

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

Кафедра электронных приборов

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ
ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное пособие
для студентов направления
«Электроника и наноэлектроника»

Томск 2018

Орликов Леонид Николаевич.

Специальные вопросы технологии приборов оптической электроники: учебное пособие для студентов направления «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2018. - 125 с.

В пособии рассматриваются:

- физические принципы формирования приборов оптической электроники и наноэлектроники;
- основные приемы построения последовательностей технологических операций при формировании и синтезе оптических материалов;
- современные технологии, применяемые при производстве приборов оптической электроники и наноэлектроники. Выделены основные пути использования вакуумной, ионно-плазменной, электронно-лучевой и лазерной технологии в изготовлении приборов оптической электроники; рассмотрены основы автоматизации процессов производства квантовых приборов и устройств; эксплуатация и сервисное обслуживание технологического оборудования.

В пособии рассмотрены технологические средства, наиболее пригодные для создания приборов оптической электроники. Приведены сведения из области применения передовых технологий и сервиса современного оборудования.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника». Пособие будет полезно для студентов смежных специальностей при изучении дисциплин «Оптическое материаловедение», «Акустоэлектронные приборы», «Оптическая электроника» и др., а также при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Содержание

1 Введение.....	5
1.1 Общие понятия	5
1.2 Эффекты, реализуемые на приборах оптической электроники	7
2. Технология интегральных микросхем, литография	10
2.1 Литография	10
2.2 Технология приборов оптической электроники	24
2.3 Технология одноэлектронных приборов	25
2.3 Технология изготовления волноводов	27
2.4 Технология формирования акустоэлектронных элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ)	28
2.5 Технология металлизации звукопровода.....	31
2.6 Технология оптоэлектронных элементов	32
2.7 Устройство оптоэлектронных элементов	32
2.8 Некоторые характеристики оптоэлектронных элементов	33
3 Специальные вопросы технологии электровакуумных приборов оптической электроники.....	35
3.1 Технология изготовления вакуумных приборов оптической электроники	35
3.2 Технология изготовления разборных приборов оптической электроники	42
4 Вакуумная, электронно-лучевая, ионно-лучевая и плазменная технология.....	46
4.1 Вакуумная технология	46
4.2 Электронно-лучевая технология	48
4.3 Ионно-лучевая технология	55
4.4 Плазменная технология	72
5 Автоматизация технологических процессов производства приборов оптической электроники.....	75
5.1 Основные понятия.....	75
5.2 Алгоритмы преобразования сигналов с датчиков	80
5.3 Системы автоматического управления и регулирования технологическими процессами	82
6. Числовое программное управление в производстве приборов оптической электроники.....	94
6.1 Математические модели объектов	94
6.2 Разновидности программ для ЧПУ	96
6.3 Шифровка деталей, инструментов и операций в системах ЧПУ	97
6.4 Проектирование автоматизированных систем для ЧПУ	98
6.5 Оптимизация в системах с автоматическим управлением	98

6.6	Методы оптимизации при одном факторе воздействия на технологический процесс	99
6.7	Методы оптимизации при числе факторов больше единицы	99
6.8	Оптимизация систем автоматики по устойчивости.....	100
6.9	Информационная оптимизация автоматических систем	101
6.10	Многокритериальная система оптимизации «МОМДИС».....	102
7	Моделирование технологических процессов производства приборов оптической электроники.....	103
7.1	Подобие технологических процессов	103
7.2	Моделирование устойчивости систем автоматики.....	104
7.3	Моделирование работы технических систем	107
8	Компьютеризация технологических процессов	109
8.1	Процесс ввода технологической информации в ЭВМ	109
8.2	Языки пользователя для программирования электрофизических установок.....	110
8.3	Система «КАМАК».....	115
9.	Системы автоматического управления технологическими процессами	117
9.1	Автоматизированные рабочие места (АРМ)	117
9.2	Робототехнические комплексы и автоматизированные рабочие места ...	117
9.3	Нейронные сети в технологических процессах	120
	Список литературы	124

1 Введение

1.1 Общие понятия

Оптическая электроника — область физики, изучающая методы получения приборов оптической электроники.

Согласно определению, данного в Большой Советской Энциклопедии, оптоэлектроника – это направление электроники, охватывающее вопросы производства и использования оптических элементов и приборов для обработки, хранения и передачи информации.

Объектами изучения дисциплины являются принципиально новая элементная база нанoeлектроники на основе кристаллов, оптоэлектронных элементов и квантовых явлений. Дисциплина изучает организацию современных инновационных нанотехнологий на базе компьютерного управления, позволяющих решать перспективные задачи предприятий.

В дисциплине изучаются такие высокие технологии как методы получения элементов голографии, оптических быстродействующих модуляторов, элементов акусто - и оптоэлектроники. Изучение данной дисциплины прививает навык прогнозирования ситуаций, возникающих в процессе профессиональной деятельности. Базовые знания, способность к анализу эффективности инноваций позволяют выпускникам быть уверенными и авторитетными руководителями отделов перспективных технологий предприятий, главными инженерами, энергетиками, главными специалистами крупнейших предприятий. Изучение дисциплины устраняет неопределенность выбора профессии, позволяет сформировать программу личного творческого роста, прививает навык адаптации к будущей профессии. Значительная часть выпускников, прошедших через данную дисциплину работают в сфере науки, где доводят свои идеи и проекты до инновационной реализации, достойно представляют свои достижения на международных симпозиумах и успешно защищают диссертации.

Оптоэлектроника возникла как этап развития радиоэлектроники и вычислительной техники, тенденцией которых является непрерывное усложнение систем при возрастании их информационных и техникоэкономических показателей, таких как надежность, быстродействие, уменьшение массогабаритов. Оптоэлектроника получила интенсивное развитие в 60-е годы после открытия лазеров, полупроводниковых излучающих диодов, волоконной оптики. Оптоэлектроника отличается от вакуумной и

полупроводниковой электроники наличием в цепи сигнала оптического звена или оптической (фотонной) связи.

Основными элементами в оптоэлектронике являются:

- источники света (излучатели), преобразующие электрические сигналы в потоки фотонов – в первую очередь это лазеры и светодиоды; -оптические среды (в частном случае линии связи); они могут быть как пассивными так и активными;

- фотоприемники (датчики) для преобразования световых сигналов в электрические (фотоэлементы, ФЭУ, фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и т.д.). Благодаря таким особенностям оптических колебаний, как электрическая нейтральность, однонаправленность потока фотонов, высокая частота колебаний, когерентность и др., оптическая связь имеет очевидные преимущества по сравнению с электрической.

Световой луч можно сфокусировать на площадку, размеры которой сравнимы с длиной волны, что позволяет резко повысить плотность записи информации в оптических запоминающих устройствах (до величины примерно 10^8 бит/см²).

Большие коэффициенты усиления ряда активных сред позволяют использовать их в качестве усилителей яркости в лазерных проекционных микроскопах и средствах визуализации быстропротекающих процессов.

Физические процессы при взаимодействии световых полей с веществами служат источником информации при диагностике различных сред. Причем в ряде случаев возможно дистанционное получение информации об объекте исследования.

При взаимодействии высокоинтенсивного излучения со средой возникает целый ряд новых явлений, которые изучает нелинейная оптика. Это: генерация высших гармоник лазерного излучения, оптические умножители и преобразователи спектра, параметрические взаимодействия, самофокусировка света, обращение волнового фронта, когерентное антистоксово рассеяние света и др.

В поле лазерного излучения получают сжатые и сложные состояния электромагнитного поля световых волн, играющие важную роль в теории информации. Высокая когерентность лазерного излучения позволила реализовать голографию и создать ряд принципиально новых голографических приборов.

Источники света, обладающие широким, но управляемым спектром, являются незаменимым инструментом исследования. Создание таких источников света стало возможным благодаря разработке наноструктурированных волокон, которые кроме сердцевины и оболочки содержат также внутреннюю периодическую структуру воздушных полостей, ориентированных вдоль волокна. Ге-

нерация белого света с помощью интенсивных сверхкоротких лазерных импульсов в волоконных структурах имеет большое значение для целого ряда приложений: высокоточных метрологических измерений, нелинейной спектроскопии, зондирования атмосферы и т. п.

1.2 Эффекты, реализуемые на приборах оптической электроники

Пьезоэффект – это явление появления ЭДС при деформации кристалла.

Пироэффект – это явление появления ЭДС при нагревании кристалла.

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

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

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

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

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

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

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

Фотогальванический эффект – это эффект появления токов по кристаллу при напряжениях $E \sim 10$ кВ/см и более, приводящие к изменению амплитуды световых пучков, обращению волнового фронта. Ток фотогальванического эффекта создается небольшой группой фотовозбужденных носителей.

Эффект пространственных солитонов – это эффект возникновения локальных областей неоднородности светового потока, вызванный

прохождением лазерного излучения через вещество. Солитоны используются для переключения и обработки оптической информации.

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

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

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

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

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

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

динамической голографии. Наиболее сильно нелинейные эффекты выражены в кристаллах силленитов с большими электронно-оптическими коэффициентами (BaTiO_3 , стронций – бариевый ниобат). Кубические кристаллы класса симметрии 23 имеют значительное удельное вращение плоскости поляризации. (От 6 град/мм в $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ до 22 град/мм $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Локальная нелинейность в этих кристаллах усиливается под действием электрического поля.

2. Технология интегральных микросхем, литография

2.1 Литография

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

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

В 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.

Разрешающие возможности литографий

На рис.2.1 представлены местоположения некоторых видов литографий относительно ширины разрешающей линии.

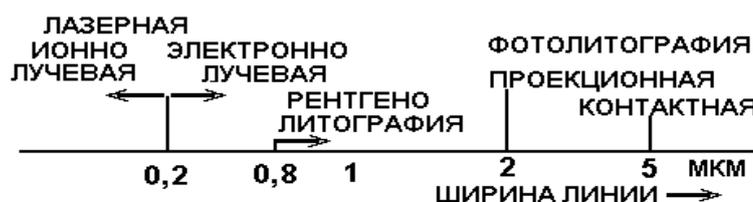


Рисунок 2.1 - Местоположения литографий относительно ширины разрешающей линии

Из рис. 2.1 видно, что с уменьшением длины волны засвечивающего излучения разрешающие возможности литографии возрастают.

