

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**

Учебное пособие Часть 2  
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

2012

УДК 621.387.002

**Орликов Леонид Николаевич.**

Технология материалов и изделий электронной техники: учебное пособие (часть 2) 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. - 100 с.

В учебном пособии ч. 2 рассмотрены основы технологии изготовления приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной и микроэлектроники. Кроме того, рассмотрены основы автоматизации процессов производства электронных приборов и устройств; эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования. Большинство разделов содержит математические модели для инженерных расчетов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» при изучении курсов «Технология материалов и изделий», «Вакуумная и плазменная электроника», «Оптическое материаловедение».

Пособие будет полезно для студентов смежных специальностей при изучении курсов «Технология приборов оптической электроники и фотоники», «Специальные вопросы технологии», а также при выполнении курсовых и дипломных работ.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» при изучении курсов «Технология материалов и изделий», «Вакуумная и плазменная электроника», «Оптическое материаловедение».

Пособие будет полезно для студентов смежных специальностей при изучении курсов «Технология приборов оптической электроники и фотоники», «Специальные вопросы технологии», а также при выполнении курсовых и дипломных работ.

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

Учебное пособие Часть 2  
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

4	Основы технологии изготовления приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной и микроэлектроники .....	6
4.1	Технология производства электровакуумных приборов .....	6
4.2	Технология изготовления газопоглотителей.....	10
4.3	Технология изготовления электронно-лучевых трубок.....	11
4.4	Технология изготовления приборов плазменной электроники... ..	14
4.5	Технология изготовления твердотельных электронных приборов.....	16
4.6	Планарная технология изготовления электронных приборов.....	22
4.7	Планарно-эпитаксиальная технология изготовления твердотельных электронных приборов .....	25
4.8	Технология элементов нанoeлектроники, молекулярной электроники и квантовых транзисторов .....	25
4.9	Технология формирования акустоэлектронных элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) .....	32
4.10	Пути повышения радиационной стойкости электронных приборов.....	34
4.11	Контрольные вопросы к главе 4 .....	36
5	Основы автоматизации в технологии производства материалов и изделий электронной техники .....	36
5.1	Подобие технологических процессов .....	36
5.2	Языки пользователя для программирования электрофизических установок .....	37
5.3	Пневматические устройства управления.....	41
5.4	Порядки и типы управляющих систем технологического оборудования.....	42
5.5	Устойчивость технологических процессов .....	43
5.6	Анализ сложных технологических систем.....	45
5.7	Системы регистрации и первичной обработки сигналов .....	46
5.8	Регулирование технологических процессов .....	48
5.9	Технология обработки сигналов с технологических объектов... ..	50
5.10	Числовое программное управление в технологии обработки материалов .....	55
5.11	Оптимизация технологических процессов .....	59
5.12	Робототехнические комплексы и автоматизированные рабочие места .....	61
5.13	Системы «КАМАК» и «АРМ» для автоматического регулирования технологических процессов .....	63
5.14	Контрольные вопросы к главе 5 .....	65
6	Эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования .....	65

6.1	Правила оформления документов для технологических процессов .....	65
6.2	Общее сервисное обслуживание оборудования .....	66
6.3	Сервисное обслуживание различных типов вакуумных установок.....	68
6.4	Сервисное обслуживание вакуумных насосов.....	71
6.5	Монтаж вакуумных коммуникаций .....	72
6.6	Сервисное обслуживание электрооборудования вакуумных установок.....	75
6.7	Сервис отдельных блоков электрофизических установок.....	78
6.8	Сервисное обслуживание систем очистки воздуха .....	84
6.9	Сервисное обслуживание специальных установок .....	85
6.10	Эксплуатация и сервисное обслуживание установок нанотехнологии типа Катунь .....	86
6.11	Методы измерения скорости формирования толщины пленок .....	94
6.12	Контрольные вопросы к главе 6.....	98
7	Заключение.....	99
8	Список рекомендуемой литературы.....	99

## 4 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ ВАКУУМНОЙ, ПЛАЗМЕННОЙ, ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### 4.1 Технология производства электровакуумных приборов

Каждый электровакуумный прибор состоит из катода – источника электронов или ионов, приемника частиц – анода и электродов, управляющих траекторией частиц. Все эти элементы помещаются в стеклянную, металлическую или керамическую оболочку. В оболочке поддерживается вакуум, необходимый для преодоления электронами или ионами расстояния от катода до анода.

#### 4.1.1 Катоды

*Катоды из чистых металлов* таких как: W, Ta, Nb, Re, Mo обладают большой яркостью, и нашли широкое распространение для эмиссии электронов в электронных лампах и разборных электровакуумных приборах (источниках электронных пучков).

*Катоды из металлов с адсорбирующим слоем:* W+Th, W+Ba, W+Ca(Ce) нашли широкое применение в люминесцентных и кварцевых лампах, лампах сверхвысокого давления.

*Катоды на основе химических соединений.* Основу катодов этой группы составляют оксиды бария и тория (оксидные катоды), щелочноземельные соединения, бориды, карбиды, нитриды и сульфиды металлов. *L-катод* – это катод, изготовленный из пористого вольфрама, пропитанного оксидами щелочноземельных элементов (импрегнированные катоды). Такие катоды нашли широкое распространение в различных радиолампах.

На рис. 4.1 представлена схема оксидного и прямо накаленного катодов.



Рисунок 4.1 – Схема оксидного (а) и прямо накаленного (б) катода: 1 – экран; 2 – катод; 3 – винтовое крепление; 4 – токоввод; 5 – изолятор.

*Специальные катоды.* В качестве таких катодов следует отметить катоды на основе вторичной электронной эмиссии для фотоэлементов; плазменные катоды и острийные для ионно-электронных источников с извлечением частиц из плазмы газового, дугового или высокочастотного разряда; катоды на основе пленок металл – диэлектрик – полупроводник; металл-диэлектрик – металл и др.

#### 4.1.1 Технология изготовления оксидного катода

Вначале на керн из железной или молибденовой проволоки навивается вольфрамовая проволока для нагревателя. После навивки на нагреватель наносится суспензия из диэлектрика. Широкое применение получил *электрофорезный способ* осаждения частичек диэлектрика из электролита. Осаждение частиц на катоде называют катафорез. Осаждение частиц на аноде называется анафорез.

Активирование оксидного катода заключается в восстановлении металлического бария из его окиси для получения хорошей эмиссии. Активирование проводят прямо в электронной лампе, в вакууме. Температура активации составляет 75% от температуры плавления соединения, из которого сделан катод (600-800° С).

Иногда в процессе изготовления или эксплуатации активный слой оксидного катода может прореагировать с остаточным газом в вакуумной среде (отравиться) и потерять эмиссионные свойства.

Почти все виды отравления лечатся путем обезгаживания в вакууме с применением ионной бомбардировки.

#### 4.1.2 Аноды

К материалам анодов предъявляются следующие требования: большая температура плавления (т.к. на аноде выделяется в виде тепла значительное количество энергии); малое газовыделение; большой коэффициент излучения; большая теплопроводность; малая ионно-электронная эмиссия; паяемость и свариваемость.

В качестве материала анодов используют вакуумный графит, медь; титан; молибден; сталь, покрытую алюминием или углеродом (соответственно плакирование и чернение).

Аноды изготавливаются методом штамповки, точения или фрезерования или травления. Для увеличения лучеиспускания анодов применяют карбидные покрытия, увеличивающие коэффициент излучения.

#### 4.1.3 Сетки

Электроды, помещенные в пространстве между катодом и анодом прибора, носят общее название – сетки. Сетки изготавливаются из

следующих материалов: Ni, Cu, W, Mo, сплавы NiW – 25. Для придания сеткам антиэмиссионных или технологических свойств их покрывают золотом, никелем, медью, серебром, карбидами или нитридами металлов (TiC, TiN, WC).

Витые и плетеные сетки широко применяются в лампах бытового назначения. Рамочные, стержневые и дисковые сетки нашли широкое распространение в высокочастотных лампах, подверженных вибрационным и температурным нагрузкам. Электролитические сетки при шаге 20 мкм и прозрачности 65% нашли широкое применение в передающих телевизионных трубках.

#### 4.1.4 Оболочки электровакуумных приборов

Оболочка служит для поддержания вакуума в приборе и крепления арматуры. Оболочки выполняются из металла, стекла и керамики.

Толщину стенки  $h$  оболочки электровакуумного прибора диаметром  $D$  рассчитывают из условия прочности. В этом случае учитывается окружающее давление  $P_{окр}$ , при котором работает прибор, допустимое напряжение на разрушение  $\delta$  и технологический допуск  $C$  на отклонение толщины:

$$h = (P_{окр} \cdot D / 2\delta) + C, \quad (4.1)$$

где  $P_{окр}$  – [атм.];  $D$  – [м];  $\delta$  – [кг/мм<sup>2</sup>];  $C$  – [мм].

В зависимости от добавок наибольшее распространение для оболочек нашли 4 группы стекла: вольфрамовое стекло (W – С37, С40); молибденовое (Mo – С46, С54); платинитовое (С87); оптическое (ОП-10, ОП-7, содержат много кварца).

Приборы с керамической оболочкой могут нормально работать при температуре до 500—600° С.

Внутренняя арматура электровакуумного прибора собирается на ножке, представляющей собой сумму деталей: изолятор (стекло, керамика) с впаянными в него выводами. Чаще выводами служит молибден. Для электрических ламп накаливания выводы могут изготавливаться из платинита: никелево-стальной проволоки, покрытой медью с присадками буры.

Важно знать газовыделение из элементов в процессе работы лампы. Константа проницаемости  $K_o$ , растворимость газа в металле  $S_o$ , и коэффициент диффузии газа из материала  $D_o$  связаны соотношением:

$$K_o = D_o S_o. \quad (4.2)$$

#### 4.1.5 Конструкции металлокерамических спаев и их расчет

Различают следующие конструкции спаев керамики с металлом: *охватывающий, итырьковый, торцевой*.

Для устранения растрескивания (из-за разных коэффициентов линейного расширения) в металлокерамических соединениях выполняется промежуточный слой из мягкого металла (Cu, Au, Ni, Ag) для *согласования спая*. На рис. 4.2 представлены некоторые типы спаев. Выбор типа металлокерамического спая зависит от величины смещения торца керамики относительно металла  $\Delta$ :

$$\Delta = \alpha \Delta T R, \quad (4.3)$$

где  $\alpha$  – разность температурных коэффициентов линейного расширения материалов, 1/град;

$\Delta T$  – разность температур от точки твердения припоя до комнатной;

$R$  – радиус спая, м.



Рисунок 4.2 – Типы металлокерамических спаев

Каждый тип керамики обладает определенным модулем упругости  $E$ , кг/мм<sup>2</sup> и коэффициентом удлинения от температуры  $\varepsilon$ . Критический коэффициент температурного расширения керамики, спаянной с металлом  $\delta_T$ , определяется выражением:

$$\delta_T = \varepsilon E \quad (4.4)$$

Перед пайкой на керамику наносится слой пасты металла (W, Mo, Ti и др) – проводится *металлизация*.

В последнее время пасты наносятся методом печати через трафарет – (*трафаретная печать*) или путем наклейки полимерного биндера с металлической пленой (*шелкография*). Затем проводится *вжигание пасты* в водородной или вакуумной печи.

В ряде случаев в керамику вводят избыток солей некоторых металлов (Ti, Al). При температуре около 1000<sup>0</sup> С на поверхность керамики вытесняется слой металла (Ti, Al). В этом случае реализуется *метод вытеснения*, позволяющий проводить пайку металла с керамикой без металлизации. В последнее время распространяется *металлизация напылением металлов в вакууме*.

В процессе пайки покрытие покрывается припоем (облуживается). Относительно дешевые *припои из меди* требуют пайки при более высоких температурах. Обильное газовыделение при высокой температуре создает поры и увеличивает вероятность негерметичности прибора. *Медно-золотые припои, медно-серебряные и медно-никелевые припои* хорошо

зарекомендовали себя в определенной группе электровакуумных приборов. Для приборов, не допускающих нагрева, используется *диэлектрический припой*, представляющий собой клеящую пасту. В таблице 4.1 представлены некоторые параметры припоев.

Таблица 4.1 – Некоторые припои для металлокерамических спаев

Марка припоя	Состав припоя, % по массе	Температура плавления, град С
ПСр72В	Ag:Cu=72:28	779
ПЗлН82	Au:Ni=82,5:1	950
ПМТ28	7,5	870
ПМН10	Cu:Ti=72:28 Cu:Ni=90:10	1100-1140

Пайка проводится в безмасляном сверхвысоком вакууме. После пайки изделия отжигают. Температура отжига составляет 75% от температуры плавления припоя.

## 4.2 Технология изготовления газопоглотителей

Во время работы прибора происходит диффузия газов через оболочку и токовводы прибора, а также выделение газов из нагретых элементов прибора. Для поддержания вакуума в конструкцию электровакуумных приборов входит *газопоглотитель (геттер)*. Геттер изготавливается путем спекания специальной шихты в вакуумных печах. Полученные конгломераты подвергаются дроблению, просеиванию и расфасовке в капсулы с углекислым газом. Наиболее распространенными являются геттеры на основе таких металлов как: Ti, Ba, Fe, Zr, P, Al, Ni. Механизм поглощения газа геттером – это образование химического соединения с газом (*абсорбция*). Различают два вида газопоглотителей – *распыляемые и не распыляемые*. Распыляемые геттеры (для радиоламп) имеют меньшую температуру возгонки относительно нераспыляемых (до 1000° С) и большую избирательность к газам. Не распыляемые газопоглотители (для осветительных ламп) наносятся в виде порошка на детали прибора.

Для обозначения марок геттеров берутся первые буквы тех металлов, из которых состоит геттер. Например: BaTo = барий + торий; BaTi = Барий + титан; ФеБаМаг = феррум (железо) + барий + магний; АльБа = алюминий + барий.

Геттеры обладают рядом свойств, характеризующих их параметры:

1) коэффициент обратимости  $R$ , как отношение потока газовой выделенной  $Q_{\text{выд}}$  из изделия к поглощенному потоку  $Q_{\text{погл}}$ :

$$R = Q_{\text{выд}} / Q_{\text{погл}} . \quad (4.5)$$

Геттер становится активным, когда на его поверхности образуется пленка, способная поглощать газ. Для *активации* геттер нагревают до температуры, составляющей 75% от температуры плавления. При более высокой температуре сам геттер начинает разлагаться и выделять газ.

2) эффективность поглощения  $\mathcal{E}$ , как отношение числа поглощенных молекул к общему числу падающих на геттер молекул:

$$\mathcal{E} = N_{\text{погл}} / N_{\text{пад}} ; \quad (4.6)$$

3) скорость поглощения (зависит от площади сорбции);

4) избирательность;

5) ёмкость геттера (л / кв.см.);

6) предельный вакуум (для ВаО –  $10^{-40}$  мм рт ст).

Остаточное давление  $P$  уменьшается при увеличении площади геттера  $S$  и зависит от скорости объемного поглощения  $G$ :

$$P = G / kS , \text{ мкм рт. ст.} , \quad (4.7)$$

где  $k$  – константа поглощения. (Если определен газ полностью поглощается, то  $k=1$ ). Размерность единиц:  $P$  – мкм рт ст,  $G$  – лмкм/с,  $S$  – см<sup>2</sup>.

Если начальное давление работы геттера в колбе прибора увеличится, то скорость поглощения газа  $V$  возрастет пропорционально корню квадратному из давления:

$$V = k\sqrt{P} . \quad (4.8)$$

При постоянном давлении количество газа  $Q$ , поглощенного геттером, пропорционально площади геттера  $S$  и времени его работы  $t$ :

$$Q = kSPt . \quad (4.9)$$

### 4.3 Технология изготовления электронно-лучевых трубок

Электронно-лучевые трубки применяются в телевизорах, компьютерах, в осциллографах, в ряде приборов для визуального наблюдения процессов. Электронно-лучевая трубка состоит из электронного прожектора, электронно-оптической системы и экрана.

#### 4.3.1 Основы теории формирования цвета на экране электронно-лучевой трубки

Цвет – это сумма нескольких цветов. В настоящее время наибольшее распространение получила схема формирования цвета на основе суммы трех цветов: красного, синего и зеленого. Для удобства расчетов этим цветам присваивают координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Координата цвета определяется положением вектора в пространстве и определяется уравнением:

$$Ц = Xx + Yy + Zz , \quad (4.10)$$

где  $x, y, z$  – единичные коэффициенты интенсивности.

Совершенствованием системы  $X, Y, Z$ , явилась международная система  $R, G, B$  (красный, зеленый, голубой). Цветовое уравнение для этой системы имеет вид:

$$S = rR + gG + bB, \quad (4.11)$$

где  $r, g, b$  – единичные векторы в цветовом пространстве.

На плоскости единичных векторов цвет можно представить в виде *цветовой диаграммы*. На рис. 4.3 а) представлена упрощенная схема цветовой диаграммы.



Рисунок 4.3 – а) – цветовая диаграмма  $RGB$ ; б) – равноконтрастная диаграмма

Цвета и соответствующие им длины волн расположены по образующей типа эллипса. Крайние линии спектра, воспринимаемые глазом, соединены *линией несуществующих цветов* («серобуромалиновых»). В центре диаграммы помещены спектры стандартных источников: С – солнце; Е – пасмурный день; В – абсолютно черное тело; А – лампа накаливания. Глаз очень хорошо видит слабый зеленый цвет с длиной волны 555 нм и очень плохо синий цвет с длиной волны 400 нм. На фоне других цветов глаз хорошо различает красный цвет. Особенности цветового восприятия глаза привели к корректировке количества компонент красного, синего и зеленого цветов в составе люминофоров и разработке равноконтрастной диаграммы. В этом случае все цвета воспринимаются равноконтрастно.

### 4.3.2 Технология изготовления электронно-лучевых трубок

Электронно-оптическая система электронно-лучевой трубки выполняется из немагнитной хромистой стали, нихрома, константана. Электронно-оптическая система вместе с катодным узлом готовится отдельно, а затем собирается на высокоточном оборудовании.

Экран представляет собой часть колбы с нанесенным на нее люминофором. Экран изготавливается из особого стекла с добавлением солей свинца, стронция или тяжелых металлов для защиты от

рентгеновского излучения. После варки стекла производится прессование экранов на одиннадцати позиционном пресс-автомате типа АПР-11М. После этого происходит отжиг экранов с целью снятия температурных напряжений.

Далее происходит изготовление конусов электронно-лучевой трубки, их отжиг и проверка.

### 4.3.3 Люминофорное покрытие экрана электронно-лучевых трубок

Люминофор представляет собой вещество, преобразующее энергию электронов в видимое излучение. *Люминофор состоит из основного вещества, активатора и плавня.* Основное вещество определяет класс люминофора: (сульфиды, селениды, силикаты, вольфраматы, фосфаты и др.). Активаторы – это центры свечения. В качестве активаторов используются медь, серебро, марганец, олово и др. металлы с концентрацией тысячные доли на грамм. Плавни добавляют в шихту для общего сцепления люминофора между собой. В обозначениях люминофоров пишут формулу основного вещества, затем – активатор в количестве грамм на один грамм основного вещества. Например:  $ZnS:10^{-5}Cu:10^{-4}Al$ . Важной характеристикой люминофора является квантовый выход – отношение числа электронов, приведших к свечению к общему числу падающих электронов. Величина квантового выхода колеблется от  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$ .

Перед нанесением люминофорного покрытия для электронно-лучевых трубок осциллографов готовится суспензия из смеси биндера и люминофора. В состав суспензии вводится *коагулятор и гель* для ускорения схватывания покрытия и защиты от ионной бомбардировки

Для получения покрытия из «цветных» люминофоров применяется метод фотопечати – *фотолитографии*. Сущность метода заключается в следующем.

На вращающийся экран поливом наносят слой фоторезиста и сразу напыляют сухой люминофор одного цвета. Экран сушат, экспонируют и проявляют. Процесс повторяют для остальных двух люминофоров. *Алюминирование* экрана – это операция покрытия люминофора на внутренней стороне экрана пленкой алюминия. Покрытие применяется для увеличения яркости свечения экрана за счет отраженного потока, а также для защиты люминофора от электронов низких энергий, которые не возбуждают, а нагревают люминофор. Кроме того, алюминирование защищает люминофор от ионов, распыляющих покрытие.

### 4.3.4 Сборка кинескопов

При сборке кинескопа перед экраном устанавливается маска. Маска служит для урезания низкоэнергетических электронов в Гауссовском

распределении пучка. Низкоэнергетические электроны не возбуждают люминофор, а лишь нагревают его. Маска изготавливается из очень мягкой стали, которая плохо подвергается намагничиванию и не искажает траекторию электронов. После очистки поверхности маски проводятся нанесение резиста, его экспонирование и задубливание, а затем травление щелей или отверстий диаметром 0,8 мм.

Последовательность основных технологических операций на линии сборки цветного кинескопа можно представить следующим образом.

Мойка колбы – сушка – нанесение лакового подслоя – нанесение синей суспензии люминофора – засветка – задубливание – суспензия зеленого люминофора – засветка – суспензия красного люминофора – установка маски – сушка – установка электрооптической части – склеивание экрана с колбой – откачка – обезгаживание – заварка – испарение геттера – испытание.

#### 4.4 Технология изготовления приборов плазменной электроники

Под приборами плазменной электроники понимаются электронные и ионные источники для технологических целей, вакуумные плазменные сильноточные выключатели, сильноточные тиратроны и игнитроны для коммутации отдельных электрических схем. Технология изготовления заваренных приборов плазменной электроники не отличается от технологии изготовления электровакуумных приборов.

*Оболочки* приборов плазменной электроники (источников электронов или ионов) в основном выполняются из керамики. Это связано с тем, что органические изоляторы: капролон, оргстекло и др., вследствие разрыва полимерных молекул при попадании на них частиц плазмы, выступают генераторами газа. Размер изолятора и оболочки прибора выбирается из расчета 2 кВ/см. Это связано с попаданием пыли на изолятор из атмосферного воздуха или перепылением материалов внутри источника. Для уменьшения габаритов изолятор делают волнистым. Для увеличения электрической прочности необходимо, чтобы силовые линии электрического поля были направлены вдоль изолятора, (рис. 4.4 а) а не поперек (рис. 4.4 б).

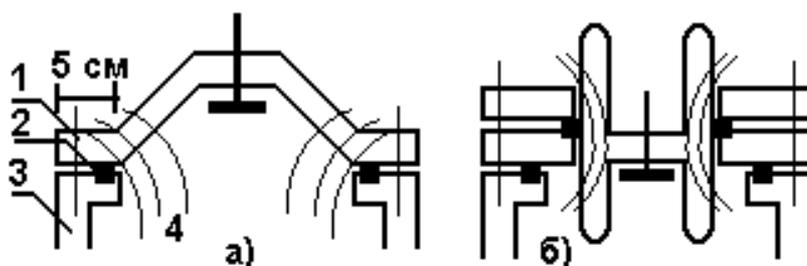


Рисунок 4.4 – Схемы высоковольтных изоляторов на 100 кВ: 1 – изолятор; 2 – уплотнение; 3 - вакуумная камера; 4 – силовые линии

электрического поля

*Материалы для конструкций.* Наиболее приемлемым материалом для конструктивных элементов является нержавеющая немагнитная сталь (например, типа X18H10T). Обычная сталь имеет большие газовыделения, ржавеет, и поэтому применяется только для внешних деталей плазменных приборов. Источники электронов и ионов должны быть сконструированными так, чтобы рентгеновское излучение не проходило через вакуумные уплотнения, смотровые окна, изоляторы. Для этого уплотнительные фланцы выполняются с буртиками, а сами источники окружаются экранами из свинца (толщиной 5 мм для напряжения 30 кВ). Внутрь камер вкладываются свинцовые стекла. Ориентировочная толщина вакуумной камеры составляет ~20 мм для напряжения до 30 кВ при токах до 100 мА.

*Материал для катодов.* Для стационарных источников электронов популярными являются катоды из гексабарита лантана. Такие катоды работают хорошо и как накаливаемый катод, и как газоразрядный. В виду его дефицитности часто применяются прямонакаленные катоды из тантала или вольфрама. Для импульсных генераторов электронов, ионов в зависимости от механизма эмиссии могут применяться и другие материалы.

*Материал для анодов.* Для анодов в основном применяется нержавеющая сталь. Другие материалы легко распыляются в разряде и имеют большой коэффициент удельного газовыделения. В источниках электронов или ионов анодом может служить корпус вакуумной камеры.

*Магнитные элементы.* Магнитные поля применяются для фокусировки электронных пучков, для обеспечения траекторий потока плазмы, для повышения эффективности ионизации. Магнитные линзы изготавливаются из электротехнической стали. Плохим заменителем электротехнической стали является низкоуглеродистая сталь Ст 3. Электромагнитные линзы стараются вынести за пределы вакуумного объема, что связано с перегревом витков и трудностью откачки газа между витками.

*Охлаждение.* В приборах плазменной электроники около 10% мощности расходуется на поддержание разряда, потери частиц и нагрев элементов. При мощности прибора до 1 кВт оправдано воздушное охлаждение от турбины высокого напора. При более высокой мощности применяют изолирующее водяное или масляное охлаждение. Обычно катод делается сменным и крепится в держателе из меди, которая обладает хорошим теплоотводом. При работе источника на длительностях менее 10 мкс в передаче энергии преобладает ударный механизм и требования к теплоотводу уменьшаются.

*Токовводы.* Следует отдавать предпочтение фабрично выпускаемым токовводам. Такими могут быть герметичные стеклометаллические вводы, автомобильные свечи, некоторые фрагменты металлокерамических

радиоламп. Для сильноточных импульсных источников подвод тока может проводиться шинами большой площади, что связано с эффектом вытеснения тока из проводника при малой его длительности (эффект Дестрио).

## 4.5 Технология изготовления твердотельных электронных приборов

### 4.5.1 Литография

Литография – это процесс формирования элементов микросхем и полупроводниковых приборов фотографическими методами.

Сущность литографического процесса состоит в том, что на подложку наносят фоточувствительный слой (*резист*), а затем его засвечивают через фотошаблон, вытравливают канавки, напыляют проводящие и диэлектрические пленки и т.д. до изготовления полупроводникового прибора или микросхемы. По используемому для засветки резиста виду излучения литография подразделяется на фотолитографию (засветка ультрафиолетом) рентгенолитографию (засветка рентгеновским излучением), электронную и лазерную литографии (соответственно засветка резиста проводится электронами или лазерным излучением и т.д.). Известны ионнолитография, комбинированные виды литографий. Засветку можно производить перемещающимся лучом (*проекционная сканирующая литография*) или посредством наложения шаблона (*контактная литография*).

В числе самостоятельных литографий следует отметить *лазерную литографию*, реализуемую как по принципу фотолитографии, так и по принципу *безрезистивной* литографии. При безрезистивной литографии роль резиста выполняет покрытие (чаще графит), выжигаемое лазером или электронным лучом.

На рис. 4.5 представлены местоположения некоторых видов литографий относительно ширины разрешающей линии.

