

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

Кафедра электронных приборов

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие Часть 2
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

УДК 621.387.002

Орликов Леонид Николаевич.

Основы технологии оптических материалов и изделий: учебное пособие (часть 2) для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / 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. - 99 с.

В учебном пособии ч. 2 рассмотрены основы технологии изготовления материалов и изделий. Кроме того, рассмотрены основы автоматизации процессов производства; эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования. Большинство разделов содержит математические модели для инженерных расчетов.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Основы технологии оптических материалов и изделий».

© Орликов Леонид Николаевич, 2012

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.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие Часть 2
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____ Л.Н.Орликов
« ___ » _____ 2012 г

Содержание

4	Основы технологии изготовления оптических материалов и изделий	6
4.1	Пленочная технология	6
4.2	Процесс эпитаксии в технологии изготовления элементов фотоники	25
4.3	Литография	29
5	Основы автоматизации процессов производства оптических материалов и изделий	40
5.1	Общая схема регулирования технологического процесса	40
5.2	Моделирование производственных процессов	41
5.3	Задающие устройства и первичные системы управления	42
5.4	Порядки и типы управляющих систем технологического оборудования	44
5.5	Типичные законы управления типа П, ПИ, ПИД	44
5.6	Многоуровневые системы децентрализованного управления	45
5.7	Программное обеспечение технологических процессов	46
5.8	Пневмоавтоматика	47
5.9	Числовое программное управление	49
5.10	Автоматизация технологических процессов с помощью ЧПУ	56
5.11	Языки программирования технологического оборудования	58
5.12	Язык релейно-контактных символов	58
5.13	Язык Булевых уравнений	58
5.14	Языки типа "Время-команда", "Время-параметр"	59
5.15	Язык управления типа КАУТ	59
5.16	Язык типа КАУТ	60
5.17	Система управления "САМАС" ("КАМАК")	60
5.18	Подсистема управления газовыми потоками	62
5.19	Язык программирования измерительной аппаратуры SCPI	63
5.20	Робототехника	64
5.21	Системы «КАМАК» и «АРМ» для автоматического регулирования технологических процессов	66
6	Эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования. Сертификация и инструкции по эксплуатации	68
6.1	Децентрализованные системы обеспечения работоспособности вакуумной установки	68
6.2	Сертификация и номенклатура оборудования	68
6.3	Правила устройства электроустановок при проектировании новых производств	69
6.4	Профилактика	70
6.5	Сервисное обслуживание	71
6.6	Технология расшифровки процесса молекулярно-лучевой эпитаксии	91
6.7	Классификация причин отказов	92
6.8	Инструкции по поиску негерметичности вакуумных систем	95
6.9	Инструкции по эксплуатации типовых вакуумных установок с масляными средствами откачки	95

6.10 Аварийные режимы вакуумного оборудования и методы реанимации режимов.....	96
Список литературы	97

4 Основы технологии изготовления оптических материалов и изделий

4.1 Пленочная технология

4.1.1 Назначение и типы пленок

В настоящее время пленки различных материалов применяются в качестве покрытий различного назначения (декоративные, антикоррозионные, диэлектрические, упрочняющие и многие другие). В зависимости от назначения пленки и условий ее эксплуатации пленки наносят различными способами. Это получение пленок из растворов, а также методами напыления в вакууме и при атмосферном давлении, методами осаждения из паров солей и аэрозолей при градиенте температур, методами распыления материалов ионной бомбардировкой и т.д. В зависимости от конкретных условий осаждения, пленки одного и того же вещества подразделяются на 4 типа:

- 1) аморфные - характеризующиеся пористой структурой, отсутствием кристаллической решетки. Подобные пленки имеют очень большое поверхностное сопротивление;
- 2) мелкозернистые (размер кристаллов менее 100 ангстрем);
- 3) крупнозернистые, с размером зерен более 100 ангстрем;
- 4) монокристаллические (эпитаксиальные). Пленки этого типа представляют собой кристаллическую решетку атомов данного материала и обладают малым сопротивлением.

4.1.2 Методы получения пленок

Среди большого разнообразия методов получения пленок наибольшее распространение получили пленки, получаемые следующими способами:

- 1) напыление пленок методом термического нагрева и испарения материалов в вакууме. По способу нагрева испарителя термовакuumное испарение подразделяют на токовое, электронно-лучевое, лазерное, с использованием СВЧ нагрева и др.;
- 2) напыление пленок может осуществляться в разряде при ионном распылении материала катода (катодное распыление). Разряд может быть стимулирован продольным магнитным полем (нанесение пленок в разряде Пеннинга) или скрещенным магнитным и электрическим полями (магнетронное напыление). Следует отметить, что этому методу присуща более низкая, по сравнению с термическим методом, скорость нанесения пленки;
- 3) напыление пленок может производиться из материала электродов, испаряемых при горении дугового разряда.

4.1.3 Термовакuumное формирование пленок

Среди множества методов изготовления пленок наибольшее распространение получил метод термического испарения материалов в вакууме. На рис. 4.1 представлены схемы реализации некоторых методов термовакuumного нанесения пленок. Процесс токового испарения пленки (рис. 4.1, а) происходит следующим образом.

В камере достигается давление, достаточное для пробега молекулами пара размеров камеры ($\sim 10^{-2}$ Па). В процессе откачки газа включается нагреватель (Н) и проводится прогрев и обезгаживание подложки (П), затем происходит нагрев испарителя (И) с расположенной на нем навеской. После этого, с помощью электромагнита, открывается заслонка (З) и материал пылится на подложку через трафарет.

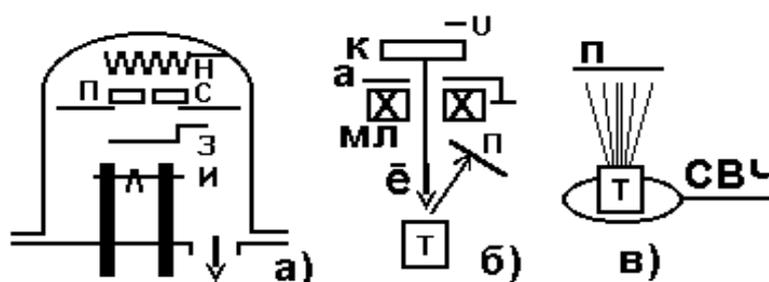


Рисунок 4.1 - Схемы термовакuumного формирование пленок

О толщине напыления свидетельствует расположенное рядом с подложкой стекло, называемое свидетелем (С).

Главное достоинство этого метода его универсальность, т.е. возможность получать на одной и той же вакуумной установке всю пассивную часть пленочной микросхемы, состоящую из слоев металлов, сплавов и диэлектриков, имеющих различные толщину и конфигурацию. В установках промышленного типа предусмотрена возможность многократного напыления без разгерметизации рабочей камеры. Для этого создаются карусели подложек и испарителей, способные перемещаться в вакууме относительно друг друга. Наличие каруселей позволяет, испаряя различные вещества с разных испарителей, получать многослойные тонкие пленки.

На рис. 4.1, б представлена схема электронно-лучевого испарения. На катод (К) электронно-лучевой пушки подается отрицательный потенциал. Электроны устремляются в направлении анода (а), фокусируются магнитной линзой (МЛ) и попадают в тигель (Т). Пары материала формируются на подложке (П). На рис 4.1, в представлена схема испарения пленок на основе СВЧ нагрева. Одно из достоинств этого метода заключается в возможности испарения дозированной навески без дорогостоящего тигля (“на лету”) в условиях конвейерного производства.

4.1.4 Процессы термического испарения материалов

За температуру испарения материала принята температура, при которой давление испаряемых паров равно 1 Па ($\sim 10^{-2}$ мм рт.ст.). Эта температура гораздо выше температуры плавления и приводится в соответствующей справочной литературе.

Большинство испаряемых в вакууме веществ являются частичными или полными сублиматорами (т.е. возгоняются с частичным плавлением или без него). Яркие сублиматоры: Cr, Zn, Cd. Частичные сублиматоры: Pb, Ti, Fe.

Для получения качественных пленок к испарителю предъявляется ряд требований:

1) у испарителя должно быть малое давление насыщенных паров, чтобы пары испарителя в меньшей степени подмешивались к парам испаряемого материала;

2) испаритель должен удерживать расплавленный материал некоторое время (т.е. быть смачиваемым);

3) испаритель не должен давать сплава или химической реакции с навеской.

Удовлетворяют вышеперечисленным требованиям незначительное число металлов. В качестве испарителей, нагреваемых электрическим током, используют W, Mo, Ni, Fe, Ta, Pt. В качестве материалов тиглей используют нитриды, карбиды, оксиды: AlN, TiN, TiC, SiC, ThO, BeO, ZrO, Al₂O₃. Существуют таблицы с рекомендациями предпочтительного метода испарения и материала испарителя. Тугоплавкие материалы рекомендуется испарять электронным лучом или в разряде. В таблице 4.1 представлен фрагмент сочетаемости материалов при термическом испарении пленок

Таблица 4.1 - Сочетаемость некоторых материалов при напылении пленок

Навеска	Pb	Al	Ti	BaO	Zr
Испаритель	Fe	W	тигель ZrO	Al ₂ O ₃ .	Gf
Метод	Токовый	Токовый	эл.луч	СВЧ	эл.дуга

Коэффициент полезного действия при испарении материалов невысок. Это связано с тем, что не все пары перехватываются подложкой, кроме того, часть паров рассеивается на газе или образует с ним интерметаллические соединения. При испарении материалов выполняется баланс между числом испаренных молекул ($N_{и}$) и числом конденсированных ($N_{к}$), площадью, в которую происходит испарение ($S_{и}$) и площадью подложки ($S_{п}$):

$$N_{к} S_{п} = N_{и} S_{и};$$

$$КПД = S_{п} / S_{и}.$$

Число испаренных молекул может быть определено через поверхностную плотность атомов N_s и энергию испарения (E) по соотношению:

$$N_{и} = N_s e^{-E/kT}$$

Для металлов поверхностная плотность атомов при температуре испарения $N_s = 10^{15} \text{ 1/см}^3$. Энергии испарения являются табличными величинами (для алюминия $E = 3 \text{ эВ}$). Удельную скорость испарения материала ($\text{г/с с } 1 \text{ см}^2$) можно определить по формуле:

$$V = 6 \times 10^{-4} \sqrt{M/T},$$

где M - молекулярный вес, T - температура.

Концентрация молекул газа в остаточной среде в вакуумной камере может быть определено по соотношению:

$$N_{г} = P_{г} / (2 \pi n k T)^{0.5}$$

Расчет показывает, что при температуре испарения при давлении в камере 10^{-3} Па концентрация газа составляет $\sim 10^{14} \text{ 1/см}^3$ (т.е. близка к концентрации испаряемых паров). В таблице 4.2 представлена тенденция изменения концентрации испаренных атомов от температуры.

Таблица 4.2 - Тенденция изменения концентрации паров от температуры для испарения железа

$T + \Delta T$	$T^0 \text{ C}$	$N_{исп} \text{ 1/м}^3$
$T_{исп}$	1500	10^{17}
$T_{исп} + 0,1 T$	1650	10^{18}
$T_{исп} + 0,2 T$	1800	10^{19}

Даже незначительное увеличение температуры испарения значительно изменяет концентрацию испаренных атомов.

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

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

где f - коэффициент конденсации, P - давление паров испаряемого материала, m - молекулярный вес конденсируемого материала, K - постоянная Больцмана ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$).

Толщина образующейся пленки определяется по формуле:

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

где G - вес испарившегося вещества, L - расстояние между испарителем и подложкой, ρ - плотность материала кг/м^3 .

Можно определить толщину конденсата пленки d , если известна скорость испарения $V \text{ кг/сек с } 1 \text{ м}^2$, плотность потока $\gamma = 1/\text{м}^3$ и расстояние до подложки r :

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

где β - угол осаждения конденсата в градусах.

4.1.5 Электронно-лучевое испарение

Способность электронного луча развивать большую температуру используется для испарения материалов. Электронный луч направляется в тигель с испаряемым материалом или фокусируется на материал, подверженный испарению (безтигельное испарение). Особенности электронно-лучевого испарения состоят в следующем:

1) электроны, отражаясь от окрестности тигля, производят ионизацию газа, стимулируют процессы десорбции газа. Это требует увеличения производительности откачных средств;

2) напыляемая поверхность может заряжаться статическим зарядом. Заряд поверхности может вызывать пробой по пленке и нарушать ее *адгезию* (степень сцепления с подложкой);

3) пары испаряемого материала могут попадать в объем электронной пушки, вызывать металлизацию электродов, менять вольтамперную характеристику, вызывать пробой межэлектродного промежутка. Эти обстоятельства требуют автоматических устройств, для поддержания стабильности напряжения и тока разряда, фокуса электронного пучка и давления газа.

4.1.6 Испарение сплавов

По закону Рауля *составляющие сплава испаряются независимо друг от друга*, подобно чистым металлам. Как следствие этого закона особенность испарения сплавов состоит в том, что при изменении температуры состав пленки меняется относительно состава сплава. Это связано с различным давлением паров испаряемых компонент. Переход в газовую фазу связан с разложением (диссоциацией) или соединением (ассоциацией) молекул. Для каждого сплава степень ассоциации и диссоциации различна.

4.1.7 Процессы конденсации пленок

При конденсации пленок из точечного источника выполняется косинусный закон распределения толщины напыляемой пленки. Это связано с тем, что интенсивность напыления обратно пропорциональна расстоянию, а расстояние между испарителем и подложкой по оси системы меньше.

Конденсация пленки начинается с центров конденсации. Зародышеобразование пленки формируется в местах минимума поверхностной энергии (чаще в местах недостаточно подвергнутых очистке). На рис. 4.2 представлена потенциальная диаграмма и фрагмент реальной поверхности, иллюстрирующие процесс формирования пленки.

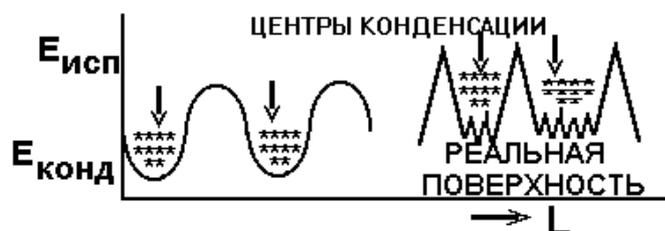


Рисунок 4.2 - Потенциальная диаграмма и фрагмент реальной поверхности

В первую очередь на подложку "садутся" молекулы газов с низкой энергией связи. Для таких газов как: N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 $E_{\text{конд}}=0,05$ ЭВ, для металлов $E \sim 1-2$ эВ. Для повышения качества пленок (в первую очередь адгезии) подложку прогревают для десорбции газов и низкоэнергетичных комплексов. При этом скорость напыления несколько снижается т.к. уменьшается вероятность прилипания паров вследствие Максвелловского распределения энергии молекул.

Существует оптимальное экспериментально подобранное соотношение температуры подложки и толщины пленки для каждого испаряемого материала.

4.1.8 Условия, влияющие на формирование пленки при термовакuumном напылении

При напылении пленок необходимо выполнить несколько условий, существенно влияющих на конденсацию пленок. Основные условия из них следующие:

– **соотношение между давлением остаточных газов и давлением насыщенных паров.** Оно влияет на количество газа, содержащегося в пленке. В последнее время развиваются методы импульсного напыления, при которых роль остаточной атмосферы минимальна;

– **степень разрежения.** Глубина вакуума влияет на среднюю длину свободного пробега молекул, которая приблизительно рассчитывается по формуле:

$$L=0,63 \times 10^{-3} / P,$$

где P - в Па, а L - в м.

Глубина вакуума влияет на степень загрязнения пара окислами, карбидами, нитридами и прочими соединениями. Установлено, что для напыления качественных пленочных проводников, резисторов, индуктивности и емкостей достаточны условия технического высокого вакуума, а для получения полупроводниковых пленок необходимы условия сверхвысокого вакуума $10^{-7} - 10^{-10}$ Па;

– **структура поверхности подложки.** Степень шероховатости и загрязнение подложки препятствуют сплошности роста конденсата пленки, препятствуют адгезии. Пленки придают хороший вид изделиям при

предварительной обработке изделий до уровня зеркальной полировки (12-14 класс).

Таким образом, способы улучшения качества пленок сводятся в первую очередь к увеличению скорости напыления, подготовке подложки, уменьшению давления газа.

4.1.9 Получение пленок равномерной толщины

Обычно толщина пленки распределяется по закону косинуса относительно оси испарителя. В ряде случаев при напылении больших поверхностей, или ответственных покрытий требуется малый разброс толщины (~2%). Для обеспечения равномерности прибегают к увеличению расстояния между подложкой и испарителем, применению нескольких испарителей, к вращению подложки или диафрагмированию потоков.

При увеличении расстояния между испарителем и подложкой кривая распределения толщины “расплывается”. Однако увеличение равномерности в этом случае достигается потерей скорости напыления.

Применение нескольких испарителей удорожает стоимость напыления за счет дорогостоящего испарителя. Перемещение подложки в процессе напыления несколько ухудшает адгезию пленки. Диафрагмирование потоков пара находит применение при изготовлении приборов в лабораторных условиях.

4.1.10 Адгезия пленок

Степень сцепления пленки с поверхностью называется адгезией. На сегодняшний день эта тема является предметом неустанного внимания исследователей и эксплуатационников.

Методы оценки адгезии

В настоящее время общепризнанными являются три метода оценки адгезии:

- царапание ногтем или абразивной резиной;
- изгибание с последующей проверкой на шелушение;
- измерение усилия на отрыв приклеенной или приваренной к пленке площадки размером 1 см².

Наибольшее распространение получил метод измерения на отрыв. Неплохой считается адгезия на полимерах ~15кг/см², на металлах ~50 кг/см².

В числе условий, влияющих на адгезию можно назвать:

- 1) наличие механических напряжений вследствие разных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки;
- 2) наличие промежуточных слоев газа и загрязнений между пленкой и подложкой;
- 3) проникновение паров воды под пленку в процессе эксплуатации;

4) деградация приповерхностного слоя подложки с течением времени (особенно это относится к стеклу).

Оптимальная толщина пленки, соответствующая максимальной адгезии, различна для различных материалов и колеблется в пределах 150-200 ангстрем.

Наличие загрязнений на подложке оказывает существенное влияние на адгезию и на электрофизические свойства пленок, поэтому перед осаждением необходимо тщательно очищать подложки и защищать их от масляных пленок, которые могут возникнуть в результате миграции паров рабочих жидкостей из насосов. Эффективным способом очистки является ионная бомбардировка поверхности подложки в плазме тлеющего разряда. Для этой цели в рабочей камере вакуумной установки обычно предусматриваются электроды, на которые от маломощного высоковольтного источника подается напряжение в несколько киловольт током до нескольких ампер. Электроды чаще всего изготавливаются из алюминия, поскольку среди металлов он имеет самую низкую скорость катодного распыления.