2.1.1 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.

2.1.2 Типовой литографический процесс

На рис.2.2. представлены основные этапы типового литографического процесса.

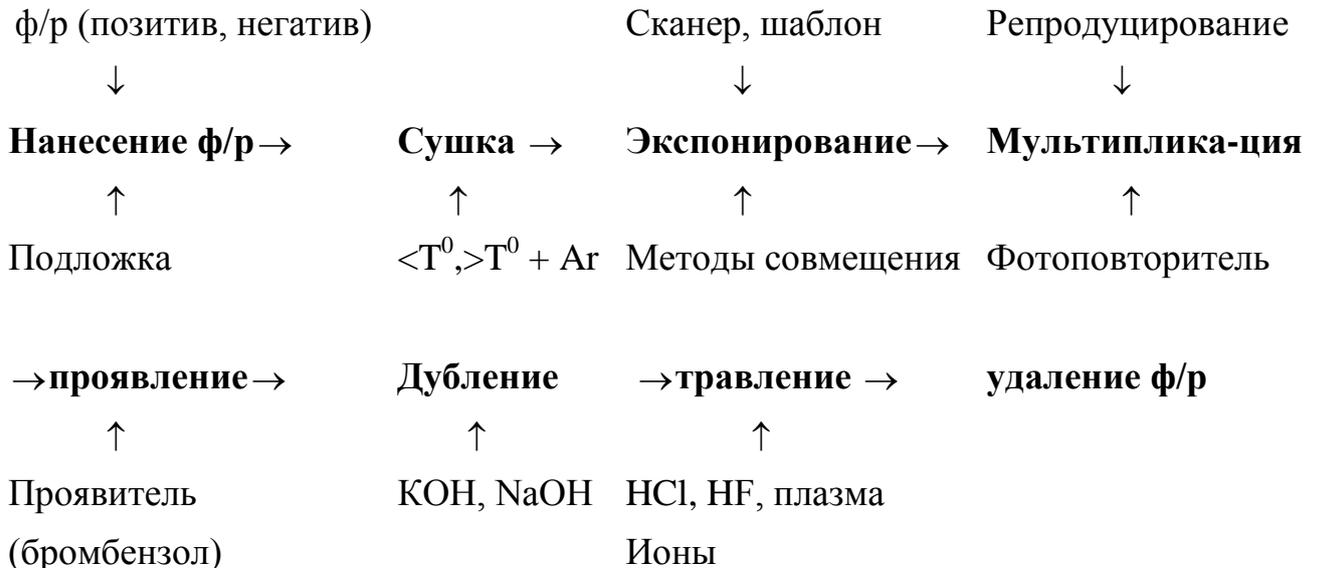


Рисунок 2.2 - Основные этапы типового литографического процесса

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.

2.1.3 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, не дефицитность 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. 2.3 представлена схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов

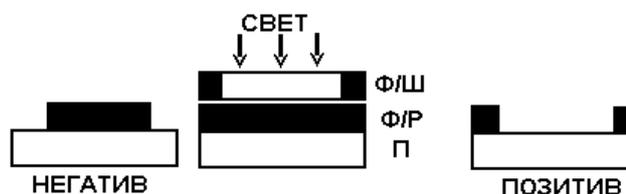


Рисунок 2.3 - Схема, поясняющая работу негативного и позитивного резистов

2.1.4 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 - сенсбилизаторов - 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.

2.1.5 Разрешающая способность фоторезиста

Разрешающая способность слоя фоторезиста (R) определяется как число задублинных линий на 1мм, 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 2.1 представлены некоторые параметры позитивных и негативных фоторезистов.

Таблица 2.1 - 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 изобилии гальванических и химических процессов на производстве. Позитивные резисты тяготеют к электрофизическим методам обработки.

2.1.6 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 - *пульверизация*. Метод пульверизации 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.

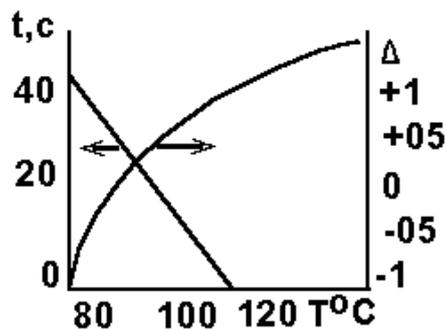
Сушка фоторезистивного покрытия

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 2.4 представлена 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.

Рисунок 2.4 - Зависимость отклонения размеров и времени засветки от температуры сушки

2.1.7 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.

Диффузию часто проводят из пленки, напыленной термовакуумным способом, что соответствует бесконечному источнику. Концентрацию примеси на расстоянии 1 см от поверхности через время t диффузии из напыленной пленки можно определить по соотношению:

$$N = N_0 \operatorname{erf} X / 2 \sqrt{Dt} ;$$

N_0 - поверхностная концентрация, $1/\text{см}^3$,

erf - коэффициент вероятности диффузии

D - коэффициент диффузии, $1/\text{см}^2$.

Коэффициент диффузии одного материала в другой рассчитывается через энергия активацию процесса (E_a , эВ) и коэффициент стационарной диффузии D_0 по соотношению:

$$D = D_0 (-\exp E_a/kT)$$

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

Глубина залегания P-n перехода определяется соотношением

$$h = 2 \sqrt{D \cdot t} \sqrt{\ln N_0/N_p}$$

где D -коэффициент диффузии.

При различии концентраций в 3 порядка эта формула преобразуется к виду: $h = 2 \sqrt{D \cdot t} \times 5,6$.

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. 2.5 представлена конструкция фотошаблона.



Рисунок 2.5 - 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.2.6 приведены некоторые знаки совмещения. На этом же рисунке приведена плотность дефектов, возникающая вследствие контакта соприкосновения фотошаблона и топологического слоя микросхемы. Различают область микроуСИЛей (“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 2.7 представлена схема рассеяния потока света в резистивном слое и его последствия, приводящие к боковому подтравливанию “Х” изменению профиля травления

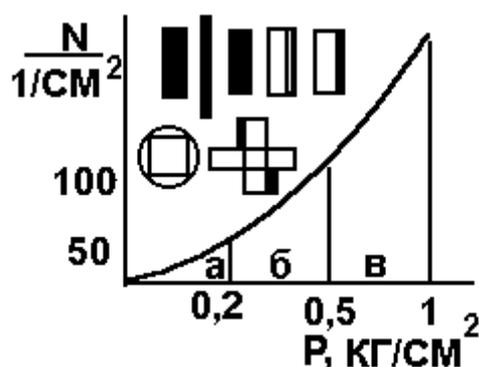


Рисунок 2.6 - Знаки совмещения и плотность

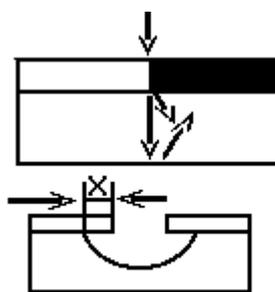


Рисунок 2.7 - Схема рассеяния потока дефектов света

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

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»

$$A=h/\lambda$$

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.

Заключительные этапы литографического процесса

Заключительные этапы литографического процесса состоят из операций удаления фоторезиста и операций сушки подложек. Удаление фоторезиста стимулируется движением жидкости и активации процесса с помощью ультразвука. Остатки резиста удаляют растворителями или водно-щелочными растворами. Универсальным способом удаления остатков позитивного или негативного резистов является кипячение в серной кислоте или хромовых смесях.

Отмывка подложек проводится в деионизованной воде.

Введение в технологический процесс ионно-плазменных и плазмохимических методов травления позволило приблизить размеры элементов интегральных схем к размерам рисунков в фоторезистивных масках. Уменьшению последних способствуют новые направления в технике литографии - электроннолитография, рентгенолитография, ионнолитография - направленные на повышение разрешающей способности.

2.1.8 Другие виды литографии

Электроннолитография

Метод электроннолитографии основан на использовании для экспонирования резистов электронных пучков. При взаимодействии электронного пучка с резистом происходят разрывы в межатомных связях, приводящие к перестройке молекулярной структуры резиста. При малых длинах волны электрона минимально возможные размеры рисунков при экспонировании резистов определяются не дифракционным рассеянием, а условиями взаимодействия электронного пучка с системой электроннорезист - подложка.

Различают *сканирующую и проекционную* электроннолитографию.

На рис.2.8 представлена схема проекционной электроннолитографии.

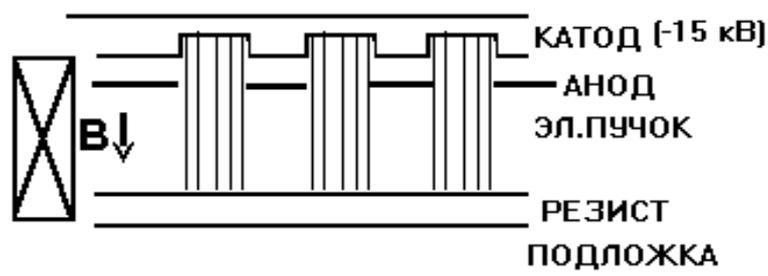


Рисунок 2.8 - Схема проекционной электроннолитографии

Процесс проходит в вакууме, глубина которого определяется рабочим вакуумом источника электронов (электронной пушки). Подложки подаются под пучок через загрузочные отсеки с откачкой газа. Поток электронов находится в продольном магнитном поле индукцией "В". Точность совмещения достигает $\sim 0,2$ мкм. Разрешающая способность неоднозначно связана с ускоряющим напряжением пушки вследствие функциональной взаимосвязи геометрических размеров электронного луча и электрических параметров пушки. Время экспонирования "t" связано с коэффициентом чувствительности "К" 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 электроннорезиста;

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:

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

где β - 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. 2.9 представлена схема реализации рентгенолитографии.



Рисунок 2.9 - 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.

2.2 Технология приборов оптической электроники

При рассмотрении трехмерной структуры кристалла, на границе раздела кристалла энергия связи меньше энергии в кристалле. Углеродная связь по границе раздела сравнима с колебательной энергией связи и составляет 0,1 эВ, что соответствует волне де Бройля порядка 4 нм. Квантовой точкой называют частицу, размер которой порядка волны Де – Бройля [3-6,18].