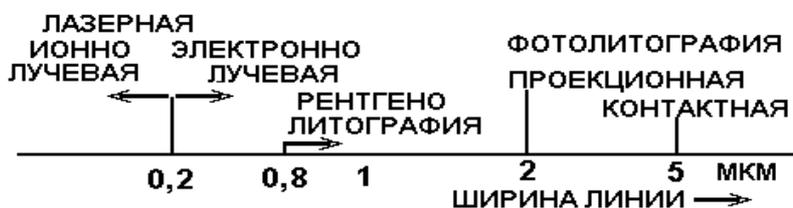


Рисунок 4.5 – Местоположения литографий относительно ширины разрешающей линии

Из рис. 4.5 видно, что с уменьшением длины волны засвечивающего излучения разрешающие возможности литографии возрастают.

### 4.5.2 Фотолитография

Чувствительные к свету органические соединения – фоторезисты (сокращенно ф/р) наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (экспонируются). Использование специальной маски с прозрачными и непрозрачными полями – фотошаблона (сокращенно ф/ш) приводит к локальному воздействию излучения на фоторезист. Энергия фотона  $E$  (Дж) для проведения литографии рассчитывается по формуле:

$$E = hc / \lambda , \quad (4.12)$$

где  $h=6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж/с – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $\lambda$  – длина волны, м.

На рис. 4.6. представлены основные этапы типового литографического процесса.

Технологический процесс фотолитографии проводится в следующей последовательности: обработка подложки; нанесение фоторезиста и его сушка; совмещение и экспонирование; проявление защитного рельефа; сушка фоторезиста, задубливание; травление рельефа; удаление фоторезиста.

<b>ф/р (позитивный, негативный)</b>		<b>Сканер, шаблон</b>	<b>Репродуцирование</b>
↓		↓	↓
Нанесение ф/р →	Сушка →	Экспонирование →	Мультипликация
↑	→	↑	↑
<b>Подложка</b>	<b>&lt;T<sup>0</sup>,&gt;T<sup>0</sup> + Ar</b>	<b>Методы совмещения</b>	<b>Фотоповторитель</b>
→Проявление	Дубление	→Травление	Удаление ф/р
↑	↑	↑	
<b>Проявитель (бромбензол)</b>	<b>КОН, NaOH</b>	<b>HCl, HF, плазма, ионы</b>	

Рисунок 4.6 – Основные этапы типового литографического процесса

### 4.5.3 Фоторезисты

В большинстве случаев основой резиста является поливиниловый спирт, полиэфиры, поливинилацетат, каучуки, эпоксидные смолы. Пленка *позитивного* фоторезиста под действием излучения становится неустойчивой и растворяется при проявлении. Пленка *негативного* фоторезиста, наоборот, под действием излучения становится нерастворимой. На рис. 4.7 представлена схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов.

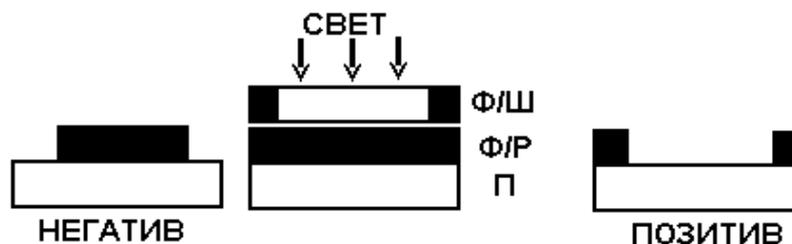


Рисунок 4.7 – Схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов

*Разрешающая способность* фоторезиста ( $R$ , лин/мм) определяется как число задубленных линий на 1мм, разделенных свободными от резиста промежутками. В таблице 4.2. представлены некоторые параметры позитивных и негативных фоторезистов.

Таблица 4.2 – Некоторые параметры позитивных и негативных фоторезистов

М	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	ПВ
АРКА	П383	П330	П333	Н106	Н108	Ц-Н
R	4	40	5	2	2	100
л/мм	00	0	00	00	50	

Позитивные резисты имеют большую разрешающую способность. Они тяготеют к электрофизическим методам обработки.

Для нанесения фоторезиста на подложку используют пульверизацию, окунание в раствор, полив, нанесение валками, центрифугирование и т.д. Центрифугирование – это способ нанесения резиста с помощью вращающегося диска.

Сушка фоторезистивного слоя проводится в два этапа: *низкотемпературная* ( $40^{\circ}\text{C}$  в течение 10-15 мин) и *высокотемпературная* ( $80-120^{\circ}\text{C}$  в течение 20 мин.). Во время сушки происходит отклонение размеров, которое следует учитывать. На рис. 4.8 представлена зависимость отклонения размеров и времени засветки от температуры сушки. Темп сушки ограничен появлением корки и микротрещин.

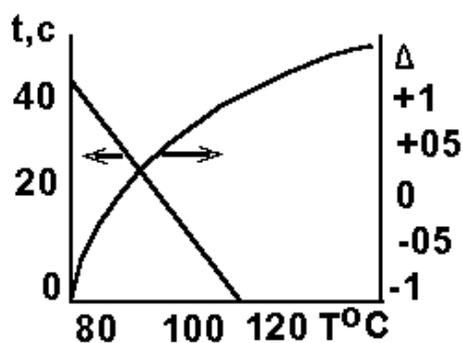


Рисунок 4.8 – Зависимость отклонения размеров и времени засветки от температуры сушки

#### 4.5.4 Процесс формирования изображения микросхемы

##### Фотошаблоны и методы их изготовления

Изображение в слое фоторезиста формируется с помощью фотошаблонов, представляющих собой пластины с прозрачными и непрозрачными участками. Различают эмульсионные, металлизированные и транспарентные (цветные) фотошаблоны. На рис. 4.9 представлена конструкция фотошаблона.



Рисунок 4.9 – Конструкция фотошаблона

К фотошаблону предъявляются табличные требования по разрешающей способности, по показателю точности, по размытости края и др., исходя из требований заказчика.

Для изготовления фотошаблонов применяют оптико-механический метод и метод фотонаборного генератора. Суть первого метода состоит в механическом вырезании первичного оригинала, увеличенного в 200-500 раз рисунка, с последующей мультипликацией и репродуцированием. *Процесс мультипликации* заключается в размножении изображения структуры в уменьшенном виде. *Процесс репродуцирования* заключается в четком воспроизведении изображения на фотошаблоне до окончательного размера.

Второй метод генерации изображений, или метод фотонабора, основан на разделении топологической структуры фотошаблона на элементарные прямоугольники различной величины и их фотопечати на фотопластину. Работа на фотонаборных установках осуществляется с помощью ЭВМ.

Для совместимости элементов в фотошаблоне предусмотрены

реперные знаки. В настоящее время наиболее широко распространились визуальный метод совмещения по базовым элементам (сопротивления транзистора) и метод совмещения по знакам с контролируемым зазором.

На рис. 4.10 приведены некоторые знаки совмещения. На этом же рисунке приведена плотность дефектов, возникающая вследствие контакта соприкосновения фотошаблона и топологического слоя микросхемы. Различают область микроусилий (*а*), область ультрамягкого контакта (*б*) и область мягкого контакта (*в*).

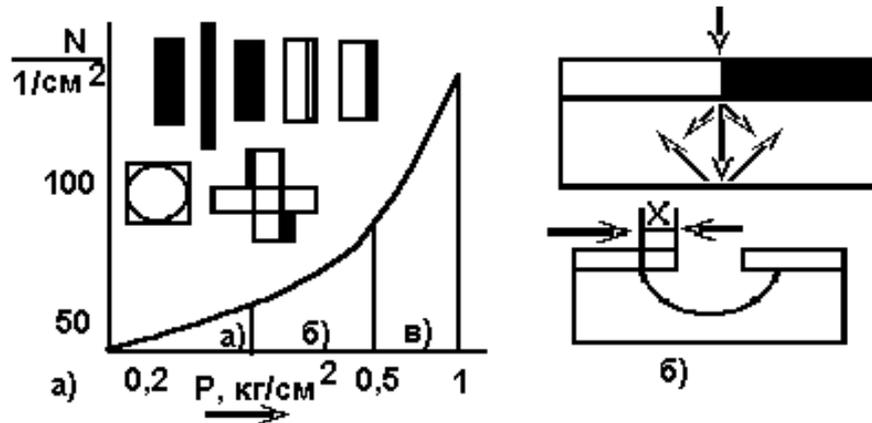


Рисунок 4.10 – Конфигурация знаков совмещения; а) зависимость плотности дефектов от усилия прижима трафарета; б) схема рассеяния света

Кроме совмещения на качество микросхемы (особенно на степень упаковки элементов) влияют эффекты рассеяния в резистивном слое. На рис. 4.10 б представлена схема рассеяния потока света в резистивном слое и его последствия, приводящие к боковому подтравливанию «X» изменению профиля травления.

После экспонирования и проявления следует процесс воспроизведения изображения. Процесс воспроизведения изображения производится путем химического или ионного травления. Травление считается *изотропным*, если фронт травления продвигается в виде круга с радиусом, пропорциональным времени травления. Отношение скорости вертикального травления к горизонтальному называется *показателем анизотропии*. Фактор травления  $A$  – это отношение глубины травления  $h$  к величине бокового подтравливания  $x$ :

$$A = h / x . \quad (4.13)$$

Заключительные этапы литографического процесса состоят из операций удаления фоторезиста и операций сушки подложек.

#### 4.5.5 Электроннолитография

Метод электроннолитографии основан на явлении перестройки молекулярной структуры резиста под действием электронного облучения. Различают *сканирующую и проекционную* электроннолитографию. На рис.4.11 представлена схема проекционной электроннолитографии. Поток электронов находится в продольном магнитном поле индукцией  $B$ .

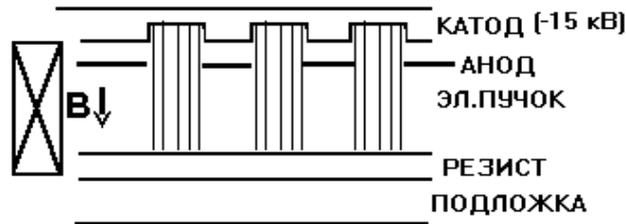


Рисунок 4.11 – Схема проекционной электроннолитографии

Время экспонирования  $t$  связано с коэффициентом чувствительности  $K$  резиста и плотностью тока луча  $J$  соотношением:

$$t = K / J . \quad (4.14)$$

$K = 10^{-6} \text{--} 10^{-8}$  кл/см<sup>2</sup> соответственно для негативных и позитивных электронорезистов. Время экспозиции при диаметре пучка 0,1 мкм  $\sim 60$  мкс на один элемент. Общее время экспонирования подложки диаметром 30 мм достигает 100 часов.

Факторы, ограничивающие разрешающую способность электроннолитографии:

1) электрон – это одновременно и частица и волна. Длина волны  $\lambda$ , соответствующая электрону определяется через постоянную Планка  $h$ , массу электрона  $m$  и его скорость  $V$  соотношением:

$$\lambda = h / mV , \quad (4.15)$$

$$V = \sqrt{2meU} ; \quad (4.16)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  кл);

$U$  – ускоряющее напряжение;

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж/с;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

Подставляя константы, получим:  $\lambda = 1,227\sqrt{U}$  (нм);

2) *сферическая абберация* и тепловой разброс поперечных скоростей электронов приводит к увеличению диаметра электронного пучка и его рассеянию в слое резиста;

3) мощность, вкладываемая в пучок, ограничена испарением электронорезиста. Энергия электрона складывается из энергии электрона и энергии взаимодействия с веществом и определяется выражением:

$$E = m_e c^2 + eU , (\text{Дж}), \quad (4.17)$$

где  $c$  – скорость света;

4) яркость источников электронов конечна и имеет Гауссовское распределение в пространстве. Яркость электронного пучка  $B$  при

электроннолитографии зависит от плотности тока эмиссии  $J$  и температуры катода  $T$ :

$$B = JeU / \pi kT, \quad (4.18)$$

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

В ряде случаев для увеличения разрешающей способности используются подкладки под подложку, отражающие электронный поток, тем самым реализуется *обратная электроннолитография*. Диаметр пучка  $d$  для электроннолитографии может возрасти из-за дифракции или aberrаций. Например, увеличение диаметра пучка из-за дифракции описывается уравнением:

$$d_{\delta} = 7,5 / \delta \sqrt{U}, \quad (4.19)$$

где  $\delta$  – угол сходимости луча, рад.

#### 4.5.6 Рентгенолитография

На рис. 4.12 представлена схема реализации рентгенолитографии.



Рисунок 4.12 - Схема реализации рентгенолитографии

Достоинства рентгенолитографии состоят в отсутствии вакуумной системы, нечувствительность к загрязнениям.

Недостатком рентгенолитографии является наличие рентгеновского излучения, что предъявляет повышенные требования к помещению и обслуживающему персоналу.

#### 4.5.7 Ионнолитография

В случае ионнолитографии засветка резиста проводится ионами инертных газов. Достоинства применения ионов состоят в большой массе иона и высокой полимеризующей способности ионов. Большая масса иона препятствует его отклонению от первоначального направления даже в сильных магнитных полях.

### 4.6 Планарная технология изготовления электронных приборов

Планарная технология (от английского planar – плоский) основывается на создании в приповерхностном слое полупроводниковой

монокристаллической пластины (Si, Ge, Ga, As) областей с различным типом проводимости и разной концентрацией примесей. Такие области создаются локальным введением в подложку (чаще Si) примесей через маску (чаще пленку SiO<sub>2</sub>), формируемую на подложке литографией. Это позволяет через окна в SiO<sub>2</sub> осуществлять коммутацию элементов при помощи пленочных (чаще Al) проводников. Пленка SiO<sub>2</sub>, помимо использования ее в качестве маски, является хорошим диэлектриком и защищает поверхность прибора от повреждений.

Полупроводниковой называют интегральную микросхему (ИС), в основе структуры которой применен полупроводниковый материал. Пленочной называют ИС, состоящую из пленочных элементов, выполненных на изолирующих поверхностях (подложках) в виде слоистых комбинаций (планарная технология). Наиболее отработанной является технология изготовления транзисторов. Комбинируя соединения транзисторов, получают сопротивления, емкости, индуктивности и другие пассивные или активные элементы схемы.

Вопросы разработки ИС требуют знания закономерностей размещения элементов на данном геометрическом уровне – *топологии*. В качестве подложек микросхем используются стеклоподобные материалы (ситгалы, сапфир), керамика и полимерные материалы. Микросхему начинают формировать с комбинации кремний – подложка. При этом различают КВД – кремний в диэлектрике; КНД – кремний на диэлектрике; КНС – кремний на сапфире.

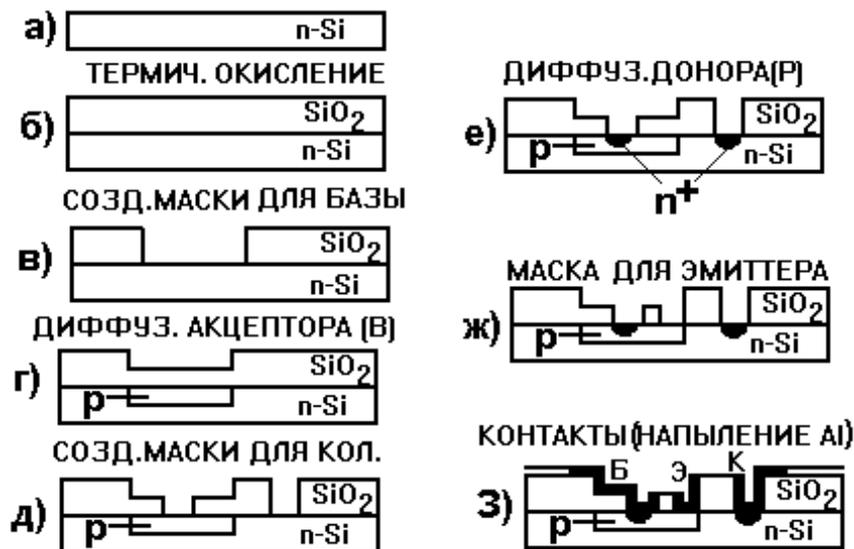
В качестве резисторов используются пленки железа, хрома, никеля, алюминия, меди. Резисторы для улучшения теплоотвода располагают ближе к краям, а частотозависимые элементы (трансформаторы, дроссели, индуктивности, конденсаторы) при определенном взаимном расположении друг относительно друга. Подгонку номиналов резисторов выполняют на специальных стендах выжиганием части пленки лазером или локальной напайкой. Межслойная изоляция микросхем может выполняться стеклом, напылением кремния или пленок переходных металлов (алюминия, титана, циркония и др.) с последующим окислением или азотированием. Для увеличения электрической прочности изоляцию располагают в форме U и V канавок (*изоляция U и V канавками*)

В последнее время широко распространились *методы диффузионной изоляции*, основанные на формировании изоляции между элементами методами локальной примеси элементов. Соединения элементов выполняются переключками, коммутационными дорожками и контактными площадками. Основное требование к подобным элементам – паяемость и формирование невыпрямляющего контакта. Материалами соединяющих элементов служит алюминий, медь, никель, железо и др., толщиной до 5 мкм.

#### **4.6.1 Последовательность операций при изготовлении биполярного**

### транзистора по планарной технологии

Пример изготовления биполярного  $n-p-n$  транзистора представлен на рис. 4.13. В качестве подложки используется пластина монокристаллического кремния с избыточной электронной проводимостью ( $n$ -Si). На ней термическим окислением создают пленку  $\text{SiO}_2$ , в которой литографией формируют окна для введения акцепторной примеси (например, В). В результате образуется базовая область транзистора ( $p$ -Si). Затем пластину снова окисляют и во вновь образованной пленке  $\text{SiO}_2$  повторной литографией создают окна для введения донорной примеси (например, фосфора) для создания эмиттера. Проводя литографию по пленке алюминия, формируют контакты к соответствующим областям транзистора, проводники и контактные площадки. После вжигания контактов пластину разрезают на кристаллы (*чипы*), каждый из которых содержит один транзистор. Чипы помещают в корпус и присоединяют выводы и герметизируют.



а) исходный кремний; б) – окисление; в) – создание маски для базы; г) – диффузия акцептора; д) – создание маски для коллектора; е) – диффузия донора; ж) – создание маски для эмиттера; з) – формирование контактов.

Рисунок 4.13 – Схема изготовления биполярного  $n-p-n$  транзистора.

На рис. 4.14 представлены структуры навесного дискретного (а) и интегрального (б) транзисторов, а также некоторые пассивные элементы в поле микросхемы (в).

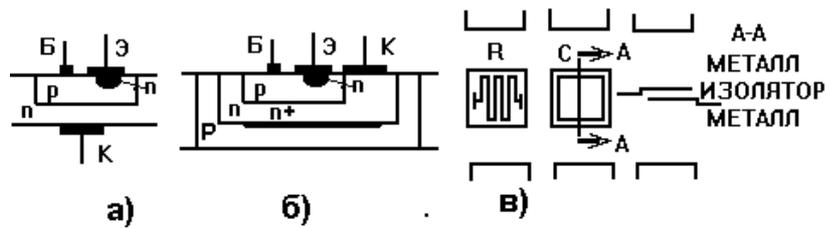


Рисунок 4.14 – Структуры транзисторов и пассивные элементы в поле микросхемы

#### 4.7 Планарно-эпитаксиальная технология изготовления твердотельных электронных приборов

Планарно-эпитаксиальная технология применяется для получения мощных (в частности полевых) транзисторов.

Для изготовления полевых транзисторов на поверхности полупроводниковой подложки (с проводимостью  $p$ -типа и удельным сопротивлением  $\sim 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) методами эпитаксии создают канал ( $n$ -типа) толщиной  $\sim 0,1\text{-}0,5 \text{ мкм}$  и концентрацией электронов  $\sim 10^{17} \text{ 1/см}^3$ . Затвор формируют наращиванием нового эпитаксиального слоя или диффузией примеси. Сток и исток представляют собой омические контакты с эпитаксиальным слоем. Контактные области транзисторов создаются методом металлизации в вакууме путем напыления пленки толщиной  $\sim 1 \text{ мкм}$ .

#### 4.8 Технология элементов нанoeлектроники, молекулярной электроники и квантовых транзисторов

**Квантовые эффекты в низкоразмерных структурах.** При рассмотрении трехмерной структуры кристалла на границе раздела кристалла энергия связи меньше энергии в кристалле. Углеродная связь по границе раздела сравнима с колебательной энергией связи и составляет  $0,1 \text{ эВ}$ , что соответствует волне де Бройля порядка  $4 \text{ нм}$ . *Квантовой точкой* называют частицу, размер которой порядка волны де Бройля. В этом случае проводимость определяется движением носителей по ребрам нанокристаллов. Кристалл можно условно представить как электронный газ с набором стоячих электронно-колебательных волн с энергиями от  $0,05$  до  $5,5 \text{ эВ}$ . При этом появляется *прыжковая проводимость*, которая может изменяться на 12 порядков. В этом отношении перспективны пористые полупроводниковые материалы (пористый кремний, наноалмаз, пироуглерод).

##### 4.8.1 Технология формирования квантового транзистора

При введении наночастиц материалов при сохранении физических

свойств изменяется спектр излучения и поглощения, локальные емкости (~1000 ф/г). Одним из механизмов этих явления является формирование локальных центров твердых растворов, центров неустойчивости абсорбционного равновесия в кристаллической решетке.

На рис. 4.15 представлена структура квантового транзистора.

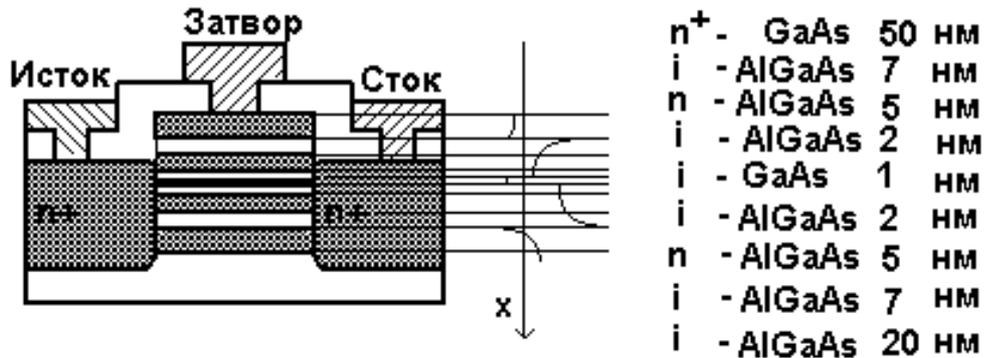


Рисунок 4.15 - Структура квантового транзистора и его зонная диаграмма

При нулевом напряжении затвор-исток для нормально закрытого транзистора выполняется условие  $V_G > V_B$ , где  $V_G$  – высота потенциального барьера затвор-канал;  $V_B$  – высота потенциального барьера канал-подложка. Для транзистора с характеристиками  $\lambda$ -типа  $V_G < V_B$ . Модуль разности напряжений между барьерами ( $U_G - U_B$ ) определяет наличие или отсутствие энергетических уровней в канале. При превышении напряжения более порогового в канале появляются уровни и транзистор открывается. При дальнейшем изменении модуля разности энергетические уровни вытесняются из квантовой ямы и транзистор закрывается. Изменением процентного содержания алюминия и галлия меняют разновидности квантовых транзисторов и их передаточные характеристики.

#### 4.8.2 Технология одноэлектронных приборов

Принципиальная схема одноэлектронного транзистора представлена на рис.4.16. Теория одноэлектронного транзистора предложена К.К. Лихаревым в приближении, что энергию туннельного перехода между двумя металлическими контактами  $E$  можно рассмотреть как энергию конденсатора  $C$ .

$$E = \frac{Q^2}{2C}, \quad (4.20)$$

где  $Q$  – заряд на обкладках конденсатора;  $C$  – емкость системы.

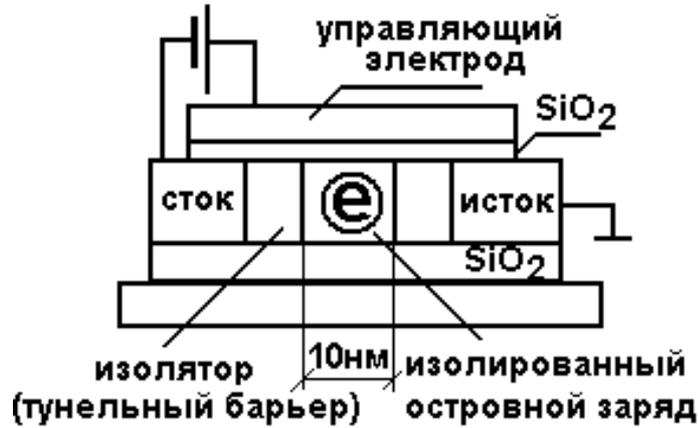


Рисунок 4.16 - Схема одноэлектронного транзистора

Так как заряд электрона – дискретная величина, минимальное значение изменения энергии  $\Delta E$  составит:

$$\Delta E = \frac{e^2}{2C}. \quad (4.21)$$

Для наблюдения квантовых эффектов необходимо, чтобы минимальное изменение энергии было больше температурных флуктуаций:

$$\Delta E \gg kT, \quad (4.22)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана

Кроме того, это изменение должно превышать квантовые флуктуации:

$$\Delta E \gg \frac{hG}{C}, \quad (4.23)$$

где  $G$  – проводимость туннельного перехода;

$h$  – постоянная Планка.

Для реализации квантовых эффектов необходимо, чтобы проводимость туннельного перехода была велика, т.е

$$G \ll R^{-1}, \quad (4.24)$$

где  $R = h/(4e^2) = 6,45$  кОм – квантовое сопротивление.

Одно из важнейших предположений теории одноэлектронного туннелирования состоит в том, что начальный заряд на туннельном переходе  $Q$  может быть отличным от нуля и принимать значения не кратные числу электронов, а от  $-e/2$  до  $+e/2$  (кратные спину – направлению вращения электрона). Для обеспечения туннелирования необходимо преодолеть силу кулоновского отталкивания электронов для напряжения  $V=Q/C$  в пределах от  $-e/(2C)$  до  $+e/(2C)$ . Эффект отсутствия тока при приложении напряжения называется эффектом кулоновской блокады. В этих условиях невозможно туннелирование из-за кулоновского отталкивания электронов. Напряжение, которое необходимо приложить к переходу для преодоления кулоновской блокады называют напряжением отсечки.

Конструкции одноэлектронных приборов весьма различны, однако их можно классифицировать по нескольким признакам.

По направлению протекания тока конструкции делятся на горизонтальные (латеральные) и вертикальные.

По способу формирования квантовой точки бывают приборы на постоянных и временных квантовых точках. Постоянная квантовая точка представляет собой кластер из металла или полупроводника. Временная квантовая точка создается в электронном газе путем приложения напряжения. Приборы на временных квантовых точках по способу формирования двумерного электронного газа делятся на инверсные и гетероструктурные. В инверсных приборах двумерный электронный газ образуется в приповерхностных инверсных каналах при наложении напряжения на прибор. В гетероструктурных приборах двумерный электронный газ сосредоточен на границе.

По количеству квантовых точек приборы могут быть нуль – (одноточечные), одно – (цепочка точек) и двумерные (массив точек).

По управляемости параметрами квантовых точек приборы делятся на неуправляемые (двухэлектродные) и управляемые (многоэлектродные), с одним или несколькими затворами. Такие приборы могут работать при температурах выше 77 К.

На рис.4.17 Представлены схемы формирования одноэлектронного устройства памяти и одноэлектронного транзистора.