4.1.11 Методы повышения адгезии

Метод подслоя. Адгезия пленки в очень сильной степени зависит от наличия окисного слоя, который может возникнуть в процессе осаждения между пленкой и подложкой. Такой окисный слой образуется, например, при осаждении железа и никрома, чем и объясняется хорошая адгезия этих пленок. Пленки из золота, которое не подвержено окислению, имеют плохую адгезию, и поэтому между золотом и подложкой приходится создавать промежуточный подслоя из материала с высокой адгезией (хрома или его сплава, никеля, ванадия и др.) Желательно, чтобы образующийся слой окисла был сосредоточен между пленкой и подложкой. На образование окислов сильное влияние оказывает состав остаточных газов в рабочем объеме установки и в особенности наличие паров воды. В настоящее время пока нет однозначной теории увеличения адгезии за счет подслоя. Считается, что материал подслоя должен иметь хорошую растворимость в пленке и подложке, либо иметь большую энергию связи с поверхностью.

Метод вспышки. Для уменьшения количества газа под пленкой в ряде случаев навеска сбрасывается на уже нагретый испаритель. Этим, так называемым, методом вспышки достигается превышение концентрации паров над концентрацией остаточного газа. Разновидностью этого метода является импульсное электронно-лучевое и импульсное взрывное лазерное испарение.

Взрывное испарение применяется для напыления пленок из многокомпонентных материалов (сплавов или смесей) с различным давлением насыщенных паров компонент.

Метод отжига и вжигания пленок. Отжиг пленок применяется для снятия термических напряжений после напыления. Для большинства пленок на стеклоподобных материалах отжиг проводится при температурах $\sim 250^{\circ}\text{C}$.

В течение 15-30 минут. Повышение температуры может привести к изменению спектра десорбированных газов и к отравлению пленки. Вжигание пленок проводят при максимально возможных температурах. В этом случае молекулы входят на границу режима поверхностной диффузии, а пленка спекается с поверхностью. Следует отметить, что при отжиге или вжигании может уменьшиться технологическая толщина пленки, поэтому напыление проводят с запасом. Отжиг и вжигание пленок лучше проводить в вакууме с добавлением инертных газов.

Метод ускорения молекул. Молекулы лучше пристают к поверхности, если им придана скорость больше тепловой. К таким методам относятся специальные методы нанесения пленок, заключающиеся в ионизация паров и ускорении ионов электрическим полем с последующим вбиванием в поверхность (ионная имплантация).

Оксидные пленки. Это в основном диэлектрические пленки, применяемые в декоративной технологии, а также для изоляции между слоями микросхем.

Оксидные пленки могут быть получены:

- 1) в парах воды (при давлении 760 мм рт ст или более);
- 2) в газовом разряде (0.1 мм рт ст $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$);
- 3) оксидирование в кислороде (в печь подается O_2 или CO_2).

4.1.12 Технология получения высококачественных пленок

Процесс напыления в вакууме связан с десорбцией различных материалов вакуумной системы в зависимости от истории ранее проводимых операций. Это приводит к многовариантности протекания газофазных реакций с образованием различных труднопрогнозируемых соединений в составе пленки. В результате воспроизводимость параметров пленок может носить вероятностный характер.

По данным масспектрометрии в остаточной атмосфере типовой вакуумной установки основными компонентами являются: вода (8 %), азот (20-30 %), углерод и его производные (40-60 %). Этот состав несколько меняется в зависимости от используемых материалов и методов их обработки. На рис. 4.3 представлена статическая зависимость интенсивности газовой выделения наиболее преобладающих компонент при линейном росте температуры.

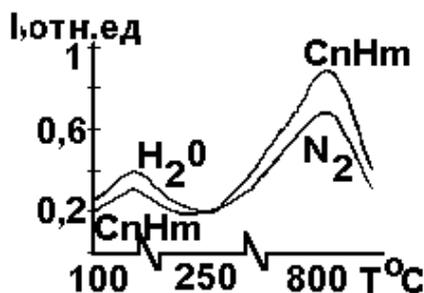


Рисунок 4.3 - Зависимость интенсивности газовой выделения от температуры

При повышении температуры поток газовой выделения возрастает в следующей последовательности: углекислый газ, азот, окислы азота, углеводороды. Характер зависимости газовой выделения в диапазоне температур до 250⁰ объясняется разложением поверхностных органических соединений и достижением энергии активации адсорбционной связи. Дальнейшее увеличение температуры способствует приоритетной десорбции углеводородов и азота, а также присутствием термоионизированных атомов на фоне общего роста потока газовой выделения. Наибольшее высокотемпературное газовое выделение наблюдается при температуре близкой к 800⁰ С, что связано с достижением энергии хемосорбции атомов и разложением нестабильных фаз, сформировавшихся в процессе напыления. В первом приближении для формирования определенной газовой фазной реакции на поверхности пленки необходимо соотношение между температурой, давлением, концентрацией и временем проведения процесса (соотношение Гиббса).

Вероятность газовой фазной реакции определяется соотношением:

$$\varphi = e^{-\Delta H/RT} e^{\Delta S/RT},$$

где ΔH - энтальпия проведения процесса (в первом приближении соизмерима с энергией образования соединения E_a и является табличной величиной, например, для окислов титана $E_a=1400$ кал/моль);

ΔS - энтропия реакции, зависящая от температуры и являющаяся табличной величиной. (Для большинства металлов, распыляемых в вакууме $\Delta S \sim 10$ кал/град моль).

Анализ условий испарения материалов показывает, что генерация потока пара, а также его взаимодействие с преградой в виде подложки сопровождается изменением параметров потоков по газодинамическим функциям. В свете выше указанных представлений видно, что протекание газовой фазной реакции носит локальный характер. В зависимости от энергетического состояния системы возможно протекание определенной газовой фазной реакции распыляемых материалов с формированием нитридов, карбидов, окислов, гидридов и т.д. (Например, для титана соответственно TiN, TiC, TiO, TiH). Направление проходящей на подложке реакции определяет количество поглощенного газа Q по соотношению:

$$Q = kFt (P_1 - P_2) / \ln(P_1/P_i),$$

где k - константа реакции ($k=0,2$ при $T=300^0$ К ; $k= 2$ при $T=1000^0$ К);

F - площадь подложки;

t - время процесса;

P_1, P_2 - общее давление газа до и после проведения процесса;

P_i - давление i -той компоненты в составе газа.

В таблице 4.3 приведены отдельные значения количества поглощенного газа при формировании некоторых соединений титана для температуры испарения 1700⁰ С

Таблица 4.3 - Количество поглощенного газа при испарении титана

Соединение	Карбиды	Оксиды	Нитриды	Гидриды
$Q \times 10^{-8}$ Вт	200	389	250	160

На практике направление возможной реакции испаряемого материала с остаточным газом в первом приближении может быть определено исходя из изменения давления в камере во времени по соотношению:

$$Q = V \, dP/dt,$$

где V - объем камеры.

Для прогнозирования возможных соединений для некоторых материалов составлены *фазовые диаграммы*, в которых по оси ординат отложена температура, а по оси абсцисс процент поглощенного пленкой газа. На рис. 4.4 представлен фрагмент фазовой диаграммы. Следует отметить, что фазовая диаграмма является довольно сложным документом, иллюстрирующим многообразие фазовых переходов. В ряде случаев на практике пользуются понятием *изобарного потенциала*, определяемого выражением:

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

где i - обозначает род газа.

На рис. 4.5 представлена диаграмма изобарного потенциала применительно к напылению титана.

С повышением температуры фазы располагаются в следующей последовательности: гидридная, оксидная, карбидная, нитридная. Изменение параметров потока ведет к изменению рабочих точек диаграммы по шкале концентраций. Например, увеличение скорости потока (путем увеличения скорости испарения или степени вакуума в рабочей камере) ведет к уменьшению функций плотности, температуры и смещению диаграммы в сторону меньших концентраций.

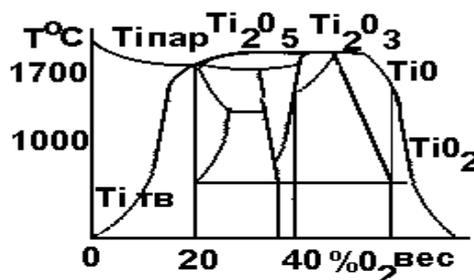


Рисунок 4.4 - Фрагмент фазовой диаграммы

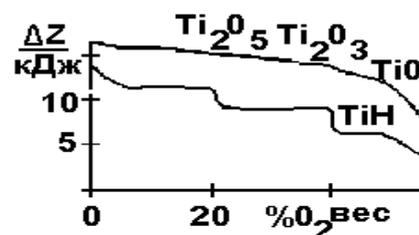


Рисунок 4.5 - Диаграмма изобарного потенциала

Для оптоэлектроники представляет интерес наиболее стабильное соединение окиси титана (TiO_2). Диаграмма изобарного потенциала позволяет корректировать ход процесса во времени, поскольку количество поглощенного газа линейно зависит от времени.

4.1.13 Измерение скорости напыления и толщины пленок

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

Толщину пленок в настоящее время измеряют самыми различными методами

Ряд методов основан на микровзвешивании, на изменении электрической емкости напыляемых конденсаторов. Оптические методы основаны на пропускании света, на интерференции. Используются также контроль электрического сопротивления пленок, наведенные вихревые токи и т.д. К средствам измерения скорости напыления и толщины пленок предъявляется ряд требований:

- 1) минимальная погрешность измерения;
- 2) независимость измерений от состава среды;
- 3) одновременность измерения скорости напыления и толщины пленки;
- 4) пригодность для различных пленок.

Свойства тонких пленок очень чувствительны к технологии их изготовления. Пленки, имеющие одинаковую толщину, в зависимости от условий их получения могут иметь совершенно различные удельные сопротивления, температурные коэффициенты сопротивления, диэлектрические потери, коэффициенты поглощения света и т. п. Поэтому в технологии часто более важно не измерение толщины пленки после ее получения, а возможность управлять толщиной в процессе нанесения.

Следует отметить, что измерение пленок дает большую погрешность даже в пределах одного типа пленки. Одна пленка, измеренная разными способами, будет иметь разную толщину. Для устранения таких противоречий ввели *понятие истинной и технологической толщины пленок*.

Истинная и технологическая толщина пленок.

Ранее отмечалось, что пленки бывают аморфные, мелко и крупнозернистые, а также эпитаксиальные. Пленки обладают разной плотностью, разным сопротивлением. Будучи напыленными одним количеством вещества и имея одинаковую массу, они обладают одной истинной толщиной, но пригодны для различных целей. Заказчики пленок пользуются технологической толщиной и заказывают тип пленки, ее толщину и методы измерения. Этим уменьшается погрешность в измерениях между заказчиком и изготовителем. Истинная толщина пленки - это толщина, которую обеспечивает изготовитель. Технологическая толщина – это толщина, при которой пленка выполняет потребности заказчика.

4.1.14 Методы измерения параметров напыления

На рис. 4.6 представлены схемы реализации методов измерения толщины пленок, по изменению сопротивления (рис. 4.6, а), по изменению емкости (рис. 4.6, б), по просвету пленки (рис. 4.6, в).

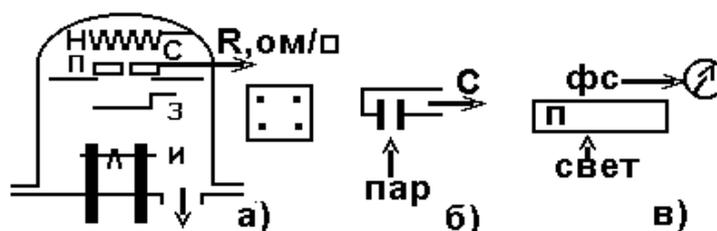


Рисунок 4.6 - Схемы реализации методов измерения толщины пленок

Резистивный метод измерения толщины пленок

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

$$R = \rho l / S,$$

где ρ - удельное сопротивление пленки.

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

$$S = d \times B,$$

разрешая исходное уравнение относительно d , находим:

$$d = \rho \times l / R_{\text{п}} B,$$

где под $R_{\text{п}}$ - понимается поверхностное сопротивление пленки (неявным образом указывающее на способ его получения). Единица измерения поверхностного сопротивления - ом / П (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 специальная контрольная непроводящая подложка в виде квадратной пластины, на края которой заранее нанесены проводящие контакты. Эта контрольная пластина включается в одно из плеч мостовой схемы. По мере роста толщины пленки и снижения ее сопротивления происходит разбаланс мостовой схемы. Метод нашел широкое применение при напылении резисторов микросхем.

В числе недостатков метода следует отметить малую чувствительность вначале напыления, а также зависимость удельного сопротивления пленки от параметров технологического процесса (давления газа, скорости конденсации, температуры подложки). В ряде случаев пленка может быть

повреждена электрическим пробоем вследствие пропуска высокого напряжения (~250 В) измерительными цепями при измерении высоких сопротивлений (~МОм). Метод непригоден для измерения толщины диэлектрических пленок.

Емкостной метод измерения толщины пленок

Этот метод контроля толщины пленок основан на измерении емкости между пластинами плоского конденсатора, помещенного на пути паров. Особенно хорошо зарекомендовал себя этот способ на пленках из диэлектрических материалов. При емкостном методе измерения толщины диэлектрических пленок также используется специальная контрольная подложка из диэлектрического материала, расположенная рядом с рабочей подложкой. На контрольной подложке изготовлен конденсатор такой конструкции, что его емкость изменяется при нанесении на поверхность конденсатора тонкой диэлектрической пленки. Обкладки конденсатора представляют собой гребенчатые структуры, сформированные на узких полосках проводящего материала.

Система измерения снабжена опорным кварцевым генератором, а также имеет систему сравнения опорных и измеряемых частот. Метод реализован в приборе типа КСТ-1. Применяется для измерения пленок SiO₂, Cu, Cr, Mo, Re, W, сапфира, стекла. Погрешность прибора в диапазоне толщин 5-100 мкм не превышает 5% и не зависит от температуры. Прибор снабжен дифференцирующей цепью, что позволяет измерять скорость напыления.

К недостаткам метода следует отнести необходимость калибровки под каждый материал, а также необходимость чистки и травления электродов.

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:

$$I=I_0 \exp(-kd),$$

где k - коэффициент поглощения, зависящий от материала пленки.

При использовании этого соотношения необходимо учитывать, что полученная пленка может обладать значительным коэффициентом отражения, и отраженный поток следует вычесть из падающего потока. В табл. 4.4 приведены коэффициенты поглощения для некоторых пленок и материалов.

Таблица 4.4 - Коэффициенты поглощения излучения

Материал	алюминий	Медь	Серебро	Золото	Никель	стекло
К	1×10^6	5×10^5	8×10^5	6×10^5	$7,8 \times 10^5$	7×10^{-1}

Оптический метод позволяет измерять полупрозрачные пленки от 100 до 800 ангстрем.

В числе недостатков метода следует отметить неудобство использования в процессе напыления вследствие паразитной подсветки накаливаемым добела испарителем. Кроме того, источник подсветки часто запыхляется.

Ионизационный метод измерения толщины пленок

В основе метода лежит принцип сравнения сигналов с ионизационных датчиков давления с паром и без пара. На рис. 4.7 представлена схема реализации метода на базе двух ионизационных датчиков давления типа ПМИ-2.

На экране осциллографа отслеживается разность сигналов. В последних разработках подобных приборов (ИСТИ-1, ИСТИ2) предусмотрены пересчетные устройства для обработки разности сигналов. Погрешность метода ~10%.

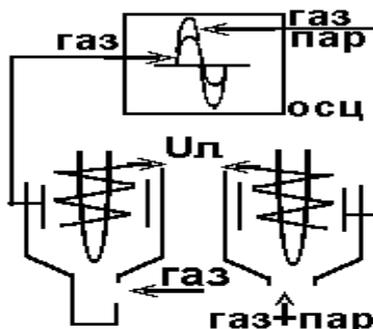


Рисунок 4.7 - Метод на базе двух ионизационных датчиков давления хода при эллипсометрическом измерении толщины пленки

Эллипсометрический метод измерения толщины пленок

Метод основан на эффекте разности коэффициентов отражения поляризованного света от пленки. На рис.4.8 представлена схема реализации метода.



Рисунок 4.8 - Эффект разности хода световой волны

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°) синусоида Н-волны идет параллельно поверхности и отражается от нее. Синусоида Е- волны идет перпендикулярно поверхности и врезается в нее на толщину пленки. Затем Е-волна отражается от основания пленки и выходит из нее. В результате чего после отражения возникает разность хода Е и Н волн (излучение оказывается эллиптически поляризованным). Разность фаз между Е и Н волнами (Δ) пропорциональна яркости отраженного излучения и несет информацию о толщине пленки. Угол поворота осей эллипса (определяемый поворотом линз поляриметра при минимуме отраженного света) пропорционален показателю преломления 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 SiO_2 , сложность настройки и обслуживания эллипсометра.

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 Δ и их разность фаз ψ .

$$\Delta = P1 + P2;$$

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

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

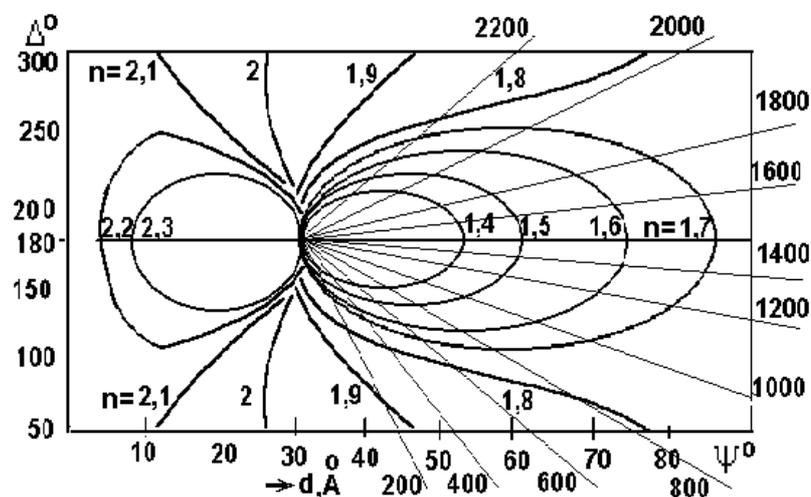


Рисунок 6.29 – Круговая диаграмма эллипсометра типа «жук»

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 $\delta = f(\psi)$, $\delta = f(\Delta)$.