В этом случае проводимость определяется движением носителей по ребрам нанокристаллов. В этом случае Холловское сопротивление равно нулю ($|\rho| = 0$). Кристалл можно условно представить как электронный газ с набором стоячих электронно-колебательных волн с энергиями от 0,05 до 5, 5 эВ. При этом появляется прыжковая проводимость, которая может изменяться на 12 порядков. В этом отношении перспективны пористые полупроводниковые материалы (пористый кремний, наноалмаз, пироуглерод).

Технология формирования квантового транзистора

На рис. 2.10 представлена структура и зонная диаграмма квантового транзистора.

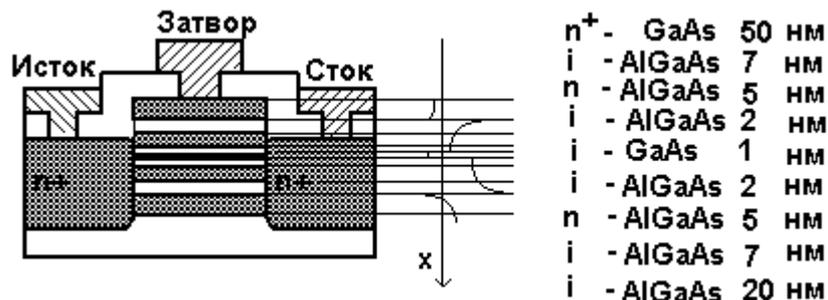


Рисунок 2.10 - Структура квантового транзистора и его зонная диаграмма

При нулевом напряжении затвор-исток для нормально закрытого транзистора выполняется условие $V_G > V_B$, где V_G – высота потенциального

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

2.3 Технология одноэлектронных приборов

В одноэлектронных приборах реализуется принцип размерного квантования энергии в присутствии квантовой точки. Принципиальная схема одноэлектронного транзистора представлена на рис. 2.11.

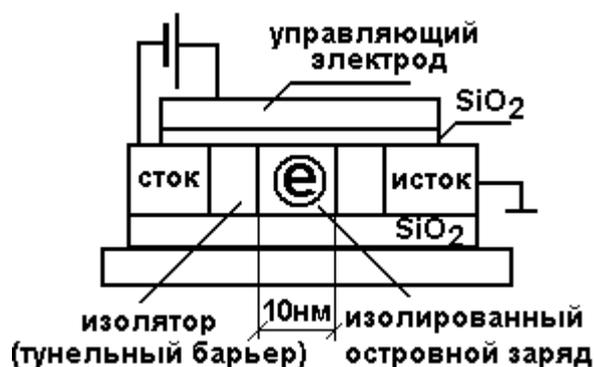


Рисунок 2.11 - Схема одноэлектронного транзистора

Теория одноэлектронного транзистора предложена К.К. Лихаревым в приближении, что энергию туннельного перехода между двумя металлическими контактами E можно рассмотреть как энергию конденсатора C .

$$E = \frac{Q^2}{2C}, \quad (2.1)$$

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

Так как заряд электрона – дискретная величина, минимальное значение изменения энергии ΔE составит:

$$\Delta E = \frac{e^2}{2C}. \quad (2.2)$$

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

$$\Delta E \gg kT, \quad (2.3)$$

где k – постоянная Больцмана

Кроме того, это изменение должно превышать квантовые флуктуации:

$$\Delta E \gg \frac{hG}{C}, \quad (2.4)$$

где G – проводимость туннельного перехода.

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

$$G \ll R^{-1}, \quad (2.5)$$

где $R = \frac{h}{4e^2} = 6,45$ кОм – квантовое сопротивление.

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

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

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

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

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

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

На рис.2.12 представлены схемы формирования одноэлектронного устройства памяти и одноэлектронного транзистора.

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

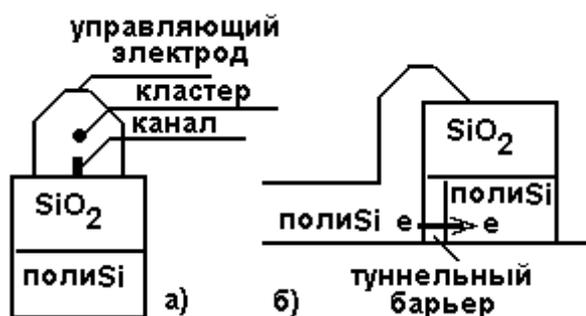


Рисунок 2.12 - а) схема формирования одноэлектронного устройства памяти, б) схема формирования одноэлектронного транзистора

Прибор изготавливается следующим образом. На поликристаллический Si наносится слой SiO₂. При помощи электронной литографии и реактивного ионного травления формируют островок Si – SiO₂ высотой 30 нм (квантовая точка). Далее проводится термическое окисление для получения тонкого (2 нм) слоя оксида на боковой поверхности островка. Затем наносят еще один слой поликремния и формируют подводящие контакты (шириной 100нм) методом литографии и ионного травления.

2.3 Технология изготовления волноводов

Волновод представляет собой подложку (желательно с пьезоэффектом), на которой сформирован стеклообразный слой толщиной 0,1-0,3 мкм, обладающий полным внутренним отражением. При этом коэффициент преломления слоя несколько больше коэффициента преломления подложки (отличается на 0,01-0,1).

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

Для усиления различных эффектов взаимодействия излучений волноводный слой может легироваться путем термического напыления в вакууме пленок железа, меди и др. с последующей диффузией. Легирование способствует формированию дополнительных центров возбуждения мод в оптоэлектронных элементах. Например селен, который наряду с полупроводниковыми свойствами и фотопроводимостью, обладает высокими пьезоэлектрическими свойствами. Пленки окиси цинка и нитрида алюминия на сапфире дают возможность использовать не пьезоэлектрический материал (сапфир) как в качестве собственно звукопровода фильтра, так и подложки для формирования структуры усилительных каскадов.

Процесс легирования проводят формированием пленки металла на поверхности кристалла. Затем проводится высокотемпературная диффузия при атмосферном давлении или в среде инертного газа.

2.4 Технология формирования акустоэлектронных элементов на поверхностных акустических волнах (ПАВ)

Общая схема изготовления элементов ПАВ

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

Одним из основных требований к звукопроводам фильтров ПАВ является высокий класс обработки их поверхности (13-14). Для обеспечения этого требования необходима высокая плотность материала, отсутствие в нем пор, трещин, царапин. Такой класс точности достигается шлифовкой с последующей полировкой пастами. Из всех известных в настоящее время технологических методов изготовления изделий из пьезокерамики только горячее прессование обеспечивает плотность образцов до 90-95 % от теоретической. Однако даже при использовании горячего прессования воспроизводимость свойств пьезокерамики низкая. Это обстоятельство позволяет использовать пьезокерамики для изготовления звукопроводов только широкополосных устройств на ПАВ с нежесткими эксплуатационными характеристиками, где значения временной нестабильности и воспроизводимости свойств имеют несущественное значение.

Технологический процесс изготовления звукопроводов фильтров ПАВ в случае использования монокристаллических материалов состоит из следующих основных операций: ориентировка кристаллов и распиловка, предварительная шлифовка заготовок по контуру и по плоскости, точная шлифовка по плоскости, полировка рабочей плоскости.

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

После ориентации монокристаллы распиливаются сначала на параллельные секции, положения главных плоскостей которых относительно кристаллографических осей определяются необходимым направлением среза. Затем секции разрезаются на заготовки, по габаритам звукопроводов.

Для резки большинства монокристаллов используются обычные кварцерапиловочные станки с наружной или внутренней режущей кромкой. К качеству обработки рабочей поверхности звукопровода предъявляются высокие требования. Например, на ней должны отсутствовать царапины, сколы, раковины; чистота рабочей поверхности должна соответствовать 13-14 классу при неплоскостности не более 0,1-0,5 мкм. Эти требования объясняются рядом причин. Хорошая плоскостность поверхности обеспечивает полное прилегание фотошаблона в процессе фотолитографии. Это, в свою очередь, позволяет повысить воспроизводимость мелких деталей структур фильтров. Качество поверхности звукопровода не только определяет разрешающую способность при формировании структур фильтров посредством фотолитографии, но и существенно влияет на

затухания ПАВ, особенно в пьезокерамических материалах, имеющих пористую структуру.

При шлифовке рабочей плоскости звукопроводов используется последовательная обработка все более мелкими корундовыми шлифовальными порошками. Полировка рабочей поверхности звукопроводов из ниобата лития и пьезокерамики осуществляется на полировальных станках с использованием алмазной пасты. Независимо от выбранного метода последующего формирования встречно-штыревых структур преобразователей на поверхность звукопроводов должно быть нанесено проводящее покрытие – металлизация.

Технология подготовки поверхности для изготовления элемента ПАВ

Для получения хорошей адгезии и воспроизводимости электрофизических свойств нанесенных металлических пленок поверхность звукопровода должна быть хорошо очищена, причем способ очистки в большей степени зависит от метода последующей металлизации.

Процедуру очистки можно разбить на этапы предварительной и окончательной очистки. Способ предварительной очистки зависит от характера загрязнений и химических свойств подложки. Основными загрязнениями являются следы масел, отпечатки пальцев, пушинки, пылевые частицы, удаляемые бензином, ацетоном, спиртом. Окончательная химическая очистка предусматривает ультразвуковую мойку в горячей воде с растворенным в ней моющим средством. Затем проводится длительное промывание в горячей дисцилированной или деионизованной воде. Использование ультразвуковой обработки позволяет удалить с поверхности подложек звукопроводов остатки масел и мастик после шлифовки и полировки. В последнее время нашли широкое распространение плазменные методы очистки.

Подготовка кристаллов (ниобата или силиката висмута) имеет свои особенности. Кристаллы обладают большой гигроскопичностью и большим внутренним напряжением. Очистка кристаллов традиционными химическими средствами часто приводит к потере работоспособности элемента ПАВ.