Рисунок 4.17 - а) схема формирования одноэлектронного устройства памяти, б) схема формирования одноэлектронного транзистора.

Реализация подобных одноэлектронных приборов проводится с использованием прецизионной литографии, сканирующей туннельной микроскопии. Такие приборы имеют достаточно большие размеры, на работают до температуры 28 К.

Прибор изготавливается следующим образом. На поликристаллический Si наносится слой  $\text{SiO}_2$ . При помощи электронной литографии и реактивного ионного травления формируют островок Si –

SiO<sub>2</sub> высотой 30 нм (квантовая точка). Далее проводится термическое окисление для получения тонкого (2 нм) слоя оксида на боковой поверхности островка. Затем наносят еще один слой поликремния и формируют подводящие контакты (шириной 100 нм) методом литографии и ионного травления.

### 4.8.3 Технология оптоэлектронных элементов

К таким элементам можно отнести световоды, элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ), волноводы, переключатели, микросхемы, работа которых основана на взаимодействии излучений оптического и радиочастотного диапазона.

Эффекты, реализуемые на оптоэлектронных элементах

*Пьезоэффект* – это явление появления ЭДС при деформации кристалла.

*Пирозэффект* – это явление появления ЭДС при нагревании кристалла.

*Фотоупругий эффект* – это появление пространственно неоднородных электрических полей и упругих деформаций под действием света.

*Переключающий эффект* – это эффект изменения показателя преломления под действием приложенного электрического поля. На этом эффекте построены электрооптические модуляторы и переключатели. В общем случае этот эффект является анизотропным и имеет как линейную (эффект Погкельса), так и нелинейную (эффект Керра) составляющие.

*Электронно-оптический эффект* – это явление изменения показателя преломления кристалла в электрическом поле (эффект Керра). (Электронно-оптический коэффициент имеет порядок  $\gamma = 10^{-12}$  м/В).

*Эффект Погкельса* – уменьшение показателя преломления под действием электрического поля ( $E \sim 10$  кВ/см).

*Фотоиндуцированный эффект* – это явление увеличения коэффициента поглощения под действием света.

*Акустооптический эффект* – это изменение показателя преломления, вызванное механическими напряжениями, наводимыми акустической волной. Акустооптический эффект используется для построения высокочастотных модуляторов.

*Фоторефрактивный эффект* – изменение показателя преломления под действием света. С помощью эффекта фоторефракции возможно проводить запись и хранение оптической информации в виде голограмм.

*Фотогальванический эффект* – это эффект появления токов по кристаллу при напряжениях  $E \sim 10$  кВ/см и более, приводящие к изменению амплитуды световых пучков, обращению волнового фронта.

Ток фотогальванического эффекта создается небольшой группой фотовозбужденных носителей.

*Эффект пространственных солитонов* – это эффект возникновения локальных областей неоднородности светового потока, вызванный прохождением лазерного излучения через вещество. Солитоны используются для переключения и обработки оптической информации.

*Эффект двухпучкового взаимодействия* – это эффект управления световым потоком малой интенсивности световым потоком опорной световой волны. Наиболее сильно эффект проявляется при падении на кристалл света с противоположных сторон (отражательная геометрия). В этом случае формируется интерференционная картина и соответствующая решетка показателя преломления. Такое двухпучковое взаимодействие перспективно для построения различных оптоэлектронных приборов (например световых усилителей, генераторов).

*Эффект самофокусировки светового пучка* – это эффект, проявляющийся при вращении плоскости поляризации под действие электрического поля.

Различные эффекты способствуют возникновению сильной неоднородности света из-за взаимодействия световых волн. Это используется в устройствах динамической голографии. Для усиления эффектов световой поток направляют по оси X вдоль кристаллографической оси вида (110), а внешнее электрическое поле прилагается перпендикулярно данному направлению. Вращением плоскости поляризации достигается изменение «подавление» оптической активности кристаллов.

*Эффект самоискривления и изменения формы пучка* – это эффект, возникающий при изменении ориентации кристалла относительно компоненты поляризации света. Ориентацией кристаллографических осей можно управлять величиной самоискривления траектории и формы пучка.

*Эффект Шубникова-де Газа* – это эффект осцилляции коэффициентов отражения и пропускания зондирующего излучения в низкоразмерных структурах GaAs/AlGaAs, содержащих квантовые ямы.

*Нелинейный оптический эффект* – это серия эффектов, связанных с зависимостью показателя преломления от интенсивности света. К ним относятся: искривление траектории, эволюция поперечного распределения интенсивности, суперпозиция (сложение или вычитание интенсивностей), самофокусировка, десамофокусировка, самомодуляция. Характерным для таких эффектов является изменение пространственной и временной структуры светового пучка вследствие наведения в среде самим пучком оптических неоднородностей. По этой причине дифракция волн, испытывающих взаимодействие, протекает иначе, чем в линейной среде. Нелинейные эффекты начинают проявляться при больших интенсивностях оптического излучения (несколько микроватт на квадратный сантиметр). Это позволяет рассматривать фоторефрактивные кристаллы как

перспективные среды для создания нелинейно-оптических устройств обработки информации в устройствах динамической голографии. Наиболее сильно нелинейные эффекты выражены в кристаллах силленитов с большими электронно-оптическими коэффициентами ( $\text{BaTiO}_3$ , стронций – бариевый ниобат). Кубические кристаллы класса симметрии 23 имеют значительное удельное вращение плоскости поляризации. (От 6 град/мм в  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  до 22 град/мм  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ). Локальная нелинейность в этих кристаллах усиливается под действием электрического поля.

Оптоэлектронные элементы состоят из подложки, покрытой стекловидным материалом и оптического слоя с полным внутренним отражением, по которому распространяется световое излучение. Акустоэлектронный элемент на ПАВ представляет собой кристалл, на который нанесены полоски пленки. При подаче высокочастотного излучения на пленку, на поверхности кристалла возникает поверхностная акустическая волна. При пропускании лазерного излучения вдоль кристалла, возникает взаимодействие акустической волны с лазерным излучением.

На рис.4.18 представлены некоторые оптоэлектронные элементы.

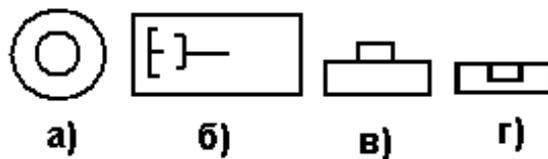


Рисунок 4.18 - Некоторые элементы оптоэлектроники: а) – световод, б) элемент ПАВ, в)– гребенчатый волновод, г) – полосковый планарный волновод с внедренным активным слоем.

Различают одномодовые и многомодовые световоды и волноводы. Мода – это излучение, проходящее по волноводу и оставшееся после интерференции.

Различают световоды и волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления и градиентные – у которых показатель преломления сердцевины уменьшается от центра к периферии. Число мод, формируемых градиентными приборами меньше числа мод, формируемых ступенчатыми, однако градиентные приборы создают меньшие искажения передаваемого сигнала. Физически наличие ограниченного дискретного числа мод можно объяснить тем, что через световод проходят только те волны, которые, отражаясь, совпадают по фазе (модовая дисперсия). Остальные же сигналы, вследствие интерференции затухают и к приемнику не проходят. Кроме модовой дисперсии, имеют место материальная и волноводная дисперсии, также ограничивающие пропускную способность световодов и волноводов. Материальная дисперсия состоит в том, что показатель преломления сердцевины зависит

от длины волны. Волноводная дисперсия возникает в одномодовых световодах и волноводах. Это связано с тем, что вследствие интерференции преобладает одна мода, способная к распространению.

### **Методы изготовления волноводов**

Волноводы по способу изготовления различают ионообменные, диффузионные и имплантационные. Ионообменные волноводы получают в результате ионного обмена, возникающего на поверхности кристалла при его окунании в растворы органических кислот (чаще бензолной кислоты). Диффузионные волноводы получают после высокотемпературной диффузии предварительно напыленной пленки титана, никеля, свинца и др. в основу волновода. Имплантационные волноводы получают путем внедрения в поверхность кристалла ионов определенного сорта. Наиболее высококачественными являются диффузионные волноводы, полученные методом термического испарения материалов в вакууме с последующей диффузией при атмосферном давлении. Однако процесс их изготовления требует тщательной очистки кристалла, вакуумной камеры, испарителя и навески, а также соблюдения количественных параметров технологического процесса.

Для усиления различных эффектов взаимодействия излучений волноводный слой может легироваться путем термического напыления в вакууме пленок железа, меди и др. с последующей диффузией.

Волоконные световоды (оптические волокна) изготавливают из полимеров, покрытых пленкой. Отдельные световоды объединяются в оптические кабели с прочным защитным покрытием. Технология их изготовления подобна технологии формирования многослойных покрытий.

### **4.9 Технология формирования акустоэлектронных элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ)**

Для изготовления звукопроводов фильтров ПАВ могут быть использованы как монокристаллические, так и поликристаллические (пьезокерамические) материалы. Монокристаллы отличаются совершенством структуры, обеспечивающей малые потери на распространение ПАВ (около 0,1-0,5 дБ/см на частотах до 1,5-2 ГГц). В качестве материалов с пьезоэффектом используются кварц, ниобат лития, танталат лития, иодат лития, германат висмута, силикат висмута.

Для снижения стоимости фильтров ПАВ, например телевизионных, при массовом производстве, необходимо использовать групповую технологию изготовления, что, в свою очередь, требует применения монокристаллов диаметром свыше 50-60 мм. При таких размерах пластин появляется возможность использования высокопроизводительного стандартного оборудования для изготовления ИМС.

В фильтрах с полосой пропускания 5–6% широко используется кварц. Для фильтров с полосой пропускания 50÷60% применяется в основном ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), который позволяет реализовать малое вносимое затухание фильтра (до 10 дБ при числе электродов не более 10).

К числу перспективных для использования в фильтрах ПАВ можно отнести танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ), германат висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ), парателлурид ( $\text{TeO}_2$ ), селен (Se), а также пленки окиси цинка ( $\text{ZnO}$ ), и нитрида алюминия ( $\text{AlN}$ ) на сапфире и некоторые другие. Кроме монокристаллических пьезоэлектриков для изготовления звукопроводов фильтров ПАВ могут найти применение пьезокерамика. Пьезокерамики почти на порядок дешевле монокристаллов, но имеют значительное затухание распространяющихся ПАВ, резко увеличивающееся с частотой.

Общая схема изготовления фильтров ПАВ включает в себя следующие основные технологические операции: Кристалл – ориентировка – распиловка – шлифовка – полировка – очистка – формирование звукопровода – литография (включая изготовление фотооригинала и фотошаблона, формирование встречно-штыревых структур преобразователей и контактных шин) – монтаж – сборка – герметизация.

Одним из основных требований к звукопроводам фильтров ПАВ является высокий класс обработки их поверхности (13-14). Такой класс точности достигается шлифовкой с последующей полировкой пастами.

Ориентация пьезокристаллов для фильтров ПАВ выполняется на рентгеновских установках. Точность ориентировки определяется заданными отклонениями рабочей частоты фильтра и составляет около  $\pm(1\div 5)'$ .

После ориентации монокристаллы распиливаются. Затем на поверхность звукопроводов должно быть нанесено проводящее покрытие – металлизация.

Технология металлизации элементов ПАВ принципиально не отличается от технологии металлизации керамики. Наиболее широко для металлизации элементов ПАВ используются алюминий, серебро, золото, иногда медь с защитой никелем. Из способов металлизации наиболее широко используется термическое испарение материалов в вакууме. Использование электрофизических методов металлизации таких как магнетронное, катодное, электродуговое, ионно-лучевое и др. для пьезокристаллов неприемлемо в виду заряда поверхности, уменьшающего массоперенос паров на подложку.

В последнее время для обработки пьезоэлектриков используются высокочастотные или ионно-плазменные системы распыления. Для получения прямых профилей травления наиболее приемлемым оказывается ионно-лучевое травление в среде инертного газа. Отличие

применяемого метода от известных заключается в нейтрализации ионного потока и применении вакуумно- дугового разряда для генерации ионов.

После окончания процесса травления рекомендуется провести отжиг кристалла для его «просветления».

#### 4.10 Пути повышения радиационной стойкости электронных приборов

Суть проблемы состоит в необходимости повышения надежности электронных приборов при работе в тяжелых условиях (высокая температура, повышенное фоновое радиационное облучение в условиях атомных электростанций, повышенное рентгеновское или космическое излучение). Присутствие излучений приводит к появлению блуждающих токов и вызывает подачу ложных команд. Для повышения радиационной стойкости электронных приборов чаще вместо  $\text{SiO}_2$  формируют диэлектрические пленки тугоплавких металлов ( $\text{ZrO}$ ,  $\text{TaO}$ ), поскольку они более плотные, чем пленки  $\text{SiO}_2$ . Среди методов формирования пленок предпочтение отдается методам эпитаксии.

##### Теория повышения радиационной стойкости

Болтакс Б.И. предложил в качестве критерия дефектообразования при облучении использовать значение молекулярной массы. Исходя из этого, при изменении молекулярной массы от 28,06 (Si) до 144,64 (GaAs) пороговое значение дефектообразования при электронном облучении изменится от 0,1 до 1,1 МэВ.

Параметром, определяющим процесс генерации электронно-дырочных пар, является средняя энергия их образования, определяемая соотношением:

$$\varepsilon = 2,2E_g + rh\nu \quad (4.25)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны;  $h\nu$  – энергия оптического фотона;  $r$  – число фотонов.

Из этого уравнения следует, что пороговая энергия образования электронно-дырочных пар зависит от ширины запрещенной зоны. Расчет дает следующие значения для Ge – 2,8, Si – 3,6, GaAs – 4,8, GaP – 7,8, GaN – 10,1 эВ.

Параметром, определяющим деформацию и разрушение кристаллической решетки, является энергия смещения атомов из узла решетки  $E_d$ , которая не зависит от типа излучения.

$$E_d = S_k(E_{am}/a^2) + Z(E_g/2) + 4E_b + E_L, \quad (4.26)$$

где  $S_k$  – коэффициент, отражающий тип кристаллической решетки;  $E_{am}$  – энергия атомизации;  $a$  – параметр решетки;  $Z$  – число валентных электронов смещаемого атома;

$E_g$  – ширина запрещенной зоны;  $E_b$  – энергия ковалентной связи;  $E_L$  –

энергия искажения решетки.

Основной вклад дают связанные друг с другом энергия атомизации и ширина запрещенной зоны. Расчет дает следующие значения энергии смещения  $E_d$ : – для Ge – 11, Si – 13, GaAs – 10, GaP – 17, GaN – 28. Аналогичная закономерность наблюдается и для твердых растворов подобных соединений: (т.е. с ростом  $E_d$ , возрастает радиационная стойкость).

**Термоустойчивость материалов.** Термоустойчивость материалов связана с тепловыми колебаниями решетки. Амплитуда тепловых колебаний зависит от температуры. Полную энергию решетки можно выразить как:

$$E = \sum [(h\omega_{\max} / 2\pi)(v_a + 0,5)], \quad (4.27)$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная частота колебаний решетки;  $v_a$  – число квазичастиц.

Известно, что

$$h\omega_{\max} / 2\pi = k\theta_D, \quad (4.28)$$

где  $\theta_D$  – характерный параметр, называемый температурой Дебая. Температура Дебая – как и всякая температура – это точка равновесия, ниже которой движение атомов описывается зонной теорией и квантовомеханическими свойствами, выше которой описание проводится законами классической статистической физики (распределением Больцмана, Максвелла).

**Влияние электромагнитных полей.** Как следует из физики полупроводников, при слабых электрических полях дрейфовая скорость в полупроводнике пропорциональна электрическому полю, а коэффициент пропорциональности – подвижность носителей – не зависит от электрического поля. Однако, если поле велико, то наблюдается нелинейность изменения подвижности.

**Основные требования к материалам экстремальной электроники (по Болтаксу Б.И):**

- 1) ширина запрещенной зоны – определяет рабочую температуру прибора;
- 2) температура Дебая – определяет общую устойчивость элементов к внешнему воздействию (температура, радиация, электромагнитные поля);
- 3) скорость насыщения дрейфа носителей – определяет допустимую плотность тока, рабочее напряжение и соответственно мощность устройства;
- 4) подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) – совместно с шириной запрещенной зоны определяет частотные и усилительные свойства;
- 5) критическая напряженность электрического поля – определяет максимальную электрическую нагрузку.

При выборе материалов обычно составляют таблицу параметров материалов. Например, при переборе параметров материалов из кремния Si, GaAs, SiC, GaN, C (алмаз), наиболее высокие параметры можно получить на изделиях, изготовленных на основе алмаза и нитрида галлия.

#### **4.11 Контрольные вопросы к главе 4**

1. Какова схема конструкции оксидного катода?
2. Какова технология пайки керамики с металлами?
3. Какое различие в применении распыляемых и не распыляемых газопоглотителей?
4. Какова технология изготовления экрана кинескопа?
5. Как выглядит равноконтрастная цветовая диаграмма?
6. Какое назначение маски кинескопа?
7. Каковы основные этапы типового литографического процесса?
8. Каковы факторы, ограничивающие разрешающие возможности различных видов литографий?
9. Каковы технологические приемы повышения радиационной стойкости электронных приборов?
10. Какова технология изготовления оптического волновода?

### **5 ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Автоматизация технологического процесса предполагает ряд операций: проектирование, моделирование, сбор и обработку информации, а также прогнозирование точности, надежности и аварийных ситуаций. Управление процессом предполагает обработку данных о материалах, кадрах, методах решения задачи, об оборудовании, построение и оптимизацию последовательностей технологических операций.

Регулирование процесса – это изменение одного параметра относительно другого посредством электрической, механической, пневматической или комбинированной связи.

#### **5.1 Подобие технологических процессов**

Технологические процессы похожи друг на друга (диапазоном давлений, температурой, временем, и др.). Теория подобия предполагает простое подобие, геометрическое подобие; физическое подобие; временное подобие; подобие начальных и граничных условий.

Критериями подобия могут выступать безразмерные комплексы и уравнения, связывающие различные величины. Такими критериями могут

быть: число Рейнольдса – ( $Re = dV/\eta$  – отношение произведения диаметра отверстия на скорость течения к вязкости), уравнение непрерывности потока ( $\rho mV = const$  – произведение плотности на массу и на скорость – уравнение Эйлера), число Кнудсена – ( $Kn = L/d$  – отношение длины свободного пробега молекулы к характерному размеру).

Например, одно из основных уравнений гидродинамики – уравнение Навье – Стокса можно записать как:

$$F = AEu^m Re^n, \quad (5.1)$$

где  $A$  – константа;  $Eu$  – число Эйлера;  $Re$  – число Рейнольдса;  $m, n$  – табличные или эмпирические коэффициенты.

Критерием геометрического подобия может выступать отношение продольного размера  $L$  к поперечному ( $L/d$ ).

Физическое подобие предполагает, что в подобных системах отношение физических констант двух любых сходственных точек, есть величина постоянная. Константами физического подобия могут быть число Кнудсена, число Рейнольдса, показатель адиабаты газа, а также обобщенные зависимости – критериальные уравнения.

При временном подобии предполагается геометрически подобное изменение параметров во времени для аналога и подобного объекта. Подобие процессов предполагает соизмеримость не менее двух параметров.

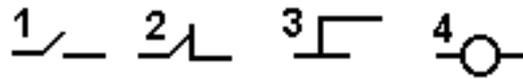
## **5.2 Языки пользователя для программирования электрофизических установок**

При проведении технологических операций нашли применение, так называемые, языки пользователя:

- 1) Ассемблер; Паскаль; Си, C<sup>++</sup>, Java;
- 2) язык релейно-контактных символов;
- 3) язык «Время – команда»; «Время – параметр»;
- 4) язык булевых уравнений;
- 5) язык программирования измерительной аппаратуры SCPI;
- 6) языки, для программирования логических контроллеров.

### **5.2.1 Язык релейно-контактных символов**

Для различных систем робототехники, систем автоматизированных станков и кузнечнопрессового оборудования широко применяется язык, основанный на аналогии включения или выключения контактов электрических схем. На рис. 5.1 представлены условные обозначения такого языка по данным фирмы MODICON.



1 – нормально разомкнутый; 2 – нормально замкнутый; 3 – вход в параллельную цепь; 4 – время.

Рисунок 5.1 – Команды языка релейно–контактных символов.

При составлении программы технологических операций первоначально зарисовывают каналы технологических операций, в которых включены контакты. Сверху контакта проставляется порядковый номер операции, а снизу код операции по международному или отраслевому классификатору.

### 5.2.2 Язык Булевых уравнений

В ряде случаев для отдельного канала оказывается удобным одновременная запись того, что включено и что выключено. В таких случаях удобно пользоваться языком булевых уравнений с использованием операторов типа «и», «или», «не (инверсия)». На рис. 5.2 представлено соответствие булевых и релейных символов.

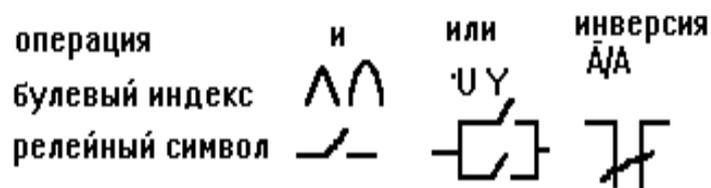


Рисунок 5.2 – Схема соответствия «булевых» и релейных символов

### 5.2.3 Языки типа: «Время – команда». «Время – параметр»

В ряде случаев подача команд на проведение последующей операции может производиться по истечении определенного времени или по достижении определенного параметра. Например, давления при температуре. Подобные реле времени рассчитаны на коммутацию канала в течение времен от секунд до недели. Такие системы нашли широкое применение в электрофизических и электровакуумных установках под названием ОРИОН – 3.

### 5.2.4 Язык управления типа «КАУТ»

Поиск наиболее универсального и простого языка общения с автоматикой привел к системе включающей контроль, анализ и управление

технологией (КАУТ). Язык системы содержит три типа переменных:

- 1) целые числа;
- 2) напряжение (вольты);
- 3) время.

Язык снабжен ключевыми словами, вводимыми вначале программирования: (ТЕМП – температура, ДАВЛ – давление, НАГРЕВ, ТАЙМЕР, ВКЛ., ВЫКЛ., ЕСЛИ, ИНАЧЕ, КЛАПАН, ЖДАТЬ и др.). Каждой операции присваивается порядковый номер (кратный пяти для введения дополнительных команд). В начале программы записываются контролируемые величины, регулируемые, включаемые, а также наименование отслеживаемого параметра.

**Пример.** Программа для установки термического напыления материалов в вакууме.

Первоначально составляется последовательность технологических операций. Каждой операции присваивается буква и номер. Присвоение букв производится по признакам подобия операций, а присвоение цифр – кратно пяти. Такое присвоение позволяет дополнительно включать промежуточные операции, возникающие при оптимизации технологического процесса. В нашем случае последовательность технологических операций для очистки изделий (индекс О), текущих операций (индекс М) и собственно напыления (индекс Н) выглядит в следующем виде:

(О5, О10, О15...), (М5, М10, М15, М20...), (Н5, Н10, Н15...).

Далее в программу записываются контролируемые, регулируемые, включаемые и выключаемые величины:

контролируемые: К 1 – давление; К 2 – температура;

регулируемые: Р1 – нагрев;

включаемые: В1 – клапан; В2 – откачка; В3 – нагрев;

параметры: П1 – температура; П2 – счетчик.

Пример конкретного исполнения

1. Включение клапана В1.(форвакуум)

5. Включение откачки В2 (высокий вакуум)

10. ВКЛ. НАГРЕВ (прогрев подложки)

15. ЖДАТЬ 150 (ждать 150 секунд пока нагреется)

20. М 10 (идет нагрев подложки)

25. ЕСЛИ К2 ТЕМП = 250, ПЕРЕХОД НА М 45 (напыление)

ИНАЧЕ М20 (нагрев) (Комментарий: если температура подложки достигнет 250 градусов, перейти на напыление, в противном случае продолжить нагрев).

В такой последовательности составляется вся программа. Справа программы возможны комментарии.

## 5.2.5 Язык программирования измерительной аппаратуры SCPI

Язык SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments – Стандартные команды для программируемых приборов) – это язык приборных команд на основе стандартного кода ASCII международного стандарта IEEE-488, предназначенный для программирования измерительных приборов.

В качестве примера показана часть команд.

SENSe: (считывание)

VOLTage: (вольты)

DC:RANGe {<range>/MINimum| MAXimum} VOLTage: (порядок считывания постоянного тока, минимум, максимум, вольты)

FREQuency: (частота)

VOLTage: RANGe {<range>/MINimum| MAXimum} FREQuency:

VOLTage: RANGe? [MINimum| MAXimum]

DETEctor:

BANDwidth {3| 20| 200 | MINimum| MAXimum} DETECTOR:

BANDwidth? [MINimum| MAXimum]

ZERO:

AUTO {OFF | ONCE| ON} ZERO:

AUTO? (автоматическое переключение пределов)

Ключевое слово предыдущего уровня от ключевого слова более низкого уровня разделяется двоеточием (:).

Командная строка заканчивается символом возврата каретки <cr> и символом новой строки <nl>.

Фигурные скобки ({}), заключают варианты параметров и с командной строкой не передаются.

Вертикальная черта (|) используется для разделения нескольких вариантов параметра командной строки.

Угловые скобки (<>) показывают, что пользователь должен указать значение заключенного в скобки параметра.

Например:

MEASure: VOLTage: DC? {<range>| MIN| MAX| DEF}, {<resolution>| MIN| MAX| DEF} – производится измерение постоянного напряжения. Показания пересылаются в буфер вывода. DEF-автоматическое переключение пределов.

MEASure: VOLTage: AC? {<range>/MUST]MAX| DEF} – производится измерение переменного напряжения;

MEASure:RESistance? – производится измерение сопротивления резистора.

AUTO- автоматическое переключение пределов;

BUS – по шине; OFF/ON- выкл/вкл;

FETCh- передача показаний из внутренней памяти прибора в буфер

вывода и далее в контроллер.

### 5.2.6 Языки, для программирования логических контроллеров

Международной электротехнической комиссией рекомендованы некоторые стандартные языки для программирования контроллеров. На рис.5.3 представлены языки для программирования контроллеров.

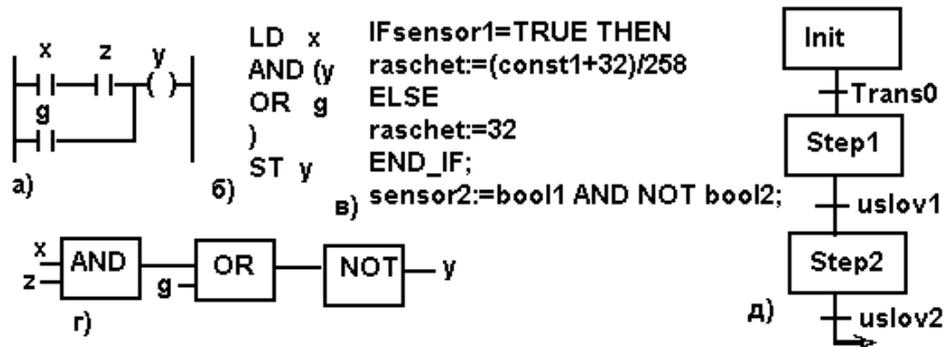


Рисунок 5.3 - Команды языков программирования контроллеров; а) – LD; б) – IL; в) – ST; г) – FBD; д) CFC

#### Язык LD

Язык LD по сути повторяет язык релейно-контактных символов. Собрав логическую последовательность, можно коммутировать входную и выходную шины, расположенные на экране.