Экспресс методы сравнительного анализа толщины пленок

Наряду с объективными способами измерения, существует ряд методов сравнительного анализа толщины пленок. Основные из них следующие:

1) микроскопический анализ. Анализ пленки производят под измерительными микроскопами типа МИИ-4, МИМ-7. Микроскоп МИИ-4 измеряет толщину по сдвигу интерференционных полос. Микроскоп типа МИМ-7 позволяет непосредственно увидеть и измерить толщину пленки. Для лучшей визуализации деталь с пленкой разрезается, срез полируется и травится в разбавленной азотной или соляной кислоте;

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

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. Этот метод нашел применение при анализе пленок драгоценных металлов. В качестве зондирующего излучения применяется рентген, бетта и гамма излучение, ультразвук.

4.1.15 Специальные методы нанесения пленок

Специальные методы нанесения пленок рассчитаны в основном на повышение адгезии. Наиболее универсальный способ напыления высокоадгезионной пленки состоит в ионизации паров и придании молекулам пара скоростей, превышающих тепловые. В основном это методы ионного нанесения покрытий, связанные с распылением материала ионами в различных условиях. Эти методы похожи на методы ионной очистки материалов. Принципиальное отличие состоит в том, что ионная очистка заканчивается после снятия поверхностных соединений и подходе к подложке, а ионное распыление материала только начинается.

Конденсация ионно-распыленных атомов

При формировании пленок методами ионного распыления мишеней в направлении подложки летят следующие компоненты:

- ионы остаточного газа (в основном углеводороды);
- ионы рабочего газа, бомбардирующего мишень (чаще аргона);
- нейтральные молекулы;
- соединения (карбиды, нитриды, оксиды и др.);
- ионы катода;
- пары металла катода.

Соотношение компонент зависит от способа и параметров напыления.

Таким образом, состав пленки, полученной ионными методами очень сложен. Поэтому ионные и плазменные методы формирования пленок чаще применяются не для промежуточных, а для финишных операций.

Плазменные методы ионного осаждения пленок

Плазменными называются методы, у которых для образования ионного потока на подложку используется газовый разряд при давлениях 10^{-2} - 10 Па независимо от способа образования частиц пара. На подложку может подаваться отрицательное напряжение смещения ($E_{см}$). Рабочими газами являются как инертные газы, так чистые реактивные газы (O_2 , N_2 , CH_4 и др.).

На рис. 4.9, а представлена схема ионно-плазменного нанесения пленок методом катодного распыления. На рис 4.9, б представлена схема нанесения пленок с помощью автономных ионных источников.

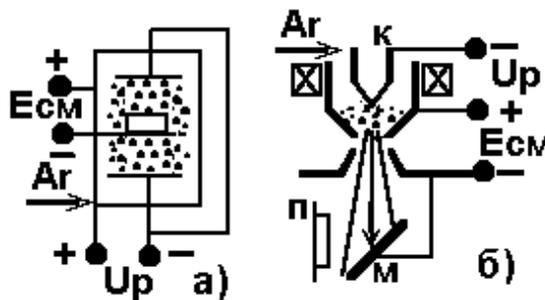


Рисунок 4.9 - Схемы нанесения пленок

Ионно-лучевые методы нанесения пленок

При ионно-лучевых методах осаждения пленок процесс конденсации осуществляется в высоком вакууме ($< 10^{-2}$ Па). Для образования ионов используется ионно-лучевой источник. При подаче рабочего газа (чаще аргона) происходит его термическая ионизация. В объеме источника зажигается разряд напряжением U_p (1-2 кВ). Ионы газа извлекаются экстрактором и ускоряются в направлении мишени (М) и бомбардируют ее. Материал мишени направляется на подложку (П). Если подложка металлическая, то на нее можно подать отрицательное смещение потенциала ($E_{см}$) для повышения эффективности бомбардировки положительными

ионами. Ионно-лучевые методы находят широкое применение для напыления износостойких и антикоррозионных покрытий.

Термоионное напыление

Процесс термоионного осаждения пленок представляет собой комбинацию термовакуумного и ионных методов. На рис. 4.10 представлены схемы реализации метода.

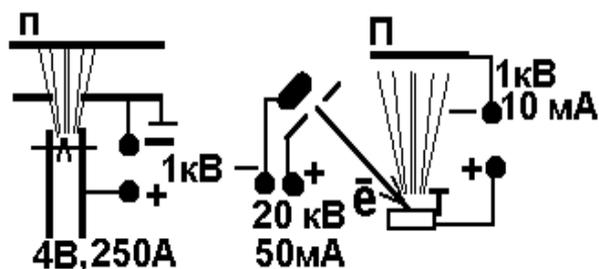


Рисунок 4.10 - Процесс термоионного осаждения пленок

Процесс проводится следующим образом. После откачки вакуумной камеры на высокий вакуум, прогрева подложки и обезгаживания испарителей, в камеру напускается рабочий газ до давления, обеспечивающего зажигание газового разряда в области подложка-испаряемый материал (1-10 Па). Подача отрицательного потенциала на подложку обеспечивает ее бомбардировку ионами и производит очистку от загрязнений и ионное травление поверхности катодным распылением. Далее без выключения разряда начинается прогрев и испарение напыляемого материала. Прилегающие к подложке начальные слои пленки состоят из смеси атомов подложки и осаждаемого материала, что увеличивает адгезию за счет поверхностной диффузии, стимулированной электрическим полем. В ряде случаев нагрев материала производят электронным лучом в тигле (Т). Расфокусированный электронный луч может быть использован для обезгаживания внутренних элементов вакуумной камеры и подложки.

На скорость нанесения пленки влияет множество факторов. Наибольшее влияние оказывает масса бомбардирующей мишень газа, род газа, ток и напряжение разряда. Для ионных методов нанесения пленок часто применяется инертный газ аргон. Присутствие азота может вызывать нитрирование пленки, присутствие соединений углерода или кислорода – оксидирование или карбидирование. При увеличении напряжения увеличивается коэффициент распыления ($K = N_{\text{выб}} / N_{\text{пад}}$). Скорость напыления пропорциональна ионному току. Повышение давления уменьшает длину свободного пробега пара.

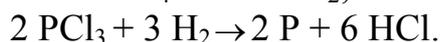
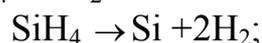
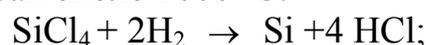
В ряде случаев термоионное нанесение пленок реализуется при электродуговом напылении пленок из материала электродов. При большой мощности дуги испарение материала электродов происходит с присутствием капельной фракции в пленке. Для уменьшения брызгового эффекта следует иметь в виду, что для каждого металла существует

предельная плотность мощности на электродах, начиная с которой происходит брызгообразование. Например для титана предельная величина $g_{Ti} \sim 10^8$ Вт/см², $g_{Mo} \sim 10^6$ Вт/см². В ряде случаев под углом к парам устанавливают отражатели, однако, при этом уменьшается скорость напыления. В ряде случаев в поток пара вводят отрицательный электрод, что разбрасывает капли электростатическим потенциалом. Уменьшению капельной фракции способствует подача отрицательного потенциала на подложку.

В последнее время успешно развивается напыление пленок из плазмы магнетронного разряда. В этом случае отрицательный потенциал подается на подложку, помещенную в магнитное поле.

4.2 Процесс эпитаксии в технологии изготовления элементов фотоники

Эпитаксия - это процесс получения высококачественной монокристаллической пленки чистого состава. В таких пленках испытывают нужду новейшие электронные приборы полупроводниковой и лазерной техники, оптоэлектроники, вычислительной техники и многие другие. Такие пленки толщиной 2-25 мкм обладают металлической проводимостью (менее 100 ом на квадрат). С помощью прямого процесса напыления такие пленки получать затруднительно вследствие невозможности исключить неконтролируемые примеси в напыляемой пленке. Традиционно для получения и легирования эпитаксиальных пленок кремния используют набор поверхностных гетерогенных реакций при давлении близком к атмосферному и температурах около 1000⁰ С:



На рис. 4.11 представлена схема проведения традиционного процесса эпитаксии.

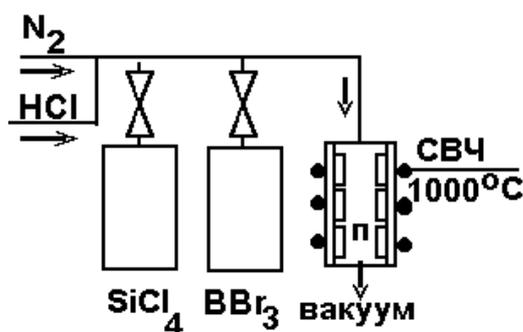


Рисунок 4.11 - Схема проведения традиционного процесса эпитаксии

Недостатки традиционной эпитаксии заключаются в следующем:

- жесткая взаимосвязь потока реагентов с температурой гетерогенной реакции;
- существует степень сегрегации поверхности (часть пленки всегда формируется поликристаллической);
- вследствие большой температуры имеют место диффузионные процессы из сформированной пленки в подложку.

Методы решения проблемы заключаются в более высококачественном напылении пленок с последующей ориентацией слоев в виде кристаллической решетки. Такой процесс называется *искусственной эпитаксией*.

4.2.1 Искусственная эпитаксия

Искусственная эпитаксия - это процесс получения монокристаллических пленок на подложке. Рост кристаллов на подложке из того же материала, что и подложка называется *автоэпитаксией* (например, Si-Si). Процесс роста кристаллов на инородной подложке называется *гетероэпитаксией* (например, Si- W).

Условия проведения процесса эпитаксии. Для ориентированного роста кристаллов в напыляемой пленке необходимо выполнение нескольких условий:

- 1 - обеспечение сверхвысокого вакуума (менее 10^{-7} Па);
- 2 - оптимальная температура подложки (для кремния 440° С)
- 3 - необходима минимальная скорость осаждения пленки (до 10 нм/с).

При большой скорости конденсации происходит интенсивное образование зародышей, сопровождаемое неупорядоченной кристаллизацией и аморфизацией пленки;

4 - необходим жидкий подслои из золота или специального полимера, (салол) в который напыляются пары для ориентации и формирования зародышей (“льдинок” кристалла) в сплошной монокристалл;

5 - на подложке с шагом 50 мкм следует нанести базовый рельеф в виде сетки или канавок с углами, соответствующими типу кристаллической решетки кристаллизуемого материала.

4.2.2 Технология формирования рельефа подложки

На рис. 4.12 представлены рекомендации, по разметке подложки исходя из порядка оси симметрии кристаллической решетки формируемого материала.

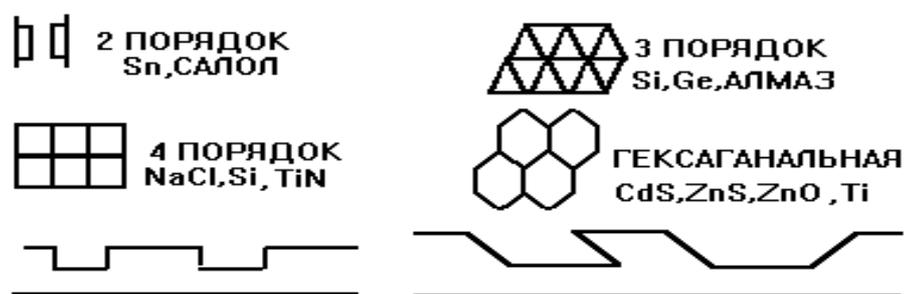


Рисунок 4.12 - Рекомендации по разметке подложки для эпитаксии

В последнее время в эпитаксии нашел применение легкоплавкий полимер “салол” ($T_{пл}=42^0$). На нем можно вырастить кристаллы высших порядков, при прямоугольной разметке подложки.

4.2.3 Механизмы ориентации и формирования кристаллов при искусственной эпитаксии

Процесс формирования и ориентации кристаллов напоминает явление ледостава на реке в тихую снежную погоду.

Если на подложке есть ванна расплава, то пары формируются из зародышей в конгломераты и ориентируются друг относительно друга за счет:

- действия закона Архимеда и капиллярных сил. При плавании кристалла формируется мениск, крутизна которого зависит от расстояния до стенок;
- под действием базового рельефа на подложке;
- под действием температурного рельефа;
- под действием внутренних напряжений и анизотропной деформации.

В расплаве всегда существует конвекция. Разность температур является источником напряжений и анизотропных деформаций. Для усиления деформаций часто напыляют подслоем меди.

Рост кристаллов наиболее интенсивен на изломах, на боковых гранях. Механизм роста предполагает участие жидких и жидкоподобных слоев. В ряде случаев для улучшения ориентации необходимы отжиг пленок при максимально возможной температуре в течение двух часов. Ориентация сильно зависит от толщины пленки. Наиболее оптимальный интервал толщин составляет 20-40 нм. При большей толщине возрастают поверхностные напряжения, что спонтанно перестраивает пленку.

4.2.4 Альтернативные методы создания эпитаксиально подобных структур

Развитие оптоэлектроники, трехмерных интегральных микросхем, фототранзисторов и прочей техники 5-6 поколения требует развития более дешевых способов получения эпитаксиальных структур. Переход к

субмикронной технике требует получения более тонких пленок (менее 0,5 мкм), а это связано с нарастанием дефектов.

Ионная имплантация - как альтернатива эпитаксии

Сущность метода состоит в том, что ионы кислорода или азота с энергией 100-200 кэВ внедряют в кремний на глубину 0,1-0,3 мкм. На рис. 4.13 представлена условная схема процесса.

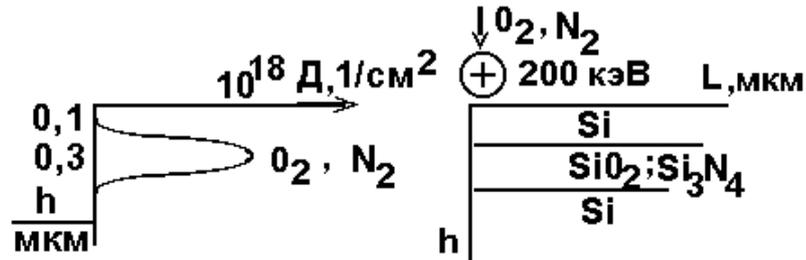


Рисунок 4.13 - Условная схема процесса ионной имплантации

После отжига при $T=1100-1200^{\circ}\text{C}$ формируется слой окиси кремния SiO_2 или нитрида кремния Si_3N_4 , обладающий хорошими изолирующими свойствами.

Особенности проведения процесса ионной имплантации состоят в следующем:

- существует пороговая доза облучения (D) для протекания процесса;
- нужны источники с током ионов ~ 100 мА с сепаратором ионов по энергиям;
- при облучении полупроводников возможно образование дислокаций.

4.2.5 Маркировка эпитаксиальных структур

Маркировка позволяет определить основные параметры эпитаксиальных структур. Маркировку проводят в виде дроби с числителем, характеризующим эпитаксиальный слой и знаменателем, характеризующим подложку.

На рис. 4.14 представлен вариант расшифровки эпитаксиальной структуры.

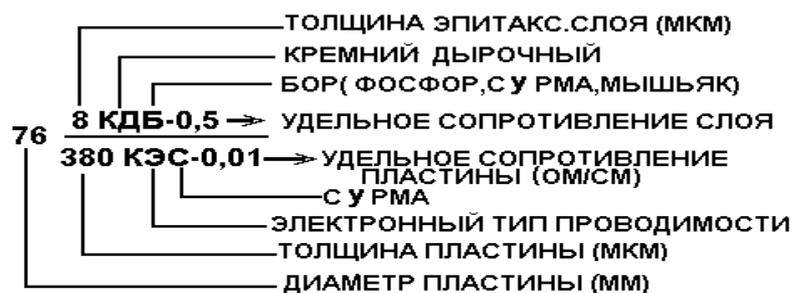


Рисунок 4.14 - Вариант расшифровки эпитаксиальной структуры

При многослойных структурах обозначение принимает вид этажерки. Каждый этаж обозначает следующие параметры:

- первая цифра-толщина контактного n^+ слоя в мкм;
- следующие буквы обозначают название материала (например, АГЭ-арсенид галлия эпитаксиальный, АГЧТ-3 арсенид галлия третьей группы);
- затем указывается концентрация носителей заряда (например, 1-18 обозначает концентрацию $1 \times 10^{18} \text{ 1/см}^3$);
- последняя цифра (А, Б, В, Г, Д и т.д.) указывает группу допуска параметров из технологической таблицы.

Вместе с тем следует заметить, что иногда в маркировку вводят не название материала, а его марку, вводятся буквы, характеризующие легирующие элементы.

4.3 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 настоящее время распространилось значительное количество как самостоятельных, так и комбинированных литографий. 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.

4.3.1 Разрешающие возможности литографий

На рис. 4.15 представлены местоположения некоторых видов литографий относительно ширины разрешающей линии, из рисунка видно, что с уменьшением длины волны засвечивающего излучения разрешающие возможности литографии возрастают.

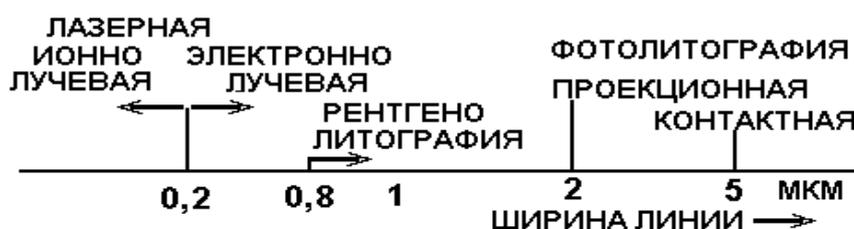


Рисунок 4.15 - Местоположения литографий относительно ширины разрешающей линии

4.3.2 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 и, следовательно, к локальному изменению его свойств. Доза засвечивания подбирается на основании так называемых *сенситометрических* измерений, исходя из типа пленки и типа излучения.

Энергия фотона (Дж) для проведения фотолитографии рассчитывается по формуле: $E_f = hc/\lambda$, где: $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Вт/с- постоянная Планка, $C= 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света, λ - длина волны, м.

4.3.3 Типовой литографический процесс

На рис. 4.16 представлены основные этапы типового литографического процесса.



Рисунок 4.16 - 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.