Наиболее приемлемым для очистки кристаллов является выдержка над парами воды или спирта с последующей сушкой кристалла в вакууме или в чистом воздухе. В процессе сушки кристалл следует прогревать до температуры 100 - 200° С. Скорость подъема температуры не должна превышать 2°/мин, во избежание растрескивания кристалла. Время сушки колеблется от 2,5 часов до нескольких суток. Плохо просушенные кристаллы

выделяют газ, что вызывает локальный отрыв пленки в процессе ее формирования. Вследствие этого важно проводить микроскопический анализ кристаллов до и после проведения технологического процесса.

2.5 Технология металлизации звукопровода

К металлизации предъявляются требования высокой адгезии, однородности по структуре, составу, толщине, отсутствия проколов, наплывов, царапин и т.п., коррозионной стойкости, хорошей растворимости в травителе, технологичности, стабильности основных физико-химических свойств и т.д. Дополнительными требованиями являются малое различие акустических сопротивлений материала металлизации и звукопровода, низкая удельная плотность во избежание сильных отражений и слабые дисперсионные свойства.

Технология металлизации элементов ПАВ принципиально не отличается от технологии металлизации керамики. Наиболее широко для металлизации элементов ПАВ используются алюминий, серебро, золото, иногда медь с защитой никелем. Серебро, алюминий и золото, применяемые для металлизации звукопроводов, обладают сравнительно малой адгезией к материалам. Для увеличения адгезии кварцевые звукопроводы желательно предварительно прокипятить в хромовой смеси следующего состава: двуххромовокислый калий – 50 г, серная кислота – 1 л, вода дистиллированная – 200 мл.

Из способов металлизации наиболее широко используется термическое испарение материалов в вакууме. Использование электрофизических методов металлизации таких как магнетронное, катодное, электродуговое, ионно-лучевое и др. для пьезокристаллов неприемлемо в виду заряда поверхности, уменьшающего массоперенос паров на подложку.

Исходя из электрофизических свойств, можно отметить, что сочетание алюминиевого покрытия и кварцевого звукопровода дает наименьшую дисперсию и отражение ПАВ. Для фильтров на ниобате лития отражение за счет несоответствия акустических сопротивлений материалов звукопровода и покрытия минимальны при использовании серебра. Однако, при этом велики дисперсионные искажения и коэффициент отражения от границ электродов. Учитывая, что алюминий дешев и позволяет получить сравнительно низкое сопротивление пленочных проводников, в фильтрах ПАВ как со звукопроводами из кварца, так и из ниобата лития и пьезокерамики наиболее часто используется алюминиевое покрытие. Медное или золотое покрытие с подслоем хрома хорошо сочетается с германатом висмута.

2.6 Технология оптоэлектронных элементов

К оптоэлектронным элементам относятся пассивные и активные элементы интегральных микросхем, работа которых основана на свойствах оптического излучения, на взаимодействии излучений оптического и радиочастотного диапазона. К таким элементам можно отнести световоды, элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ), волноводы, переключатели, разветвители и другие элементы микросхем и устройств [14 - 21].

Световоды служат для передачи оптической информации. Волноводы служат для преобразования и деления сигналов. Элементы на поверхностных акустических волнах (элементы ПАВ) служат для фильтрации, кодировки и преобразования сигналов. Акустоэлектронный элемент представляет собой подложку с активным волноводным слоем, в котором происходит взаимодействие оптического и СВЧ излучения. Такие устройства играют роль фильтров СВЧ, элементов кодирования сигналов. Основные параметры фильтров ПАВ: рабочая частота, полоса пропускания, вносимое затухание, температурная стабильность, искажения из-за эффектов второго порядка и т.п. – определяются в первую очередь, характеристиками материала звукопровода. Поэтому для каждой конструкции выбор материала звукопровода необходимо проводить, исходя из конкретных заданных характеристик фильтра и его предназначения.

2.7 Устройство оптоэлектронных элементов

Оптоэлектронные элементы состоят из подложки, покрытой стекловидным материалом и оптического слоя с полным внутренним отражением, по которому распространяется световое излучение. Световод и волновод представляют собой пару материалов с разным показателем преломления: кварцевые стекла – (кварц – кварц), многокомпонентные стекла – (стекло – стекло) или стекло – полимер (кварц – полимер). Акустоэлектронный элемент на ПАВ представляет собой кристалл, на который нанесены полоски пленки. При подаче высокочастотного излучения на пленку, на поверхности кристалла возникает поверхностная акустическая волна. При пропускании лазерного излучения вдоль кристалла, возникает взаимодействие акустической волны с лазерным излучением.

На рис.2.13 представлены некоторые оптоэлектронные элементы

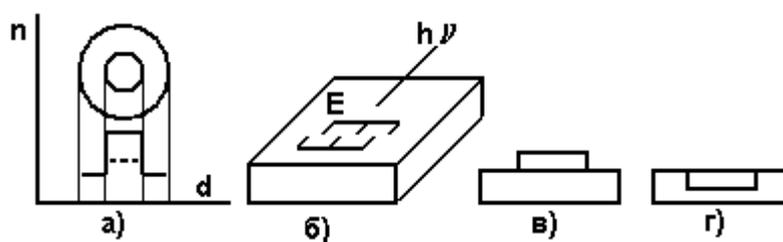


Рисунок 2.13 - Некоторые элементы оптоэлектроники: а) – световод, б) элемент ПАВ, в)– гребенчатый волновод, г) – полосковый планарный волновод с внедренным активным слоем.

Свет в волноводе и световоде распространяется благодаря полному внутреннему отражению от стенок сердцевины, покрытой оболочкой с меньшим показателем преломления, чем у материала сердцевины. Полимерные световоды характеризуются высокой стойкостью против действия ионизирующих излучений, высокой пластичностью, прочностью, технологичностью.

2.8 Некоторые характеристики оптоэлектронных элементов

Световой луч – это электромагнитная волна с магнитной (H) и перпендикулярной электрической (E) составляющей. Обыкновенный луч – это луч, отражающийся по классическим законам оптики (H- волна). Необыкновенный луч – это поляризованный луч, который может частично проникать вглубь материала и отражаться из глубины материала. По одному световоду можно передать одновременно ограниченное число электромагнитных волн, каждая из которых соответствует лучам, распространяющимся по траекториям, образующим различные углы с осью световода. Такие волны (пучки световых лучей), а также траектории и направления их распространения, называют модами. Мода – это излучение, проходящее по волноводу и оставшееся после интерференции.

Различают одномодовые и многомодовые световоды и волноводы. Различают световоды и волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления и градиентные – у которых показатель преломления сердцевины уменьшается от центра к периферии. Число мод, формируемых градиентными приборами меньше числа мод, формируемых ступенчатыми, однако градиентные приборы создают меньшие искажения передаваемого сигнала. В градиентных приборах скорость передачи сигнала увеличивается по мере уменьшения показателя преломления. Физически наличие ограниченного дискретного числа мод можно объяснить тем, что через световод проходят только те волны, которые, отражаясь, совпадают по фазе

(модовая дисперсия). Остальные же сигналы, вследствие интерференции затухают и к приемнику не проходят. Это приводит к снижению пропускной способности световода, поскольку необходимо обеспечить задержку последующего сигнала на время прохождения первоначального сигнала.

Кроме модовой дисперсии, имеют место материальная и волноводная дисперсии, также ограничивающие пропускную способность световодов и волноводов. Материальная дисперсия состоит в том, что показатель преломления сердцевины зависит от длины волны. Волноводная дисперсия возникает в одномодовых световодах и волноводах. Это связано с тем, что вследствие интерференции преобладает одна мода, способная к распространению.

3 Специальные вопросы технологии электровакуумных приборов оптической электроники

3.1 Технология изготовления вакуумных приборов оптической электроники

Технология изготовления электронных приборов очень многогранна и во многом специфична. В данном разделе рассматриваются наиболее общие закономерности технологии изготовления электронных приборов.

Каждый электровакуумный прибор состоит из катода – источника электронов или ионов, приемника частиц – анода, а также электродов, управляющих траекторией частиц в виде сеток или диафрагм. Все эти элементы помещаются в стеклянную, металлическую или керамическую оболочку. В оболочке поддерживается вакуум, необходимый для преодоления электронами или ионами расстояния от катода до анода с минимальными потерями от рассеяния на газе.

Катоды

Наиболее ответственный элемент прибора – катод. В большинстве отпаянных приборов оптической электроники используются накаливаемые катоды, испускающие электроны вследствие нагрева катода до необходимой температуры. Нагрев катода производится от специального источника тепла (подогревателя) или путем пропускания тока непосредственно через тело катода. Такие катоды называются термокатадами.

Катоды из чистых металлов нашли широкое распространение в электровакуумных приборах. Катоды из металлов: W, Ta, Nb, Re, Mo обладают большой яркостью. Они нашли широкое распространение в электронных лампах, фотоэлементах и разборных электровакуумных приборах (источниках электронных пучков).

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

Катоды на основе химических соединений составляют группу высокоэффективных катодов. Основу катодов этой группы составляют оксиды бария и тория, щелочноземельные соединения, бориды, карбиды, нитриды и сульфиды металлов.

Оксидный катод представляет собой цилиндр, верхняя часть которого наполнена оксидами металлов. В процессе работы на поверхности такого катода формируется сверхтонкий жидкий слой, испускающий электроны при

его работе и поэтому называются L-катодами. На рис. 3.1 представлена схема оксидного и прямо накаленного катодов.



Рисунок 3.1 – Схема оксидного (а) и прямо накаленного (б) катода:
1 – экран; 2 – катод; 3 – винтовое крепление; 4 – токоввод; 5 – изолятор

L-катод – это катод, изготовленный из пористого вольфрама, пропитанного оксидами щелочноземельных элементов. Такие катоды нашли широкое распространение в радиолампах различных классов: приемно-усилительных, в том числе сверхминиатюрных, генераторных, модуляторных, в телевизионных трубках, лампах СВЧ, и т.д. Оксидный катод обладает высокой эмиссией, самой низкой среди других термокатодов рабочей температурой, длительным сроком службы, высокой механической стойкостью.