Язык IL – это программирование на ассемблере, используемое всеми производителями.

Язык ST – это аналог языков C, Pascal.

Язык FBD – это язык функциональных блоков. Язык подобен языку релейно-контактных символов и удобен для специалистов, проектирующих системы на элементах логики.

Язык CFC – это язык функциональных блоков FBD, снабженный дополнительными командами выдержки времени или параметров перехода между операциями.

## 5.3 Пневматические устройства управления

Пневматическая аппаратура на газовых струях проста в обслуживании, дешева, пожаро – и взрывобезопасна. Она может работать при очень высоких температурах и сильной радиации. Системы работают от вентилятора при атмосферном давлении. В основу работы пневматических элементов положены эжектирующие эффекты, эффекты перехода турбулентного потока в ламинарный, различные кромочные эффекты, эффекты взаимодействия струй с преградой и струй между собой.

Система пневмоавтоматики имеет набор разнообразных устройств: усилители, модуляторы, триггеры, генераторы, интеграторы, пневматические вычислительные машины и мн. др.

На рис. 5.4 представлены простейшие схемы пневматических элементов.

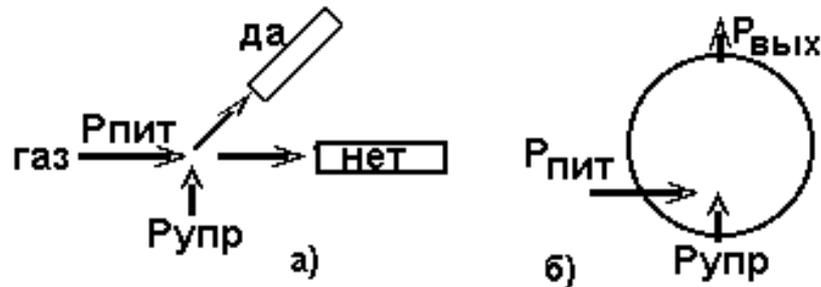


Рисунок 5.4 – а) – схема работы логического пневматического элемента типа триггер с функцией «да – нет»; б) – схема струйного усилителя

Пассивные пневматические элементы способны к самостоятельному выполнению функций на основе газодинамических эффектов. Это пневматические сопротивления, емкости, индуктивности, фильтры, резонаторы, линии задержки.

Активные пневматические элементы требуют дополнительной энергии для стимулирования эффектов. В ряде случаев для стимулирования используется тлеющий, дуговой или искровой разряд, температура, энергия дополнительной газовой струи.

На рис. 5.5 представлены схемы пассивных и активных элементов.



Рисунок 5.5 – а) - схема пассивного пневмоэлемента; б), в) - схемы активных пневмоэлементов

#### 5.4 Порядки и типы управляющих систем технологического оборудования

По степени математического описания системы управления разделяются на три уровня – порядка.

Системы первого порядка описывают процесс и регулятор линейными уравнениями. (Например, насколько поднимается напряжение

питания – настолько поднимается температура нагрева). Системы второго порядка применяются, если регулятор или объект описываются уравнениями второго порядка. Система третьего порядка применяется для отслеживания колебательных процессов и описывается уравнениями третьего порядка и математическими рядами. Сходимость ряда – признак устойчивости системы.

Различают несколько типов систем для управления процессами. Некоторые из них следующие:

- системы с фазовой подстройкой;
- системы с угловым сопровождением параметров;
- системы временного сопровождения;
- системы с частотной подстройкой;
- системы с подстройкой по уравнениям.

Обычно при анализе систему управления разбивают на звенья. Передаточную характеристику каждого звена описывают по аналогии с уравнениями электрической цепи. Например:

$$U = U_0 e^{J\omega} \quad (5.2)$$

Для ряда традиционных схем в справочниках приведены амплитудно – фазовые и частотные характеристики. Исследование системы упрощается при переходе от дифференциального уравнения к алгебраическому (так называемое преобразование Лапласа). Например, производные могут быть заменены оригиналами изображений при нулевых начальных условиях:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.3)$$

При моделировании работоспособности систем используют пропускание калиброванных сигналов по цепи.

## 5.5 Устойчивость технологических процессов

Система называется устойчивой, если после снятия воздействия по окончании переходного процесса система приходит в исходное состояние или в состояние равновесия. Обычно выходная и входная величины системы связаны с помощью дифференциального уравнения.

$$X(t) = X_{вын}(t) + X_{св}(t) \quad (5.4)$$

Решение этого уравнения состоит из двух составляющих: вынужденной  $X_{вын}(t)$  и свободной  $X_{св}(t)$ . Именно свободная составляющая определяет переходный процесс.

Устойчивость процесса автоматике определяется критерием Вышнеградского, критерием Гурвица, критерием Михайлова, критерием Найквиста.

*Критерий Вышнеградского.* Для устойчивости системы необходимо, чтобы произведение средних коэффициентов уравнения, описывающего

процесс, было больше произведения крайних коэффициентов.

Например. Напуск газа в вакуумную систему отслеживается уравнением:

$$5p^3 + 6p^2 = 8p + 1 = 0,$$

критерий Вышнеградского определится соотношениями:

$$a_3 = 5, a_2 = 6, a_1 = 8, a_0 = 1.$$

Таким образом:  $6 \cdot 8 > 5 \cdot 1$ . Ответ: система устойчива.

*Критерий Гурвица* используется, если процесс описывается уравнением в виде степенного ряда:

$$A(p) = a_0 P^n + a_1 P^{n-1} + \dots + a_{n-1} + a_n. \quad (5.5)$$

Для определения устойчивости по критерию Гурвица необходимо из коэффициентов уравнений процесса составить определитель. На рис. 5.6 представлен вид определителя.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{n-1} & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{n-2} & 0 \end{vmatrix}$$

Рисунок 5.6 – Определитель Гурвица

Концы строк заполняются нулями. Число столбцов – n соответствует порядку уравнения. Система устойчива, если определитель положителен. На границе устойчивости  $\Delta=0$ ,  $a_n=0$ ,  $a_0=0$ .

*Критерий устойчивости Михайлова* используется при анализе цепей, имеющих реактивные элементы. Такие цепи описываются комплексными функциями типа:

$$A(j\omega) = X(\omega) - jY(\omega), \quad (5.6)$$

где  $X(\omega)$  – действительная часть, содержащая четные степени;  $Y(\omega)$  – мнимая часть с нечетными степенями.

На рис. 5.7 представлен вид графика устойчивости (так называемого годографа Михайлова).

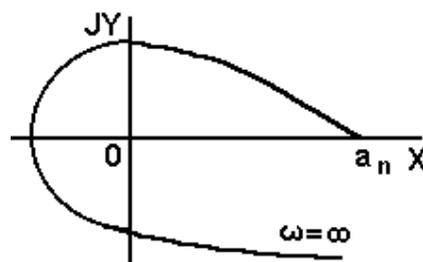


Рисунок 5.7 – Годограф Михайлова для системы четвертого порядка

Согласно критерию устойчивости Михайлова: система устойчива, если годограф  $A(\omega)$  начинаясь на положительной действительной полуоси, огибает против часовой стрелки последовательно «n» квадрантов, где: n – порядок описания системы. Прохождение годографа через начало координат соответствует границе неустойчивости.

*Критерий устойчивости Найквиста* предназначен для определения устойчивости систем с изменяющимися амплитудными и фазовыми характеристиками. Условие устойчивости сводится к требованию, чтобы амплитудно – фазовая частотная характеристика не захватывала отрицательную ось. На рис. 5.8 представлены две амплитудно – фазовые частотные характеристики, иллюстрирующие критерий устойчивости Найквиста.

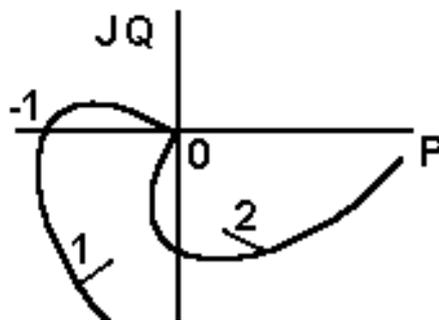


Рисунок 5.8 – Критерий устойчивости Найквиста: 1 – система неустойчива; 2 – система в основном устойчива

Устойчивость систем со случайной подстройкой моделируется при обработке статических выходных данных.

## 5.6 Анализ сложных технологических систем

### Принцип Кюри в технологических системах

Принцип Кюри – это принцип расчленения сложной системы автоматики на составные части. Выделяют: общую (симметричную), специализированную (принадлежащую только данному объекту) и сменную части (принадлежащую более чем одной системе управления). В электрофизических установках такими частями могут быть: вакуумная схема, электрическая схема, высоковольтная схема, схема охлаждения элементов, схема индикации параметров, гидравлическая схема и т.д.

### Ядро технологического процесса

Основная задача заключается в выделении наиболее главной операции (ядра), обеспечивающего достаточно полный контроль процесса. Для построения ядра технологического процесса следует:

– провести лексический анализ задачи. Цель лексического анализа заключается в уточнении метода достижения задачи с учетом конкретных

технических возможностей оборудования;

– провести разметку узлов. Например: первый узел – операции монтажа в вакуумной камере; второй узел – обеспечение вакуума; третий узел – напыление пленки;

– разработать математические модели процесса в виде формул и предполагаемых графиков и таблиц.

## 5.7 Системы регистрации и первичной обработки сигналов

### 5.7.1 Групповые измерительные преобразователи

подавляющая часть измерений проводится группой четырех преобразователей:

- 1) ПС ТР (преобразователь сигнала терморезисторов);
- 2) ПС ИД (преобразователь сигнала индуктивного датчика);
- 3) ПС ТП (преобразователь сигнала термопарного датчика);
- 4) ПС ВД (преобразователь сигнала вакуумного датчика).

Сигнал с датчика (например, с термопары) может быть многократно усилен ( $\sim 10^7$  раз) программируемыми измерительными станциями или ЭВМ и использован для непосредственного силового управления. Среди зарубежных фирм пользуется популярностью фирма National Instruments. Из отечественных разработок популярны блоки: МИНИТЕРМ, ОРИОН, ПИТРА – 1100 и др.

### 5.7.2 Алгоритмы преобразования сигналов с датчиков

Управляющий сигнал должен быть преобразован для согласования с усилителем, питающим исполнительный механизм. В настоящее время наибольшее распространение нашли три способа преобразования: линеаризация, аппроксимация и функциональное преобразование по формуле.

На рис. 5.9 представлен пример линеаризации показаний термопары.

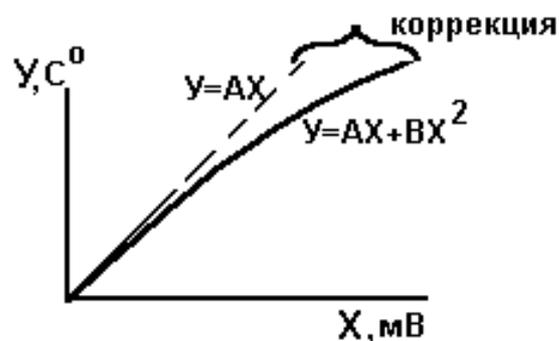


Рисунок 5.9 - Схема линеаризации термопары

Следует учесть, что при преобразовании сигнала погрешность может носить функциональный характер. На рис. 5.10 (а) представлен возможный

характер ошибок и возможные функции коэффициентов преобразования сигналов (рис. 5.10 б).

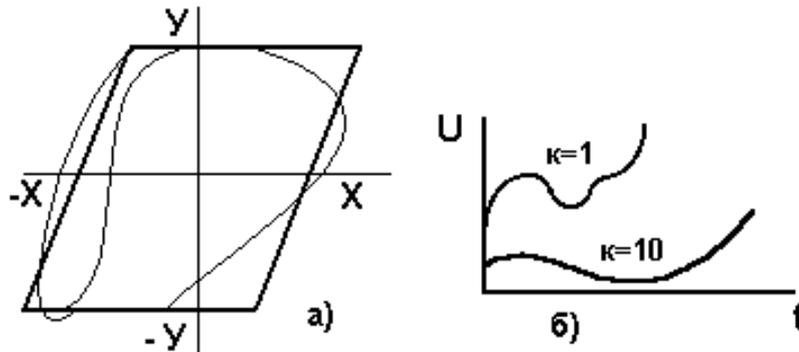


Рисунок 5.10 – а) Поверхность ошибок при преобразовании сигналов; – б) вид функции преобразования программируемого вычитателя

Ниже приведены некоторые функции преобразования:

$$\text{Cos } Z = 1 + 0,235 Z - 0,7(Z)^{1,5}; \quad (5.7)$$

$$\text{Sin } Z = Z - 0,17(Z)^{2,8}. \quad (5.8)$$

Функция преобразования обычно указывается в паспорте модуля – преобразователя. В последнее время начинают широко внедряться программируемые станции, в которых заложено большое количество виртуальных приборов и измерительных модулей, имеющих выход на ЭВМ (компьютерные осциллографы, генераторы, и др.).

### 5.7.3 Нормализация данных

Данные о технологическом процессе поступают от датчиков различными по амплитуде и частоте. Нормализация, обрезает помехи и сильные сигналы, дотягивает слабые сигналы. Она подобна системе автоматического усиления в телевизионных приемниках. На рисунке 5.11 представлена блок – схема ввода информации с использованием нормализации.



Рисунок 5.11 – Блок схема обработки данных с применением ЭВМ

Критерий оценки качества сигнала определяется отношением сигнал – шум (С/Ш). Этот критерий вычисляется через отношение квадрата

максимальной амплитуды напряжения сигнала  $U_c^2$  к квадрату напряжения шума.

$$(C/Ш) = (U_c / U_{ш})^2 \quad (5.9)$$

Обычно вероятность искажения сигнала учитывается через табличную функцию вероятности процесса «erfc» (она берется на уровне 90 %). На рис. 5.12 представлена схема изменения сигнала при обработке данных.



Рисунок 5.12 – Изменение сигнала во времени при передаче данных

## 5.8 Регулирование технологических процессов

На рис. 5.13 представлена наиболее распространенная схема регулирования технологических процессов. Сигнал от задающего устройства и от объекта сравнивается «ноль органом». Затем сигнал рассогласования усиливается и передается на исполнительный механизм. В качестве «ноль органа» может использоваться компаратор, двойной триод и др. Система управления такого типа представляет собой замкнутый контур, в котором обратная связь выполняется от исполнительного механизма через измеритель параметра. Такая система регулирования называется замкнутой. Для упрощения управления система может не иметь обратной связи и называться разомкнутой.



Рисунок 5.13 – Общая схема регулирования технологического процесса

### 5.8.1 Законы регулирования параметров

Разнообразие траекторий управления технологическими процессами укладывается в три закона регулирования: *пропорциональный (П)*;

*пропорционально – интегральный (ПИ); пропорционально – интегральный с дифференцированием сигнала (ПИД).*

Типичным примером пропорционального закона может выступать интегратор, вырабатывающий число импульсов, пропорциональное напряжению.

Пропорционально – интегральный закон чаще реализуется в системах, где возможно случайное проявление нестабильности измеряемой величины и ее приходится усреднять. Примером использования может выступать сигнал напряжения зажигания с электроразрядных устройств.

Пропорционально – интегральный закон регулирования с дифференцированием сигнала предполагает наличие так называемого «изодромного звена», отслеживающего скорость изменения управляющего сигнала. Примером такого управления может выступать система управления температурой печи, которая по мере приближения к заданной температуре чаще выключает нагреватель, предотвращая перегрев. На рис. 5.14 представлены кривые, отражающие законы изменения параметров.

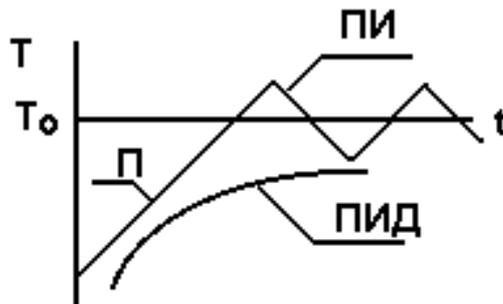


Рисунок 5.14 – Законы изменения параметров управления

В общем случае уравнение ПИД регулятора (применительно к изменению напряжения во времени) выглядит следующим образом:

$$U(t) = f(t) + \frac{du}{dt} + \int u(t)dt \quad (5.10)$$

Первое слагаемое обеспечивает работу в режиме П – регулятора, второе – в режиме ПИ – регулятора, третье – в режиме ПИД – регулятора.

### **5.8.2 Многоуровневые системы децентрализованного управления технологическими процессами**

В ряде технологических процессов часть операций управления выведена из поля зрения ЭВМ и оператора. Степень «собственного» управления подразделяется на три уровня децентрализованного управления:

первый уровень – обеспечивает защиту персонала и оборудования от

аварийных режимов;

второй уровень – обеспечивает диагностику работоспособности систем и ответственен за устройства блокировки;

третий уровень – обеспечивает общую работу всей системы и отвечает за работу концевых выключателей и исполнительных механизмов.

Перед запуском установки во избежание нештатных и аварийных режимов локальной системой автоматики проводится тестирование оборудования на выполнение отдельных операций как то: отслеживание функций (П, ПИ, ПИД); проверка блокировок (по воде, по фазам, по перегрузке, старт нулевого положения, автоматическое заземление).

## 5.9 Технология обработки сигналов с технологических объектов

Различают распознавание сигналов оператором и машинное распознавание. Распознавание оператором зависит от степени обученности и тренированности.

Машинное распознавание. На первом этапе машинного распознавания выделяются информативные признаки сигналов, учитывающие форму изменения их амплитуды. Для учета всех особенностей формы и уменьшения потери информации о сигналах они дискретизируются с шагом:

$$\Delta t = 1 / 2F_m, \quad (5.11)$$

где  $F_m$  – максимальная частота спектра сигнала. Для повышения достоверности распознавания сигналов по форме признаки распознаваемого сигнала  $X$ , сравниваются с соответствующими признаками  $Y$ , эталонного сигнала.

В ряде случаев распознавание истинного сигнала от ложного производится на разложении функции в ряд Фурье и ее анализе на четность.

Если функция четная – то ряд Фурье составляют косинусные члены, а если нечетная – синусные.

Например, если функция симметрична относительно  $t=0$ , то в ряду Фурье будут лишь постоянная составляющая и четные гармоники.

$$S(t) = A_0 / 2 + \sum A_k \cos k\omega_k t, \quad (5.12)$$

где  $S(t)$  – функция сигнала;

$A_0, A_1$  – коэффициенты амплитуды при разложении функции сигнала в ряд;

$\omega_k$  – круговая частота.

Настроенный на прием интерфейс сравнивает фронту первого импульса и амплитуду (количество нулей или единиц) с кодом (эталоном), занесенным при программировании интерфейса. Это позволяет отличать

истинный сигнал от сигнала помехи.

### 5.9.1 Статические и динамические характеристики объектов

Учет статических и динамических характеристик объектов необходим для настройки оборудования. На рис. 5.15 приведены статическая и динамическая характеристика вакуумного насоса.

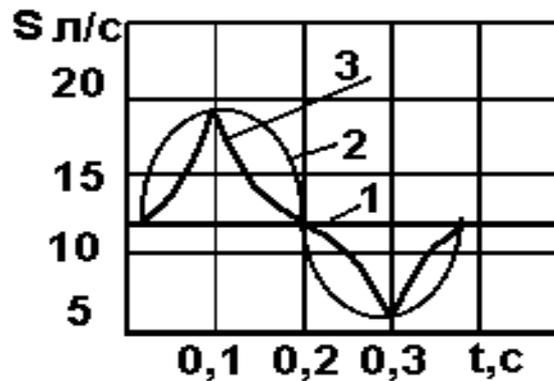


Рисунок 5.15 – Характеристики давления в вакуумной системе: 1 – характеристика давления в паспорте насоса; 2 – давление в вакуумной камере; 3 – истинное давление на входе вакуумного насоса

*Статические характеристики.* Это характеристики стационарных режимов. Например: паспортная скорость откачки насоса  $S$ , число оборотов ротора в минуту  $N$ , вес, габариты.

*Динамические характеристики.* Это характеристики, меняющиеся от параметра. Например,  $S(p, t)$ . Такие величины задаются формулами.

*Максимальные величины.* Например: быстродействие – это максимальная импульсная скорость откачки в момент времени.

### 5.9.2 Случайные и переходные явления в технологических процессах

При подключении измерительного объекта происходит скачок напряжения, обусловленный собственной индуктивностью и емкостью датчика, а также емкостью и индуктивностью  $L$  соединительной коммуникации. Величина напряжения самоиндукции  $E$  зависит от времени коммутации  $dt$  (обычно это микросекунды, что соответствует частоте несколько мегагерц).

$$E = L \frac{dI}{dt} \quad (5.13)$$

Причины переходных процессов следующие:

- включение и выключение отдельных узлов;
- перенастройка на другие координаты;
- скачок изменения нагрузки;
- возмущение параметров (нештатная ситуация).

При отсчете параметров возникают систематические и случайные ошибки. Случайные ошибки устраняются повторением измерений, а систематические выбором методики измерений или заменой приборов на более точные. Измеряемые величины могут описываться непрерывными и дискретными кривыми. На рис 5.16 представлены кривые непрерывных и дискретных значений погрешности функции  $F(x)$ .

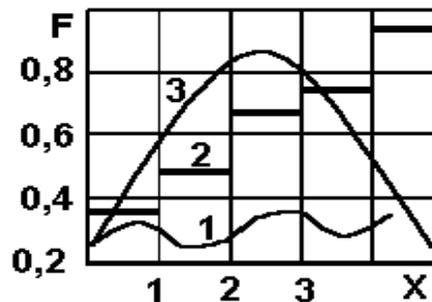


Рисунок 5.16 – Кривые непрерывных и дискретных погрешностей процесса: 1 – случайные процессы; 2 – вероятность погрешности процесса на этапе; 3 – характеристика непрерывного процесса.

При анализе процессов принято считать вероятность отклонения квадрата величины. В целом для анализа процесса важна корреляционная функция процесса, которая усредняет весь процесс во времени. На рис. 5.17 приведена корреляционная кривая (1) и график функции ошибок (2) во времени для технологического процесса.

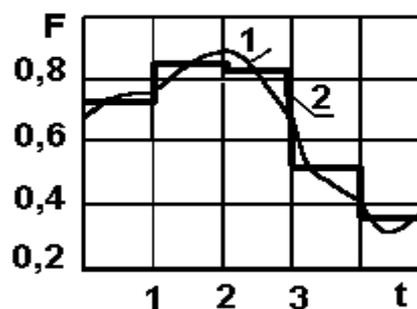


Рисунок 5.17 – Корреляционная кривая (1) и функция ошибок (2).

### 5.9.3 Обратная связь и коррекция управления между объектами

Обратная связь вводится для корректировки управления. Обратная связь может быть жесткой и записываться в системе координат уравнением:

$$x_{oc} = k_{oc}y, \quad (5.14)$$

где индексы  $oc$  при координатах и коэффициенте связи  $k$  обозначают обратную связь.

Обратная связь может быть инерционной жесткой и записываться в виде:

$$t_{oc}(dx_{oc}/dt) + x_{oc} = k_{oc}y \quad (5.15)$$

Обратная связь может быть гибкой и записываться в виде:

$$x_{oc} = k_{oc}dy/dt, \quad (5.16)$$

Обратная связь может быть изодромной (опережающей) и записываться в виде:

$$t_{oc}(dx_{oc}/dt) + x_{oc} = k_{oc}dy/dt, \quad (5.17)$$

Для коррекции режимов используются дифференцирующие или интегрирующие цепи, фильтры, выполняющие простейшие законы регулирования типа:

$$y = kX, \quad (5.18)$$

где  $X$  – отклонение;  $k$  – коэффициент регулирования.

Для увеличения скорости коррекции используются уравнения с производными (используют дифференцирующие и интегрирующие цепи). Например, уравнение (5.18) можно переписать в виде:

$$y = k(dx/dt) \quad (5.19)$$

Тогда при вводе дифференцирующей цепи выделяется точка перехода сигнала через ноль и сигнал быстрее вычитается. В электрических схемах простейшей дифференцирующей цепью является емкость на землю.

Интегрирующая цепь позволяет накапливать сигнал, усреднять его и играет роль демпфера. (Например, емкость в электрической цепи).

#### 5.9.4 Описание экспериментальных данных и их корреляция

Определение вида формулы производится или по виду графической зависимости или исходя из физических соображений. Часто функциональную зависимость представляют в виде функции, разложенной в ряд Тейлора:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_{nn}. \quad (5.20)$$

В ряде случаев некоторые зависимости путем алгебраических преобразований (например, путем логарифмирования) удается привести к линейному уравнению. Некоторые разновидности графических зависимостей и соответствующие им уравнения представлены на рис. 5.18.

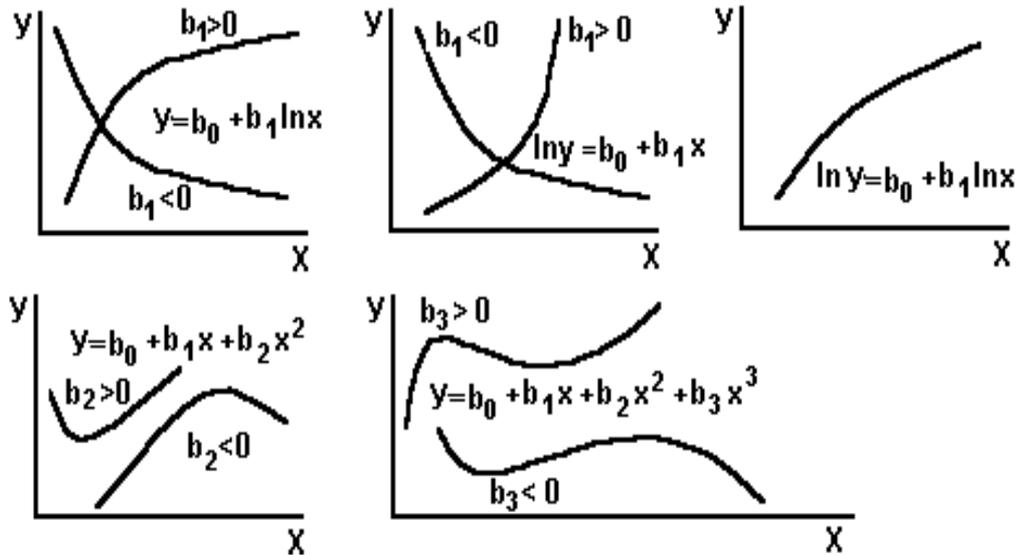


Рисунок 5.18 – Разновидности графических зависимостей двух переменных и возможные уравнения их описания

Понятие корреляции дает возможность судить о том, насколько тесно экспериментальные точки ложатся на аппроксимирующую кривую. Количественную тесноту связи между переменными случайными величинами называют коэффициентом корреляции  $K$ . Для линейной зависимости она имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n. \quad (5.21)$$

Полное отклонение параметра  $y$  от среднего значения (дисперсия) складывается из двух частей: описываемой уравнением и остатка.