4.3.4 Выбор фоторезиста

Фоторезисты - это многокомпонентные системы из полимерной основы и добавок, обеспечивающих светочувствительность, кислотостойкость, вязкость, смачивание и др. параметры. В большинстве случаев основой резиста является поливиниловый спирт, полиэферы, поливинилацетат, каучуки, эпоксидные смолы. Основные требования к фоторезистам - это достаточная светочувствительность, высокая разрешающая способность, устойчивость к химическим воздействиям, технологичность. В числе дополнительных требований к резистам отмечается минимум загрязнения от фотографических операций, недифицитность материалов, линейность изменения параметров в процессе обработки. В зависимости от механизма фотохимических процессов, протекающих под действием излучения, растворимость в химических реактивах экспонированных участков фоторезиста может либо возрасти, либо падать. В первом случае фоторезисты называют позитивными, во втором - негативными. Пленка позитивного фоторезиста под действием излучения становится неустойчивой и растворяется при проявлении. Пленка негативного фоторезиста, наоборот, под действием излучения становится нерастворимой, в то время как неосвещенные участки при проявлении растворяются. На рис. 4.17 представлена схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов

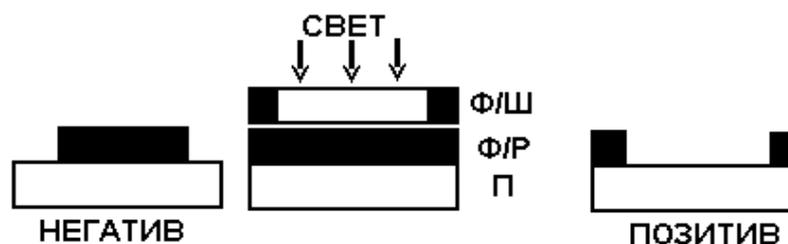


Рисунок 4.17 - Схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов

4.3.5 Спектральная чувствительность к излучению

Широкое распространение получили фоторезисты, чувствительные к ультрафиолетовому излучению. Для позитивного фоторезиста спектральная характеристика содержит несколько максимумов поглощения, граница поглощения соответствует 460-480 нм. Для негативного резиста длинноволновая граница 310 нм. При введении специальных веществ - сенсibilизаторов - она сдвигается от 310 до 400-420 нм

Критерием чувствительности является получение локальных участков с высокими защитными свойствами. Для негативных фоторезистов это означает задубливание или полимеризацию в экспонированных участках на

глубину, достаточную для защиты от воздействия травителей. Критерием чувствительности позитивного фоторезиста является полное удаление пленки фоторезиста в экспонированных участках.

4.3.6 Разрешающая способность

Разрешающая способность слоя фоторезиста (R) определяется как число задублированных линий на 1 мм, разделенных свободными от резиста промежутками. Разрешающая способность слоя зависит от типа фоторезиста (позитивный или негативный) его толщины и составляет для используемых в настоящее время фоторезистов 2000 лин/мм, при толщине 0,2-0,3 мкм.

В таблице 4.5 представлены некоторые параметры позитивных и негативных фоторезистов.

Таблица 4.5 - Некоторые параметры позитивных и негативных фоторезистов

МАРКА	ФП383	ФП330	ФП333	ФН106	ФН108	ПВЦ-Н
R л/мм	400	400	500	200	250	100

Преимущества позитивных резистов перед негативными состоит в следующем:

- более высокая разрешающая способность;
- более высокая контрастность и более резкая зависимость глубины проработки слоя от выдержки;
- на длинных волнах позитивные резисты имеют спад чувствительности и слабую зависимость от действия отраженного от подложки света. Это обстоятельство позволяет использовать стеклянные подложки вместо кварцевых.

Негативные фоторезисты проще в эксплуатации, они более предпочтительны при избытии гальванических и химических процессов на производстве. Позитивные резисты тяготеют к электрофизическим методам обработки.

4.3.7 Формирование фоторезистивного слоя

Нанесение фоторезиста

Для нанесения фоторезиста на подложку можно использовать пульверизацию, окунание в раствор, полив, нанесение валками и т.д. В настоящее время наиболее распространенным способом является нанесение фоторезиста с помощью *центрифугирования*. Подложка помещается на вращающийся диск, на центральную часть подложки наносится фоторезист. Равномерность нанесения фоторезиста обеспечивается центробежными силами и вязкостью раствора. Скорость вращения составляет сотни тысяч

оборотов в минуту в зависимости от требуемой толщины и вязкости слоя резиста.

Недостатки центрифугирования состоят в проявлении прогрессирующих дефектов при попадании инородных пылинок. Неудобства возникают при корректировке толщины на число оборотов и вязкость.

Другим распространенным способом нанесения фоторезиста является распыление в электростатическом поле - *пультверизация*. Метод пультверизации имеет следующие преимущества перед центрифугированием: возможность нанесения на рельефную поверхность, более широкие возможности автоматизации, более широкий диапазон толщин. Для распыления используется газ-носитель, который тяжелее воздуха (чаще фреон). Распыление проводится в обеспыленных боксах. Запыленность поддерживается на уровне 4 пылинки по 0,5 мкм на 1 литр воздуха. После распыления газ-носитель регенерируется и снова подается в распылитель.

В ряде технологий для нанесения фоторезиста успешно используется *метод окунания* подложки в суспензию из фоторезиста. Особенность этого метода состоит в клинообразности нанесенного слоя вследствие мениска поверхностного натяжения. Это обстоятельство требует переворота подложки на 180° и нанесения второго покрытия.

Сушка фоторезистивного покрытия

Сушка - это первый процесс из цикла изготовления микросхем и фундамент работоспособности приборов.

Сушка проводится в два этапа: *низкотемпературная* и *высокотемпературная*.

Низкотемпературная сушка проводится при температуре $\sim 40^{\circ}$ в течение 10-15 мин. За это время удаляется растворитель и укладываются макромолекулы полимера. Низкотемпературная сушка-залог адгезии.

Высокотемпературная сушка проводится при температуре $80-120^{\circ}$ в течение 20 мин. Пределом повышения температуры является *термическое задубливание*, которое препятствует проявлению. Для корректировки работы проявителя корректируется время засветки (экспозиции). Во время сушки происходит отклонение размеров, которое следует учитывать. На рис 4.18 представлена зависимость отклонения размеров и времени засветки от температуры сушки.

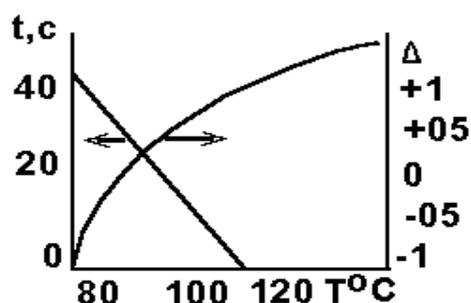


Рисунок 4.18 - Зависимость отклонения размеров и времени засветки от температуры сушки

Темп сушки ограничен появлением корки и микротрещин. Во избежание окисления процесс сушки проводят в обеспыленном азоте или инертном газе с помощью инфракрасных излучателей.

4.3.8 Процесс формирования изображения микросхемы

Фотошаблоны и методы их изготовления

Изображение в слое фоторезиста формируется с помощью фотошаблонов, представляющих собой прозрачные пластины с рисунком, состоящим из сочетания непрозрачных и прозрачных для света участков. Фотошаблоны изготавливаются из стекла, пластика, напылением металла. Различают эмульсионные, металлизированные и транспарентные (цветные) фотошаблоны. В последнее время находят применение диффузионные фотошаблоны, у которых запыленный слой металла (меди, титана, железа и др.) с целью повышения износостойкости вжигается методом диффузии. В ряде случаев для избежания царапин фотошаблон напыляют слоем стекла толщиной 0,2 мкм. Если позволяют размеры, то на этой же подложке изготавливают дублирующие элементы. На рис. 4.19 представлена конструкция фотошаблона.



Рисунок 4.19 - Конструкция фотошаблона

К фотошаблону предъявляются требования по разрешающей способности, по показателю точности, по размытости края и др.

Совокупность основных требований к фотошаблону перечисляется в технологических картах в алфавитном порядке, а совокупность дополнительных требований просто нумеруется по порядку. Для определенной серии изделий сумма требований сводится в таблицу. Например, фотошаблон марки ФШ Б44 означает фотошаблон, применяемый для изделий ширпотреба с допусками по 4-му пункту точности.

Для изготовления фотошаблонов применяют в основном два метода. Это 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 последовательной фотопечати этих прямоугольных элементов на фотопластину. Работа на фотонаборных установках осуществляется с помощью ЭВМ.

Методы совмещения топологических слоев через фотошаблон

Микросхема состоит из множества слоев. Каждый топологический слой требует нескольких технологических операций. Для совместимости элементов в фотошаблоне предусмотрены реперные знаки. В настоящее время наиболее широко распространились визуальный метод совмещения, базовый и метод совмещения по знакам с контролируемым зазором. При совмещении следует учитывать, что между подложкой и шаблоном должен быть минимальный зазор для предотвращения их повреждения от соприкосновения.

Визуальный метод совмещения заключается в одновременном просмотре рисунка микросхемы на подложке и на фотошаблоне. Особенность состоит в том, что увеличение глубины резкости требует длиннофокусности микроскопа, а это противоречит степени его увеличения. Точность такого метода ~ 10 мкм.

Базовый метод предполагает совмещение по базовым элементам микросхемы в данном топологическом слое (сопротивления, элементы транзистора и т.д.). Точность такого метода 0,5-2 мкм.

Метод совмещения по знакам с контролируемым зазором имеет наиболее высокую точность ($\sim 0,5$ мкм.). Повышение точности совмещения достигается применением фотоиндикаторов светового потока. На рис.4.20 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”).

Кроме совмещения на качество микросхемы (особенно на степень упаковки элементов) влияют эффекты рассеяния в резистивном слое. На рис 4.21 представлена схема рассеяния потока света в резистивном слое и его последствия, приводящие к боковому подтравливанию “Х” изменению профиля травления

Кроме контактного метода находит применение бесконтактное *проеекционное экспонирование*. Его преимущества заключаются в повышении срока службы фотошаблонов, возможность масштабирования. Однако для увеличения разрешающей способности приходится применять другие методы экспонирования.

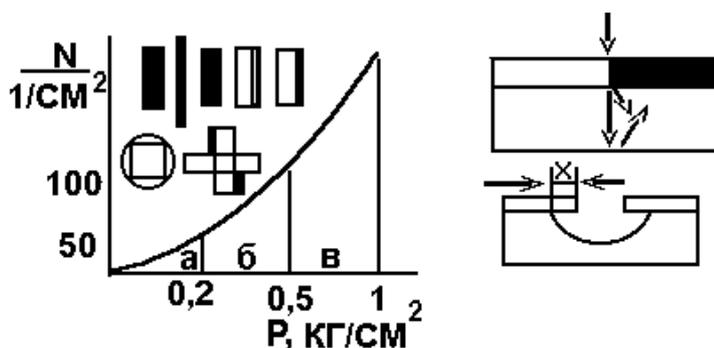


Рисунок 4.20 - Знаки совмещения и плотность дефектов света

Рисунок 4.21 - Схема рассеяния потока

Процессы проявления фоторезистов

После экспонирования следует процесс проявления. Общее в проявлении резистов состоит в наличии *инкубационного периода*, характеризующегося временем, в течение которого процесс проявления идет, но визуально не обнаруживается. Отличия проявления негативных резистов от позитивных состоит в том, что в проявители для позитивных резистов входит щелочь для задубливания. Это исключает общее разбухание резиста и повышает разрешающую способность. В ряде случаев для повышения стойкости при травлении в кислотах проводится операция *задубливания* резиста путем выдержки в щелочи в течение 2-3 минут или путем термического прогрева.

Процессы воспроизведения рельефа изображения

Процесс воспроизведения изображения производится путем химического или ионного травления с последующим химическим или электрофизическим осаждением пленки. К процессу травления предъявляется требование избирательности травления и изотропности 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 «А» - это отношение глубины травления h к величине бокового подтравливания «х»

$$A=h/x .$$

Большую роль на профиль химического травления оказывает смачиваемость поверхности и температура травителя, определяющая энергию активации травления. С уменьшением размеров элементов возникают ограничения возможностей жидкостного травления. Ряд зарубежных фирм при травлении субмикронных элементов используют газовое травление или травление ионными методами.

взаимосвязи геометрических размеров электронного луча и электрических параметров пушки. Время экспонирования “ t ” связано с коэффициентом чувствительности “ K ” резиста и плотностью тока луча “ J ” соотношением:

$$t = K/J.$$

Коэффициент чувствительности электронрезиста зависит его марки и колеблется в пределах от 10^{-6} кл/см² для негативных электронрезистов до -10^{-8} кл/см² для позитивных. Хотя чувствительность негативных резистов выше, однако, разрешающая способность ниже.

В случае однолучевой электронной пушки с термокатодом при диаметре пучка равном 0,1 мкм может быть достигнута плотность тока $J \sim 1 \text{ А/см}^2$. Время экспозиции для этих условий составит $\sim 60 \text{ мкс}$ 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 λ , соответствующая электрону определяется через постоянную Планка h , массу электрона m и его скорость V соотношением:

$$\lambda = h/mV$$

где $V = \sqrt{2meU}$;

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

U - ускоряющее напряжение;

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

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

Энергия электрона, вкладываемая в проведение процесса электроннолитографии, складывается из энергии электрона и энергии взаимодействия с веществом и определяется выражением:

$$E = m_e C^2 + eU \text{ [Дж]},$$

где C - скорость света;

2) разрешающая способность электроннолитографии ограничивается конечным диаметром электронного луча и рассеянием электронов в слое резиста;

3) ограничения электронной оптики, наличие *сферической аберрации* и теплового разброса поперечных скоростей электронов приводит к увеличению диаметра электронного пучка;

4) мощность, вкладываемая в пучок, ограничена испарением электронрезиста;

5) яркость источников электронов конечна и имеет Гауссовское распределение в пространстве;

6) скорость прецизионного сканирования ограничена индуктивностью и емкостью электромагнитной отклоняющей системы.

Несмотря на ограничения, электроннолитография берет на себя формирование субмикронных размеров сверхбольших интегральных

микросхем (СБИС) и числовых интегральных процессоров (ЧИП), высокочастотных (1 ГГц) цифровых микросхем на арсениде галлия. В ряде случаев для увеличения разрешающей способности используются подкладки под подложку, отражающие электронный поток, тем самым реализуется *обратная электроннолитография*. Диаметр пучка для электроннолитографии может возрасти из-за дифракции или аберраций. Например, увеличение диаметра пучка из-за дифракции описывается уравнением:

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

где δ - угол сходимости луча, рад.

Яркость электронного пучка при электроннолитографии зависит от плотности тока эмиссии J и температуры катода T :

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

где $K = 1,38 \times 10^{23}$ – постоянная Больцмана.

Рентгенолитография

Рентгенолитография реализует засветку резиста рентгеновским излучением. Рентген получают облучением металлической пластины электронным лучом с энергией 10-20 кВ. Используя разные металлы, получают разную длину волны. Предпочтительней использовать более короткую длину волны (0,4-1,4 нм.). На рис. 4.23 представлена схема реализации рентгенолитографии.



Рисунок 4.23 - Схема реализации рентгенолитографии

Достоинства рентгенолитографии состоят в следующем:

- 1) увеличивается разрешающая способность;
- 2) отсутствует избирательность фоторезиста;
- 3) нет контакта фоторезиста с фотошаблоном;
- 4) ослабляются отражательные эффекты;
- 5) процесс литографии не требует вакуума;
- 6) процесс нечувствителен к загрязнениям;
- 7) мала стоимость литографического процесса.

Недостатки рентгенолитографии состоят в следующем:

- 1) наличие рентгеновского излучения предъявляет повышенные требования к помещению и обслуживающему персоналу;

2) элементы микросхем, механические напряжения или дефекты могут выступать в роли точечных диафрагм, изменяющих ход лучей в виде выпуклой или вогнутой подушки (*дисторсия*);

3) возможно только теневое экспонирование.

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. Недостаток ионнолитографии в относительно сложном оборудовании, требующем квалифицированного обслуживания.

5 Основы автоматизации процессов производства оптических материалов и изделий

5.1 Общая схема регулирования технологического процесса

Для большинства технологических процессов схема их регулирования может быть представлена в соответствии с рисунком 5.1.

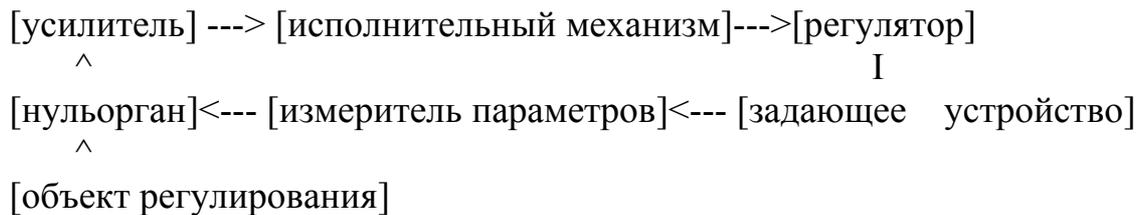


Рисунок 5.1- Принципиальная схема регулирования технологического процесса

Сигнал с задающего устройства и сигнал с объекта регулирования подается на схему сравнения (нульорган). Сигнал рассогласования подается через усилитель и исполнительный механизм на регулятор технологического процесса. Регулятор в свою очередь, через задающее устройство и измеритель параметра связан со схемой сравнения. Таким образом, по мере изменения технологического параметра производится его отслеживание и сравнение с заданным. В ряде случаев инерционность отслеживания сигналов учитывается специальным звеном электронной схемы (так называемым изодромным звеном). В этом случае из анализа скорости изменения параметра выдается коррекция на усилитель исполнительного механизма. Такие системы управления нашли широкое применение в устройствах защиты печей от перегрева, в системах напуска газа в вакуумные камеры, в устройствах следящей автоматики.

5.2 Моделирование производственных процессов

5.2.1 Система подготовки к моделированию

Перед проведением процесса его моделируют и прогнозируют. Моделирование процессов может происходить на различных уровнях. Различают следующие уровни моделирования:

- 1- организационный - (осуществляет общезаводское управление);
- 2- функциональный - (предполагает должностные инструкции и работу с кадрами);
- 3- управляющий - (предполагает программы финансового управления);
- 4- производственный - (моделирует производственные процессы и загрузку оборудования на уровне начальника цеха);
- 5- технологический - (моделирует уровень сложности и последовательность технологических операций).

Автоматизация на уровне производства сводится к трем задачам: запуск, оптимизация режимов, остановка. В ряде случаев приоритетным является отслеживание траектории технологического процесса. Система следящих датчиков передает информацию на ЭВМ и одновременно на световую или звуковую индикацию. Система подготовки к моделированию предполагает проработку только законченных изделий, как экономически более выгодных. Моделирование технологий предполагает сравнение изготовления изделий с достижениями науки и техники. Перед моделированием проводится предпроектный анализ на целесообразность изготовления изделия из 2-3 разработанных альтернативных проектов.

Особенности производственного и технологического моделирования состоят в следующем:

- 1) необходимо исключение траекторий с участием человека;
- 2) важен комплексный подход к обработке изделий для загрузки вспомогательного оборудования;
- 3) желательно применение систем автоматизированного производства (складские системы роботы, измерительные системы и т.д.);
- 4) особое внимание уделяется системам прогнозирования по ресурсам материалам и инструментам.

