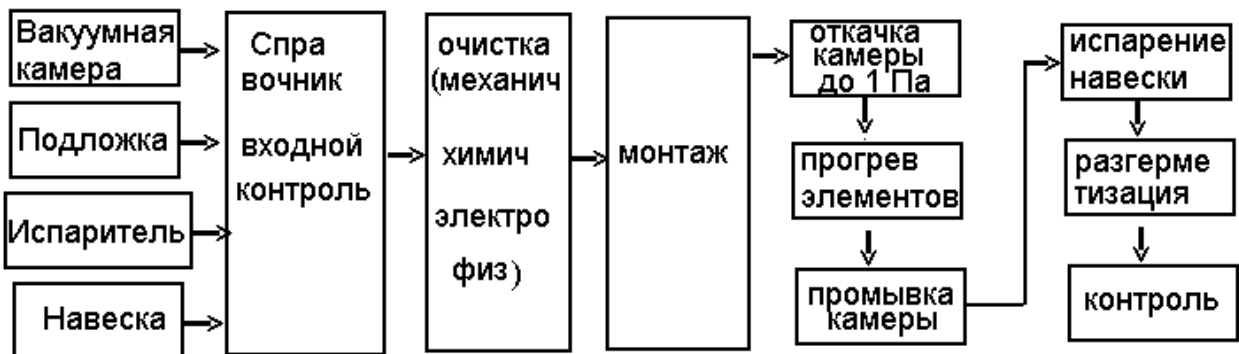


Рисунок 5.1 – Общая схема последовательности технологических операций

Задание

Сформировать последовательность технологических операций для своего индивидуального задания.

Занятие 2. Разработка операционных карт

Разработка операционных карт формирования оксидных нанослоев на основе цинка

В качестве подложки используется стекло. Поверхность стекла по литературным данным подвержена аморфизации и на нем большие локальные перепады высоты поверхности (по 0,12 мкм). Для восстановления стекла проводится термическая полировка. Стекло следует прогревать при температуре 450 градусов в течение 4 часов. В таблицах 5.1-5.4 представлены операционные карты процесса изготовления волноволнового оптического слоя на основе окиси цинка.

Таблица 5.1 – Операционная карта подготовки стекла

№	Операция	Материал	Марка	Примечание
1	Выбор марки стекла	Справочник	С 8-93	
2	Раскрой	Стеклорез		
3	Боковая разметка	Наждак		
4	Очистка	Ткань, ацетон	пинцет	
5	Анализ чистоты	Микроскоп	МИМ 7	
6	Укладка на фланец	Нерж		
7	Нагрев 5град/мин	Выдержка 5 часов	Печь СУОЛ	
8	Остывание в печи			

Таблица 5.2 – Операционная карта подготовки цинка

№	Операция	Средства		
1	Выбор марки цинка	Справочник	Технический	
2	Раскрой	Кусачки	Слесарные	
3	Очистка	Механическая	Нож	
4	Анализ чистоты	Микроскоп	МБС	
5	Переплавка при 760 тор	Железная емкость	0,2 л	

Таблица 5.3 – Операционная карта формирования пленки окиси цинка

№	Операция	Параметр	Указания	
1	Откачка до 10 Па	5 мин	Форвакуум	
2	Прогрев подложки 5 гр/мин	До 2000 С		
3	Откачка до 1 Па		Форвакуум	
4	Промывка камеры водой	Дозатор		
5	Прогрев испарителя		(0,8 Тпл)	
6	Снять нагрев подложки			
7	Испарение (1 сек)	$\Delta=0,1$ мкм		
8	Промывка камеры			
9	Испарение (1 сек)	$\Delta=0,2$ мкм		
10	Промывка камеры			
11	Испарение (1 сек)	$\Delta=0,3$ мкм		

Таблица 5.4 – Контроль покрытия

№	Операция	Средства	Марка
1	Визуальный контроль		
2	Измерение толщины	Микроскоп	МИИ-4
3	Измерение сплошности покрытия	Микроскоп	МИМ7
4	Измерение поверхностного сопротивления	Изм. мост	P-37

Тема 6. Сервисное обслуживание установок эпитаксии

Методические указания

Сервисное обслуживание предполагает знание принципиального устройства и функционирования отдельных узлов установки, обеспечивающей технологический процесс. Это: вакуумная часть, отдельные электрические схемы, схемы источников молекулярных, ионных, электронных или плазменных потоков. Данная тема является дополняющей к индивидуальному заданию. Защита индивидуального задания проводится в виде конференции, выступающей как интегратор компетенций.

Рекомендуемая литература

1. Александров С. Е., Греков Ф. Ф. Технология полупроводниковых материалов: Учебное пособие. 2 е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 240 с.: ил. — http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=3554
2. Основы физики плазмы: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. - СПб.: Издательство "Лань", 2001. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1550
3. Рожанский В. А. Теория плазмы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань». — 2012. — 320 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). Режим доступа http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2769
4. Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы технологии приборов
квантовой и оптической электроники

Методические указания к практическим занятиям

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