Значение  $K$  находится в пределах  $-1 \leq K \leq 1$ . Если  $K=1$ , то связь между переменными является функциональной, то есть, учтены все факторы, от которых в той или иной мере зависит параметр  $y$ . Если  $K=0$ , то корреляционная зависимость между исследуемыми переменными отсутствует. Если же  $0 < K < |1|$ , то существует более или менее тесная связь между переменными (рис. 5.19).

Если аппаратура постоянно используется в одних условиях, то распределение ошибок носит Гауссовский характер. Существуют коэффициенты Стьюдента в виде таблиц, согласно которым, чтобы повысить коэффициент корреляции и провести измерение с вероятностью 96 – 98 % на приборах с погрешностью половины цены деления, необходимо провести не менее 9 – 12 измерений.



Рисунок 5.19 – Характер корреляционной зависимости

Для повышения точности измерений вводят понятие динамической погрешности и функции поправок на динамическую погрешность. На рис. 5.20 приведена функция динамической погрешности. Для повышения достоверности оценивают вероятность верного отсчета (чаще 90 %), вводят аппроксимации, оценивают конечность решения уравнений процесса, анализируют критерии подобия технологических процессов.

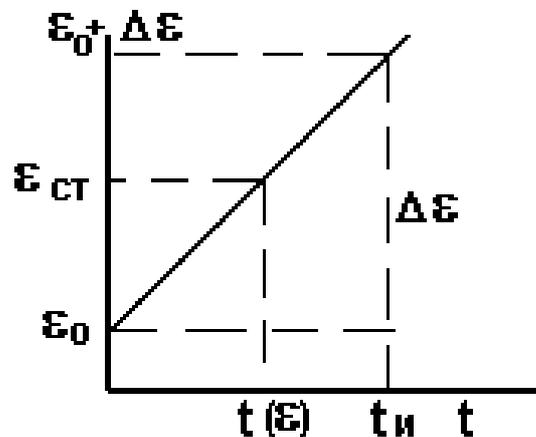


Рисунок 5.20 – Определение динамической погрешности

### 5.10 Числовое программное управление в технологии обработки материалов

Числовое программное управление (ЧПУ) нашло широкое применение в машиностроительном производстве, в станкостроительной промышленности, в робототехнике, в электрофизических установках. Предпочтение числовому программному управлению отдается в следующих случаях:

- массовое изготовление относительно простых деталей;
- возможность математического описания операций;
- загрузка оборудования – не менее полутора смен в день;

ЧПУ не оправдывает себя в ремонтных цехах, при малосерийности или недостаточной точности станка.

### 5.10.1 Математические модели объектов

#### *Линейные модели описания объектов*

Линейные модели широко применяются в системах числового программного управления (ЧПУ). Движение резцов задается координатами  $x$ ,  $y$  и числом импульсов с применением интегратора или специальной логики. Специальный блок – линейный интерполятор, снимает опорный отсчет, вычисляет число поправок и их величину (*дискрету*).

#### *Азимутальные модели объектов*

Координаты точек базирования инструментов в системах ЧПУ могут быть заданы полярной системой координат: длиной радиуса – вектора и углом поворота. На рис. 5.21 представлен фрагмент задания информации по принципу цифровой модели циркуля.

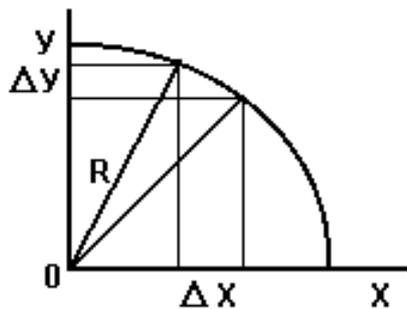


Рисунок 5.21 – Задание информации для цифровой модели азимута

Оценочная функция чаще имеет вид «шаровой функции»:

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (5.22)$$

Интерполяторы построены по принципу центрального дифференциального анализатора (ЦДА) и решают уравнения типа:

$$X = R \cos \varphi, \quad Y = R \sin \varphi. \quad (5.23)$$

Угловая цена деления (дискреты) одного импульса такого интерполятора равна:

$$\Delta \varphi = 2n, \quad (5.24)$$

где  $n$  – число двоичных разрядов кругового интерполятора.

*Табличные модели объектов.* В системах видеообработки, числового программного управления (ЧПУ), в робототехнике и мн. др. широкое распространение получили цифровые модели объектов. В этом случае

данные заносятся в таблицу. Программа типа MATCHAD считывает поле значений и подвергает его обработке.

*Функциональные модели объектов.* В робототехнике находят применение функции, описывающие характер местности, по которой движется робот. Условные названия некоторых из них: «ромашка, гора, лес, прямоугольник».

### 5.10.2 Разновидности программ для ЧПУ

#### *Линейная программа токарной обработки*

Режим токарной обработки изделий зависит от нескольких переменных: режим резания; скорость резания; подача; глубина резания; стойкость резца (до заточки). Обычно в справочниках машиностроителя приводятся практические формулы, в которых фигурируют эти величины. На рис. 5.22 представлена схема изменения параметров при линейной обработке детали.

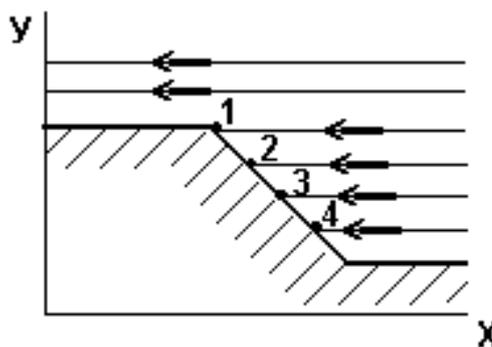


Рисунок 5.22 - Схема построения параметров для программы линейной обработки

#### *Линейная программа с непрерывным изменением аргумента.*

Примером такой программы может быть операция, при которой резец движется в одном направлении. Например, операция отрезки может быть выражена формулой:

$$N = c \cdot 10^3 / (d \cdot t \cdot S), \quad (5.25)$$

где  $N$  – число оборотов шпинделя, об/мин;

$t$  – стойкость резца, час;

$S$  – подача на один оборот.

$c$  – константа сорта материала.

#### *Программы с подпрограммами типа «пакет формул»*

Примером может служить операция растачивания изделия. Для проведения операции требуется провести операцию сверления, (применяется первый пакет формул), а затем провести несколько проходов

резцом при дискретном изменении координаты  $Y$  и непрерывном изменении координаты  $X$  (применяется второй пакет формул).

#### *Программа с условным и безусловным переходом*

Эта программа выполняется при исполнении отдельных элементов технологического цикла с применением оператора «ЕСЛИ». В случае нештатных или аварийных ситуаций осуществляется программа безусловного перехода (например, отвод резца, выключение силового питания и др.).

### **5.10.3 Информационное обеспечение систем ЧПУ**

Наибольшее распространение для станков с ЧПУ получил программный продукт Технологическая интерактивная графическая система проектирования (Тиграс). Тиграс поставляется как отдельный программный продукт. Программные средства написаны на языке VC++ 4.2. для ЭВМ типа IBM PC под операционной системой WINDOWS.

Виды обработки распределены между четырьмя модулями: фрезерный, токарный, электроэрозионный, штамповочный.

Программа Тиграс позволяет вести разработку чертежа детали и последовательности ее обработки; выбирать типоразмер режущих инструментов; проводить расчет режимов резания; норм времени и припусков на обработку.

### **5.10.4 Шифровка деталей, инструментов и операций в системах ЧПУ**

При кодировке технологических операций принято пользоваться унифицированными стандартными международными обозначениями операций в виде цифр. Например: заготовительные операции – 001 – черновое точение; фрезерные – 400; шлифовальные – 500; термообработка – 200, 506 – шлифовка с полировкой.

Для упрощения анализа технологического процесса проводится запись деталей и процессов их изготовления в виде таблиц инструментального каталога. Фрагмент возможного варианта таблицы представлен в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Фрагмент инструментального каталога

Код детали	Материал	Инструмент №1	Инструмент №2	Базовые координаты
Кольцо	Медь	Сверло 12	Метчик 14	X=9, Y=54
Фланец	Сталь 3	Резец Т – 15	–	X=9,2; Y=55

Рекомендуется чаще использовать обычный инструмент и в меньшей мере «экзотический».

## 5.11 Оптимизация технологических процессов

Общие подходы к оптимизации таковы:

- 1) составляется таблица за и против;
- 2) проводится анализ времен процесса;
- 3) проводится анализ соотношения точности и времени затрат на достижение такой точности;
- 4) проводятся прямые эксперименты с покадровой разверткой процесса.

### 5.11.1 Методы оптимизации при одном факторе воздействия на технологический процесс

*Метод производной.* Если имеется математическая модель, то оптимизацию можно провести методами математического анализа, приравнявая производные к нулю. Если функция линейна, то оптимум находится из анализа граничных условий.

*Метод деления интервала пополам (метод дихотомии).* В этом случае выбираются три соседние точки, и определяется среднее значение параметра. Оптимизация проводится до величины шага измеряемой величины в эксперименте.

*Метод с использованием чисел Фибоначчи.* При заданном числе экспериментов доля интервала выбирается ЭВМ случайным образом. Например, для вероятности 96 % необходимое число измерений  $N=11$ , при этом ЭВМ обрабатывает 144 точки.

*Метод золотого сечения.* Этот метод является частным случаем метода Фибоначчи, при котором вычисляется предельное значение максимальной величины исходя из погрешностей аппаратуры. Метод нашел широкое распространение, поскольку число опытов не нужно определять заранее.

### 5.11.2 Методы оптимизации при числе факторов больше единицы

Среди разнообразия методов следует остановиться на трех методах: метод Гаусса – Зейделя, метод градиента, метод крутого восхождения (метод Бокса – Уилсона). На рис. 5.23 представлена схема реализации метода Гаусса – Зейделя.



Рисунок 5.23 – Схема метода Гаусса – Зейделя

*Методом Гаусса – Зейделя* предполагается изменение только одного оптимизируемого параметра, а остальные остаются неизменными до достижения частного экстремума. Неудобство метода в необходимости малого шага и большого числа экспериментов.

*Градиентный метод* предполагает движение в направлении наибольшего изменения параметра оптимизации. Причем направление движения и шаг постоянно корректируются из различных соображений.

*Метод крутого восхождения* объединяет характерные элементы методов Гаусса – Зейделя и метода градиента.

### 5.11.3 Оптимизация устойчивости технологических процессов

Часто добавление определенного звена приводит к неустойчивости. Причины неустойчивости могут быть следующими:

- добавление элемента создает внутренний колебательный контур;
- изменяется реактивное сопротивление цепи, происходит преобразование схемы.

На рис. 5.24 представлены исследование процесса регулирования.

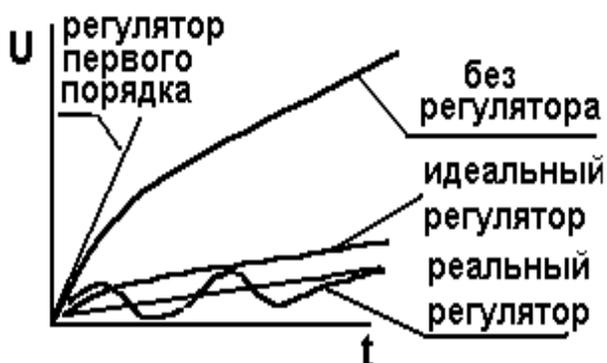


Рисунок 5.24 – Анализ процесса регулирования

Для повышения устойчивости управляющих систем необходимо следующее:

- снабдить схему инерционными звеньями (редукторы, емкости, большие индуктивности);

– решить уравнение, описывающее систему. Для отсутствия колебаний не должно быть отрицательных корней решения уравнения.

Различают первый и второй информационные критерии оптимизации. Первый соответствует максимуму ожидаемой информации. Второй информационный критерий соответствует минимуму потерь информации.

#### **5.11.4 Многокритериальная информационная система оптимизации «МОМДИС»**

Система «МОМДИС» состоит из совокупности двух больших подсистем: подсистемы пользовательского интерфейса и математической подсистемы. Система может применяться для управления группой оборудования в условиях конфликтов, а также при проектировании производственных систем с выбором компромиссов в условиях несогласованных приоритетов и неопределенности.

На рис. 5.25 представлена структурная схема оптимизации управления объектом.



Рисунок 5.25 – Структурная схема оптимального управления объектом

## **5.12 Робототехнические комплексы и автоматизированные рабочие места**

### **5.12.1 Классы роботов и их характеристики**

В последнее время создан новый тип оборудования, предназначенного для различных воздействий на материалы и внешнюю среду на основании воспринятой и переработанной информации. Такие системы называются роботами или манипуляторами. Различают несколько классов роботов:

– первый класс – манипуляторы. Управление такими устройствами осуществляется конечными выключателями;

– второй класс – это роботы с программами от ЭВМ для привода манипуляторов;

– третий класс – это роботы с адаптивными программами самонастройки;

– четвертый класс – это роботы с элементами интеллекта и принятия решений в неизвестной обстановке на основе накопленного опыта.

Различаются пневматические, гидравлические и электромеханические конструкции роботов и манипуляторов напольной,

подвесной или настольной конструкции. Пневматические роботы более быстроходные (1 – 5 м/сек) и имеют грузоподъемность до 5 кг. Гидравлические роботы имеют скорости перемещения до 1 м/с при грузоподъемности до 100 кг.

Различают промышленные, исследовательские и интеллектуальные роботы. Промышленные роботы занимаются перемещением грузов по заданной программе. Исследовательские роботы, как правило, имеют дистанционное управление, техническое зрение и адаптирующуюся программу для выполнения операций. Интеллектуальные роботы могут иметь элементы речевого сопровождения, трехмерное цветное поле зрения с просмотром зон, заслоненных объектами, подсистемы локальной настройки.

Различают следующие типы управляющих систем для роботов:

- адаптивная (изменение программы происходит при изменении параметров датчиков, например температуры печи);
- контурная (управление производится по программе);
- позиционная (задаются только точки прихода и ухода).

Работа робота осуществляется в трех режимах: обучение, повторение, редактирование.

Отдельную группу среди информационных систем составляют локационные системы роботов для определения расстояний на принципе разности хода ультразвуковых волн, поляризованного радио или лазерного излучения.

### 5.12.2 Распознающие системы роботов

Для распознавания объектов используются: сравнение яркостей и сравнение голограмм. Сравнение голограмм является очень молодым направлением. В промышленности чаще встречаются системы на основе сравнения яркостей.

Сравнение яркостей строится на корреляционном анализе и на статистической обработке изображений. Далее проводится выделение контуров объекта по функциям приближения. Например: функция – гора, функция – яма, функция – лес. На рис. 5.26 представлены некоторые вероятностные модели функции синтеза объектов.

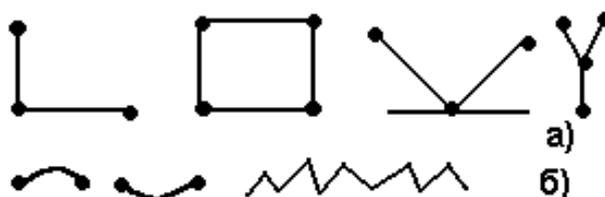


Рисунок 5.26 – Функции синтеза объектов (а); функции стыковки изображений (б).

Функции синтеза нашли широкое применение в картографии местности небесных тел, в системах автоматической парковки автомобилей.

### 5.12.3 Системы цветового зрения роботов

Ранее было показано, что соотношение компонент красного цвета  $R$ , зеленого  $G$  и синего  $B$  позволяет получить любой цвет. Точка в пространстве декартовых координат характеризует определенный цвет. Насыщенность (масштабный коэффициент) соответствующего цвета задают величинами  $r, g, b$ . Цветовое уравнение выглядит следующим образом:

$$Ц = Rr + Gg + Bb. \quad (5.26)$$

Если разбивать цветное изображение на три компоненты, то доля яркости для анализа уменьшится. Этим объясняется тот факт, что черно – белое изображение более контрастно, чем цветное. В случае цветного изображения роботу необходимо проделать обработку каждой компоненты цвета. Кроме того, необходимо проделать работу по цветовой обработке изображений путем добавок других цветов к основному цвету. В итоге получается координата цвета

$$R^* = R + \Delta G + \Delta B. \quad (5.27)$$

Этим объясняется тот факт, что цветовое зрение роботов пока мало распространено.

## 5.13 Системы «КАМАК» и «АРМ» для автоматического регулирования технологических процессов

Система КАМАК – это многоуровневая система, способная принимать и обрабатывать сигналы с технологического оборудования. Первый уровень ответственен за диагностику и обеспечение работоспособности оборудования. Второй уровень обеспечивает программную обработку данных. Третий уровень обеспечивает моделирование процессов.

Система КАМАК содержит библиотеку программных продуктов и вспомогательные функции по обработке эксперимента.

На рис. 5.27 представлена общая схема подключения преобразователей к системе КАМАК.

АРМ (автоматизированное рабочее место) – это система централизованного управления на несколько рабочих мест. Как и система «КАМАК», АРМ – это многоуровневая система. На первом уровне осуществляется система диагностики и обеспечения работоспособности оборудования. Второй уровень обеспечивает программную обработку данных. Третий уровень обеспечивает моделирование процессов.



Рисунок 5.27 – Схема подключения датчиков к системе «КАМАК»

### 5.13.1 Нейронные сети в технологических процессах

В последнее время значительная часть работы технологических систем переносится с аналоговых блоков на программный уровень. После обработки на ЭВМ сигнал многократно усиливается и поступает на исполнительный механизм. Фрагменты функциональных программ (логических элементов) называют «нейронами». Множество нейронов образуют нейронную сеть. У каждого нейрона имеются много входов и только одно значение функции на выходе. Степень рассогласования между значениями функций (поправочные коэффициенты к входным значениям) называют весовыми коэффициентами. Подбором весовых коэффициентов достигается синтез приборов (генератор, осциллограф и т.п.).

На рис. 5.28 представлен нейрон и фрагмент нейронной сети для исследования спектра газовой выделения материалов в вакууме.

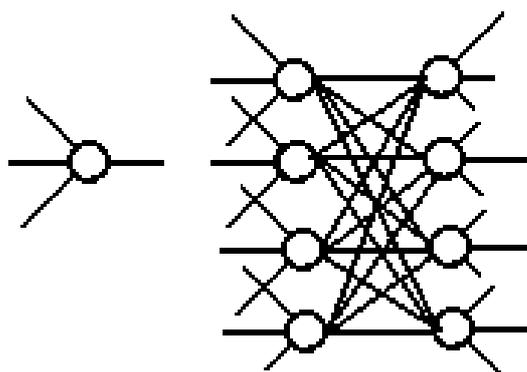


Рисунок 5.28 – Нейрон и фрагмент нейронной сети

В качестве функции подбора весовых коэффициентов использована сигмовидная функция в виде:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.28)$$

Нейронная сеть состоит из четырех слоёв по 50 нейронов, и выходного слоя с одним нейроном. Сеть обучается до уровня ошибки – 0,0016, за число итераций – 95649. Связь между нейронами осуществляется посредством весовых коэффициентов. Программа написана в среде Borland Delphi 3. Предварительное обучение сети проводится по известным газам: гелий, аргон, азот, вода. Сигнал с коллектора записывался на электронный потенциометр, оцифровывается и подается на СОМ – порт персонального компьютера. Функция изменения параметра отображается на экране.

Таким образом, в ходе проведения идентификации выбираются весовые коэффициенты для обучения нейронной сети.

### **5.14 Контрольные вопросы к главе 5**

1. В чем отличие процесса автоматизации от автоматического регулирования?
2. Каковы достоинства и недостатки систем пневмоавтоматики?
3. Какие законы регулирования параметров приняты в технике?
4. Как проводится анализ устойчивости систем управления?
5. Как формулируется принцип Кюри?
6. Как различаются порядки математического описания систем автоматизации?
7. Как программируется работа электрофизических установок на языке релейно- контактных символов?
8. Каковы способы задания траектории инструмента в системах числового программного управления?
9. Какие схемы оптимизации известны в системах автоматизации?
10. Как подразделяются робототехнические комплексы по уровню интеллекта?

## **6 ЭКСПЛУАТАЦИЯ И СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **6.1 Правила оформления документов для технологических процессов**

Содержание документов на проведение технологических процессов определяется стандартами (ГОСТ). Основное требование ГОСТ – понятливость. ГОСТ не распространяется на документы демонстрационного и пояснительного характера. Основными документами технологии являются: технологический проект, технологическая карта, маршрутная карта, операционная карта, конструкторская документация (чертежи).

*Технологический проект* – это документ, в котором описывается суть решаемой проблемы, ее состояние на сегодняшний день; предлагаемые пути решения на имеющемся типовом оборудовании (типовой технологический процесс), данные об исполнителях, сведения об оборудовании, сроки выполнения работ, необходимое финансирование, необходимое привлечение сторонних организаций, рынки сбыта продукции, конкурентоспособность продукта.

## **6.2 Общее сервисное обслуживание оборудования**

### **6.2.1 Классы и номенклатура оборудования**

Следует отличать устройство от установки. К устройству подводится однофазная сеть и оно имеет установленную мощность до 1000 Вт. К установке подводится трехфазная сеть. Установка имеет установленную мощность свыше 1 кВт. Установка может иметь подводку воды, воздуха, технических газов. Различают оборудование первого габарита (до 3-х кВт), второго габарита (до 10 кВт) и третьего габарита (свыше 10 кВт). Различают оборудование до 1000 В и высоковольтное – свыше 1000 В.

По своему построению типовые электрофизические установки подразделяются на напылительные, распылительные, упрочняющие, электронно-лучевые, ионно-лучевые, ионно-плазменные, смешанные.

По типу генерации паров материалов установки делятся на установки с генерацией паров путем термического, (в том числе электронно-лучевого нагрева). Распылительные установки предназначены для распыления материалов путем ионного или высокочастотного распыления, а также для формирования пленок в разряде или плазме.

Некоторые марки установок расшифровываются следующим образом: УВН – установка вакуумного напыления; ВУП – вакуумный универсальный пост; ЭЛУ – электронно-лучевая установка; МИР – установка для формирования пленок в магнетронном разряде; УРМ – установка реактивно-магнетронного распыления в плазме или в дуге (УРМ 387.2 – БУЛАТ). Обычно после марки установки стоят цифры, отражающие модификацию разработки.

В последнее время успешно развиваются установки смешанного типа (например, марки КАТОД), которых в одной установке реализованы системы нескольких способов формирования покрытий.

Отдельную группу составляют высоковольтные лучевые установки для размерной обработки материалов (типа ЭЛУРО), для легирования полупроводниковых материалов ионными потоками (типа ВЕЗУВИЙ), для упрочнения металлов (типа ННВ).

Современные технологические установки могут быть снабжены системой автозапуска, аварийной остановки, компьютером, электронным бортовым журналом.

## 6.2.2 Правила устройства электроустановок

Электроустановки устанавливаются с разрешения строительного надзора предприятия, главного энергетика и санитарно-эпидемиологической станции. Монтаж установок и приспособлений желательно проводить на первых этажах зданий с нагрузкой на перекрытие до  $400 \text{ кг/м}^2$ . По линии техники безопасности составляется перечень опасных факторов, и прилагаются режимы использования оборудования (ускоряющее напряжение высоковольтного оборудования, перечень используемых материалов и методы утилизации отходов, инструкции и журналы по технике безопасности, расчеты доз облучения персонала, а также другие документы по запросу).

Для монтажа установок составляется план помещения с указанием мест энергопотребления электричества, воды, сжатого воздуха и т.д. При расчете энергопотребления составляется ориентировочная последовательность технологических операций с указанием потребляемой мощности. При разработке проекта электропитания установки следует обратить внимание на поэлементную проверку схемы на пропускаемый ток и напряжение.

К работе на установках допускается только обученный персонал, имеющий удостоверения от службы техники безопасности. К работе с напряжением свыше  $1000 \text{ В}$  допускается персонал с опытом работы на установках не менее 3-х лет.

Установка должна располагаться так, чтобы был свободный доступ ко всем элементам во время проведения пуска наладочных и профилактических работ. Проходы между установками должны составлять не менее  $1,2 \text{ м}$  по выступающим частям. От стены проход должен составлять не менее  $0,7 \text{ м}$  для удобства технического обслуживания. В помещении должна располагаться только одна высоковольтная установка и не содержаться оборудование, непосредственно не относящееся к процессу. Все профилактические и сервисные работы должны проводиться при выключенном питании установки.

Рабочие параметры оборудования обычно фиксируются в технических паспортах или экспериментальных журналах. В последнее время начинают распространяться паспорта с записью технологического процесса в электронном виде на специальную карту – «flash». Ежедневное обслуживание заключается в содержании оборудования в чистоте, обеспечении свободного к элементам, осмотр внешнего вида на отсутствие посторонних предметов, проводов и инструментов на установках. Плановые профилактические работы проводятся не реже 1 раз в год, как правило, в период длительной остановки оборудования.

### 6.3 Сервисное обслуживание различных типов вакуумных установок

Вакуумные установки состоят из нескольких отдельных схем. Это: вакуумная схема, схема охлаждения, схема пневматического или гидравлического питания для открывания камер, шлюзов, затворов, приводов, силовая электрическая часть, высоковольтная электрическая часть, источник частиц со схемой питания, пуль управления.

#### 6.3.1 Алгоритм включения и выключения типовых вакуумных установок с масляными средствами откачки

*Алгоритм включения* установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) составить вакуумную схему установки;
- 2) закрыть все вентили;
- 3) перевести все тумблеры влево/вниз;
- 4) провести внешний осмотр установки на наличие нагревателя на диффузионном насосе, наличие воды для охлаждения, отсутствие посторонних предметов, проводов и т.п.;
- 5) провести импульсное включение механического насоса. (При отсутствии системы автозапуска включение провести «рывками»). Такой запуск необходим для удаления остатков масла из плунжерных камер, а также для предотвращения гидравлического удара и сохранения муфты между электродвигателем и вакуумным насосом.
- 6) открыть обводную (байпасную) систему для откачки рабочей камеры;
- 7) по достижении вакуума  $\sim 0,1$  мм рт. ст. включить нагреватель диффузионного насоса и ждать  $\sim 45$  минут до выхода установки на высокий вакуум.

*Алгоритм выключения* установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- производится выключение измерительной аппаратуры;
- закрывается вентиль на входе диффузионного насоса. Выключается нагреватель диффузионного насоса. Выдерживается время  $\sim 40$  мин для остывания диффузионного насоса;
- закрываются вентили на выходе диффузионного насоса;
- выключается форвакуумный насос;
- выключается охлаждение установки.