Основные принципы технологического моделирования состоят в следующем:

- 1) универсальность технических решений;
- 2) преемственность программно - математического обеспечения;
- 3) удобство перенастройки: (например, вакуумпровод собирается как детский конструктор);
- 4) кадры программистов должны обеспечивать не менее 40% общих затрат на подготовку производства;
- 5) максимум автоматизации на одном рабочем месте.

Для решения конкретной задачи составляются таблицы

моделирования, содержащие назначение технологической задачи, ее содержание и принцип, для которого следует решать задачу. Часто такая таблица 5.1 превращается в балансовую с содержанием «за» и «против»

Таблица 5.1 - Фрагмент таблицы перестройки линии на другой типоразмер изделий

Принцип	Содержание	Технологическая задача
Компьютерная технология	Алгоритмизация	Коррекция баз данных
Перестройка	Конкретный процесс	Многовариантное проектирование

Формирование информационных технологий в моделировании придерживается следующих правил:

- 1) анализируется информационная обеспеченность программными продуктами;
- 2) проводится анализ на активное вмешательство в технологический процесс. Моделирование должно преследовать принцип активно – управляемой технологии с прогнозированием аварийных и нештатных ситуаций завершения процессов;
- 3) исследуется принцип интеграции (возможность разбиения задач с последующим объединением по принципу детали-узлы);
- 4) рассматривается принцип оптимальности решения на основании анализа различных траекторий технологических процессов;
- 5) анализируется принцип завершенности изготовления изделия.

5.2.2 Подобие технологических процессов

подавляющая часть технологических процессов и оборудование для его проведения является подобным по типу применяемых приборов, по режимам и другим параметрам и в связи с этим имеют много общего при автоматизации. Существуют критерии подобия технологических процессов. Основными из них являются давление, температура, концентрация или отдельные параметры, выраженные в физических константах. Подобие предполагает соизмеримость нескольких (более трех) параметров для различных условий проведения технологических процессов. Например, подобие режимов течения газов (вязкостный, молекулярный или молекулярно-вязкостный) характеризуется произведением давления в сосуде на размер сосуда (Pd).

5.3 Задающие устройства и первичные системы управления

Выбор первичного устройства, выделяющего сигнал управления, зависит от уровня сигнала, функции преобразования, согласуемости с

имеющимся оборудованием. По использованию первичных средств в качестве источников управления выделяются следующие системы:

- а) система "реохорд";
- б) система мостовых схем;
- в) магнитные устройства;
- г) механические устройства;
- д) устройства на принципах индукции трансформатора;
- е) пневматические регуляторы;
- ж) комбинированные устройства.

Система "реохорд" предполагает использование переменного резистора в качестве первичного элемента. Мостовые схемы предполагают выработку сигнала рассогласования в плечах мостовой схемы. Магнитные устройства имеют нелинейную функцию преобразования. Механические устройства предполагают наличие выступов или кулачков на механическом валу, включающих или выключающих электрические или пневматические схемы. Пневматические регуляторы используют эффекты взаимодействия струи газа с преградами или струй между собой и широко применяются во взрывоопасных и пожароопасных условиях.

5.3.1 Групповые измерительные преобразователи

подавляющая часть электрофизических установок снабжена универсальными преобразователями сигналов. Основные из них следующие:

- а) ПС ТР (преобразователь сигнала терморезисторов);
- б) ПС ИД (преобразователь сигнала индуктивного датчика);
- в) ПС ТП (преобразователь сигнала термпарного датчика);
- г) ПС ВД (преобразователь сигнала вакуумного датчика).

Такие измерительные преобразователи объединены в группы, имеют стандартные для микросхем уровни выходных напряжений. В ряде случаев такие преобразователи снабжены устройствами сопряжения с ЭВМ.

5.3.2 Алгоритмы преобразования сигналов

Первичные датчики параметров технологического процесса выдают сигнал в виде напряжения различного уровня. Такие сигналы называются аналоговыми. Управляющий сигнал должен быть преобразован для согласования с усилителем, питающим исполнительный механизм. В настоящее время нашли применение несколько способов преобразования сигнала. Основные из них: линеаризация, функциональное преобразование, оцифровка.

При линеаризации сигнал разбивается на уровни изменения напряжения или тока во времени. Для каждого участка вычисляются значения функции параметра. В итоге имеется таблица или матрица значений технологических параметров.

Оцифровка сигнала позволяет привлекать ЭВМ для обработки

параметров технологического процесса и их оптимизации. В последнее время первичные датчики параметров снабжаются специальными микросхемами, позволяющими оцифровывать сигнал.

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 Типичные законы управления типа П, ПИ, ПИД

Разнообразие траекторий управления технологическими процессами укладывается в три закона регулирования:

- 1) пропорциональный (П);
- 2) пропорционально-интегральный (ПИ);

3) пропорционально-интегральный с дифференцированием сигнала (ПИД).

Пропорциональный закон обеспечивает функциональную зависимость изменяемых величин от задающей. Типичным примером исполнения такого 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. Обычно на функциональном оборудовании завод-изготовитель обязан ставить закон регулирования. Многие современные устройства снабжены микропроцессором, в котором предусмотрен переход из одного закона регулирования в другой.

5.5.1 Уравнение ПИД регулятора

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

$$U(t)=f(t)+du/dt+\int u(t)dt,$$

где $U(t)$ - функция изменения напряжения во времени;

$f(t)$ - временная функция;

du/dt - приращение изменения напряжения во времени.

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

5.6 Многоуровневые системы децентрализованного управления

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

а) первый уровень обеспечивает защиту персонала и оборудования от аварийных режимов;

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

в) третий уровень обеспечивает общую работу всей системы и отвечает за работу конечных выключателей и исполнительных механизмов.

Индикация всех уровней децентрализованного управления выводится на пульт управления.

5.6.1 Алгоритмы диагностики оборудования

Перед запуском установки во избежание нештатных и аварийных режимов всегда проводится тестирование оборудования на выполнение отдельных операций, как то:

- а) отслеживание функций (П, ПИ, ПИД);
- б) тест-проверка (отсутствие течи);
- в) блокировки (по воде, по фазам, по перегрузке, старт нулевого положения, автоматическое заземление).

В последнее время для уменьшения загрузки оператора установки снабжаются системами простейшей автоматики с индикацией на пультах управления, что значительно упрощает обслуживание оборудования.

5.6.2 Устройства сопряжения ЭВМ с объектом (УСО)

ЭВМ напрямую неспособна воспринимать сигнал с датчика. В первую очередь сигнал должен быть преобразован из аналогового в цифровой. Такое преобразование осуществляется в устройстве сопряжения с объектом (УСО типа ИНТЕРФЕЙС). Нашли широкое распространение преобразователи следующих типов:

- а) напряжение - число импульсов (марки ПНЧ);
- б) напряжение - разность сигналов.

В первом приближении преобразование сигналов может быть выполнено на микросхемах типа КР 580, КР 1810, К 1816 (интерфейс марки И-41). Магистральный параллельный интерфейс типа "МПИ" может быть выполнен на микросхемах К 1809, К 1801, К 581, К 588. Известны аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП), которые имеют собственное встроенное "прошитое" программное обеспечение и рассчитаны на подключение 48 каналов одновременно с выдачей кода по конкретному адресу (марки АЦП К 572 ПВ1). В числе программируемых УСО следует отметить систему "ОРИОН-3".

5.7 Программное обеспечение технологических процессов

Для проведения технологических операций могут использоваться программы различного уровня от механического коммутатора до электронно-вычислительной машины. В настоящее время нашли широкое применение маршрутные и технологические карты, а также описания последовательности технологических операций в виде документации.

Перед проведением технологической операции следует оценить предыдущие процессы с изделием, познакомиться по справочной литературе с маркой материала, оценить требования заказчика к результату, а также технологические возможности оборудования. Целесообразно процесс подготовки разбить на несколько этапов:

- а) составление последовательности технологических операций;
- б) присвоение индексов операциям;
- в) составление таблицы параметров и времени их выполнения;
- г) канал возврата на случай брака.

Последовательность технологических операций предполагает несколько каналов (по числу участников операции). Например, при напылении пленок в вакууме участниками процесса являются: исходный материал, вакуумная камера, источник паров, подложка, система индикации толщины пленки, система газового питания и т.д.

5.8 Пневмоавтоматика

При решении задач автоматизации наряду с электрическими ~ и электронными средствами широко применяется пневмоавтоматика. В таких отраслях, как химическая, газовая, пищевая и др., пневмоавтоматика является основным средством автоматизации. Пневматическая аппаратура проста в обслуживании, дешева, пожаро- и взрывобезопасна. Она может работать при очень высоких температурах. Системы работают от вентилятора при атмосферном давлении.

В отличие от традиционных электронных систем, элементы пневмоавтоматики представляют собой отдельное функциональное устройство. В числе отличительных достоинств пневмоэлементов следует отметить:

- а) технологическую совместимость с различными технологиями;
- б) быстродействие (Гц - кГц);
- в) работа в условиях высоких температур, радиации;
- г) небольшие массогабаритные параметры;
- д) возможность исполнения в виде плат с набором огромного числа элементов.

5.8.1 Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА)

Это набор элементов, достаточный для построения любого управляющего устройства со стандартными характеристиками. Система включает в себя следующие устройства:

- усилители, модуляторы, триггеры, делители;
- генераторы функциональных сигналов;
- вычислительные устройства;
- логические и функциональные элементы, сдвигающие регистры;
- концевые выключатели, кнопки, тумблеры;
- интеграторы, повторители, дифференцирующие звенья;
- емкости, сопротивления, дроссели и др. элементы;
- аналоговые блоки дискретной автоматики.

В ряде стран: США (фирма MOOR.), Германии (фирма DRD), Англии

(фирма SUNVIC) нашла применение агрегатная унифицированная система "АУС" блочного типа с элементами логической автоматики. В последнее время нашли широкое применение шифраторы и дешифраторы сигналов, а также системы формирования сложных изменяемых сигналов, так называемые "импульсаторы", а также печатные пневматические платы.

Это позволило построить пневматические вычислительные машины для горячих цехов и взрывоопасных производств.

5.8.2 Пассивные и активные пневмоэлементы

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

Для активных элементов требуется дополнительная энергия стимулирования эффектов. В ряде случаев для стимулирования используется тлеющий, дуговой или искровой разряд, температура, энергия дополнительной газовой струи.

Принцип работы активных и пассивных пневмоэлементов

В основу работы пневмоэлементов положены законы сохранения количества движения, эффекты в пограничном слое, эжектирующие эффекты, эффекты перехода турбулентного потока в ламинарный, различные кромочные эффекты, эффекты взаимодействия струй с преградой и струй между собой.

Передаточные функции пневмоэлементов

Пневмоэлементы могут производить алгебраические операции, связанные с задержкой сигналов или их генерацией, операции формирования импульсов произвольной формы и т.д. Наиболее широкое распространение нашли следующие функции преобразования:

- а) линейная (реализуется при суммировании давлений);
- б) стабилизационная (реализуется в условиях постоянства расхода газа при перепаде давлений в струе более порядка);
- в) квадратичная (в первом приближении реализуется при откачке газа из камеры);
- г) логарифмическая (реализуется в распределении давления по длинному трубопроводу);
- д) дифференцирующая (реализуется при дросселировании потока);
- е) произвольная.

На пневмоэлементах успешно реализуются законы управления технологическими процессами. Например: П-закон реализуется на мембране, соединенной с катушкой, ПИ-закон на игольчатом натекателе, ПИД-закон реализуется на поплавковых элементах в струе газа.

Типы пневмопреобразователей

Техническое исполнение пневмопреобразователей основано на различных газодинамических эффектах. Исходя из простоты и энергетических затрат наиболее широкое распространение нашли следующие типы пневмоэлементов:

- а) струйный;
- б) дроссельный;
- в) мостовой;
- г) компенсационный;
- д) тепловой.

В последнее время успешно развиваются газожидкостные системы компенсационного типа.

5.9 Числовое программное управление

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.

5.9.1 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.

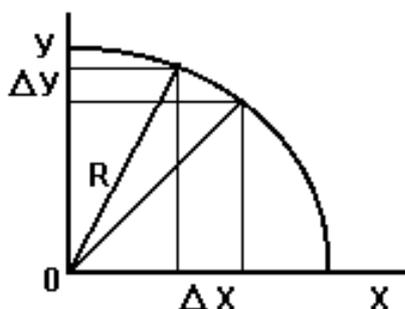


Рисунок 5.21 – Задание информации для цифровой модели азимута

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».

Числовое программное управление нашло широкое применение в автоматизации машиностроительного производства, в станкостроительной промышленности, в робототехнике. Степень автоматизации систем может быть средняя (до 30%), низкая (до 20%), нулевая (менее 20%).

5.9.2 Показания и запреты к применению ЧПУ

Числовое программное управление предполагает повышение точности изготовления деталей, наличие высококвалифицированного обслуживающего персонала, наличие вычислительного центра и т.д. В конечном итоге ЧПУ является относительно дорогим мероприятием, не приводящим к уменьшению стоимости изделий. Предпочтение числовому программному управлению отдается в следующих случаях:

- а) массовое изготовление относительно простых деталей;
- б) возможность математического описания элементов последова-

тельности технологических операций (для многовариантной оптимизации);

- в) загрузка оборудования не менее полутора смен в день;
- г) наличие кадрового обеспечения.

По отзывам специалистов, имеющих многолетний опыт использования ЧПУ (США, Япония, Корея, Англия) системы ЧПУ не оправдывают себя в следующих производствах:

- а) ремонтные и заготовительные цеха;
- б) сложные детали высокой точности изготовления;
- в) малосерийность;
- г) отсутствие оснастки;
- д) недостаточная точность станка;
- е) маленький магазин станка;
- ж) большая перенастройка.

Системы автоматизации традиционного неспециализированного оборудования довольно сложны и дороги. Перед внедрением ЧПУ проводится функционально-стоимостной анализ. Чаще вместо систем автоматизации целесообразно организовать дополнительное рабочее место. В числе способов снижения стоимости можно отметить следующие достижения:

- а) патентный анализ на новые достижения;
- б) менее жесткий допуск на размер, материал и степень его обработки;
- в) применение составных деталей с последующей разрезкой;
- г) применение стандартных деталей;
- д) использование коллективного творчества

5.9.3 Особенности выбора деталей для ЧПУ

Для повышения эффективности станков с ЧПУ руководствуются следующими рекомендациями:

- а) исключаются очень большие консоли;
- б) вводятся ограничения по диаметру и длине;
- в) исключаются детали по месту или требующие подгонки;
- г) исключается обработка неоднородных композитных материалов, например металлокерамики.

Следует отметить, что ЧПУ уменьшает время обработки сложных деталей, повышает производительность процесса до 20%, сокращает транспортные расходы, повышает точность изготовления, но не ведет к уменьшению стоимости изделий, поскольку высока стоимость станков и их обслуживание.

5.9.4 Технический процесс изготовления деталей на станках с ЧПУ

Право введения и производство станков с ЧПУ принадлежит ведущим специалистам предприятия. Общая схема процесса внедрения, станков с ЧПУ может быть представлена следующим образом. Главный инженер

осуществляет финансовую и техническую поддержку проекта с применением ЧПУ. Инженер-технолог с группой специалистов осуществляет контроль предполагаемых изделий на технологичность. Начальник вычислительного центра обеспечивает программное обеспечение процесса, математизацию операций, контроль ошибок, составляет базу данных на материальные ресурсы и инструменты. Начальник цеха производит изготовление пробного образца и оптимизацию его производства.

С целью уменьшения затрат производится оптимизация процесса изготовления-изделия по следующим направлениям:

- а) варьирование оборудования и инструментов;
- б) пересчеты технологических циклов;
- в) выработка технологической траектории;
- г) покaдровый просмотр технологических операций;
- д) учет достижения науки и техники, применение передового опыта.

5.9.5 Способы построения систем с ЧПУ

По способам построения системы с ЧПУ выделяются в следующие классы:

NC - блочное исполнение электронных узлов;

NC - применение больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС);

CNC-NC - применение БИС, СБИС и подсистем регулирования техпроцессов типа "ТЕХНОЛОГ";

MPST - применение микроЭВМ.

5.9.6 Технологические средства отсчета размеров

Перед началом обработки детали, средство отсчета берет исходную точку за начало отсчета размеров. В качестве датчиков отсчета применяются:

- а) индикаторные головки (термопарные, электроконтактные);
- б) оптические средства на базе светодiodов, лазеров и оптопар;
- в) базовая поверхность части заготовки;
- г) пневмодатчики;
- д) индуктивные датчики.

Особенность использования систем отсчета состоит в необходимости поддерживать относительно постоянную температуру их эксплуатации.

5.9.7 Следящие системы ЧПУ

Обычно оператору, обслуживающему станки с ЧПУ, поручается не менее шести-десяти станков одновременно. На индикаторную панель станка обычно выводятся следующие данные:

- а) виброакустика (шумомер, спекрограф);

- б) данные токовой нагрузки по элементам схем;
- в) аварийная автоматика.

5.9.8 Погрешности в системах с ЧПУ и методы их лечения

При работе систем с ЧПУ неизбежно возникают погрешности. Основные из них следующие:

- а) погрешность программирования (ошибка из-за округления).
Лечение: простановка запятых после третьего знака и более;
- б) погрешность установки деталей (погрешность работа: ~ 50 мкм).
Лечение: применение кондукторов и направляющих, перебазировка координат, коррекция программы;
- в) погрешность установки инструмента (± 0.01 мм). Лечение: смещение фотодатчиков (± 0.06 мм), контрольный проход с последующей коррекцией;
- г) прочие погрешности: износ инструментов, износ следящего привода вибрация, изменение температуры.

Методы лечения:

- а) разработка программ коррекции;
- б) использование специальных программ типа "СПИД" (станок, приспособление, инструмент, диагностика);
- в) применение информационно-измерительных систем (например ОКАР-34, АРМ "КУЛОН 1").

5.9.9 Цифровые модели объектов

При работе систем программного управления возникает необходимость в цифровом задании траектории инструмента. Для этой цели служат цифровые модели.

Линейное движение может быть задано:

- по координатам x, y ;
- полярными координатами (углом и длиной радиуса вектора);
- по теореме Пифагора (по приращению осей координат);
- по формуле и числу импульсов.

Техническое исполнение цифровой модели линии осуществляется также применением интегратора или специальной логики.

5.9.10 Линейный интерполятор и его функции

Линейный интерполятор - это устройство, позволяющее проводить подстройку траектории инструмента. Он осуществляет следующие функции:

- а) снятие опорного отсчета;
- б) выработка коррекции поправок;
- в) вычисление новой траектории;
- г) коррекция по аналогичным технологическим процессам.

5.9.11 Цифровые модели азимута

Угол поворота инструмента или держателей детали может выполняться с помощью дисков с прорезями в комплексе с оптопарами (по аналогии с мышью ЭВМ). В ряде случаев применяются кодовые диски, либо цифровые дифференциальные анализаторы азимута. Анализатор выполняет графическую прорисовку траектории на дисплее станка, а также функции интерполяции и нормализации сигнала.