Катоды сложного состава выполняются на основе окислов щелочных и редкоземельных металлов в традиционном, полупроводниковом и пленочном вариантах. По конструкции такие катоды могут быть сетчатые, ячеистые или спеченные по профилю. В последнее время в качестве высокоэффективного катода в электронно-ионных источниках находит применение гексабарид лантана, который может работать и как накаленный катод и как катод в условиях ионной бомбардировки.

Катоды с запасом активного вещества изготавливаются различных конструкций в виде протяженных профилей (ламелей) или с распределением активного вещества по определенному профилю.

Специальные катоды. Это катоды на основе вторичной электронной эмиссии; плазменные катоды для ионно-электронных источников; катоды на основе пленок металл- диэлектрик – полупроводник; металл-диэлектрик-металл и др. Значительное место для генерации электронных или ионных пучков занимают металлокапиллярные, пучковые катоды, пропитанные специальными составами (импрегнированные катоды).

Применение керамики в технологии приборов оптической электроники

Изделия из керамики широко используются при производстве различных электронных и ионных приборов, ускорителей заряженных частиц, приборов сверхвысоких частот. Керамика находит широкое распространение благодаря ряду достоинств:

- 1) малое удельное газовыделение ($g = 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{ м}^3 / \text{с} \cdot \text{м}^2$);
- 2) легкость очистки и обезгаживания;
- 3) керамика выдерживает температуры до 1000° С и более;
- 4) механическая прочность на сжатие керамики составляет $60-80 \text{ кг/см}^2$, на растяжение – $6-8 \text{ кг/см}^2$;
- 5) керамика устойчива к химическим и радиационным воздействиям;
- 6) керамика – отличный диэлектрик.

К недостаткам керамики следует отнести хрупкость и непостоянство отклонения размеров по осям симметрий, возможность наличия посторонних включений и пор.

Конструкции металлокерамических спаев и их расчет

В зависимости от температурных условий керамика может работать на сжатие или расширение. Исходя из этого, металл может охватывать керамическое изделие снаружи или изнутри. Различают следующие типы спаев: охватывающий, штырьковый, торцевой.

В виду разности коэффициентов линейного расширения и устранения растрескивания в металлокерамических соединениях выполняется промежуточный слой для согласования спая. Это достигается соединением керамики с металлом через слой пластичного припоя или мягкого металла (Cu, Au, Ni, Ag). На рис. 3.2 представлены некоторые типы спаев.

Выбор типа металлокерамического спая зависит от величины смещения торца керамики относительно металла Δ :

$$\Delta = \alpha \Delta T R, \quad (3.1)$$

где α – разность температурных коэффициентов линейного расширения материалов, $1/\text{град}$; ΔT – разность температур от точки твердения припоя до комнатной; R – радиус спая, м.



Рисунок 3.2 – Типы металлокерамических спаев

Каждый тип керамики обладает определенным модулем упругости E , кг/мм². У разных типов керамик характерно функциональное изменение относительного удлинения от температуры ε , %. Критический коэффициент температурного расширения керамики спаянной с металлом δ_t , определяется выражением:

$$\delta_t = \varepsilon E \quad (3.2)$$

После проведения всех операций по пайке металлокерамической лампы, ее подвергают отжигу для снятия температурных напряжений.

Температура отжига паяных металлокерамических ламп составляет 75% от температуры плавления припоя.

Технология выполнения пайки керамики с металлом

Перед выполнением пайки на керамику наносится слой металла – проводится металлизация.

Металлизация может проводиться нанесением специальной пасты из металлических порошков Mo, W, Ti, Si, TiN, оксида алюминия, стекла и др., разведенных в испаряемом органическом веществе – биндере. (Простейшими биндерами могут служить дибутилфталат, спирт). Такой метод требует двух – трехкратного повторения операции вжигания пасты в водородной или вакуумной печи. Паста наносится пульверизатором, валками, кистью, или окунанием изделия. В последнее время пасты наносятся методом печати через трафарет – (трафаретная печать) или путем наклейки полимерного биндера с металлической пленой (шелкография). Затем полимер при нагревании испаряется, а пленка металла остается на изделии.

В ряде случаев для сокращения энергетических затрат в керамику вводят избыток солей некоторых металлов. При температуре около 10000 С на поверхность керамики вытесняется слой металла (Ti, Al). В этом случае реализуется метод вытеснения, позволяющий проводить пайку металла с керамикой без металлизации.

В последнее время распространяется металлизация напылением металлов в вакууме. Трудность реализации метода состоит в том, что

вследствие газофазных реакций пленочное покрытие имеет сложный интерметаллический состав с плохой паяемостью.

В заключение на слой металлизации наносится припой (покрытие облуживается).

Припои для пайки керамики должны обеспечивать получение вакуумноплотных соединений и обладать достаточно низкой упругостью паров при повышенных температурах (600-700° С), с тем, чтобы они не могли сильно испаряться внутрь вакуумного прибора. Кроме того, припои должны содержать минимальное количество газов и разлагающихся в процессе пайки примесей.

Перед пайкой обычно проводится анализ условий работы изделия. Относительно дешевые припои из меди требуют пайки при более высоких температурах. Обильное газовыделение при высокой температуре создает поры и увеличивает вероятность негерметичности прибора. Медно-золотые припои имеют отличное качество спая, но требуют подслоя из никеля. Медно- серебряные и медно-никелевые припои хорошо зарекомендовали себя в определенной группе электровакуумных приборов. Для приборов, не допускающих нагрева, используется диэлектрический припой, представляющий собой клеящую пасту.

В таблице 3.1 представлены некоторые параметры припоев.

Таблица 3.1 – Некоторые припои для металлокерамических спаев

Марка припоя	Состав припоя, % по массе	Температура плавления, град С
ПСр72В	Ag:Cu=72:28	779
ПЗлМН81,5	Au:Cu:Ni=81,5:15	910-925
ПЗлН82	Au:Ni=82,5:17,5	950
ПМТ28	Cu:Ti=72:28	870
Ni	Ni=100	1453
ПМН10	Cu:Ni=90:10	1100-1140

Процесс пайки изделия реализуется в вакуумной высокочастотной печи после предварительного ионного травления и очистки места спая. Пайка проводится в безмасляном сверхвысоком вакууме. Большинство электронных приборов (в частности радиоламп) после пайки выходят готовыми к употреблению.

Геттеры (газопоглотители)

Нормальная работа прибора в процессе его эксплуатации требует, чтобы в нем непрерывно поддерживался высокий вакуум. Для выполнения этого требования в конструкцию большинства электровакуумных приборов оптической электроники входит газопоглотитель, так называемый геттер. Назначение геттера заключается в поглощении газов, которые выделяются из отдельных частей прибора во время его работы. Необходимость применения газопоглотителя обусловлена тем, что во время работы прибора происходит диффузия газов через оболочку и токовводы прибора, а также выделение газов из нагретых элементов прибора. Газопоглотители помещают в электровакуумный прибор в виде специальных конструктивных элементов или отдельных капсул. Они выполняют функцию миниатюрных «встроенных» насосов. К геттерам предъявляются следующие требования: избирательность по поглощаемым газам; большой предельный вакуум; большое газопоглощение; широкий температурный диапазон; хорошая адгезия и виброустойчивость; химическая устойчивость.

Материалы и марки геттеров

Материалами геттеров служат металлы и соединения, хорошо поглощающие газ при испарении. Наиболее распространенными являются геттеры на основе таких металлов как: Ti, Ba, Fe, Zr, P, Al, Ni.

Механизм поглощения газа геттером – это адсорбция молекулы газа с образованием химического соединения с одновременной диффузией газов в соединение (абсорбция).

Различают два вида газопоглотителей – распыляемые и не распыляемые.

Основной составной частью распыляемых газопоглотителей является барий, который в процессе изготовления прибора нагревается и, испаряясь, наносится на внутреннюю поверхность баллона, образуя тонкую и активную пленку черного цвета. Лучшие результаты получаются при применении не чистого металлического бария, а сложных составов с добавками CaO, MgO и др., в которые барий входит как основной компонент. Распыляемые газопоглотители изготавливаются в виде спрессованных из порошка таблеток или в виде трубочек, наполненных барием. Распыляемые геттеры имеют меньшую температуру возгонки относительно нераспыляемых (до 1000° С) и большую избирательность к газам. Такие геттеры нашли широкое распространение в радиолампах.

Не распыляемые газопоглотители наносятся в виде порошка на детали прибора или помещаются внутрь прибора в виде таблеток либо кусочков

компактного металла, прикрепленных к арматуре. В качестве нераспыляемых газопоглотителей обычно используются цирконий, титан, цезий, церий или смесь некоторых редкоземельных элементов.

Нераспыляемые геттеры имеют меньшую скорость поглощения и меньшую сорбционную емкость, но могут достичь более глубокий вакуум.

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

Расчет параметров геттера

Геттеры обладают рядом свойств, характеризующих их параметры:

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

$$R = Q_{\text{выд}} / Q_{\text{погл}} . \quad (3.3)$$

(Газовыделение геттеров начинается при достаточно высокой температуре и связано с разложением компонентов геттера);

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

$$\mathcal{E} = N_{\text{погл}} / N_{\text{пад}} ; \quad (3.4)$$

3) скорость поглощения (зависит от площади сорбции);

4) избирательность;

5) ёмкость геттера (л / кв.см.);

6) предельный вакуум (для ВаО – 10^{-40} мм рт ст., для ВаС – 10^{-17} мм рт ст).

Остаточное, предельное давление в объеме прибора устанавливается только после длительного времени работы геттера. Остаточное давление P уменьшается при увеличении площади геттера S и зависит от скорости объемного поглощения G :

$$P = G / kS , \text{ мкм рт. ст.} , \quad (3.5)$$

где k – константа поглощения. (Если определенный газ полностью поглощается, то $k=1$). Размерность единиц: P – мкм рт ст, G – лмкм/с, S – см².

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

$$V = k\sqrt{P} . \quad (3.6)$$

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

$$Q = kSPt. \quad (3.7)$$

Скорость поглощения газа на некотором отрезке давлений можно считать линейной.

Активация геттера

Геттер становится активным, когда на его поверхности образуется пленка, способная поглощать газ. Для активации геттер нагревают до температуры, составляющей 70% от температуры плавления.