Вакуумная система всегда будет работать, если на выходе диффузионного насоса поддерживать давление не более 10 Па ( $10^{-1}$  мм рт ст). Высоковакуумный (диффузионный) насос часто не обеспечивает предельный вакуум по следующим причинам:

- 1) мало масла в насосе. Рекомендуется 70 грамм на 100 литров

откачки;

2) масло потеряло фракционирующие свойства из-за окисления;

### **6.3.2 Сервисное обслуживание безмасляных вакуумных установок**

Форвакуумный тракт безмасляной откачки должен иметь прогреваемую электрическим током ловушку масел, а также ловушку, охлаждаемую жидким азотом. При давлении  $\sim 2$  Па необходимо залить жидкий азот в форвакуумную ловушку. (Более раннее заливание азота может привести к сильному росту инея, уменьшению проводимости вакуумных коммуникаций и выделению воды). Понижение давления до 0,1- 0,01 Па ( $10^{-3}$ -  $10^{-4}$  мм рт ст) проводится криогенными или криосорбционными насосами. Понижение давления от 0,01 Па проводится электроразрядными или турбомолекулярными насосами. Запуск электроразрядных насосов на давлении более  $10^{-2}$  Па нежелателен из-за «науглероживания» вследствие прогрева элементов и газовыделения углеводородов.

Особенностью турбомолекулярных насосов является необходимость обеспечения давления 1 Па ( $\sim 10^{-2}$  мм рт ст) на выходе насоса. К сожалению, незначительное число механических вакуумных насосов даже прогрессивной серии обеспечивает это давление при рабочем потоке газа. На входе электроразрядных и турбомолекулярных насосов необходимо иметь сетки, предупреждающие попадание посторонних предметов.

### **6.3.3 Сервисное обслуживание вакуумных камер**

КПД формирования пленок невысок и составляет единицы процента. Все остальное «садится» на элементы вакуумной камеры и формирует покрытие с большим содержанием газов. При разгерметизации вакуумная камера работает как пылесос.

Чистка вакуумных камер и отдельных элементов установок от ранее распыленных материалов должна проводиться только по специальной технологии, разрешенной отделом техники безопасности. Не допускается чистка камер механическими средствами или наждачными шкурками без использования вытяжных пылесосов и противогазов с протяженными воздуховодами. В некоторых случаях очистка мелких деталей может проводиться путем прокаливания.

### **6.3.4 Аварийные режимы, на типовых вакуумных установках с диффузионными вакуумными насосами и методы их устранения**

Ниже приводится перечень наиболее встречающихся неприятностей при работе на установках и возможные приемы реанимации работоспособности:

1) прекратилась подача воды - необходимо выключить нагрев диффузионного насоса. Необходимо, чтобы работал механический насос до полного остывания диффузионного насоса;

2) прекратилась подача электроэнергии - необходимо перекрыть все вентили и выключить установку. Остудить диффузионный насос;

3) забыли включить механический насос, но включили диффузионный насос. Если прошло не более 10-15 минут необходимо снять нагрев, включить механический насос. Если прошло более 15 минут необходимо, произвести чистку диффузионного насоса и заменить в нем масло;

4) забыли открыть воду при запуске диффузионного насоса. Необходимо снять нагрев диффузионного насоса. Пустить воду в насос только после его остывания во избежание разрыва водяной рубашки паром;

5) открыли входной или выходной вентиль работающего диффузионного насоса на атмосферу. Для реанимации необходима замена масла в диффузионном насосе;

6) выключили форвакуумную откачку при горячем диффузионном насосе. В этом случае необходимо включить форвакуумный насос и провести откачку диффузионного насоса в течение 2-3 часов. Если по истечении этого времени диффузионный насос не обеспечит рабочий вакуум – провести замену масла в диффузионном насосе;

7) начали измерение высоковакуумным датчиком ПМИ –2 при форвакууме в вакуумной системе. Последствия – сгорает катод датчика. В этом случае работают, ориентируясь по термомпарному датчику, а давление определяют из формулы для оценки времени высоковакуумной откачки. Обычно время достижения предельного высокого вакуума от 0,1 до  $10^{-2}$  Па не превышает 15 минут.

8) выключили форвакуумный насос не закрыв вакуумные затворы. После остановки насоса атмосферное давление выдавливает масло из форвакуумного насоса на выход диффузионного насоса. Подмес форвакуумного масла к высоковакуумному приведет к потере работоспособности диффузионного насоса. Если форвакуумный насос двухступенчатый – то выдавливание происходит в течение 5-10 минут. Если насос одноступенчатый – то происходит «выстрел» масла из форвакуумного насоса в диффузионный;

9) вакуумные затворы закрыли, но не напустили атмосферный воздух в форвакуумный насос. Масло из форвакуумного насоса поднимается до затвора. Лечение: провести напуск воздуха во всю вакуумную систему, прокрутить вакуумный насос вручную.

### **6.3.5 Практические рекомендации по поиску негерметичности вакуумных систем**

Наибольшей трудностью при сервисе вакуумных систем является нахождение мест нарушения герметичности (мест течей). Обычно течи происходят в местах проведения работ. Это источники частиц, токовводы, вводы охлаждения.

Во фланцевых соединениях в основном изнашиваются прокладки. Необходимо избегать изготовления прокладки путем склейки резинового шнура. В последнее время в качестве уплотнений применяется паста «герметик» – силиконовая резина. После заполнения канавки пасте дают высохнуть 1-2 дня.

Иногда в качестве прокладок применяют медь, алюминий, свинец. Такие прокладки являются одноразовыми. Наиболее часто течи через металлические уплотнения возникают в местах перекоса при монтаже системы. Наиболее эффективным способом поиска течи является метод пробной жидкости. В качестве инструмента используется медицинский шприц, заполненный ацетоном. При поиске течей в диапазоне 1-0,1 мм рт ст, где: мало измерительного оборудования применяют метод поэлементного поиска течи от затвора до затвора, а также затяжку всех уплотнений вакуумной системы.

## **6.4 Сервисное обслуживание вакуумных насосов**

### **6.4.1 Обкатка новых форвакуумных насосов**

Перед подключением вакуумного насоса следует установить правильное направление вращения его ротора (указывается на корпусе насоса). Для этого необходимо снять крышку с электродвигателя и включить насос на 1 секунду. Если направление вращения в противоположную сторону, то меняют местами подключение любые из двух фаз.

Рекомендуется после нескольких часов работы нового насоса сменить в нем масло. В насос можно заливать только рекомендованное заводом масло, что связано со смазывающими свойствами, вязкостью и кислотностью масла. Эксплуатация насоса при входном давлении более 40 мм рт ст запрещена.

### **6.4.2 Ремонт механических вакуумных насосов**

Механический вакуумный насос является изделием точной механики и требует определенных навыков его проведения. Целесообразно проанализировать условия работы насоса, проверить уровень масла в насосе, слить из насоса старое масло, промыть насос свежим, осушенным маслом.

Часто пластинчато-роторные вакуумные насосы имеют заводской дефект – течь в газобалластное устройство, или в клапан, выравнивающий давление при остановке насоса. Иногда возникает заклинивание насоса или «медленное раскручивание ротора». Это связано с попаданием инородного тела в насос (ваты, резины, стекла от датчиков) или с разбуханием от влаги пластин ротора, выполненного из текстолита. В этом случае насос следует разобрать, шлифовать пластины, удалить ржавчину, прочистить отверстия выхлопных клапанов. При разборке следует четко запоминать ориентацию всех деталей и отверстий в них.

### **6.4.3 Ремонт диффузионных вакуумных насосов**

Если диффузионный насос не обеспечивает паспортный вакуум, то его разбирают, проводят чистку элементов от нагара. Часто недостаточный вакуум связан с недостаточным охлаждением насоса. Вода на выходе работающего насоса должна быть холодной с расходом  $\sim 10$  мл/с. Для очистки системы охлаждения диффузионного насоса используется смесь перекиси водорода и нашатырного спирта 1:1. Смесь создает избыточное давление, удаляющее хлопья коррозии или посторонние включения. Работу необходимо проводить в резиновых перчатках.

Часто потеря скорости откачки по потоку происходит из-за ошибочного подключения вакуумного трубопровода не к выходу диффузионного насоса, а к служебному патрубку, служащему для свинчивания элементов насоса. В этом случае не используется последняя эжекторная ступень диффузионного насоса, обеспечивающая выходное давление 10 Па и более. Полезно проверить щупом зазоры сопел насоса. Часто сопла бывают погнутыми, а зазоры нарушенными.

Для перестройки диффузионного насоса под более глубокий вакуум (не ниже  $10^{-6}$  мм рт ст) необходимо применить вакуумное масло с более низким давлением паров (например ВМ-5, ВМ-7). Кроме того, необходимо провести полировку внутри стального корпуса насоса, а также уменьшить зазор в самом верхнем сопле насоса путем снятия регулировочного кольца.

## **6.5 Монтаж вакуумных коммуникаций**

Гибкие вакуумные трубопроводы, предназначенные для работы на форвакууме, выполняются из вакуумных трубок. Существуют вакуумные трубки с толщиной, равной внутреннему диаметру 2x2, 3x3, 5x5, 6x6, 8x8, 12x12, 18x18 и более. Вакуумные трубопроводы из металла принято выполнять в виде входящих друг в друга труб. Это позволяет подстраивать трубопровод по высоте, по длине и по радиусу. На рис. 6.1 представлена схема такого трубопровода.

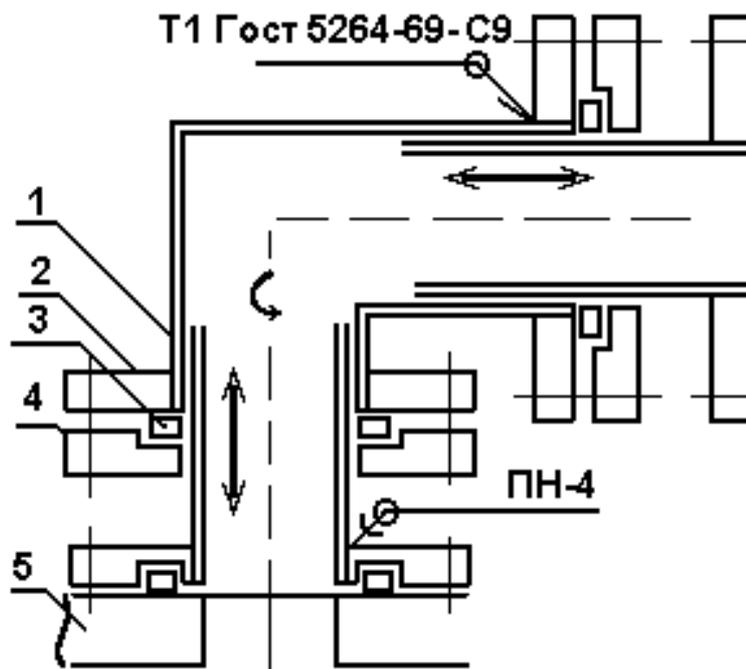


Рисунок 6.1 – Фрагмент вакуумного трубопровода: 1 – труба; 2 – приваренный фланец; 3 – уплотнение (резина); 4 – накладной фланец; 5 – фрагмент корпуса (вакуумного насоса или вакуумной камеры)

Сварка трубы с фланцем тавровым соединением с одной стороны (Т1) выполнена вкруговую по ГОСТ 5264-69-С9. Фланец по резьбе можно навинтить на трубу, а затем герметично припаять. (ПН-4 указывает пайку внахлестку в виде телескопического соединения по ГОСТ 19249-73).

На рис. 6.2 а) представлен вариант стыковки источника заряженных частиц на вакуумную камеру. На рис. 6.2 б) представлена схема низковольтного токоввода через стенку вакуумной камеры.

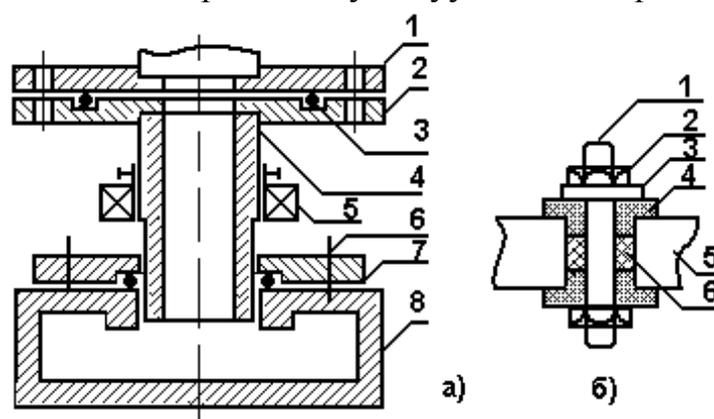


Рисунок 6.2. – а) схема установки источника частиц на вакуумную камеру. 1 – фланец источника частиц; 2 – переходной фланец; 3 – уплотнение; 4 – трубка из немагнитного материала; 5 – магнитная линза; 6 – шпилька; 7 – посадочный фланец; 8 – вакуумная камера. б) 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – шайба; 4 – диэлектрик; 5 – стенка камеры; 6 – уплотнение.

### 6.5.1 Вводы в вакуум

На рис. 6.3 представлена схема подвижного соединения для ввода поступательного или вращательного движения в вакуум, обеспечиваемый механическим вакуумным насосом.

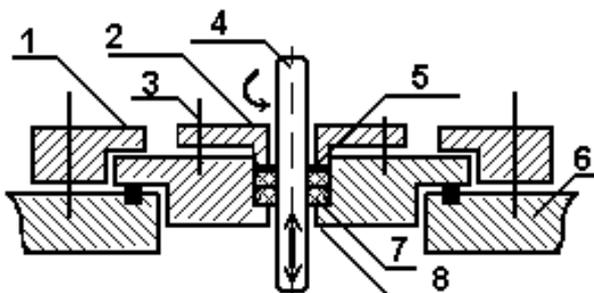


Рисунок 6.3. – Схема подвижного соединения. 1 – фланец, 2 – шайба, 3 – шпилька, 4 – шток, 5 – металлическая прокладка, 6 – стенка вакуумной камеры, 7 – наборные уплотнительные шайбы, 8 – монтажный фланец.

В качестве смазки обычно применяется касторовое масло, имеющее хорошие смазочные свойства при малом давлении насыщенных паров  $\sim 10^{-5}$  Па. В качестве уплотнений может использоваться резина или фторопласт.

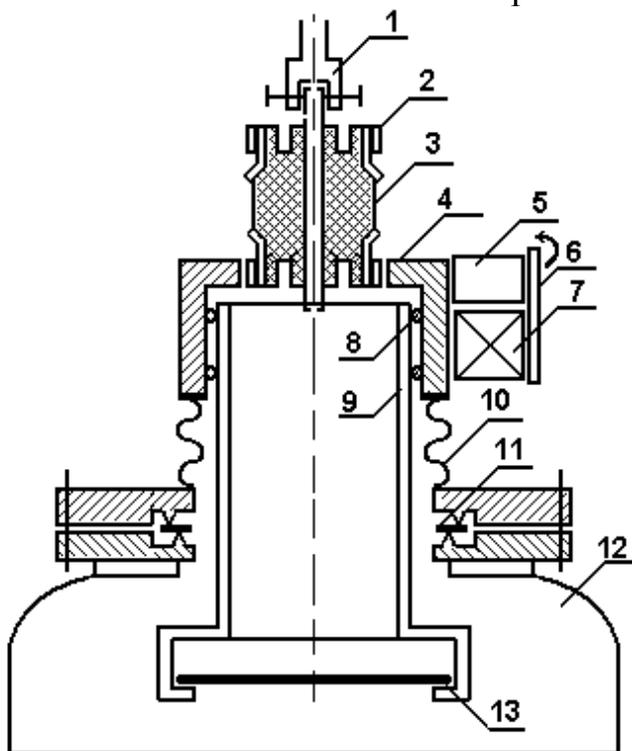


Рисунок 6.4. – Схема сверхвысоковакуумных уплотнений и вводов манипулятора молекулярно-лучевой эпитаксии. 1 – клемма, 2 – кольцо металлокерамического спая, 3 – керамический изолятор, 4 – немагнитная нержавеющая труба, 5 – электродвигатель, 6 – червячная передача, 7 – магнит, 8 – подшипник, 9 – стальная труба, 10 – сильфон, 11 – медная прокладка, 12 – вакуумная камера, 13 – подложка.

## 6.6 Сервисное обслуживание электрооборудования вакуумных установок

Всю измерительную аппаратуру, в которой нет постоянной необходимости, следует выключать. Это связано со случайными наводками на все, даже выключенные цепи. При включении аппаратуры необходимо проверить положение всех ручек и выключателей (должны быть влево, вниз). Прежде, чем подать сигнал на вход аппаратуры необходимо провести анализ формы сигнала, его амплитуды и длительности и сравнить с паспортными возможностями. Сигналы от газоразрядных цепей должны подаваться через так называемый, проходной конденсатор или разрядник, шунтирующий вход аппаратуры в случае случайного пробоя высокого напряжения.

### 6.6.1 Трансформаторы

В устройствах электропитания трансформаторы применяются для преобразования напряжения, преобразования числа фаз в фазовращателях и т.д. Ниже приводится упрощенная методика расчета силового трансформатора с достаточной для практики точностью.

Площадь сердечника  $S$  определяются по мощности трансформатора

$$S = k\sqrt{P_2}, \text{ см}^2, \quad (6.1)$$

где  $k = 1,1 - 1,4$  – коэффициент соотношения между объемом стали и объемом меди. Для маломощных трансформаторов берется большее значение;

$P_2$  – мощность во вторичной обмотке, Вт.

Число витков на 1 В определяется соотношением:

$$N = (40 - 45) / S, \quad (6.2)$$

где (40-55) – коэффициент качества стали. Для трансформаторов до 1000 Вт берется сталь худшего качества с повышенным коэффициентом.

Число витков в первичной и вторичной обмотках с учетом потерь определится

$$N_1 = U_1 N; \quad (6.3)$$

$$N_2 = 1,1 \cdot U_2 N. \quad (6.4)$$

Диаметр проволоки для рабочего тока  $I_p$  при плотности тока  $\sim 2,5 \text{ А/мм}^2$  определится по формуле:

$$D = 0,7\sqrt{I_p}. \quad (6.5)$$

В трансформаторах и ряде аппаратов высокого напряжения элементом изоляции может быть трансформаторное масло. В процессе эксплуатации происходит старение и полимеризация масла, увлажнение, окисление. Уход за трансформаторным маслом выражается в сушке масла

при давлении 0,1 мм рт ст при температуре  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ .

### 6.6.2 Автотрансформаторы

В электрофизических установках нашли применение несколько схем регулирования напряжения. Наиболее распространенная схема – это схема с автотрансформатором. На рис. 6.5 представлены схемы с применением автотрансформаторов.

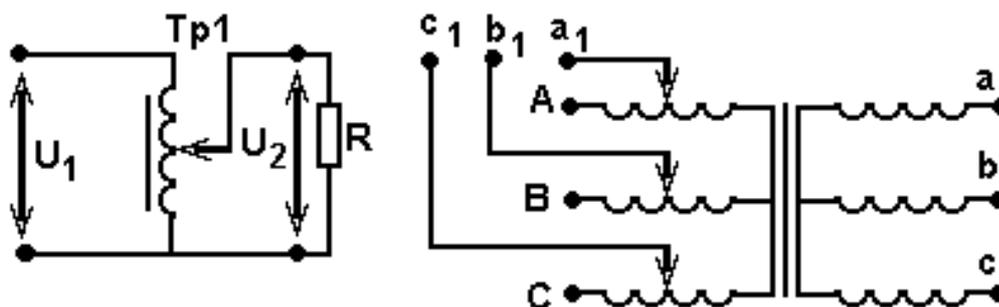


Рисунок 6.5 – Схемы автотрансформаторного регулирования

При переключении вторичных обмоток со звезды на треугольник напряжение уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что дает дополнительные возможности регулирования. Достоинством схем с авторегуляторами являются:

- плавная регулировка напряжения до нуля;
- передача синусоиды напряжения без искажений.

Недостатком автотрансформаторных схем являются:

- отсутствие развязки по напряжению. (При малом снятом напряжении относительно конца обмотки, напряжение относительно «земли» равно 220 В);

- наличие подвижного изнашиваемого контакта провоцирует съём напряжения сразу с двух соседних витков. Вследствие этого возникает КЗ-виток и загорание регулятора.

### 6.6.3 Потенциал – регуляторы

В качестве плавного регулятора переменного напряжения находит применение асинхронный двигатель с фазным заторможенным ротором. Асинхронный двигатель можно рассматривать как вращающийся трансформатор. Поворот ротора осуществляется с помощью червячного редуктора. На рис. 6.6 представлена схема потенциал-регулятора.

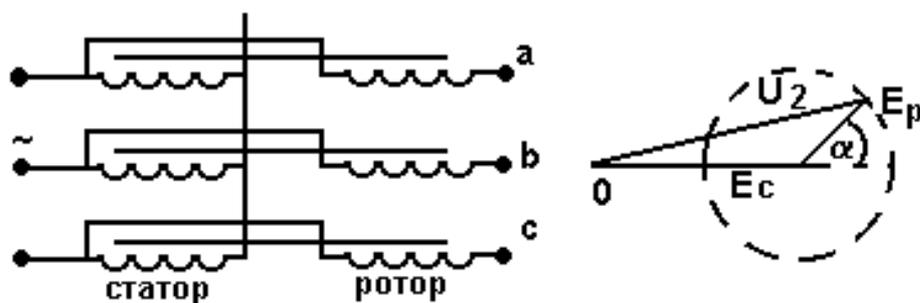


Рисунок 6.6 – Схема потенциал-регулятора и векторная диаграмма изменения напряжения.

Недостатками потенциал – регуляторов являются большие габариты, высокая стоимость, низкий коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ).

#### 6.6.4 Тиристорные регуляторы

Регулирующим элементом могут выступать сами электронные приборы. Наиболее широкое распространение получили титорные регуляторы. На рис. 6.7 представлены некоторые схемы регуляторов на тиристорах.

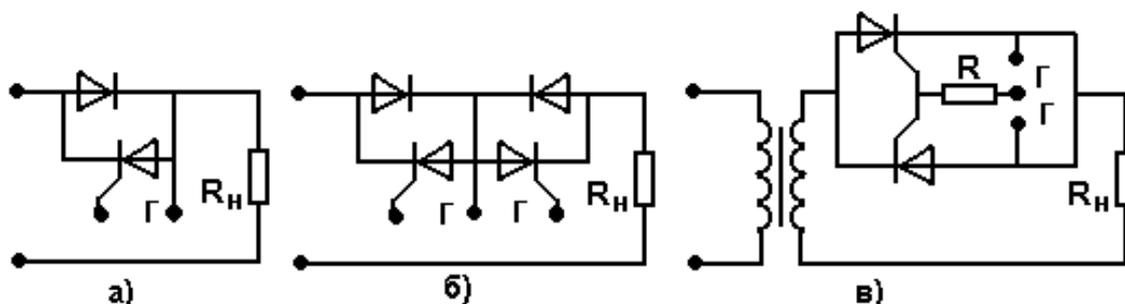


Рисунок 6.7 – Схемы регуляторов на тиристорах

Тиристорные схемы позволяют регулировать напряжение по первичной и по вторичной обмотке трансформатора (рис. 6.7 а). Тиристор открывается импульсами, подаваемыми от генератора Г. Схема (рис. 6.7 б) состоит из двух тиристорov, собранных по симметричной схеме. Тиристоры защищены от воздействия обратного напряжения с помощью шунтирующих диодов. На рис. 6.7 в представлена схема промышленного тиристорного биполярного преобразователя – регулятора температуры БПРТ.

К недостаткам тиристорных схем относится следующее:

- выбросы пиков напряжения при работе на индуктивную нагрузку, что провоцирует возникновение разряда и полимеризацию масел в элементах вакуумной системы;
- регулировка напряжения происходит в диапазоне 120-220 В. Расширение диапазона регулировки до нуля связано с усложнением схемы.

### 6.6.5 Выпрямительные устройства

Известно достаточно большое количество выпрямительных устройств. Однополупериодные схемы содержат один выпрямляющий диод на фазу и нагрузку. Такие схемы применяются при небольших мощностях нагрузки и малых требованиях к пульсациям напряжения.

На рис. 6.8 приведены наиболее распространенные в установках двухтактные схемы выпрямления.

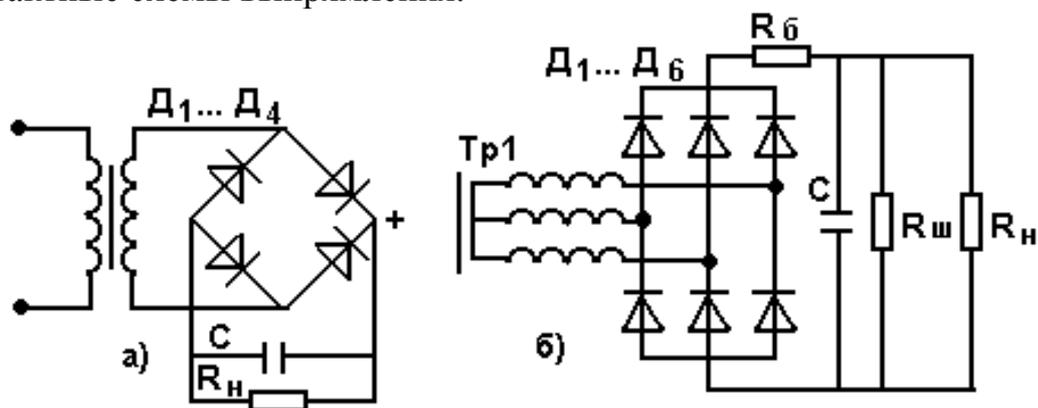


Рисунок 6.8 – Двухтактные схемы выпрямления

Схема *a)* содержит емкость  $C$  для сглаживания пульсаций на нагрузочном сопротивлении  $R_{н}$ . Достоинства трехфазных схем (схема *б)* в лучшем использовании трансформатора, в равномерной нагрузке на электрическую сеть.

Особенностью сервисного обслуживания выпрямляющих устройств являются:

- необходимо обязательно шунтировать выходные емкости высокоомным резистором  $R_{ш}$  для предотвращения попадания обслуживающего персонала под напряжение;
- необходимо иметь в схеме сопротивление, ограничивающее ток при случайном коротком замыкании ( $R_{б}$ ), особенно в высоковольтных цепях.

## 6.7 Сервис отдельных блоков электрофизических установок

### 6.7.1 Электрическая схема вакуумного агрегата

Для получения вакуума в рабочей камере служит вакуумный агрегат, электрическая схема которого представлена на рис. 6.9. Электродвигатель форвакуумного насоса  $\Phi H$  соединен с электросетью 220/380 В через плавкие предохранители  $Fи$  и включается замыканием контактов магнитного пускателя  $П1$  через тумблер  $K1$ , расположенный на пульте управления. Сигнальные неоновые лампы  $Л$  подключены параллельно контактам пускателя через резисторы  $R$  величиной по 150 кОм и

свидетельствует о наличии напряжения на выводах электродвигателя.

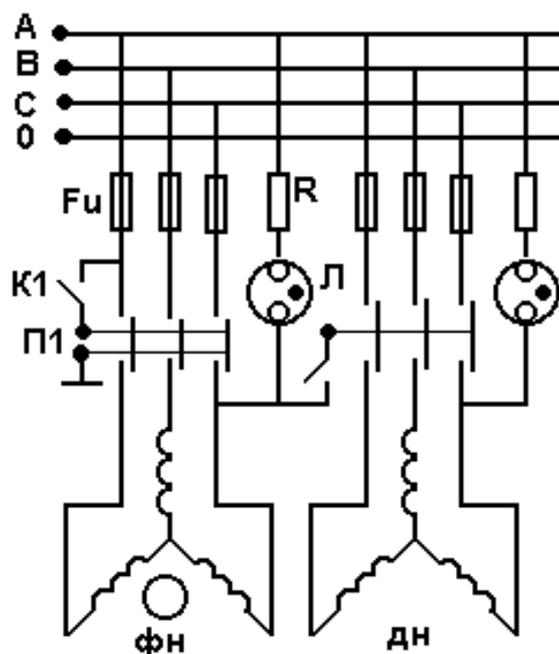


Рисунок 6.9 – Электрическая схема вакуумного агрегата

Практика эксплуатации вакуумных агрегатов показала, что вакуумный насос является равномерной нагрузкой, поэтому тепловой защиты двигателя не требуется.