5.9.12 Алгоритмы программ обработки изделий

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.

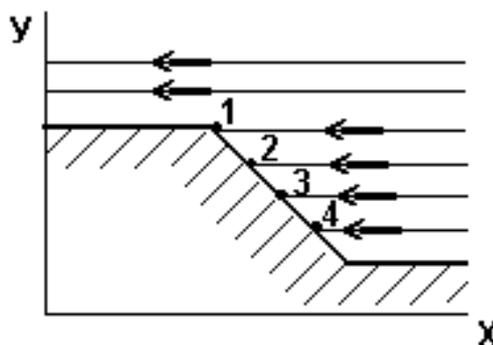


Рисунок 5.22 - Схема построения параметров для программы линейной обработки

5.9.13 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.

С уменьшением диаметра число оборотов должно увеличиваться. Это достигается изменением управления на тиристорном регуляторе числа оборотов, либо на регуляторе изменения подачи.

5.9.14 Программа типа "пакет формул"

Подобные программы представляют собой либо совокупность нескольких формул, либо когда переменные находятся в функциональной зависимости от других величин.

В качестве примера 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). Скорость подачи зависит от режима обработки. Коррекция программы будет состоять в учете скорости обработки материала, учете параметров заготовки (применяется третий пакет).

5.9.15 Программы с условными и безусловными переходами

Программа с условным переходом 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.).

5.9.16 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.

5.9.17 Программы с подпрограммами

На станках с ЧПУ за одну установку детали обычно проводится полное изготовление детали. Это может быть проточка, нарезание резьбы, сверление. Особенности процесса состоят в том, что промежуточные операции могут меняться местами с одновременной перебазирвкой координат от одной операции к другой. В таких случаях рекомендуется применение гибридного интегратора, в который вносятся в виде подпрограмм технологические процессы каждой операции.

5.10 Автоматизация технологических процессов с помощью ЧПУ

Перед изготовлением деталей проводится анализ на возможность их изготовления. При анализе исходных чертежей проверяется стандартизация деталей, унификация операций, таблицы кодировки деталей, последовательность технологических операций, условия сборки деталей. Составляется массив загрузки оборудования, просчитываются экономические показатели.

5.10.1 Шифровка деталей, инструментов и операций

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».

По международным стандартам сведения о материалах, эскизах деталей и инструментах оформляют в виде таблиц. В последнее время широко практикуются электронные таблицы и базы данных. В таблице 5.2 приведен фрагмент подобной таблицы.

Таблица 5.2 - Таблица инструментальных модулей

Поряд. Номер	Эскиз детали	Материал	Инструмент 1	Инструмент 2
1	Кольцо	Медь	Сверло 12	Метчик 14
2	Фланец	Сталь	Резец ТК-15	-

Подобные таблицы составляют для инструментов и операций. Рекомендуется чаще использовать обычный инструмент и в меньшей мере

"экзотический". Фрагмент инструментального каталога приведен ниже.

Таблица 5.3 - Фрагмент инструментального каталога

Поряд. номер	Инструмент	марка инструмента	Координаты опорной точки	Примечание
1	Резец	T15K6	X=9, Y=54	Черновой
2	Резец	TK-25	X=9,23, Y=55	Чистовой

5.10.2 Унификация технологических операций

При кодировке технологических операций принято пользоваться стандартными международными обозначениями операций в виде цифр. Например:

- заготовительные операции -001- черновое точение;
- фрезерные - 400;
- шлифовальные -500;
- термообработка -200, 506-шлифовка с полировкой.

Перечень технологических операций приводится в справочной литературе.

5.10.3 Автоматизированные системы для ЧПУ

Ряд операций для ЧПУ может быть упрощено благодаря применению специальных программ. В настоящее время определилось три группы библиотек программных продуктов различного уровня:

- 1-я группа: автоматизация вычислений;
- 2-я группа: автоматизация программирования;
- 3-я группа: автоматизация автоотладки.

Автоматизация вычислений предполагает разнообразие операционных систем, базы данных на кадры, ресурсы и инструмент, математическое обеспечение.

Автоматизация программирования предполагает применение различных языков пользователя, трансляторов и программных документов.

Автоотладка обеспечивает работу языка пользователя для тестирования цепей, работу отладчика программ, некоторые функции по корректировке режимов. В настоящее время среди эксплуатационников популярны системы диагностики оборудования, системы прогнозов ошибок и рекомендации по функциям технологического воздействия.

Перед автоматизацией технологического процесса необходимо составить портрет цеха, программу оперативного управления, методы устранения брака, степень автоматизации цеха.

5.11 Языки программирования технологического оборудования

При приведении технологических операций нет необходимости в применении больших электронно-вычислительных машин. В основном требуются машины с возможностью выработки сигнала коммутации исполнительного устройства (например, машины фирмы MAKENTOSH). В настоящее время нашли применение, так называемые, языки пользователя:

- а) ассемблер;
- б) Паскаль; бейсик;
- в) язык релейно-контактных символов:
- г) "Время-команда";
- д) "Время-параметр";
- е) язык булевых уравнений.

5.12 Язык релейно-контактных символов

Для различных систем робототехники, систем автоматизированных станков и кузнечно-прессового оборудования широко применяется язык, основанный на аналогии включения или выключения контактов электрических схем. Условные обозначения такого языка по данным фирмы MODICON следующие:

___/_ нормально разомкнутый;

___/___ нормально замкнутый;

___I___ вход в параллельную ветвь;

-O- время.

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.

5.13 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)". В таблице 4.1 представлено соответствие булевых и релейных символов.

Таблица 4.1 - Таблица соответствия булевых и релейных символов

Операция	и	или	инверсия
Булевый индекс	\wedge	\vee	A/A
Релейный символ	$_ / _$		

5.14 Языки типа "Время-команда", "Время-параметр"

В ряде случаев подача команд на проведение последующей операции технологического цикла может производиться по истечении определенного времени или по достижении определенного параметра. Подобные реле времени рассчитаны на коммутацию канала в течение времен от секунд до недели и имеют до 24 каналов. Такие системы нашли широкое применение в электрофизических, и. электровакуумных установках" под названием "ОРИОН-3".

Система "ОРИОН-3" предполагает контроль ввода сигналов, контроль хода процесса, управление процессом и индикацию параметров. Система снабжена подсистемами управления типа "ТЕХНОЛОГ" марки УТК - управление, технология, контроль. Подсистема "ТЕХНОЛОГ-1" предполагает технику исполнения изделия и включает в себя технические требования на материалы, инструменты, а также технические допуски на изготовление. Подсистема- "ТЕХНОЛОГ 2" предполагает базу данных кадрового обеспечения и вспомогательного . производства. Система" ОРИОН" имеет дополнительный набор параметров: напряжение, температура, время.

5.15 Язык управления типа КАУТ

Поиск наиболее универсального и простого языка общения с автоматикой техпроцессов привел к системе, включающей контроль, анализ и управление технологией (КАУТ). Язык системы содержит три типа переменных:

- а) целые числа;
- б) напряжение (вольты);
- в) время.

Язык снабжен ключевыми словами, вводимыми вначале программирования (температура, 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.

5.16 Язык типа КАУТ

Одним из примеров применения языка "КАУТ" может быть выполнение процесса напыления пленки на установке термовакуумного напыления. Процессу напыления пленки предшествуют операции очистки материалов, их монтаж в вакуумной камере, откачка воздуха из камеры, прогрев всех деталей.

Первоначально составляется последовательность технологических операций. Каждой операции присваивается буква и номер. Присвоение букв производится по признакам подобия операций, а присвоение цифр – кратко 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 ...), (Н5Л10, Н15 ...).

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

контролируемые: К1 - давление; К2 - температура;

регулируемые: Р1 - нагрев;

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

параметры: П1 - температура; П2 - счетчик.

1. Включение клапана В1;

2. Включение откачки В2;

10. ВКЛ. НАГРЕВ;

15. ЖДАТЬ 150 (ждать 150 секунд пока нагреется);

20. М 10;

35. ЕСЛИ К 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).

Таким образом, составляется вся программа. Справа программы возможны комментарии.

5.17 Система управления "САМАС" ("КАМАК")

Система "КАМАК"- это многоуровневая система. На первом уровне осуществляется система диагностики и обеспечения работоспособности оборудования. Второй уровень обеспечивает программную обработку данных. Третий уровень обеспечивает моделирование процессов. Система содержит библиотеку программных продуктов и вспомогательные функции по обработке эксперимента. Система позволяет одновременно поддерживать и обрабатывать около десятка установок различного профиля.

5.17.1 Этапы программного обеспечения системы КАМАК

При относительно небольших массогабаритных параметрах система КАМАК является дорогой и требует высококвалифицированного обслуживания узкими специалистами. Перед использованием системы рекомендуется ответить на ряд вопросов:

- а) оценка целесообразности;
- б) проблема кадрового обеспечения (техника, методика, материалы и т.д.);
- в) программное обеспечение;
- г) алгоритмы обработки.

В настоящее время системы КАМАК нашли широкое применение в академической науке, в цехах, работающих без присутствия человека, в автоматизированной поддержке рабочих мест (АРМ). При подключении к сети система обеспечивает управление на расстоянии.

Система КАМАК позволяет обслуживать одновременно несколько разнопрофильных установок. Способы соединения приборов в такой системе определяются возможностями сети и ее интерфейсами. Наиболее широкое распространение нашли следующие способы соединения приборов:

- а) каскадный (последовательный друг за другом);
- б) радиальный (в виде окружности с центром для ЭВМ);
- в) магистральный (с подключением, приборов на общую шину ЭВМ);
- г) комбинированный.

5.17.2 Адекватность в системах автоматизированного контроля

Адекватность объекту означает соответствие аппаратуры и объекта по определенным характеристикам, носителями которых являются контролируемые параметры. (Это значит, что если оборудование работает с третьим классом допуска по размерам, то нельзя проводить контроль по повышенному классу точности). Набор параметров несет информацию только об определенном состоянии отражаемого объекта, поэтому автоматизированная система контроля может получить лишь ограниченное количество информации. В принципе объект располагает бесконечным количеством информации, однако автоматизированная система контроля, как правило, имеет ограниченные отражательные способности. Поэтому всегда требуется произвести отбор параметров по их существенности, ценности, полноте. Количественное выражение адекватности можно получить в виде критерия, представляющего собой некоторую функцию отношения реально воспринятой автоматизированной системой контроля информации к необходимой информации, заключенной в исследуемом объекте. Под необходимым количеством информации будем понимать минимальное количество информации для достижения определенной цели.

Для характеристики адекватности по отношению к оператору

представляют интерес и информационные характеристики отражения. Это связано с необходимостью отражения информационного портрета объекта человеком. Присутствие "смысла" отражения и цели — необходимое условие для выработки адекватных реакций оператора на полученный сигнал. Такие характеристики описываются функциями информационного, конструкторского и психологического состояний системы человек- объект производства.

Кроме вышеописанного, можно рассматривать адекватность систем автоматизированного контроля применительно к условиям внешней среды. Критерий адекватности для сферы внешних условий должен обосновывать выделение ядра (универсальной части аппаратуры), удовлетворяющего определенному классу объектов и разумным диапазонам изменения внешних условий.

Адекватность по отношению к внутренним задачам означает соответствие внутренней структуры системы контроля требованиям по надежности, точности, помехоустойчивости при различных изменениях внутренних условий (внутренних шумах, колебаниях питающих напряжений, старением элементов, изменении сигналов эталонных источников и т. п.).

В первом приближении критерием адекватности системы контроля к объекту является коэффициент асимметрии, в виде относительного отклонения параметров системы от номинальных значений. Графически коэффициент адекватности представляется в виде смещенных кругов с центрами реального и расчетного значений. Площадь круга представляет собой множество реальных и расчетных значений.

Часто на предприятиях используется одна система автоматизированного контроля для обработки сигналов от разнородных операций. В этом случае может иметь место *потенциальная асимметрия адекватности*, вызванная случайным формированием множества приходящих от объекта значений и более широкой областью расчетных значений. Для подобных случаев необходимо строить таблицу с указанием адреса подключения, названия операции или ее кода и допуска отклонения. Для упрощения обсчета множество значений отклонений параметров системы автоматизированного контроля дробят на три части: общую (симметричную), специализированную и сменную.

5.18 Подсистема управления газовыми потоками

Это децентрализованная система, позволяющая автоматически управлять величиной газового потока. Система содержит расходомер, усилитель, стабилизатор, триггер. В системе полностью отсутствуют электрические элементы, что позволяет ей работать при высоких температурах с очень активными газами. Непосредственное регулирование потока осуществляется вихревым мультивибратором. Система нашла широкое применение в плазмохимическом производстве.

5.19 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 ({}) включают 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.

5.20 Робототехника

5.20.1 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 концевыми 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.

5.20.2 Типы управляющих систем для роботов

Типы управляющих систем для роботов следующие:

- адаптивная (изменение программы происходит при изменении

параметров датчиков, например, температуры печи);

- контурная (управление производится по программе);
- позиционная (задаются только точки прихода и ухода).

В последнее время разработаны унифицированные системы управления узкоспециализированными дешевыми роботами. Работа робота осуществляется в трех режимах: обучение, повторение, редактирование. Следует отметить, что по условиям техники безопасности человек должен быть выведен из зоны робота ввиду возможных ложных срабатываний.

5.20.3 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.

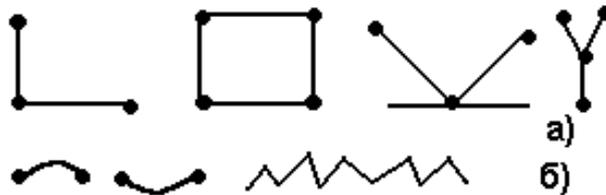


Рисунок 5.26 – Функции синтеза объектов (а); функции стыковки изображений (б).

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

5.20.4 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 цветное зрение роботов пока мало распространено.

5.21 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»

5.21.1 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.

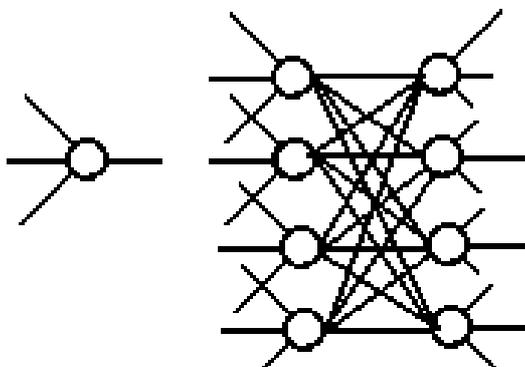


Рисунок 5.28 – Нейрон и фрагмент нейронной сети

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.

6 Эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования. Сертификация и инструкции по эксплуатации

6.1 Децентрализованные системы обеспечения работоспособности вакуумной установки

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).

6.2 Сертификация и номенклатура оборудования

Под сертификацией понимается стандартно-выпускаемое заводом оборудование, имеющее технический паспорт. 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.

6.3 Правила устройства электроустановок при проектировании новых производств

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 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 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 пусконаладочных 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.

6.4 Профилактика

Профилактика 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.

Профилактика 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.

Профилактика 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 ~ 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 VM-5, VM-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 Сервисное обслуживание

6.5.1 Сервисное обслуживание безмасляных вакуумных установок

Форвакуумный тракт безмасляной откачки должен иметь прогреваемую электрическим током ловушку масел, а также ловушку, охлаждаемую жидким азотом. При давлении ~ 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.

6.5.2 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, пульт управления.

6.5.3 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.

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.

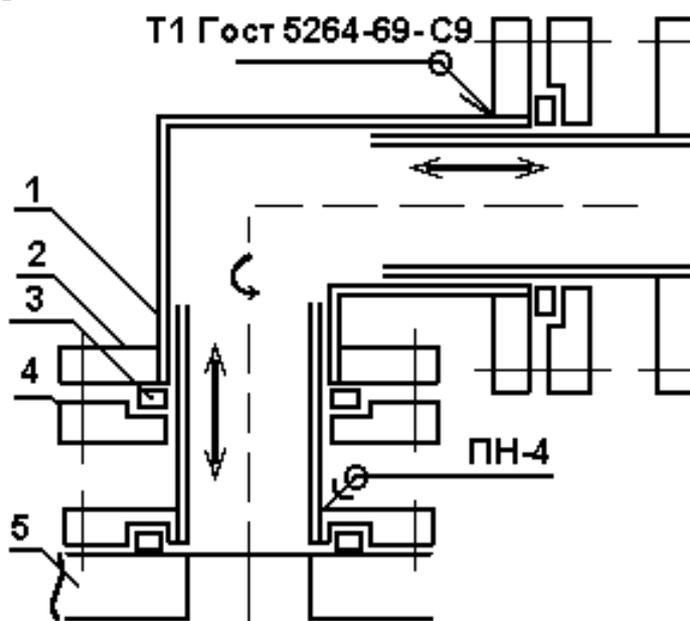


Рисунок 6.1 – Фрагмент вакуумного трубопровода: 1 – труба; 2 – приваренный фланец; 3 – уплотнение (резина); 4 – накидной фланец; 5 – фрагмент корпуса (вакуумного насоса или вакуумной камеры)

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.

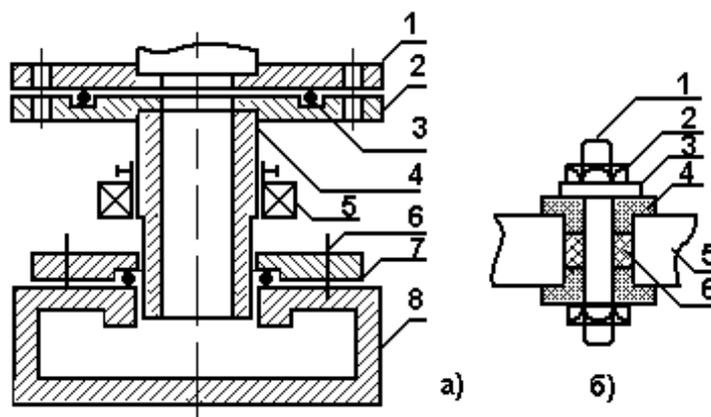


Рисунок 6.2. – а) схема установки источника частиц на вакуумную камеру. 1 – фланец источника частиц; 2 – переходной фланец; 3 – уплотнение; 4 – трубка из немагнитного материала; 5 – магнитная линза; 6 – шпилька; 7 – посадочный фланец; 8 – вакуумная камера. б) 1 – шпилька; 2 – гайка; 3 – шайба; 4 – диэлектрик;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

Вводы в вакуум

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

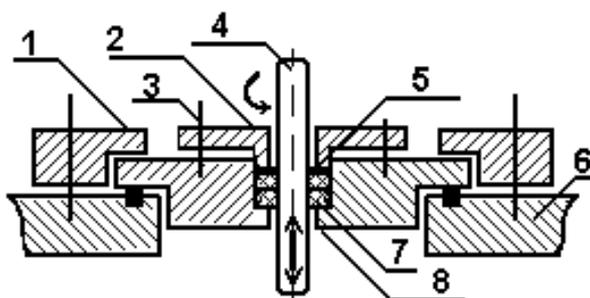


Рисунок 6.3. – Схема подвижного соединения. 1 – фланец, 2 – шайба, 3 – шпилька, 4 – шток, 5 – металлическая прокладка, 6 – стенка вакуумной камеры, 7 – наборные уплотнительные шайбы, 8 – монтажный фланец.