При нагреве часть содержащегося в геттерной массе бария испаряется. «Выход бария» в процентах является важной характеристикой геттера. Отечественные геттеры имеют выход бария не менее 50%. При более высокой температуре геттер начинает разлагаться и выделять газ. Спектр поглощения и спектр газовой выделения зависят от температуры.

Изготовление и хранение геттеров

Геттер изготавливается путем спекания специальной шихты в вакуумных печах. Полученные конгломераты подвергаются дроблению, просеиванию и расфасовке в капсулы. Капсулы хранятся в вакуумных колбах в атмосфере углекислого газа. В таком виде геттеры разрешается хранить до шести месяцев. Однако в процессе монтажа электровакуумного прибора геттеры из сплава «Альба» разрешается держать открытыми в помещении с влажностью воздуха не выше 65% не более 48 ч, а геттеры из сплава «Альба НС» — не более 16 ч.

3.2 Технология изготовления разборных приборов оптической электроники

Под разборными приборами оптической электроники понимаются электронные и ионные источники для технологических целей, которые служат для формирования электронного или ионного потока с целью напыления пленок или травления оптических материалов. Технология изготовления разборных и сваренных приборов не отличается от технологии изготовления электровакуумных приборов. Ниже рассматриваются отдельные рекомендации по изготовлению технологических генераторов плазмы, источников электронов или ионов.

Источники электронов или ионов работают на технологических установках, поддерживающих необходимый состав газовой среды в приборе

и давление $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Как правило, эти приборы рассчитаны на напряжение более 1000 В. Разработку прибора плазменной электроники начинают с готового типоразмера изолятора и оболочки.

Оболочки приборов плазменной электроники в основном выполняются из стеклокерамики или из керамики. Это связано с тем, что органические изоляторы: капролон, оргстекло и др., вследствие разрыва полимерных молекул при попадании на них частиц плазмы, выступают генераторами газа. К оболочкам предъявляются повышенные требования по перпендикулярности и соосности металлокерамических спаев. В последнее время такие спаи выполняются электронным лучом при давлении 10^{-2} Па, вместо традиционной технологии высокотемпературной выдержки спая в сверхвысоком вакууме. Размер изолятора и оболочки прибора выбирается из расчета 2 кВ/см . Это связано с попаданием пыли на изолятор из атмосферного воздуха или перепылением материалов внутри источника. Для уменьшения габаритов изолятор делают волнистым. Для увеличения электрической прочности необходимо, чтобы силовые линии электрического поля были направлены вдоль изолятора, (рис. 3.2 а) а не поперек (рис. 3.2 б).

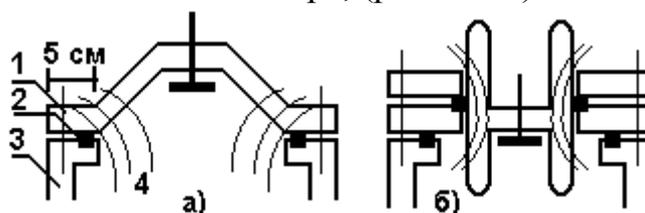


Рисунок 3.2 – Схемы высоковольтных изоляторов на 100 кВ: 1 – изолятор; 2 – уплотнение; 3 - вакуумная камера; 4 – силовые линии электрического поля

При конструировании источников, следует учитывать появление твердых углеродных и металлических отложений на относительно холодных элементах источника и изоляторе.

Материалы для конструкций. Наиболее приемлемым материалом для элементов конструкций является нержавеющая немагнитная сталь (например, типа Х18Н10Т). Однако у нержавеющих сталей малый коэффициент теплопередачи (в 40 раз меньше стали). Обычная сталь имеет большое газовыделение, и поэтому применяется только для внешних деталей плазменных приборов.

Материал для катодов. Для источников электронов популярными являются катоды из гексаборида лантана. Такие катоды работают хорошо и как накаливаемый катод, и как газоразрядный. В виду его дефицитности часто

применяются прямонакаленные катоды из тантала, вольфрама или молибдена.

Материал для анодов. Для анодов часто применяется нержавеющая сталь, а иногда медь. Однако медь, обладая хорошей теплопроводностью, легко расплывается в разряде и имеет большой коэффициент удельного газовыделения.

Магнитные элементы. Магнитные поля применяются для фокусировки электронных пучков, для обеспечения траекторий потока плазмы, для повышения эффективности ионизации. Магнитные линзы изготавливаются из электротехнической стали. Плохим заменителем электротехнической стали является низкоуглеродистая сталь Ст 3. Электромагнитные линзы стараются вынести за пределы вакуумного объема, что связано с перегревом витков и трудностью откачки газа между витками. В последнее время становятся популярными относительно малогабаритные постоянные магниты для стимулирования ионизации в рабочей зоне электронного прибора.

Охлаждение. В приборах плазменной электроники около 10% мощности расходуется на поддержание разряда, потери частиц и нагрев элементов. Такие приборы имеют принудительное охлаждение. При мощности прибора до 3 кВт оправдано воздушное охлаждение, осуществляемое от турбины высокого напора. При более высокой мощности применяют изолирующее водяное или масляное охлаждение. Обычно катод делается сменным и крепится в держателе из меди.

Технологичность конструкции – важный аспект конструирования электронно-ионных и плазменных источников. Необходимо учитывать общий вес источника, легкость его сборки и разборки. В настоящее время наиболее приемлемым является токарный вариант изготовления электронно-ионных источников технологического назначения. Все электроды должны иметь закругление для уменьшения напряженности электрического поля. Класс обработки материалов: 12- 14. Крепление электродов в вакууме проводится винтами с осевыми отверстиями для откачки посадочного места.

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

Техника безопасности. Источники электронов и ионов должны быть сконструированными так, чтобы рентгеновское излучение не проходило через вакуумные уплотнения, смотровые окна, изоляторы. Для этого уплотнительные фланцы выполняются с буртиками, а сами источники окружаются экранами из свинца (толщиной 5 мм для напряжения 30 кВ).

Ориентировочная толщина вакуумной камеры составляет ~20 мм для напряжения до 30 кВ при токах до 100 мА.

Кроме физических принципов работы следует учитывать проблемы чистоты спектра остаточного газа, изоляции, высокого напряжения, высокой температуры и рассеяния мощности. Для этого полезно обращаться к литературе, в которой более глубоко рассмотрено решение этих проблем, в частности в материалах соответствующих конференций.

4 Вакуумная, электронно-лучевая, ионно-лучевая и плазменная технология

4.1 Вакуумная технология

Расчет вакуумных систем

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

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

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

$$Q = Ag\Omega. \quad (4.1)$$

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

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

$$Q = \kappa N. \quad (4.2)$$

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

$$\sum Q = (Ag\Omega)_k + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (4.3)$$

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

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

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

$$S_n = \sum Q / P_{раб} . \quad (4.4)$$

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

$$S_{\phi} = \sum Q / P_{вых} . \quad (4.5)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{вых} = 10 \text{ Па}$ (0,1 мм рт. ст.). Следует заметить, что определенная нами скорость откачки насоса меньше паспортной и соответствует производительности при давлении 10 Па. Поэтому, следует проанализировать кривые производительности форвакуумных насосов от давления, и выбрать тот насос, который обеспечивает требуемую скорость откачки при давлении 10 Па.

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

$$S_n = \gamma S_o , \quad (4.6)$$

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

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

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt . \quad (4.7)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_n} \quad (4.8)$$

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

В расчетах времени откачки в диапазоне давлений, когда существенно возрастают газовыделения (от 10 до 0,01 Па и менее) необходимо учитывать приведенный объем V' , увеличенный пропорционально уменьшению давления. (Например, обеспечение рабочего вакуума от 10 до 0,01 Па

соответствует, уменьшению давления на три порядка). Соответственно, приведенный объем составит величину $V' = 10^3$).

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

$$t = V / S_g (\ln P_1 / P_2). \quad (4.9)$$

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

$$t = 8V / S_n. \quad (4.10)$$

Далее проводят корректирующий расчет, который учитывает особенности работы системы. Например, проводят согласование откачных средств, учитывают пропускную способность коммуникации, газовыделение при повышении температуры, проницаемость газа через прокладки и т.д. Обычно время проведения процесса откачки, включая запуск высоковакуумного оборудования не должно превышать 1 час. Если оно мало – следует корректировать коэффициент поверхности или приведенный объем. Если время проведения вакуумного этапа больше 1 часа – следует корректировать напуск газа и производительность откачных средств.

4.2 Электронно-лучевая технология

В настоящее время электронные пучки широко используются в различных промышленных технологических установках для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления и для физических исследований.

Электронный луч по своей удельной энергетической мощности, легкости управления, эффективности и локальности нагрева превосходит все известные источники и лишь немного уступает лазерному лучу. Плотность мощности электронного луча всего на два порядка меньше лазерного, однако, электронный луч на порядок дешевле. Электронный луч, в отличие от лазерного, может быть произвольной формы. Электронный луч не вносит примесей в материал, может работать в любой агрессивной и инертной среде, имеет возможность совмещения технологий с ЭВМ.

В числе недостатков использования электронно-лучевых установок следует отметить возникновение рентгеновского излучения при повышении ускоряющего напряжения более 5 кВ, а также возможность генерации дефектов при обработке полупроводниковых материалов.

Электронные источники для технологических целей

В простейшем виде источник электронов для технологических целей (электронная пушка) представляет собой катод, испускающий электроны и анод с осевым отверстием для выхода электронов. Катод обычно находится под высоким потенциалом, а анод заземляется. Электроны могут быть получены путем нагрева катода (за счет термоэмиссии) или путем извлечения из плазмы тлеющего или дугового разряда. На рис. 4.1 представлены некоторые схемы электронных пушек.

Источники с термокатодом работают при давлениях 10^{-2} Па и менее. Они обладают большой яркостью электронного пучка ($B \sim 10^7$ А/м² стер). В качестве катода могут использоваться тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, тантал) или сложные соединения (оксиды, нитриды или карбиды металлов). В последнее время нашли широкое распространение катоды из гексабарита лантана (LaB₆).