Паромасляный диффузионный насос содержит нагреватель, который также подключен к контактам своего пускателя. В последних разработках вакуумных установок катушка этого пускателя подключается через пускатель механического насоса. Это предотвращает включение паромасляного насоса без включения механического насоса при неквалифицированном включении установки.

### 6.7.2 Схема питания испарителей вакуумного агрегата

Рассмотрим схему питания испарителей установок вакуумного напыления, представленную на рис. 6.10. Сетевое напряжение 220 В поступает через предохранитель и пусковой контакт на регулирующий автотрансформатор и с его выхода на понижающий трансформатор. Напряжение на вторичной обмотке составляет 4 – 32 В. Нагреватели испарителей  $R_{и}$  имеют очень малое сопротивление ( $\sim 0,01$  Ом) и подключаются к питающему напряжению с помощью симисторов  $D$ , предназначенных для коммутации токов  $\sim 300$  А, после сильноточного переключателя  $P$ .

В последних разработках вместо симисторов с ширokoимпульсной модуляцией выходного напряжения (ШИМ-выход) применяются симметричные тиристоры с ограничительным резистором  $R \sim 50$  Ом в цепи

управляющего электрода.

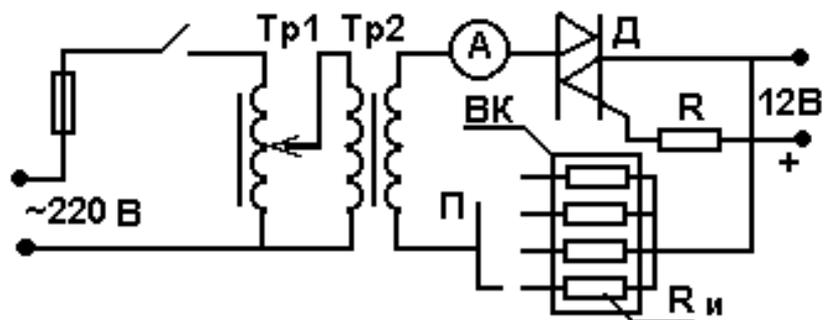


Рисунок 6.10 – Схема питания испарителей

Одним из недостатков таких схем является ненадежность полупроводниковых элементов, вызванная очень малым сопротивлением испарителя и большими токами нагрузки. В случае неработоспособности полупроводниковых элементов их исключают из цепи, а управление нагревом проводят от регулировочного трансформатора  $TP1$ .

### 6.7.3 Схема газоразрядной очистки

В установках вакуумного напыления перед нанесением покрытия подложка тщательно очищается от органических загрязнений в тлеющем разряде. На рис. 6.11 представлена схема питания электродов газоразрядной очистки.

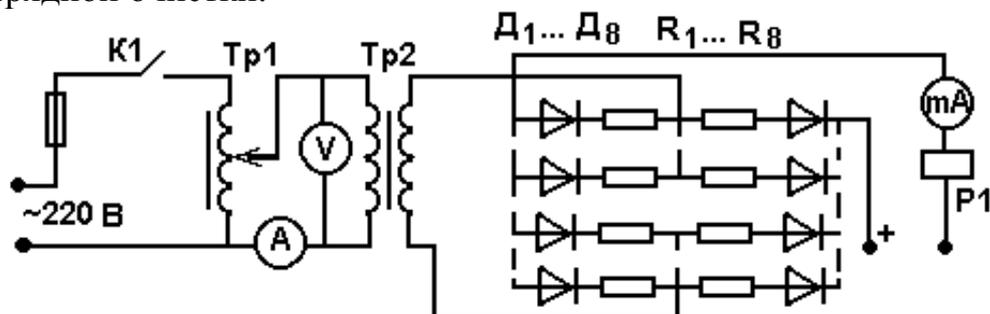


Рисунок 6.11. – Схема питания электродов газоразрядной очистки

На пульте управления включается пакетный выключатель  $K1$ . С помощью автотрансформатора  $TP1$  производится регулирование режима газового разряда. Регулируемое напряжение поступает на первичную обмотку повышающего трансформатора. Высокое напряжение (до 3000 В) с вторичной обмотки выпрямляется мостовой схемой, выполненной на диодах  $D1 - D8$ . Резисторы  $R1 - R8$  ( $\sim 6$  кОм, 150 Вт каждый) служат для ограничения тока разряда. Реле «максимального тока»  $P1$  служит для защиты схемы от коротких замыканий в газоразрядной камере. Ионная бомбардировка проводится при давлении  $\sim 0,5$  Па. Для процесса очистки необходима плотность тока  $\sim 3-5$  мА/см<sup>2</sup>.

#### 6.7.4 Сервисное обслуживание систем охлаждения элементов вакуумного оборудования

*Воздушное охлаждение* применяется для охлаждения источников частиц с выделяемой тепловой мощностью до 1 кВт. Чаще всего охлаждается катод, находящийся под высоким потенциалом. Высокооборотная турбина должна располагаться на расстоянии большем, чем может развиться пробой по воздуху на турбину.

*Водяное охлаждение.* На рис.6.12 представлена упрощенная схема водяного охлаждения электрофизических установок.

Вода из магистрали подается на водяное реле 6, а затем поступает на коллектор. Часть трассы направляется на охлаждение высоковакуумного насоса 5, стенок вакуумной камеры 2, стенок трансформаторов, токовыводов или элементов привода обрабатываемой детали.

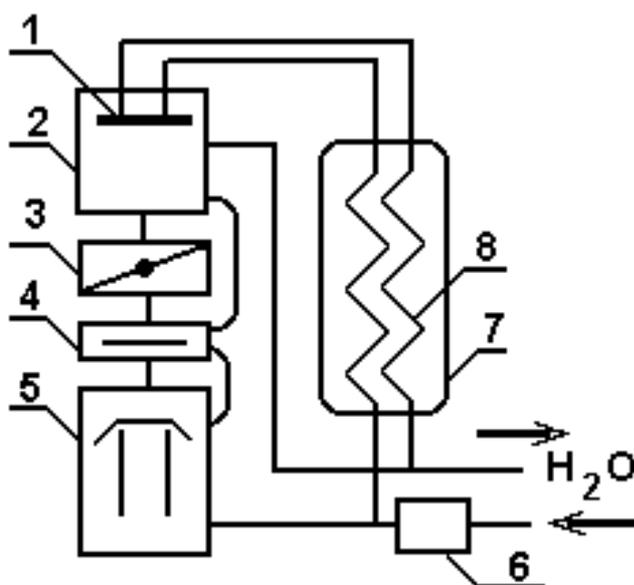


Рисунок 6.12 – Схема водяного питания вакуумной установки: 1 – катод-мишень; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумный затвор; 4 – ловушка паров масел; 5 – диффузионный насос; 6 – водяное реле; 7 – емкость; 8 – змеевик.

Другая часть водяной магистрали из приемного коллектора через длинные трубки (змеевик 5 метров и более) укладывается в емкость 7 из изолятора и направляется на охлаждение катода или мишени 1, находящихся под высоким потенциалом. После катода трубка опять укладывается в емкость из изолятора. Длинная трансмиссия трубок обеспечивает *водяное сопротивление*, чтобы ток утечки через воду не превышал 2-3 мА при напряжении 20 кВ. В ряде случаев для сокращения габаритов и повышения рабочего напряжения водяное охлаждение подводят к баку с маслом. В баке располагается шестеренчатый масляный

насос, прокачивающий охлажденное масло через катод, или мишень. Для охлаждения ответственных приборов и дорогостоящих установок применяют деионизованную воду.

### 6.7.5 Сервисное обслуживание пневматических систем вакуумных установок

Пневматические системы широко распространены на электрофизических установках типа УРМ (установках БУЛАТ). На рис. 6.13 представлена схема пневматической системы установки БУЛАТ.

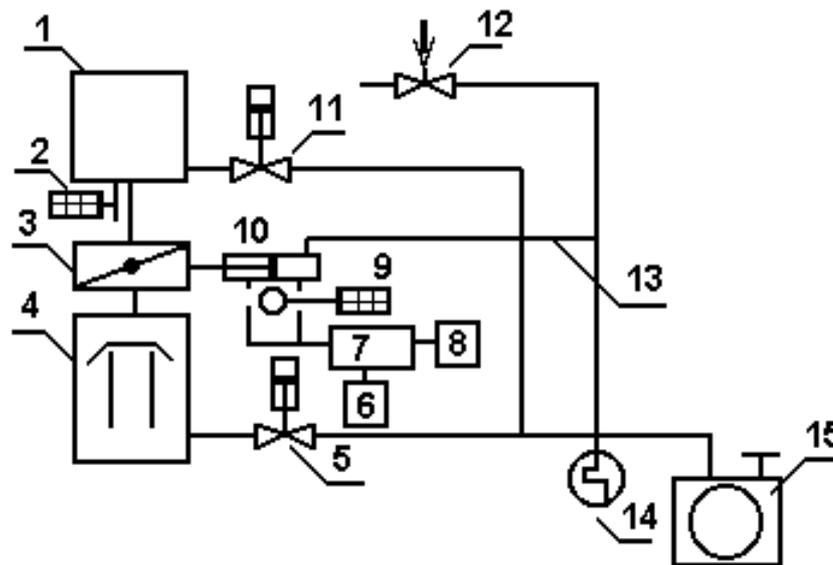


Рисунок 6.13 – Схема пневматической системы установки БУЛАТ: 1 – вакуумная камера; 2 – клапан напуска газа в камеру; 3 – высоковакуумный затвор; 4 – диффузионный насос; 5, 11, 12 – вентили; 6 – компрессор; 7 – коллектор; 8 – реле давления; 9 – электромагнитный клапан; 10 – пневматический цилиндр; 13 – трасса напуска воздуха; 14 – датчик давления; 15 – вакуумный насос.

Наибольшего сервисного внимания требуют соединения и разветвления пневматической системы. При не герметичности концы трубок ровно отрезают и, прогревая горячим воздухом, закрепляют специальной муфтой.

### 6.7.6 Сервисное обслуживание систем гидравлики

На рис. 6.14 представлена схема гидравлической системы типовых вакуумных установок типа УВН, УРМ.

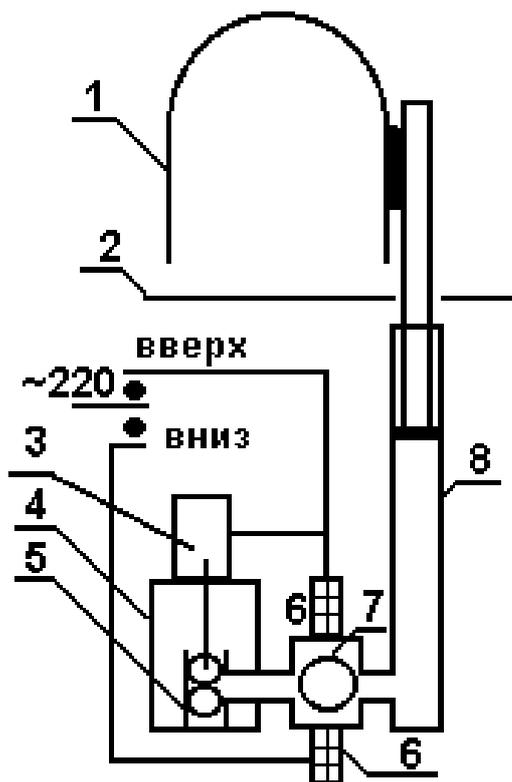


Рисунок 6.14 – Схема гидравлической системы вакуумной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – рабочая плита установки; 3 – электродвигатель; 4 – масляный бак; 5 – масляный шестеренчатый насос; 6 – электромагниты; 7 – распределитель с шариком; 8 – гидроцилиндр.

При нажатии кнопки «ВВЕРХ» замыкается цепь электродвигателя и верхнего электромагнита. Шарик поднимается электромагнитом и шестеренчатый насос качает масло в гидроцилиндр 8. В это время вакуумная камера поднимается вверх. При нажатии кнопки «ВНИЗ» замыкается цепь нижнего электромагнита. Шарик уходит вниз и масло сливается обратно в масляный бак. Наиболее частый дефект, требующий сервиса – отсутствие подъема колпака. Для устранения дефекта следует проверить предохранители электродвигателя и концевые выключатели на гидроцилиндре 8.

### 6.7.7 Сервисное обслуживание систем напуска рабочего газа

*Напуск рабочего газа.* Рабочие газы подаются от баллона, (в котором давление достигает 150 атм) через специальный редуктор, на выходе которого давление снижается до 1-2 атм. Для уменьшения углеводородов тракт подачи должен быть выполнен из металлической трубки. Далее газ поступает через расходомер. В большинстве случаев величина расхода газа для промывки систем, травления материалов или формирования декоративных покрытий не превышают 30 – 80 см<sup>3</sup> атм/час. Это

соответствует скоростям откачки механического вакуумного насоса 5- 16 л/с. Обычно установка должна иметь как минимум два канала для напуска газа для работы на смесях газов. Особую осторожность следует соблюдать с кислородом, реагирующим с маслом и водородом, дающим гремучую смесь при соотношении кислорода и водорода 1:7. На рис. 6.15 представлены варианты газового питания вакуумных установок.

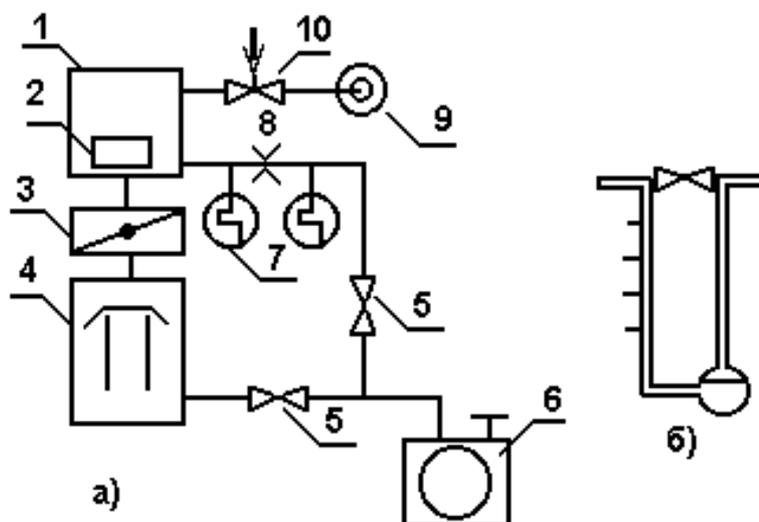


Рисунок 6.15 – Схема газового питания электрофизической установки: 1– вакуумная камера; 2 – генератор газа; 3, 5, 10 – вентили; 4, 6 – вакуумные насосы; 7 – датчики давления; 8 – диафрагма; 9 – расходомер; б) конструкция лабораторного расходомера.

Часто в вакуумных установках используются генераторы газа в виде замороженных исследуемых продуктов (воды и др), или соединений, выделяющих газ при нагревании ( $\text{CuCl}_2$  для генерации хлора, аспирина для генерации азота и многие др.). В современных установках используются расходомеры с установкой диафрагмы между датчиками давления. Далее разность давлений оцифровывается и подается на ЭВМ.

## 6.8 Сервисное обслуживание систем очистки воздуха

Для производства приборов микроэлектроники применяется очищенный воздух с количеством пылинок не более 3-4 шт на  $1 \text{ м}^3$  (класс помещения 1000). Из атмосферы с помощью мощного вентилятора через специальный фильтр воздух подается через кондиционер в систему воздушного питания помещения. В ряде случаев кондиционеры могут иметь системы оборотного воздушного потока или системы с улучшением спектрального состава воздуха.

Перед модулями загрузки и выгрузки устанавливается бокс дополнительной очистки воздуха. На рис. 6.16 представлен типовой модуль очистки воздуха «ЛАДА».

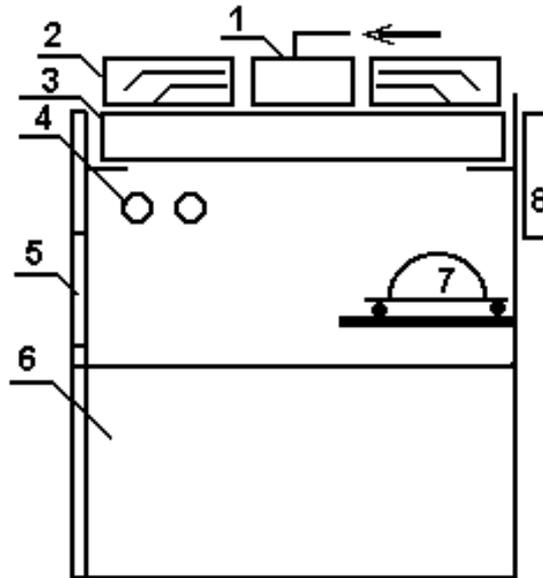


Рисунок 6.16 – Принципиальная схема модуля очистки воздуха ЛАДА: 1 – вентилятор; 2 – газораспределитель; 3 – фильтр; 4 – лампы освещения; 5 – рабочее окно; 6 – герметичное ограждение; 7 – емкость для изделий; 8 – блок электрической разводки.

Выхлопные газы ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ,  $\text{NO}$  и др.) от вакуумного механического насоса должны удаляться системой выхлопа. В передвижных течеискателях на выход механического насоса рекомендуется надеть специальный фильтр (например, от противогаса).

## 6.9 Сервисное обслуживание специальных установок

### 6.9.1 Сервисное обслуживание ударных упрочняющих установок

В последнее время начинают широко применяться установки для упрочнения материалов методом воздействия плазмы высокой энергии. В первом приближении такие установки содержат генератор импульсного напряжения (ГИН) в виде системы конденсаторов или индуктивностей. При производстве профилактических работ емкости должны находиться под постоянным заземлением, поскольку установки подобного типа имеют свойство накапливать электрический заряд в самых неожиданных местах (на корпусах конденсаторов, на кабелях и т.д.). Многие элементы схем и измерительного оборудования являются антеннами, наводящими потенциал на контуры оборудования. При изменении взаимного расположения элементов могут меняться параметры системы.

### 6.9.2 Сервисное обслуживание оборудования для проведения диффузии

Для проведения диффузии используются термические установки.

Они содержат камеру загрузки, пульт управления, печь с автоматикой для программного задания температуры и систему газового питания. Поточные линии (типа АПЛД-24-100), кроме вышеуказанного термического оборудования снабжены системами пылезащиты.

Управление основывается на сигнале с термопары. Термопара представляет собой две сваренные проволоки из разных материалов. Наибольшее распространение получили термопары следующих марок: ХА (хромель-алюмель), ХК (хромель-капель), Pt-Ro (платина-родий), ПП (платина-платинородий). Градуировка термопар проводится измерением термо ЭДС в кипящей воде.

Диффузенты являются ядами, что требует развития специальных предохранительных мероприятий. Высокая температура процесса ограничивает выбор материалов нагревателей по термостойкости и газовыделению. Перспективным нагревателем до 1500 С является нитрид кремния. Каждый материал имеет допустимую скорость подъема температуры вследствие возникновения температурных напряжений. Для кристаллов безопасная скорость подъема температуры  $\sim 2^{\circ}/\text{мин}$ , для стекла  $\sim 5^{\circ}/\text{мин}$ .

## **6.10 Эксплуатация и сервисное обслуживание установок нанотехнологии типа Катунь**

Установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) используются в нанотехнологиях для изготовления пленок и слоистых структур при создании приборов на арсениде галлия (GaAs), легированного различными элементами. К таким приборам относятся лавиннопролетные диоды, переключающие СВЧ-диоды с прыжковой проводимостью, полевые транзисторы с барьером Шоттки, интегральные оптические структуры, одноэлектронные транзисторы. Некоторые из установок МЛЭ: ЦНА, ЭПН-2, Ангара, Катунь, Riber. Французская фирма «Рибер» выпускает установки MBE-500 и MBE-1000 (Molecular Beam Epitaxy).

Установки принципиально не отличаются и в зависимости от марки оборудованы различными откачными средствами и аналитическим оборудованием.

### **6.10.1 Вакуумная система установки МЛЭ типа «Катунь»**

На рис.6.17 представлена вакуумная схема отечественной установки МЛЭ типа КАТУНЬ.

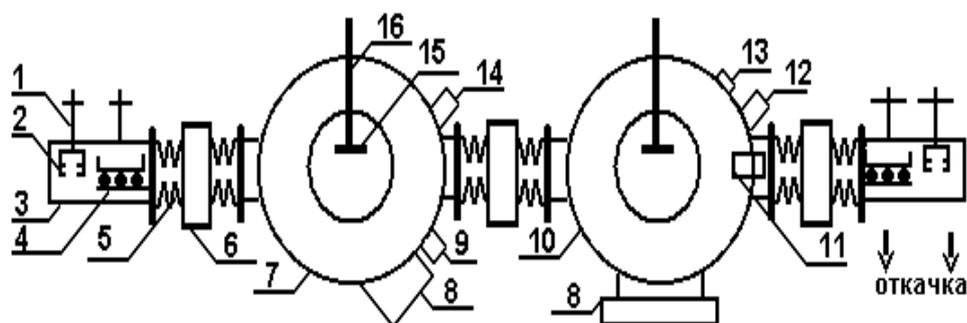


Рисунок. 6.17. – Схема установки МЛЭ. 1 – вакуумный затвор, 2 – магазин, 3 – корпус модуля загрузки, 4 – конвейер, 5 – сильфон, 6 – пневматический шлюз, 7 – камера роста структур, 8 – испарители, 9 – ионный источник, 10 – камера анализа структур, 11 – ОЖЕ- спектрометр, 12 – квадрупольный масс- спектрометр, 13 – ВИМС, 14 – дифрактометр быстрых электронов, 15 – подложка, 16 – манипулятор.

Предварительно очищенные подложки устанавливаются в магазине модуля загрузки. После откачки загрузочного модуля и камеры роста до давления  $10^{-4}$  Па, подложки по конвейеру через шлюзовое устройство подаются в камеру роста, где захватываются манипулятором. На манипуляторе происходит прогрев подложек до температуры  $\sim 600^\circ \text{C}$ . Затем давление понижается до  $10^{-8}$  Па, производится ионная очистка подложки и формирование пленки арсенида галлия. Контроль параметров роста проводится дифрактометром быстрых электронов. В камере анализа проводятся дополнительные исследования полученной пленки и состава газовой среды

На рис. 6.18 представлена вакуумной камеры установки КАТУНЬ.

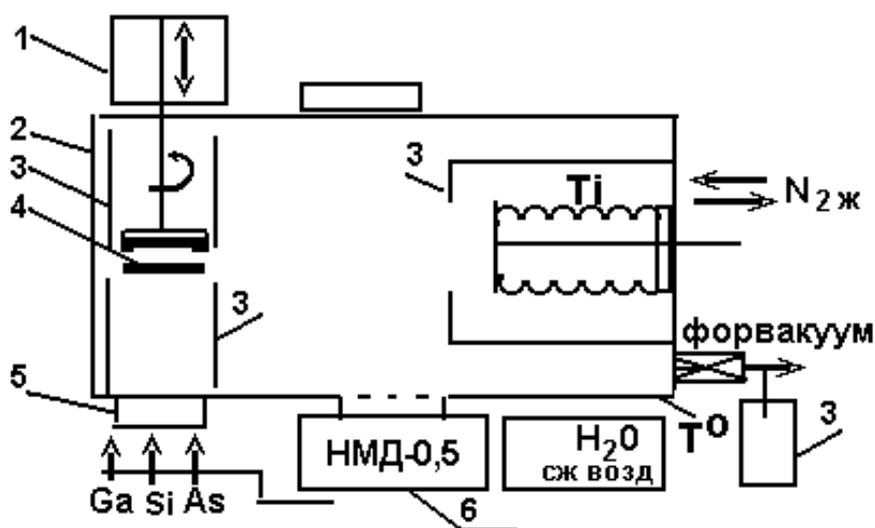


Рисунок 6.18 – Схема установки МЛЭ: 1 – манипулятор; 2 – вакуумная камера; 3 – криогенные панели; 4 – подложка; 5 – испарители; 6 – электроразрядный насос.

Для создания и поддержания вакуума используют магниторазрядные и сублимационные насосы совместно. Откачка до сверхвысокого вакуума с обезгаживанием всей системы длится обычно 20 – 48 ч. Прогрев вакуумной камеры проводится до температуры  $\sim 150^\circ\text{C}$ . Обезгаживание материалов (в частности мышьяка) выполняют при температуре  $250\text{--}400^\circ\text{C}$  в специальных нагревательных устройствах.

Отечественные установки для МЛЭ выполняются одно- и многокамерными. Они имеют до 8 молекулярных сменных источников с электропневматическими заслонками. С помощью манипулятора подложка перемещается внутри камеры и вращается вокруг оси, что позволяет выставлять ее не только под молекулярные пучки, но и последовательно устанавливая на позиции контроля. Возможен нагрев подложек до  $1000^\circ\text{C}$ . Пределы регулирования температуры источников  $300\text{--}1300^\circ\text{C}$  с допуском поддержания температуры  $1^\circ\text{C}$ . Манипуляторы рабочих камер имеют по 4 степени подвижности, с поворотом вокруг оси на  $360^\circ$ . Погрешность воспроизведения положения подложки при перемещении вдоль одной из координатных осей менее  $1\text{ мм}$ .

Аналитическая камера служит для анализа газовой среды и поверхности подложек. Камера может эксплуатироваться и самостоятельно для анализа различных объектов – в этом преимущество трех камерной установки. На аналитической камере установлены оже-спектрометр и квадрупольный масс-спектрометр с дифференциально откачиваемой сканирующей ионной пушкой. Диапазон регистрируемых массовых чисел  $1\text{--}1000\text{ а. е. м}$ .

Тигель помещен внутрь электронагревателя и танталового экрана. Ёмкость тигля  $1.6\text{ см}^3$ . Он может выполняться из графита, пиролитического нитрида бора или карбида бора. Легирующие материалы помещаются в нескольких тиглях, каждый из которых монтируется внутри съемной ячейки и имеет свои блоки питания, контроля температуры и управления. Над источниками молекулярных потоков (ячейками Кнудсена) устанавливается вымораживающая система (криопанель) для уменьшения потока загрязнений.

Через шлюз подложка вводится в камеру для анализов, где: ее поверхность очищают ионной бомбардировкой. Степень очистки контролируется оже-спектрометром и масс-спектрометром. Затем с помощью конвейера подложка перемещается в рабочую камеру и устанавливается в держателе манипулятора для проведения процесса эпитаксии.

### 6.10.2 ОЖЕ- спектрометр

Для анализа состава подложек методом ОЖЕ- спектроскопии используется закономерность отражения низкоэнергетических ( $\sim 100\text{ эВ}$ ) электронов от рода материала.