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.

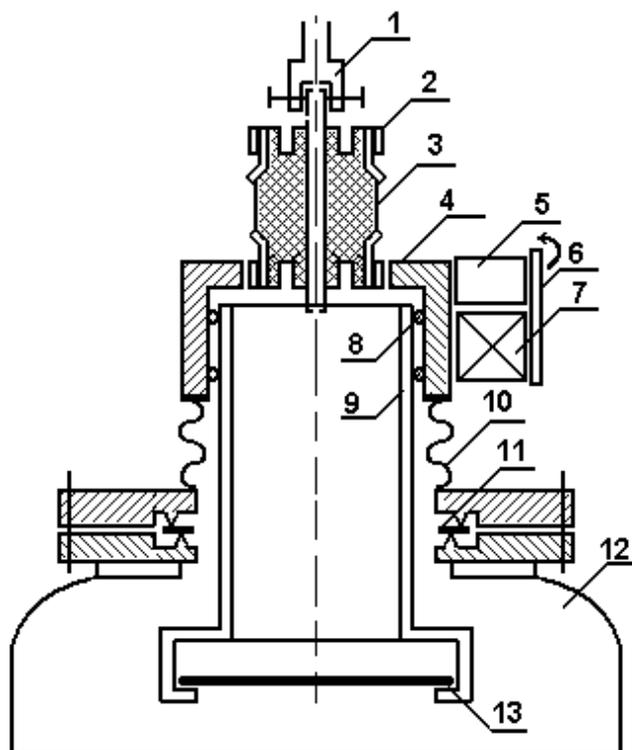


Рисунок 6.4. – Схема сверхвысоковакуумных уплотнений и вводов манипулятора молекулярно-лучевой эпитаксии. 1– клемма, 2 – кольцо металлокерамического спая, 3 – керамический изолятор, 4 – немагнитная нержавеющая труба, 5 – электродвигатель, 6 – червячная передача, 7 – магнит, 8 – подшипник, 9 – стальная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

6.5.4 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.

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

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

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 $\sim 2,5$ А/мм² 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 $\sim 200^\circ\text{C}$.

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.

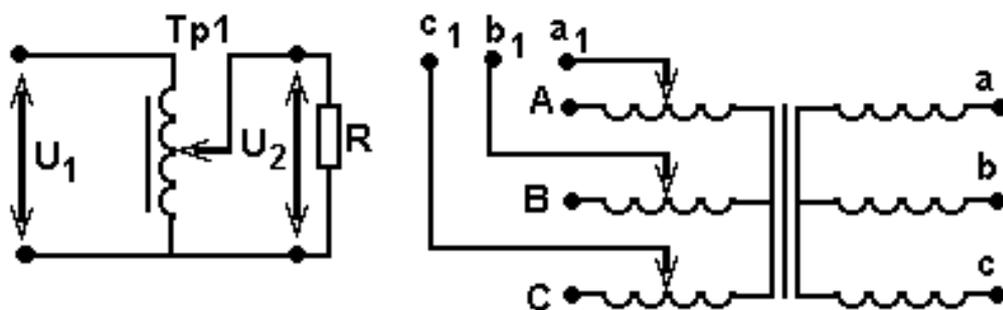


Рисунок 6.5 – Схемы автотрансформаторного регулирования

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.

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.

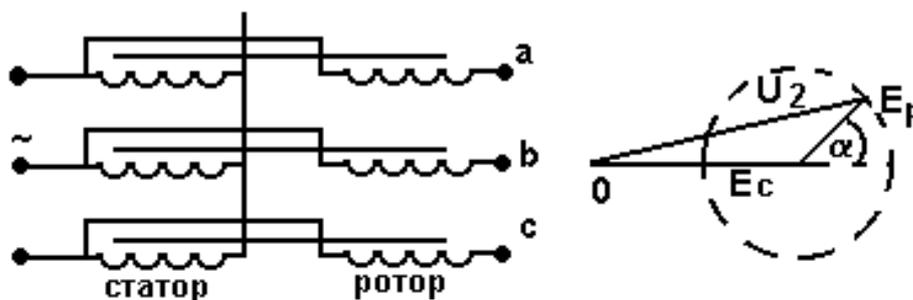


Рисунок 6.6 – Схема потенциал-регулятора и векторная диаграмма изменения напряжения.

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

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.

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 тиристоров, 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.

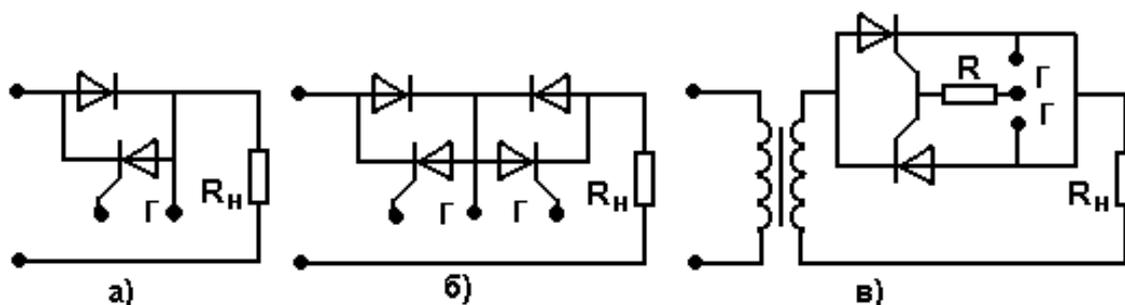


Рисунок 6.7 – Схемы регуляторов на тиристорах

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.

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.

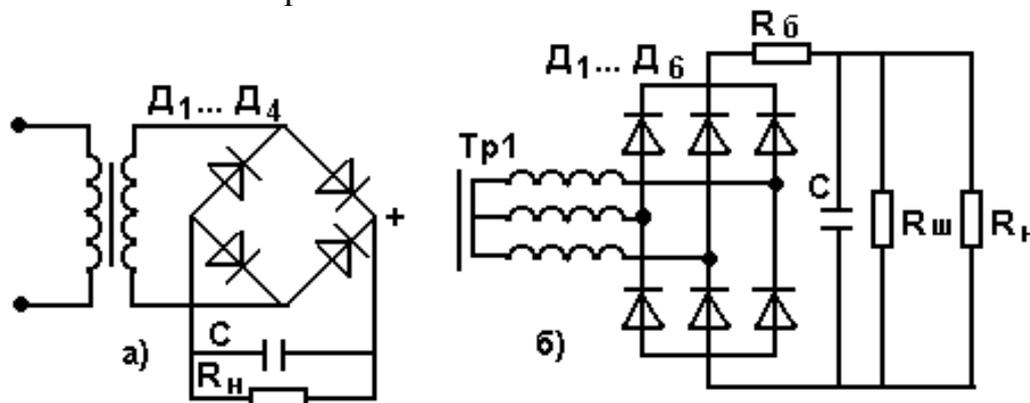


Рисунок 6.8 – Двухтактные схемы выпрямления

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_0), особенно в высоковольтных цепях.

6.5.5 Сервис отдельных блоков электрофизических установок

Электрическая схема вакуумного агрегата

Для получения вакуума в рабочей камере служит вакуумный агрегат, электрическая схема которого представлена на рис. 6.9. Электродвигатель форвакуумного насоса ΦH соединен с электросетью 220/380 В через плавкие предохранители Fu 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.

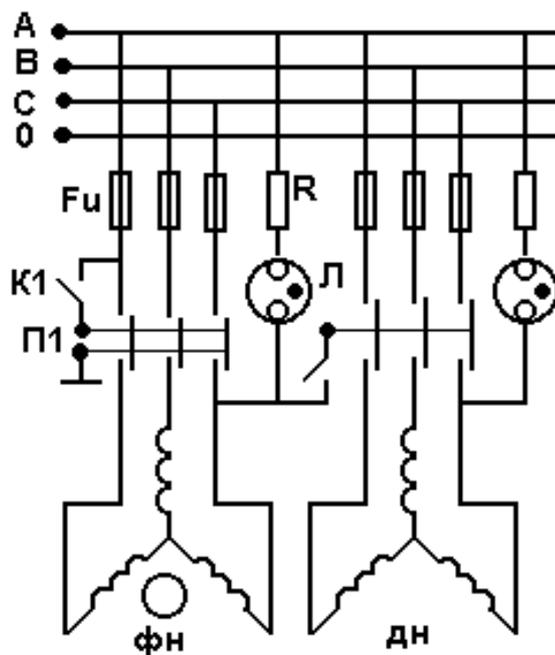


Рисунок 6.9 – Электрическая схема вакуумного агрегата

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.

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 ~ 300 А, после сильноточного переключателя $П$.

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

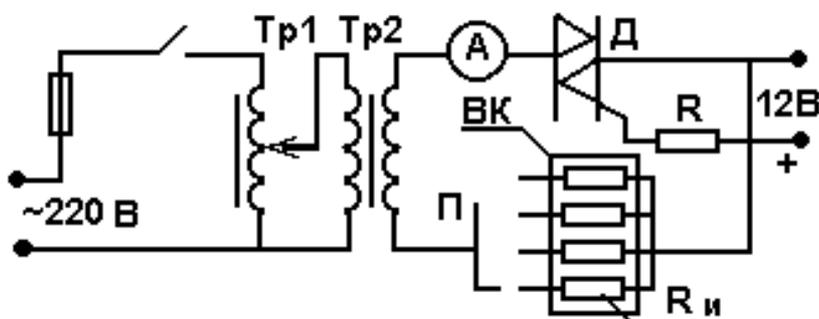


Рисунок 6.10 – Схема питания испарителей

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 $TP1$.

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.

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 $R1 - R8$ (~ 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 $\sim 3-5 \text{ мА/см}^2$.

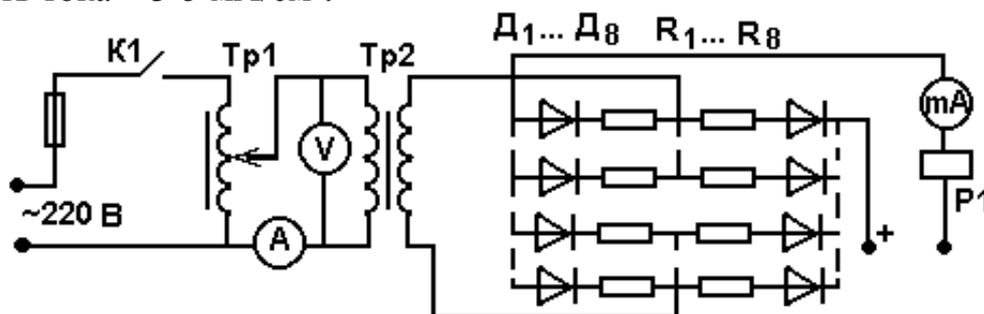


Рисунок 6.11. – Схема питания электродов газоразрядной очистки

6.5.6 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, токовводов или элементов привода обрабатываемой детали.

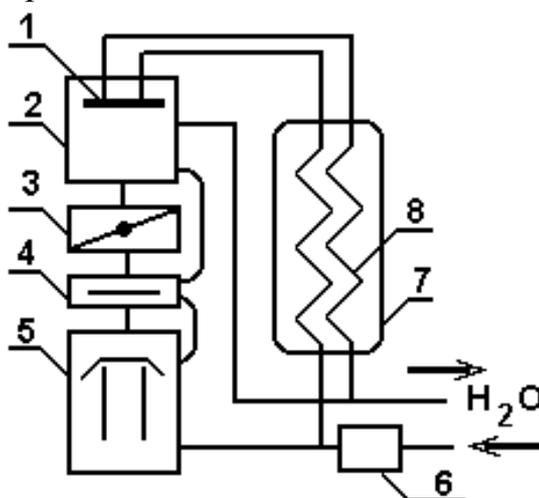


Рисунок 6.12 – Схема водяного питания вакуумной установки: 1 – катод-мишень; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумный затвор; 4 – ловушка паров масел; 5 – диффузионный насос; 6 – водяное реле; 7 – емкость; 8 – змеевик.

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.

6.5.7 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.

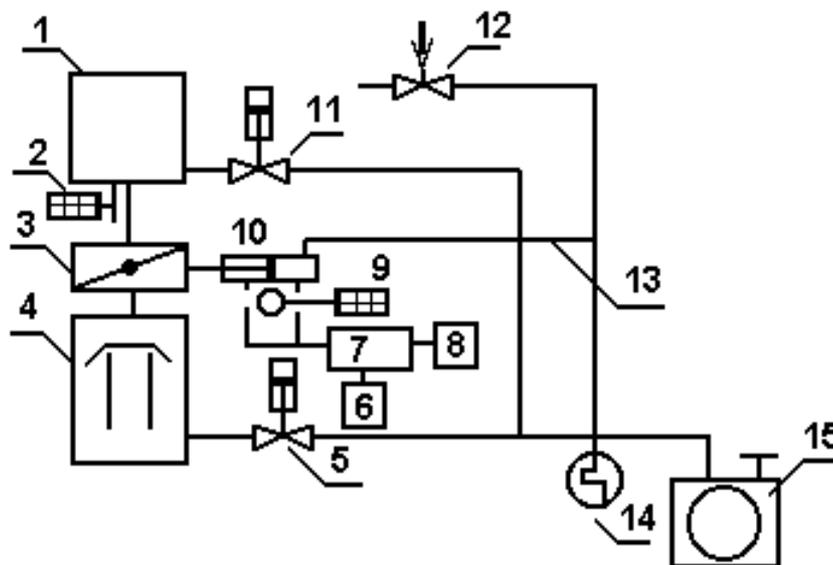


Рисунок 6.13 – Схема пневматической системы установки БУЛАТ: 1 – вакуумная камера; 2 – клапан напуска газа в камеру; 3 – высоковакуумный затвор; 4 – диффузионный насос; 5, 11, 12 – вентили; 6 – компрессор; 7 – коллектор; 8 – реле давления; 9 – электромагнитный клапан; 10 – пневматический цилиндр; 13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

6.5.8 Сервисное обслуживание систем гидравлики

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

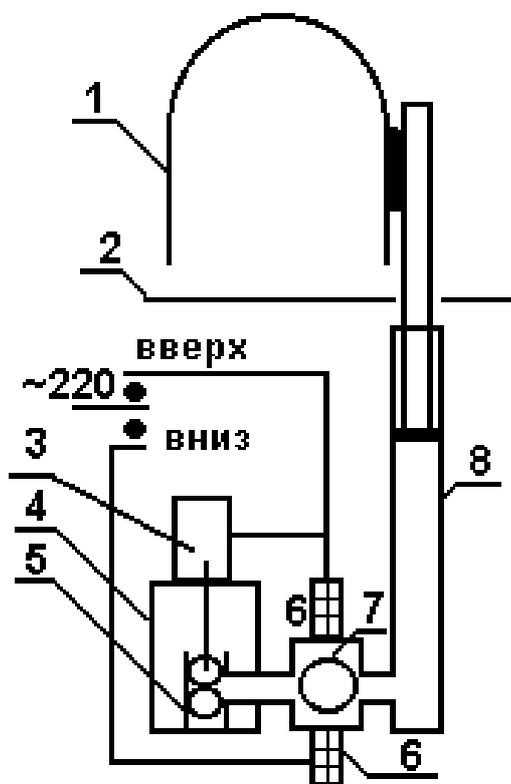


Рисунок 6.14 – Схема гидравлической системы вакуумной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – рабочая плита установки; 3 – электродвигатель; 4 – масляный бак; 5 – масляный шестеренчатый насос; 6 – электромагниты; 7 – распределитель с шариком; 8 – гидроцилиндр.

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.

6.5.9 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 $30 - 80 \text{ см}^3 \text{ атм/час}$. 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.

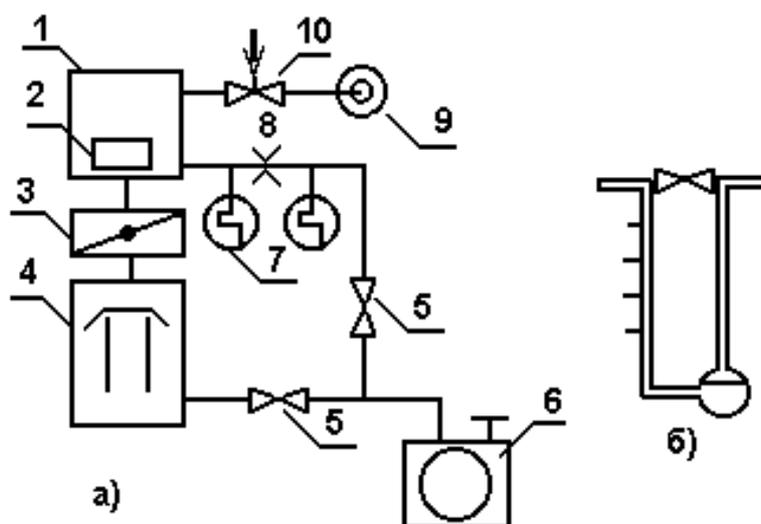


Рисунок 6.15 – Схема газового питания электрофизической установки: 1 – вакуумная камера; 2 – генератор газа; 3, 5, 10 – вентили; 4, 6 – вакуумные насосы; 7 – датчики давления; 8 – диафрагма; 9 – расходомер; б) конструкция лабораторного расходомера.

Часто в вакуумных установках используются генераторы газа в виде замороженных исследуемых продуктов (воды и др), или соединений, выделяющих газ при нагревании (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.

6.5.10 Сервисное обслуживание систем очистки воздуха

Для производства приборов микроэлектроники применяется очищенный воздух с количеством пылинок не более 3-4 шт на 1 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 обратного 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».