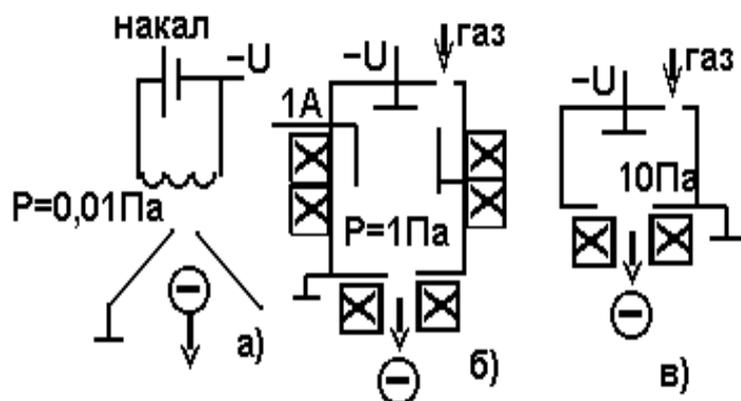


Рисунок 4.1 – Схемы технологических электронно-лучевых пушек; а) – пушка с термокатодом; б) – пушка на основе разряда Пеннинга; в) – пушка на основе высоковольтного тлеющего разряда

Источники на основе разряда Пеннинга построены на основе извлечения частиц из плазмы газового разряда. Газовый разряд может гореть при давлениях 1-0,01 Па. Стимулирование горения разряда при малом давлении достигается магнитным полем.

Максимальная плотность тока с границы плазмы определяется по формуле:

$$J = \frac{1}{4} n_e e \sqrt{8kT_e / \pi m} \quad [\text{А/см}^2], \quad (4.11)$$

где n_e – концентрация электронов в плазме 1/м³; $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ Кл – заряд электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; T_e – электронная температура;

$M = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

На рис. 4.2 представлены некоторые характеристики плазменного источника электронов (ПИЭЛ)

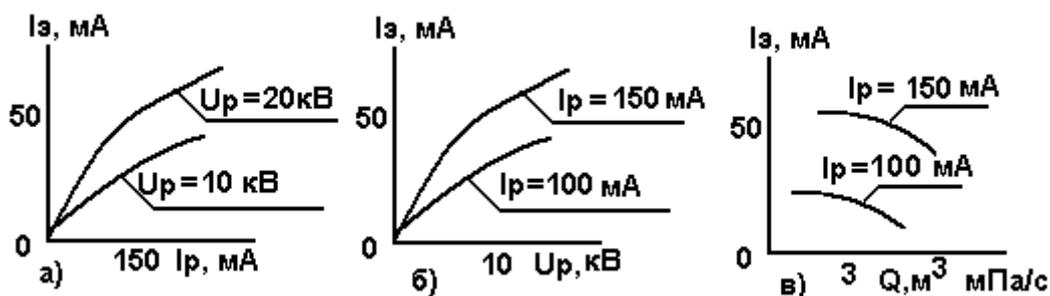


Рисунок 4.2 – Характеристики ПИЭЛ. а) – эмиссионная, б) – вольтамперная, в) – газовая

Источники на основе высоковольтного тлеющего разряда состоят из холодного катода и заземленного анода, выполненного в виде диафрагмы. При откачке объема электронного источника до давления 1^{-10} Па (10^{-1} - 10^{-2} мм рт ст) и подаче на катод отрицательного потенциала (более 2,5 кВ), между холодным алюминиевым катодом и анодом возникает высоковольтный тлеющий разряд. Ионы из плазмы разряда устремляются на отрицательный катод, из которого за счет бомбардировки выбивают электроны. Электроны фокусируются магнитной линзой и выводятся в камеру.

Расчет мощности электронного источника

Для проведения технологических операций того или иного вида важна плотность мощности на обрабатываемом материале. Поверхностная обработка материалов проводится при плотностях мощности $g = 10^5$ Вт/см², сварка – при $g = 10^6$ Вт/см², испарение материалов и выполнение глубоких отверстий при $g = 10^6 - 10^8$ Вт/см². На проведение процессов влияет коэффициент температуропроводности материалов a , плотность материала ρ и водность, диаметр пучка d , глубина проникновения луча b . Минимально необходимая мощность P электронной пушки для проведения технологической операции рассчитывается по формуле:

$$P = 4aL\rho b / d^2, \quad (4.12)$$

где L – энергия испарения материала, Дж/см² (численно $L = T_{пл} + \ln T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления материала). Размерность единиц: P – Вт, ρ – г/см³, b – см, d – см; $a \sim 10^4$. Для практических расчетов рекомендуется сравнивать полученные величины с аналогами.

Критическая плотность мощности, при которой начинается процесс, определяется по формуле:

$$g = \rho L \sqrt{a/t} , \quad (4.13)$$

где t – длительность импульса.

Глубина проникновения электронов h прямо пропорциональна квадрату напряжения на электронном источнике и обратно пропорциональна плотности материала:

$$h = 2,2 \cdot 10^{-12} \cdot U^2 / \rho . \quad (4.14)$$

Несмотря на относительно небольшую глубину проникновения электронов (микроны), импульс тепловой энергии, переносимой электронами, проникает на большую глубину. Например, при ускоряющем напряжении 60 кВ электронный луч сваривает сталь толщиной 10 мм.

Рекомендации по применению электронно-лучевых технологий

Особенности электронно-лучевой обработки материалов состоят в том, что электронный луч представляет собой высокоэнергетический стержень, под которым перемещается деталь. Электронно-лучевые установки, как правило, имеют в вакуумной камере координатный стол для перемещения детали под электронным лучом. Вакуумная камера выполняется из толстой стали для защиты от рентгеновского излучения и снабжена свинцовыми стеклами для наблюдения процесса. Фокусирующая система позволяет с помощью магнитной или электростатической линзы сфокусировать электронный пучок. Отклоняющая система позволяет электронному лучу несколько смещаться в горизонтальном направлении.

Особенность обработки диэлектриков электронным пучком состоит в необходимости снятия отрицательного заряда с поверхности. Чаще это выполняется с помощью плазмы, формируемой с помощью разряда в зоне обработки диэлектрика.

Для фокусировки электронного пучка применяются электромагнитные линзы. Число ампервитков магнитной линзы (NI) рассчитывается по уравнению:

$$NI = 10\kappa \sqrt{Ur/f} , \quad (4.15)$$

где κ – коэффициент заполнения катушки проводом ($\kappa = 0,6-0,7$); U – ускоряющее напряжение, В; r – средний радиус витка провода, м; f – фокусное расстояние от центра линзы.

Для отклонения электронного луча по оси X или Y служат две пары постоянных или электрических магнитов, расположенных под магнитной линзой. Угол отклонения луча связан с параметрами системы соотношением:

$$\theta = 2,96 NI / \sqrt{U} , \quad (4.16)$$

где θ – угол отклонения луча, рад; l – длина пути электрона в магнитном поле; U – анодное напряжение, В; H – напряженность поля в отклоняющей системе.

Электронно-лучевая сварка

В электронных пушках для сварки применяются обычно низкие ускоряющие напряжения от 10 до 50 кВ. Мощность большинства пушек не превышает 5 кВт. По отношению глубины проплавления h к ширине шва d различают мягкий режим сварки ($h \sim d$), жесткий режим ($h > d$) и режим кинжального проплавления ($h \gg d$). При относительно постоянной ширине сварного шва, изменение ускоряющего напряжения связано с глубиной проплавления соотношением:

$$h_1 / h_2 = \sqrt{U_1 / U_2} . \quad (4.17)$$

В указанных системах в основном используются диодные и триодные пушки. В качестве эмиттеров используются термокатоды, преимущественно чисто металлические (вольфрамовые и танталовые), а также боридлантановые катоды. Оксидные катоды в установках технологического назначения не применяются, т.к. из-за частой разгерметизации рабочей камеры они быстро выходят из строя.

Регулировка тока луча осуществляется изменением отрицательного смещения, подаваемого на фокусирующий электрод. В диодных пушках фокусирующий электрод соединен с катодом, поэтому регулировка тока луча осуществляется изменением напряжения накала катода.

Сварка электронным лучом может производиться как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Импульсное управление лучом для точной дозировки энергии луча осуществляется подачей на фокусирующий электрод положительных импульсов напряжения. Для увеличения прочности шва проводится поверхностная наплавка металла на сварной шов путем качания луча. После проведения сварки рекомендуется снять внутренние напряжения с изделия путем прогрева под расфокусированным электронным лучом.

Проверка качества сварки во время проведения процесса может проводиться визуально через темное стекло или передающую телевизионную камеру. В промышленном масштабе контроль сварных соединений проводится с помощью ультразвуковой диагностики или с помощью бетатрона. В лабораторных условиях для контроля сварных швов производится разрез сварки с последующей полировкой и травлением шва в разбавленной серной, соляной или азотной кислоте.

Электронно-лучевая плавка

Электронно-лучевые пушки для плавки металлов по характеристикам и условиям работы отличаются от сварочных пушек. В них используются более мощные электронные пучки, более интенсивное газовыделение и испарение плавящегося металла и, следовательно, более сильное колебание давления в рабочей камере. В тоже время требования к фокусировке пучка менее жесткие, поскольку зона термической обработки велика.

При разработке электронно-оптической системы большое значение имеет обеспечение защиты катода от ионной бомбардировки и напыления металла из расплава. Для защиты катода используют различные конструктивные меры. Во-первых, при удалении пушки от расплавленной ванны, приходится использовать магнитные фокусирующие системы. Во-вторых, применение дифференциальной откачки, позволяет поддерживать в пушке высокий вакуум.

В плавильных установках используют несколько типов электронно-оптических устройств: электронную пушку без анода; пушку с анодом и электронно-оптическую систему, содержащую пушку Пирса; электронную пушку с магнитной линзой и электромагнитной системой отклонения пучка.

В качестве катода в этих пушках используют чистые тугоплавкие металлы - вольфрам, тантал, молибден.

Электронные пушки без анода отличаются простотой конструкции. В первом типе пушки анодом служит ванна жидкого металла. Однако такая пушка имеет серьезные недостатки, связанные с близким расположением катода к расплавленной ванне, бросками газовыделений и запылением элементов.