На рис. 6.19 представлена схема ОЖЕ- спектрометра. Подложка располагается под углом к вторичному электронному умножителю (ВЭУ). Электроны, отраженные от поверхности пленки, попадают на ВЭУ и усиливаются. По распределению тока судят о качестве структуры. В установках имеется анализатор для регистрации медленных электронов с энергией от 10 до 1000 эВ. В ряде случаев облучение полученной пленки проводят электронами с энергией 1—12 кэВ. В этом случае используют сцинтиллятор и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

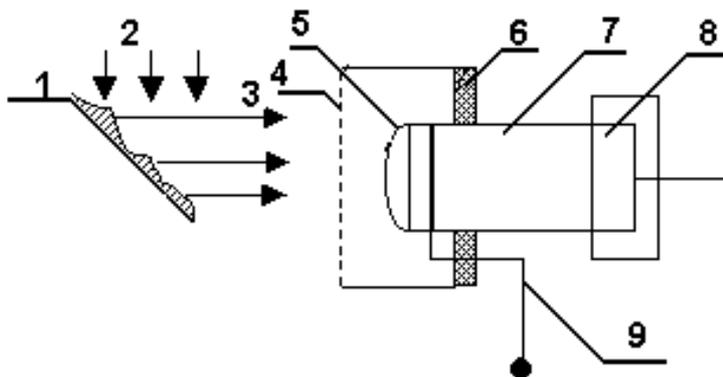


Рисунок 6.19 – Схема регистрации вторичных электронов: 1 – объект; 2 – поток электронов; 3 – вторичные электроны; 4 – сетка; 5 – сцинтиллятор; 6 – изолятор; 7 – световод; 8 – ФЭУ; 9 – высоковольтный ввод.

Удары электронов с энергией 10-12 кэВ о поверхность сцинтиллятора вызывают световые вспышки. Световые кванты через световод передаются в ФЭУ, который преобразует их в электрические сигналы.

### 6.10.3 Молекулярные источники

На рисунке 6.20 изображен типовой источник молекулярного потока. Тигель 4 из нитрида бора разогревается электрическим током, проходящим по танталовой проволоке 3, продетой в сапфировые капиллярные трубки. Многослойные экраны 1 из танталовой фольги толщиной 0,12 мм экранируют тигель так, что для поддержания температуры 1210°С требуется мощность всего 26 Вт.

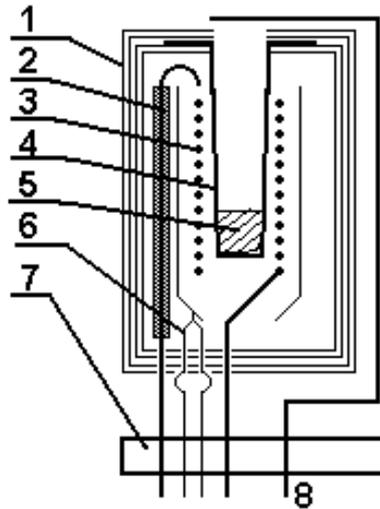


Рисунок 6.20 – Схема испарителя: 1 – экран; 2 – ввод нагревателя; 3 – нагреватель; 4 – тигель; 5 – испаряемый материал; 6 – термопара; 8 – привод заслонки

Спираль нагревателя тигля изготовлена из молибдена. Тигель выполнен из пиролитического нитрида бора. Тепловые экраны выполнены из тантала.

#### 6.10.4 Манипулятор

Манипулятор служит для захвата подложки и удержания ее на период формирования структуры. На рис. 6.21 представлена схема манипулятора.

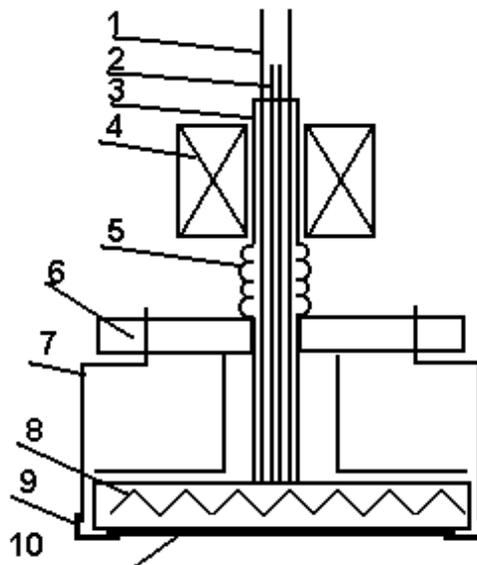


Рисунок 6.21 – Устройство манипулятора: 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 – втулка; 4 – магнитный привод вращения; 5 – сильфон; 6 – монтажный фланец; 7 – держатель; 8 – нагреватель подложки; 9 – захватчик подложки; 10 – подложка.

Манипулятор позволяет линейно перемещать подложку на длину не менее 1500 мм с погрешностью фиксации 1 мм. В рабочей технологической камере максимальная температура нагрева подложки на манипуляторе достигает 800°C с допуском поддержания выбранной величины 1°C.

### 6.10.5 Дифрактометр быстрых электронов

Дифрактометр быстрых электронов (рис. 6.22) представляет собой источник электронов с прямонакальным катодом. Электронная пушка дифрактометра быстрых электронов с энергией до 20 кэВ формирует пучок диаметром менее 200 мкм. При дифракционных измерениях с помощью быстрых электронов, угол падения электронного пучка равен 1°, а дифрактограмму наблюдает оператор на экране диаметром 100 мм. Оператор может определить степень кристаллизации, отсутствие ее, а также параметры элементарной ячейки решетки.

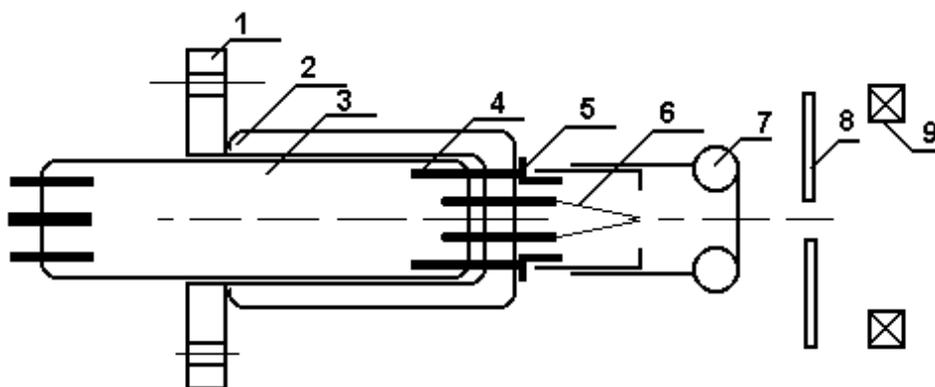


Рисунок 6.22 – Конструкция дифрактометра установки КАТУНЬ. 1 – посадочный фланец, 2, 3 – изоляторы; 4 – токовводы, 5 – токоввод модулятора, 6 – катод; 7 – выходной электрод; 8 – анод; 9 – магнитная линза

Диагностический электронный пучок фокусируется на подложке, отражается от нее и направляется на люминесцентный экран.

Сервисное обслуживание источников частиц заключается в их чистке, замене отдельных элементов, профилактике систем ввода напряжения и т.д. Особенностью является предварительное ознакомление со сборочным чертежом, а также соблюдение последовательности сборки и разборки. Источники с накаливаемым катодом часто требуют смены вольфрамового прямонакального катода. Чаще всего катоды готовятся предварительно. Для этого вольфрам очищается в щелочи от поверхностного защитного покрытия (акводага), а затем на оправке формируется сам катод. Для уменьшения изломов при формировании катод

может подогреться горелкой до температуры ниже температуры рекристаллизации (до слабого красного каления). Держатели катода крепятся к вольфрамовой проволоке на контактную сварку. Для улучшения качества соединения сварка проводится через никель.

Обработка электродов проводится металлическими щетками, наждачной бумагой. В ряде случаев высоковольтные электроды могут полироваться алмазными пастами например из эльбора. Чем белее паста – тем она мельче. Однако после паст необходимо тщательно удалять масла бензином «калоша» и спиртом. После переборки источник необходимо подвергать тренировке на напряжениях выше номинальных.

### 6.10.6 Электронно-лучевой испаритель тугоплавких материалов

Для испарения тугоплавких материалов в установке эпитаксии предусмотрен электронно-лучевой испаритель. На рис. 6.23 представлена его схема.

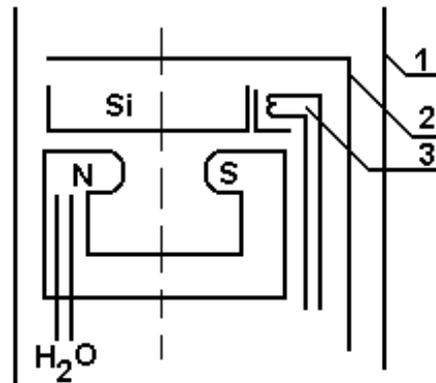


Рисунок 6.23 – Схема электронно-лучевого испарителя материалов: 1 – экран; 2 – заслонка; 3 – катод.

Электронно-лучевой испаритель рассчитан на напряжение до 5 кВ при токах до 100 мА. Наличие катода 3 обеспечивает эмиссию электронов. Электроны сосредотачиваются в области максимума магнитного поля и нагревают материал (кремний).

### 6.10.7 Дополнительное ионно-лучевое оборудование установки МЛЭ

В установке МЛЭ имеются две ионные пушки с энергиями газовых ионов 0,5–5 кэВ и диаметром пучков 2–5 мм. Плотность тока ионов аргона из ионной пушки типа С-40 для очистки подложек можно изменять от 0 до 200 мкА/см<sup>2</sup>, а их энергию от 30 эВ до 3 кэВ. В процессе очистки ионный пучок диаметром 2,5 мм сканирует по площади до 100 мм<sup>2</sup>. Это позволяет проводить не только очистку подложек, но и их послойное травление.

В составе установки имеется квадрупольный масс-спектрометр для анализа спектра потоков и остаточных газов.

### 6.10.8 Технология расшифровки процесса молекулярно-лучевой эпитаксии

Процесс роста эпитаксиальной пленки арсенида галлия наблюдается методом дифрактометрии быстрых электронов (ДБЭ)

Электронный пучок падает на кристаллическую поверхность под углом  $1-2^\circ$  (рис. 6.24). Пучок отражается от рядов кристалла и формирует на люминесцентном экране отражение (рефлекс) в виде световых точек или полос (тяжей). Расстояние между рефlekсами  $d$  связано с расстоянием  $a$  между рядами атомов (периодом) соотношением:

$$ad = L\lambda, \quad (6.6)$$

где  $L$  – расстояние от образца до экрана;  $\lambda$  – длина волны де Бройля.

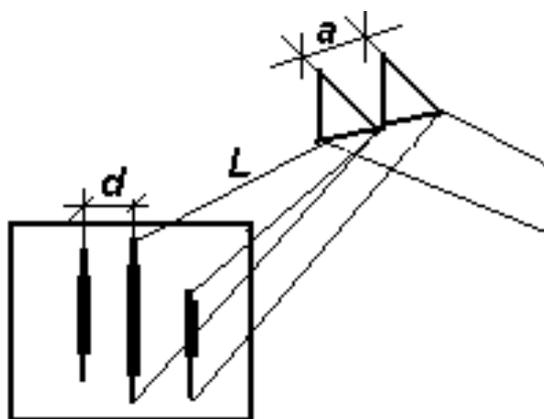


Рисунок 6.24 – Схема формирования рефлексов методом ДБЭ

В табл. 6.1 представлена расшифровка картины ДБЭ.

Таблица 6.1 - Расшифровка картины ДБЭ

Вид картины	Свойства	Вид картины	Свойства
Диффузный фон	Аморфный материал	Полукольцо	Поликристалл
Толстый рефлекс	Грубая поверхность	Распад полосы в крупную сетку	Грубая поверхность
Ряды точек, тяжей	Монокристалл		
Тяжи вейером (линии Кикучи)	Высокое совершенство	Исчезание линий вейера	Огрубление поверхности
Длинные тяжи	Большой зародыш	Узкие тяжи	Совершенная поверхность
V-образный рефлекс	Наложение от двойниковой упаковки		

Число тяжей совпадает со степенью совершенства.

## 6.11 Методы измерения скорости формирования толщины пленок

### 6.11.1 Экспресс - методы сравнительного анализа толщины пленок

Наряду с объективными способами измерения, существует ряд экспресс - методов сравнительного анализа толщины пленок. Некоторые из них:

1) микроскопический анализ. Анализ пленки производят под измерительными микроскопами, которые измеряют толщину по сдвигу интерференционных полос;

2) эталонный анализ. В ряде случаев толщину пленки сравнивают с эталоном. Широкое распространение получил визуальный контроль полупрозрачных пленок толщиной 200- 700 ангстрем;

3) микровзвешивание. Технически этот способ реализуется напылением паров на развитую стрелку измерительного прибора;

4) метод стравливания. Этот метод основан на относительно постоянной скорости травления пленок в определенном травителе. Иногда в травитель добавляют уксусную кислоту для уменьшения скорости травления;

5) метод вихревых токов. При большой толщине пленки ее толщину можно оценить по ЭДС, наведенной вихревыми токами. Этот метод реализован в приборах типа ВН-30 Н и ВТ-40 НЦ;

6) метод электрического пробоя. Этот метод широко применяется для испытаний диэлектрических пленок;

7) метод пропускания излучения. В качестве зондирующего излучения применяется оптическое излучение, рентген, бетта и гамма излучение, ультразвук.

Скорость напыления пленки и ее толщина взаимосвязаны. Зная толщину пленки можно определить скорость ее конденсации на подложке.

На рис. 6.25 представлены схемы реализации некоторых методов измерения толщины пленок: по изменению сопротивления (рис.6.25 а); по изменению емкости (рис. 6.25 б); по просвету пленки (рис. 6.25 в).

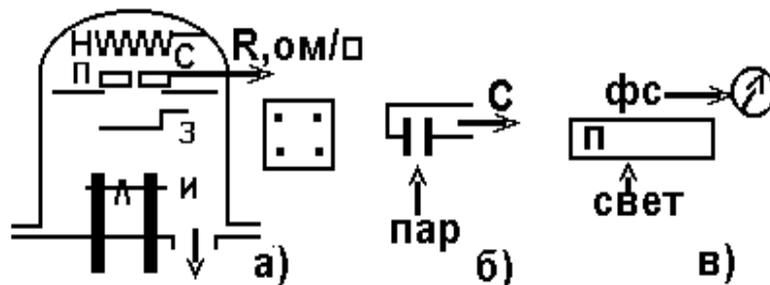


Рисунок 6.25 – Схемы реализации методов измерения толщины пленок:  
И – испаритель; З – заслонка; С – свидетель; Н – нагреватель; П – подложка.

### 6.11.2 Резистивный метод измерения толщины пленок

Из закона Ома известна зависимость сопротивления  $R$  от длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$ :

$$R = \rho l / S, \quad (6.7)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление пленки.

Учитывая, что для пленки площадь поперечного сечения равна произведению толщины  $d$  на ширину  $B$  т.е.:

$$S = dx \cdot B, \quad (6.8)$$

разрешая исходное уравнение относительно  $d$ , находим:

$$d = \rho x l / R_n B, \quad (6.9)$$

где  $R_n$  – поверхностное сопротивление пленки. Единица измерения поверхностного сопротивления: ом / □ (ом на квадрат).

Диапазон измеряемых толщин резистивным методом составляет 1-5 мкм.

Для измерения электрического сопротивления в установке для нанесения пленки рядом с рабочей подложкой помещается «свидетель» – подложка с контактами.

### 6.11.3 Ионизационный метод измерения скорости формирования пленок

В основе метода лежит принцип сравнения сигналов с ионизационных датчиков давления с паром и без пара. На рис. 6.26 представлена схема реализации метода на базе двух ионизационных датчиков давления. На экране осциллографа отслеживается разность сигналов. В последних разработках подобных приборов (ИСТИ-1, ИСТИ2) предусмотрены пересчетные устройства для обработки разности сигналов. Погрешность метода составляет ~ 10%.

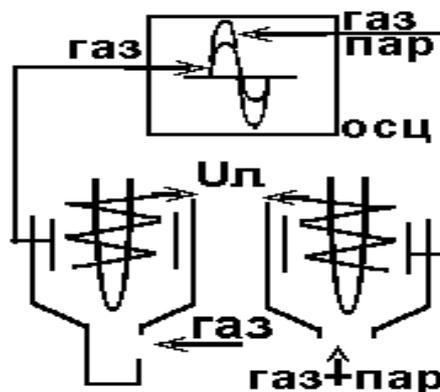


Рисунок 6.26 – Метод измерения толщины на базе двух ионизационных датчиков давления

### 6.11.4 Оптический метод измерения толщины пленок

В основу оптического метода измерения толщины нанесенной пленки положена зависимость коэффициента пропускания света от толщины пленки. Световой поток  $I$  после прохождения света через пленку толщиной  $d$  определяется относительно первоначального потока  $I_0$  соотношением Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 \cdot \exp(-kd), \quad (6.10)$$

где  $k$  – коэффициент поглощения, зависящий от материала пленки.

В табл. 6.2 приведены коэффициенты поглощения для некоторых пленок и материалов.

Таблица 6.2 – Коэффициенты поглощения излучения

Материал	Алюминий	Медь	Серебро	Золото	Никель	Стекло
K	$1 \times 10^6$	$5 \times 10^5$	$8 \times 10^5$	$6 \times 10^5$	$7,8 \times 10^5$	$7 \times 10^{-1}$

Оптический метод позволяет измерять полупрозрачные пленки от 100 до 800 ангстрем (0,8 мкм). На рис. 6.27 представлена схема реализации оптического метода измерения на базе эллипсометра типа ЛЭМ.

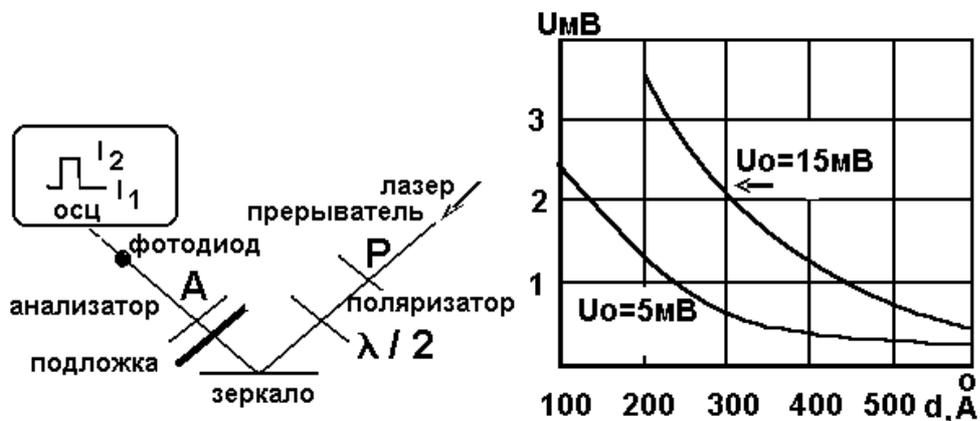


Рисунок 6.27 – Схема эллипсометра и его градуировочные кривые для измерения толщины пленки на просвет

Первоначально без подложки устанавливается уровень опорного сигнала  $U_0$  с фотодиода. Затем в луч лазера, отраженный от зеркала, вставляется подложка. По изменению сигнала оценивается толщина пленки. В ряде случаев толщина пленки может быть определена сравнением по эталону.

### 6.11.5 Эллипсометрический метод измерения толщины пленок

Метод основан на эффекте разности коэффициентов отражения

поляризованного света от пленки. На рис.6.28 представлена схема реализации метода.

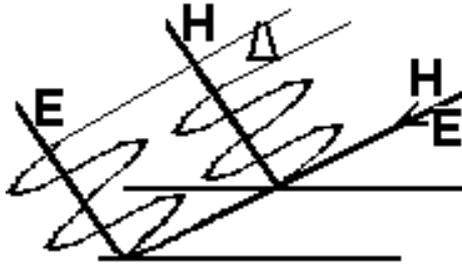


Рисунок 6.28 – Эффект разности хода при эллипсометрическом измерении толщины пленки

Известно, что свет представляет собой электромагнитную волну. Луч света можно представить в виде небольшой окружности с осями  $E$  и  $H$ , аналогично осям  $X$  и  $Y$ . При освещении подложки под углом Брюстера (для стекла  $57^\circ$ ) синусоида  $H$ -волны идет параллельно поверхности и отражается от нее по законам классической оптики. Синусоида  $E$ -волны идет перпендикулярно поверхности и врезается в нее на толщину пленки. Затем  $E$ -волна отражается от основания пленки и выходит из нее. В результате чего после отражения возникает разность хода  $E$  и  $H$  волн (излучение оказывается эллиптически поляризованным). Разность фаз между  $E$  и  $H$  волнами ( $\Delta$ ) пропорциональна яркости отраженного излучения и несет информацию о толщине пленки. Метод позволяет измерять толщину пленки в пределах 20-15000 ангстрем с точностью 2-3%. К недостаткам метода следует отнести приспособленность в основном к пленкам  $\text{SiO}_2$ , сложность настройки и обслуживания эллипсометра.

#### 6.11.6 Измерение толщины прозрачной пленки и показателя ее преломления с помощью эллипсометра

1. Подложка ложится на зеркало и на фотодиоде получается максимальный сигнал при нулевых углах лимба на поляризаторе и анализаторе.

2. Находится значение угла  $P1$ , при котором в пределах  $P=45-135^\circ$  сигнал минимален.

3. Находится значение угла  $A1$ , при котором в пределах  $A=0-90^\circ$  сигнал минимален.

4. В пределах  $P= 135-225^\circ$  находится  $P2$  для минимального сигнала.

5. В пределах  $A= 90-180^\circ$  находится  $A2$  для минимального сигнала

6. Рассчитывается разность хода электрической и магнитной составляющих световой волны  $\Delta$  и их разность фаз  $\psi$ .

$$\Delta = P1 + P2;$$

$$\psi = 1/2 [A1 + (180 - A2)].$$

7. По круговой диаграмме (типа «жук») определить показатель преломления и толщину пленки. На рис.6.29 представлена круговая диаграмма типа «жук».

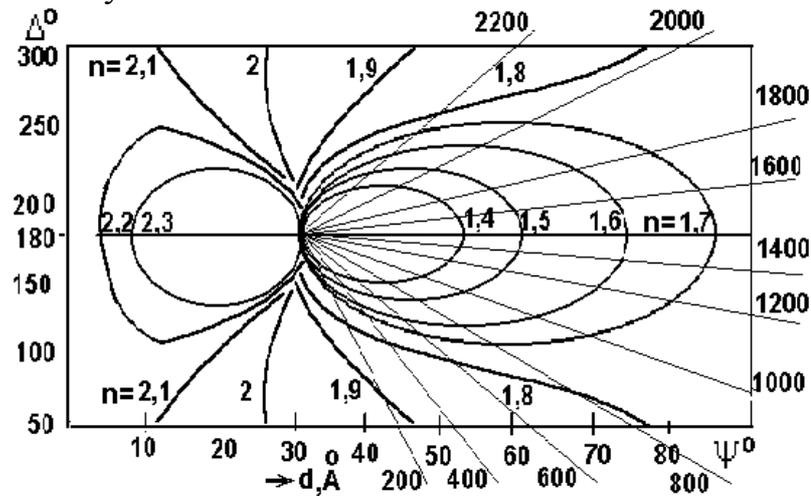


Рисунок 6.29 – Круговая диаграмма эллипсометра типа «жук»

В поле диаграммы цифрами обозначены показатели преломления. Толщины пленок в ангстремах находятся на лучах диаграммы. Более точно толщина пленки определяется из прилагаемых к описанию прибора диаграмм зависимости толщины пленки  $\delta = f(\psi)$ ,  $\delta = f(\Delta)$ .

## 6.12 Контрольные вопросы к главе 6

1. Каковы юридические и технические правила устройства электроустановок?
2. Какие аварийные режимы могут проявиться на электрофизических установках и как они устраняются?
3. Каковы методы быстрого поиска негерметичности вакуумных систем?
4. В чем отличие сервисного обслуживания установок с масляными и безмасляными средствами откачки?
5. Как устроен модуль очистки воздуха для технологических целей?
6. Каков порядок утилизации отработанных материалов и веществ?
7. Каковы особенности сервисного обслуживания источников заряженных частиц?
8. Каковы особенности охлаждения элементов, находящихся под высоким напряжением?
9. Каковы особенности сервисного обслуживания ударных установок?
10. Как проводится контроль параметров пленок?

## 7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология материалов и изделий представляет собой широкую область знаний. В данном издании изложены лишь основы технологии материалов электронной техники. Рассмотренные технологические процессы не являются единственно возможными. При изготовлении электронных приборов применяют набор универсальных технологических операций, выполняемых в определенной последовательности. С развитием электроники обновляется и совершенствуется технология изготовления электронных приборов. Основным достижением микроэлектроники является создание новых технологических процессов с использованием ЭВМ. Основной тенденцией развития современной микроэлектроники является развитие нанотехнологий в комплексе с автоматизацией технологических процессов. Определяющей является технология, основанная на функциональных методах управления технологическими процессами. Тенденция перехода к нанотехнологиям с размерами  $\sim 0,05$  мкм сопровождается переходом к новым физическим явлениям, вследствие которых резко меняются свойства твердого тела. Начинают проявляться размерные и квантовые эффекты. Достижения в области технологии получения и применения новых материалов требует смены парка технологического оборудования для расширения его технологических возможностей. Большие перспективы открываются перед вакуумными и плазменными технологиями при создании принципиально новых наноматериалов и особо чистых веществ. Благодаря широкому применению моделирования повышается качество и снижается себестоимость продукции. Создаются системы автоматизированного проектирования и банки данных технологических процессов. Создание воспроизводимых и дешевых перспективных технологий определяет ускорение научно-технического прогресса.

## 8 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

К разделу 4. Основы технологии изготовления приборов и устройств вакуумной, плазменной, твердотельной и микроэлектроники.

1. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А, Величко А.А. Процессы микро– и нанотехнологии. – Томск: ТУСУР, 2005. – 315 с.
2. Куц Г.Г. Оптоэлектронные устройства и приборы. – СПб.: Лань, 2001. – 176 с.
3. Пихтин. А.Н. Оптическая и квантовая электроника. – М.: Высшая школа, 2001. – 574 с.

К разделу 5. Автоматизация процессов производства электронных приборов и устройств.

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования

Учебник для ВУЗов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.

2. Степанов М.Ф. Автоматизация эскизного проектирования систем автоматического управления.: Учебное пособие / М.Ф. Степанов. Саратов, ГТУ, 2000, 110 с – ISBN 5-7433-0658-3.

3. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR, схемы, алгоритмы, программы. – М.: Изд. Дом «Додека XXI», 2004. – 250 с.

К разделу 6. Эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования.

1. Орликов Л.Н. Технология и автоматизация производства электронных приборов. – Томск: ТМЦДО, 2001. – Ч.1-2. – 150 с.

2. Симонов В.В. Оборудование ионной имплантации. М.: Радио и связь 1988, 182 с – ISBN 5-256-00071

3. Браун Я., Келлер Р, Холмс А и др. Физика и технология источников ионов. – М.: Мир, 1998. – 500 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Учебное пособие Часть 2  
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