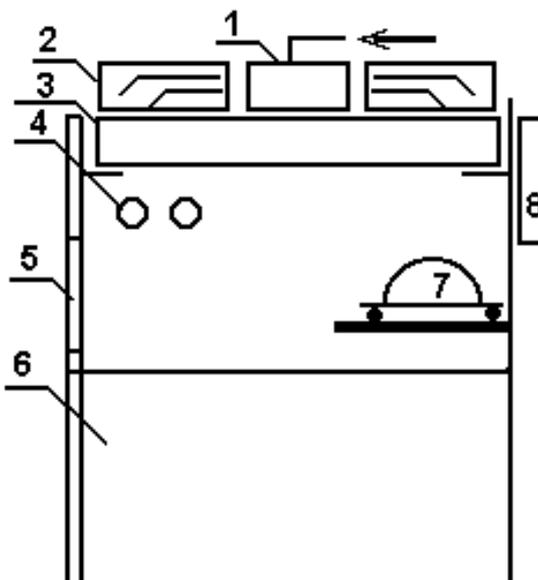


Рисунок 6.16 – Принципиальная схема модуля очистки воздуха ЛАДА: 1 – вентилятор; 2 – газораспределитель; 3 – фильтр; 4 – лампы освещения; 5 – рабочее окно; 6 – герметичное ограждение; 7 – емкость для изделий; 8 – блок электрической разводки.

Выхлопные газы (CO , CO_2 , C_nH_m , 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).

6.5.11 Сервисное обслуживание специальных установок

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.

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.

Диффузаны 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 $\sim 5^{\circ}/\text{мин}$.

Эксплуатация и сервисное обслуживание установок нанотехнологии типа Катунь

Установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) используется 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 МВЕ-500 и МВЕ-1000 (Molecular Beam Epitaxy).

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

Вакуумная система установки МЛЭ типа «Катунь»

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

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 $\sim 600^{\circ}$ С. 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

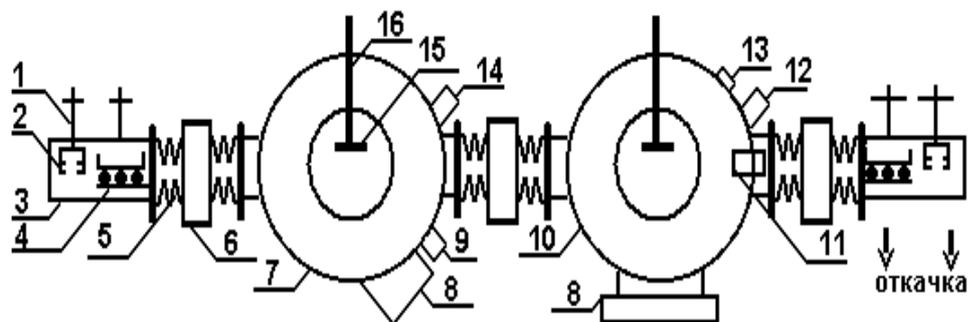


Рисунок. 6.17. – Схема установки МЛЭ. 1 – вакуумный затвор, 2 – магазин, 3 – корпус модуля загрузки, 4 – конвейер, 5 – сильфон, 6 – пневматический шлюз, 7 – камера роста структур, 8 – испарители, 9 – ионный источник, 10 – камера анализа структур, 11 – ОЖЕ- спектрометр, 12 – квадрупольный масс- спектрометр,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

На рис. 6.18 представлена вакуумной камеры установки КАТУНЬ.

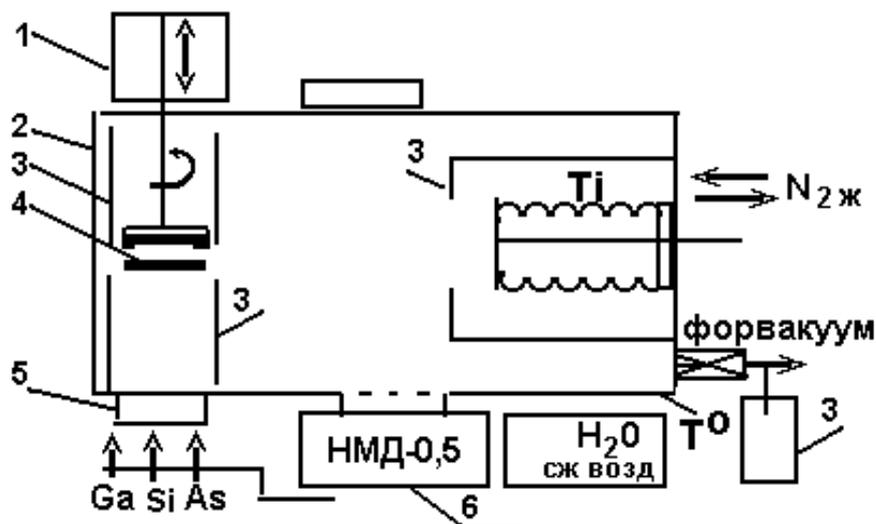


Рисунок 6.18 – Схема установки МЛЭ: 1 – манипулятор; 2 – вакуумная камера; 3 – криогенные панели; 4 – подложка; 5 – испарители; 6 – электроразрядный насос.

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°C . Пределы регулирования температуры источников $300\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ с допуском поддержания температуры 1°C . Манипуляторы рабочих камер имеют по 4 степени подвижности, с поворотом вокруг оси на 360° . Погрешность воспроизведения положения подложки при перемещении вдоль одной из координатных осей менее 1 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 внутри электронагревателя и танталового экрана. Ёмкость тигля 1.6 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.

ОЖЕ- спектрометр

Для анализа состава подложек методом ОЖЕ- спектрометрии 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 $1\text{--}12\text{ кэВ}$. В этом случае используют сцинтиллятор и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

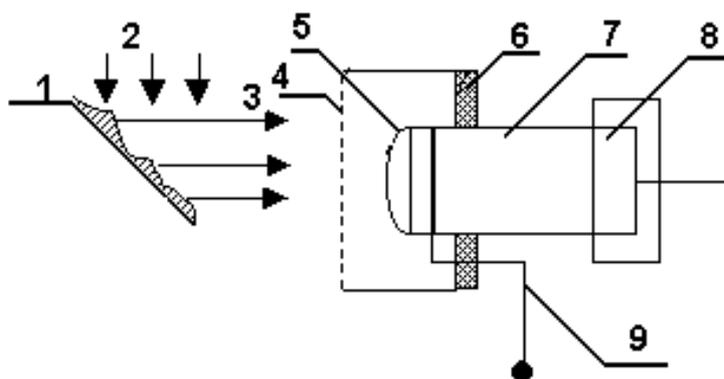


Рисунок 6.19 – Схема регистрации вторичных электронов: 1 – объект; 2 – поток электронов; 3 – вторичные электроны; 4 – сетка; 5 – сцинтиллятор; 6 – изолятор; 7 – световод; 8 – ФЭУ; 9 – высоковольтный ввод.

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.

Молекулярные источники

На рисунке 6.20 изображен типовой источник молекулярного потока.

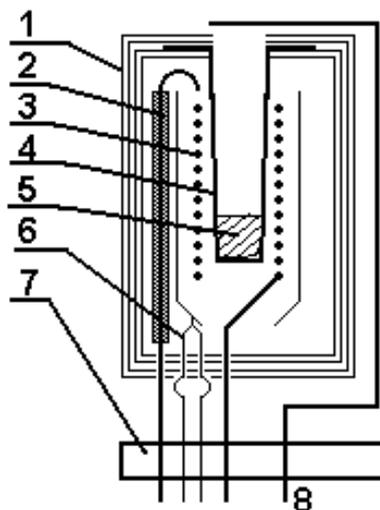


Рисунок 6.20 – Схема испарителя: 1 – экран; 2 – ввод нагревателя; 3 – нагреватель; 4 – тигель; 5 – испаряемый материал; 6 – терморезистор; 8 – привод заслонки

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.

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

тантала.

Манипулятор

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

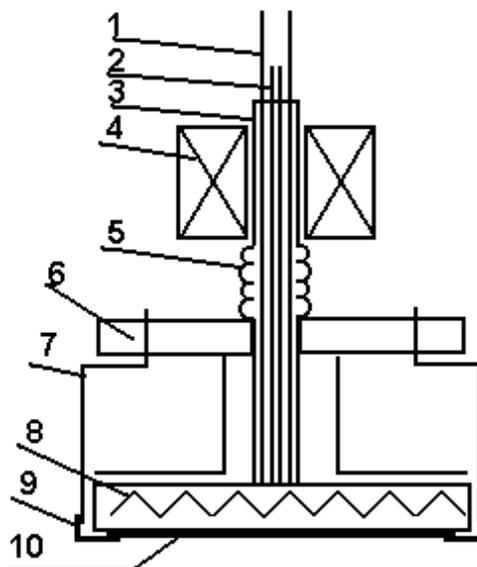


Рисунок 6.21 – Устройство манипулятора: 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 – втулка; 4 – магнитный привод вращения; 5 – сильфон; 6 – монтажный фланец; 7 – держатель; 8 – нагреватель подложки; 9 – захватчик подложки; 10 – подложка.

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.

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.

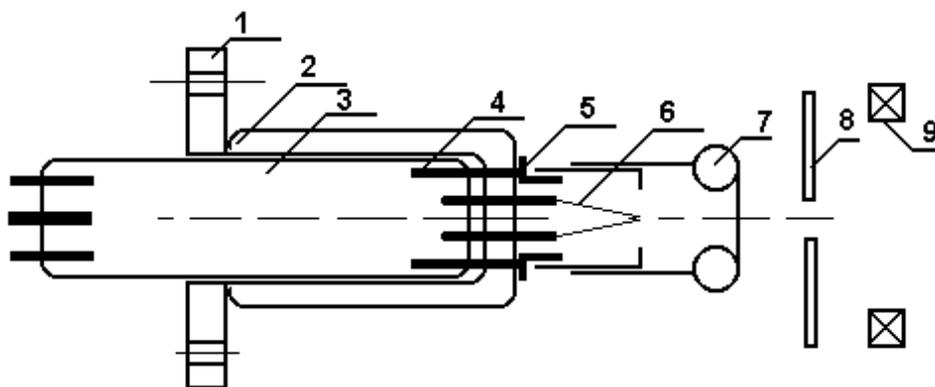


Рисунок 6.22 – Конструкция дифрактометра установки КАТУНЬ. 1 – посадочный фланец, 2, 3 – изоляторы; 4 – токовводы, 5 – токоввод модулятора, 6 – катод; 7 – выходной электрод; 8 – анод; 9 – магнитная линза

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 формуется сам катод. Для уменьшения изломов при формировании катод может подогреваться 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.

Электронно-лучевой испаритель тугоплавких материалов

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

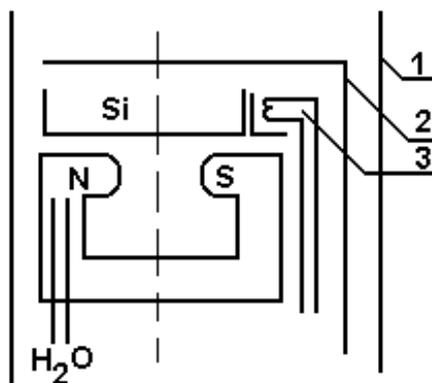


Рисунок 6.23 – Схема электронно-лучевого испарителя материалов: 1 – экран; 2 – заслонка; 3 – катод.

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).

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/см², а их энергию от 30 эВ до 3 кэВ. В процессе очистки ионный пучок диаметром 2,5 мм сканирует по площади до 100 мм². 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.

6.6 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° (рис. 6.24). Пучок отражается от рядов кристалла и формирует на люминесцентном экране отражение (рефлекс) в виде световых точек или полос (тяжей). Расстояние между рефлексами d связано с расстоянием a между рядами атомов (периодом) соотношением:

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

где L – расстояние от образца до экрана; λ – длина волны де Бройля.

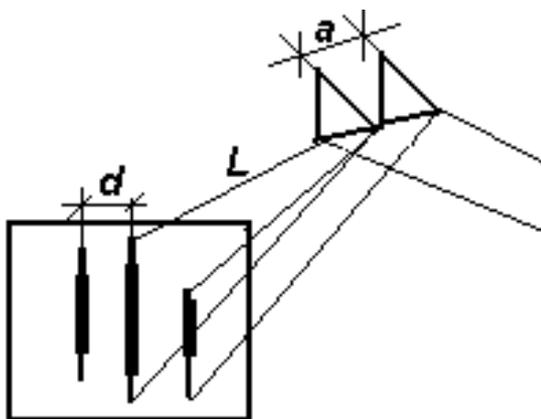


Рисунок 6.24 – Схема формирования рефлексов методом ДБЭ
В табл. 6.1 представлена расшифровка картины ДБЭ.

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.

6.7 Классификация причин отказов

Отказы изделия могут быть классифицированы по различным признакам. Одним из распространенных признаков является место отказа. При указанной классификации приходится различать изделие в целом, его узлы, отдельные детали узлов и отдельные элементы деталей. В дальнейшем будем различать лишь две категории объектов: система, представляющая собой устройство, содержащее несколько частей; элемент, представляющий собой некоторую часть системы.

Классификация дефектов по месту отказа позволяет оценить слабое место системы и принять меры к его усилению. Не менее важно установить причину появления отказа в данном месте.

Отказы могут быть классифицированы по конструктивным и технологическим группам.

Отказы конструктивной группы возникают как следствие несовершенства конструкции (промахов в конструировании). Типичным промахом при конструировании является неучет «пиковых» нагрузок.

Нагрузка, действующая на систему и ее элементы, обычно имеет случайные вариации. При конструировании стремятся учесть возможность возникновения пиковых нагрузок, т.е. нагрузок, существенно превышающих нормальные эксплуатационные. Если анализ и учет нагрузок выполнен недостаточно тщательно, то воздействие «пиковых» нагрузок приводит к отказам. С точки зрения анализа и расчета надежности важно, что промах в конструировании одинаково сказывается на всех экземплярах рассматриваемой системы или элемента. Типичным примером подобной ситуации может быть снабжение пультов управления тумблерами и кнопками, рассчитанными на напряжение 300 В для коммутации цепей пускателей оборудования, с управляющим напряжением 380 В от двух фаз промышленной сети. В этом случае незначительное повышение фазного напряжения приводит к повышению напряжения между фазами, пробоем в тумблере и самопроизвольному включению оборудования.

Отказы технологической группы возникают как следствие нарушения принятой технологии изготовления системы (элемента). Качество отдельных деталей, узлов, и изделия в целом имеет неизбежные случайные вариации. Вариации качества, заключенные в достаточно узких пределах, не сказываются сколько-нибудь заметно на надежности системы. При резких колебаниях качества надежность одних экземпляров оказывается намного ниже надежности других. Поэтому технологические дефекты приводят к снижению надежности у части экземпляров общей совокупности изготовленных систем (элементов).

Группу отказов технологического направления дополняют *эксплуатационные отказы*.

Для каждой системы устанавливаются ограничения на условия эксплуатации (ограничения на температуру, амплитуду колебаний и т.д.), задаются правила ухода за системой и ее элементами.

Нарушение правил эксплуатации приводит к преждевременным отказам, т.е. способствует увеличению скорости преждевременного старения системы. Обычно такие нарушения касаются лишь части эксплуатируемых экземпляров системы.

Отказы типа старения (износа) системы обусловлены тем, что в процессе эксплуатации и хранения в металлах, пластмассах и других материалах накапливаются необратимые изменения, которые нарушают прочность, координацию и взаимодействие частей и, в конечном счете, вызывают отказы. Например, с течением времени, особенно под действием

дневного света и температуры, изоляция проводов полимеризуется, трескается и отваливается.

Таким образом, вариации времени безотказной работы порождаются вариациями качества изготовления, условий эксплуатации и процессами старения.

Схемы возникновения отказов

Одна из причин отказов оборудования заключается в поломках и описывается как *схема мгновенных повреждений*.

Если предположить, что отказ элемента наступает в случае, когда нагрузка S превышает некоторый уровень S_n , то в силу случайности изменения нагрузки момент отказа также будет случайным. Здесь характерно, что отказ элемента наступает независимо от того, сколько времени он до этого находился в эксплуатации и каково его состояние. Ярким примером образования отказа по схеме мгновенного повреждения может служить прокол шины автомобиля. Он происходит за счет попадания острого предмета и не зависит ни от степени изношенности шины, ни от состояния автомобиля. Математическая модель схемы мгновенных повреждений основывается на том, что сумма вероятностей отказов от различных причин не должна превышать определенную величину (меньше единицы).

Схема накапливающихся повреждений отвечает ситуации, когда отказ образуется за счет постепенного накопления повреждений (постепенного старения или изнашивания). Для ряда рабочих параметров элемента (системы) заранее устанавливаются допустимые пределы, выход за которые квалифицируется как отказ. Изменение параметров диктуется старением элемента, и время выхода параметра за допустимый предел является временем безотказной работы.

Постепенное накопление повреждений может явиться не прямой, а лишь косвенной причиной отказа. Вероятность отказа может колебаться. Такие отказы описываются схемой релаксации. В отличие от схемы накапливающихся *схема релаксации* повреждений не устанавливает допустимый предел для рабочего параметра: накопление повреждений приводит лишь к росту вероятности отказа. Для этого примера характерно сочетание постепенного накопления повреждений со скачкообразным изменением состояния, возникающее как следствие постепенного накопления повреждений.

Схема отказов от действия нескольких независимых причин является в практике наиболее типичной. Здесь важно отметить следующее обстоятельство. Часто бывает, что среди множества причин, вызывающих отказы, имеются одна-две преобладающие. Влияние остальных причин будет настолько слабым, что отказы по их вине практически не наблюдаются. Поэтому при исследовании надежности объекта, прежде всего, стремятся выявить преобладающие причины отказов и лишь затем, если в этом есть необходимость, учитывают влияние остальных причин. Если же

одновременно действует много причин примерно одинакового влияния, то совокупное действие этих причин может быть условно заменено на действие одной причины, которая является в некотором смысле эквивалентом всего множества причин.

6.8 Инструкции 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.

6.9 Инструкции по эксплуатации 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 ~ 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 ~ 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;

6.10 Аварийные режимы вакуумного оборудования и методы реанимации режимов

Несоблюдение последовательности включения или выключения установки, отключение электричества или воды, приводит к потере служебных характеристик установки.

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 мин необходимо снять нагрев, включить механический насос. Если прошло более 15 мин выключить установку и произвести переборку диффузионного насоса и заменить в нем масло;

4) *забыли открыть воду при запуске диффузионного насоса*. Необходимо снять нагрев диффузионного насоса. Пустить воду в насос после его остывания;

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 горячего 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 продолжают работать «вслепую», ориентируясь по термодатчику.*

Реанимация: по окончании работ и выключении установки провести замену датчика;

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;*

10) *нештатная ситуация: изменение звука работающего механического насоса, запах масла, прорыв воды внутри установки или в вакуумной камере, оставление ручек и других посторонних предметов и т.п. В этих случаях следует принять меры по выключению установки.*

Список 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 Часть 2

Орликов Л.Н.

Учебное пособие
по дисциплине «Основы технологии оптических материалов и изделий»

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