Пушки с анодом и электронно-оптической системой имеют водоохлаждаемый самостоятельный заземленный анод, массивный катод в виде вольфрамовой шайбы и фокусирующий электрод. Существенным достоинством систем этого типа является наличие анода, что позволяет защитить катод от паров расплавленного металла, а также отделить источник электронов от рабочей камеры с тиглем.

Пушки с отклонением электронного пучка содержат магнитную линзу и отклоняющую систему. Катод в этой системе удален от расплавленной ванны, что существенно снижает загрязнение его конденсирующими парами, а также от ионной бомбардировки.

Размерная электронно-лучевая обработка

Размерная микрообработка электронным лучом может применяться для сверления микронных отверстий в сверхтвердых материалах, для выполнения рельефных рисунков, для локальных термических операций.

Особенностью этих систем является то, что они работают в импульсном режиме, обеспечивая высокую плотность мощности в пучке $10^8 - 10^9$ Вт/см². Импульсный режим позволяет значительно уменьшить разогрев изделий и сократить размеры зоны термического влияния. Ускоряющее напряжение этих пушек составляет 80 – 100 кВ, ток пучка до 1 мА. Диаметр пучка на обрабатываемом изделии составляет 10 - 50 мкм. Фокусирующая система, как правило, содержит две магнитные линзы, позволяющие сфокусировать пучок в пятно малых размеров.

В пушках для размерной обработки применяются катоды с малой эмитирующей поверхностью. Все элементы системы должны быть точно отъюстированы. Несовпадение осей или их не параллельность приводит к абберациям системы. Для юстировки элементов оптики применяются механические и электромагнитные системы юстировки.

Вневакуумная электронно-лучевая обработка материалов

При больших размерах обрабатываемых материалов (например, для сварки ферм мостов, наплавки листовой инструментальной стали и т.п.) изготовление вакуумных камер является сложной задачей, поскольку на 1 см² площади камеры приходится давление в 1 атмосферу. Для проведения операций при атмосферном давлении электронный луч выводят из вакуума в атмосферу. Среди разнообразия систем вывода наибольшее распространение получил вывод пучков через систему диафрагм с малыми отверстиями, между которыми откачивается газ. Диафрагмы обладают конечной пропускной способностью для газа. Таким образом, создается ступенчатое уменьшение давления до такого, при котором возможна генерация электронного пучка. Для уменьшения потерь на газе электроны ускоряют до энергий около 100 кВ. Однако, величина пробега электронов столь высоких энергий при атмосферном давлении невелика и для процесса сварки не превышает один-два сантиметра.

В ряде случаев применяются «шагающие» камеры-присоски, которые переустанавливаются после проведения процесса.

Электронно-лучевое испарение материалов

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.

4.3 Ионно-лучевая технология

Ион, в отличие от электрона обладает очень большой массой. Вследствие этого ионы, попадая на мишень, слабо нагревают поверхность, но могут распылять ее. При ионной обработке материалов (очистке, полировке, легировании, имплантации) поток ионов бомбардирует твердое тело, изменяя его электрофизические, оптические и другие свойства. Границы энергий для проведения процессов являются условными.

Ионная очистка и полировка поверхности производится ионами относительно малых энергий (до 10 кэВ, с плотностью тока до 5 мА/см²). Для операций травления требуется плотность тока свыше 7 мА/см². Легирование материалов производится ионами определенных элементов при энергиях 30-50 кэВ с целью создания зон определенной проводимости в полупроводниковых материалах. Ионная имплантация проводится при энергиях 0,1-1 мэВ и предназначена для контролируемого введения легирующих атомов в полупроводниковые материалы или для модификации поверхности различных материалов.

Ионные источники для проведения технологических операций

Ионный источник должен обеспечивать следующие основные требования:

– величина тока ионов, ускоряющее напряжение, длительность импульса тока, равномерность распределения плотности тока;

– массовый и зарядовый состав ионов, минимальный расход газа, минимальная потребляемая электрическая мощность.

Ионный источник для технологических целей содержит генератор плазмы, ускорительную ионно-оптическую систему, сепаратор масс. Ионно-оптическая система чаще выполняется электростатической, в виду слабого воздействия магнитного поля на траекторию ионов.

Некоторые параметры ионных источников

Эффективность извлечения – параметр α – (отношение тока эмиссии ионов I_i к току разряда I_p)

$$\alpha = I_i / I_p \quad (4.18)$$

Экономичность – (отношение тока ионов к мощности машины). Экономичность определяет цену иона.

$$\eta = \frac{I_i}{U_p I_p} \quad (\text{А/кВт}) \quad (4.19)$$

Достижением является эффективность извлечения (~6%), при этом энергетическая эффективность составляет 0,06-0,25 А/кВт.

Первеанс -отношение ионного тока к ускоряющему напряжению в степени три-вторых.

$$P = I_i / U^{3/2} \quad (4.20)$$

Более высокие значения первеанса свидетельствуют о малом диаметре пучка при том же токе, о большой плотности мощности в пучке и большой его яркости.

Газовая экономичность – отношение ионного тока к расходу газа.

$$F = I_i / Q \quad (4.21)$$

Яркость – это распределение плотности тока в пространственном угле распространения пучка.

$$B = I / \Omega \quad (\text{А} \cdot \text{м}^2 \text{стер}) \quad (4.22)$$

Эмиттанс- это площадь эллипса скоростей в поперечном сечении фазового объема, занимаемого частицами пучка. (В первом приближении это пространственное распределение яркости пучка).

Акцептанс – зона пучка в площади меньше эмиттанса (в зоне не более 20 мрад ~ 1,10)

Параметр Холла. Параметр показывает, во сколько раз доля энергии, переходящая в продольный ток по оси источника больше радиальной составляющей.

$$X = \omega_e \tau_e \quad (4.23)$$

(Например для установки типа УРМ 387 – Булат, при $V=0,2$ Тл.; ω_e -циклотронная ленгмюровская частота $\omega_e=5,94 \cdot 10^3$; те-время пробега электрона $\tau_e=0,83 \cdot 10^{-3}$. Тогда $\omega_e \tau_e=5,94 \cdot 10^3 \cdot 0,83 \cdot 10^{-3}=4,93$)

Чальд-Ленгмюровский предел плотности извлекаемого тока рассчитывается по формуле:

$$J=1,72(\xi/A)0,5U^{3/2}/d^2; \quad J-\text{мА/см}^2, \quad \xi-\text{зарядность, } A-\text{ а.е.м.}; \quad d-\text{ см.} \quad (4.24)$$

Доза легирования Φ определяется произведением плотности тока j на длительность облучения t . $\Phi=Jt$ (Кл/м²). Величина Φ не отражает в явном виде число примесных ионов, поэтому принято дозу выражать в количестве частиц, внедренных на единицу поверхности.

$$Q = \Phi / g = jt / en \quad (4.25)$$

Некоторые параметры сильноточных ионно-электронных источников

Предельный ток, который может пропустить вакуумный промежуток, определяется по формуле Чальд-Ленгмюра:

$$J_{\text{чл}} = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2} / d^2 \cdot S(Zm_e / m_i)^{1/2} \quad (4.26)$$

где U – ускоряющее напряжение, В; d – расстояние между катодом и анодом, см; S – площадь токоотбора; Z – заряд иона (для металлов в данном приближении $Z=1$); m_e – масса электрона, кг;

$$m_i = Y_{\text{АЕМ}} \cdot A \quad (4.27)$$

m_i – масса иона, кг; $Y_{\text{АЕМ}} = 1.66 \cdot 10^{-27}$ кг – условная атомная единица массы; A – атомный вес;

Например: масса иона олова $m_i \text{ Sn} = 1.66 \cdot 10^{-27} \cdot 119 = 1.98 \cdot 10^{-25}$ кг; Масса иона свинца $m_i \text{ Pb} = 1.66 \cdot 10^{-27} \cdot 207 = 3.4 \cdot 10^{-25}$ кг.

В некоторых условиях плотность тока может превышать Чальд-Ленгмюровский предел в 30-50 раз.

Параметры плазмы связаны с током извлеченного пучка соотношением:

$$I = e \cdot n \cdot S(kT_e / 2\pi m)^{0.5}, \quad (4.27),$$

где n – концентрация частиц на границе токоотбора; S – площадь поверхности токоотбора;

Ток заряженных частиц, необходимый для реализации данной концентрации при данной плотности тока определится:

$$I = J \cdot S, \quad (4.28)$$

где S – площадь сечения анода (см²).

Учитывая, что из дугового разряда можно извлечь не более 10% ионного тока, можно рассчитать ток разряда через дугу ионного источника.

Из плазмы можно вытянуть плотность тока:

$$J = 0,4n_{+,-}(2kT_e/m)^{0,5}, \quad (4.29)$$

где $n_{+,-}$ — концентрация ионов или электронов (см⁻³); T_e — электронная температура, (для дугового разряда $T_e = 10^5$, К); $m=m_I / m_p$, m_p — масса протона, при $m_p=1$; имеем:

$$J = 8 \cdot 10^{-16} n(T_e/m)^{0,5}, \quad (4.30)$$

где

$$n = (J \cdot S^{0,5}) / (8 \cdot 10^{-16} T_e^{0,5}). \quad (4.31)$$

Концентрацию движущейся плазмы можно рассчитать из соотношения:

$$J = n \cdot e \cdot V, \quad (4.32)$$

где n — концентрация плазмы, см⁻³; e — заряд электрона, ($e=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл); V — скорость движения плазмы, см/с (для металлов 10^6 см/с, для плазмы органических веществ $V=10^7-10^8$ см/с).

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

$$Q = CM\Delta T \text{ (Дж)}, \quad (4.33)$$

где C — удельная теплоемкость материала калориметра (для меди $C=0,38$); M — масса калориметра, кг; ΔT — изменение температуры калориметра вследствие воздействия пучка. Энерговклад от действия пучка, оцениваемый электрическим способом (по осциллограмме), рассчитывается по соотношению:

$$Q = UI\Delta t, \quad (4.34)$$

где t — длительность импульса.

Источники на основе разряда Пеннинга

Плазменный источник ионов характерен тем, что ионы извлекаются из плазмы разряда. Для повышения эффективности ионизации газа, разряд помещается в магнитное поле. Источники с магнитным полем относятся к источникам Пеннинга.

На 4.2 представлены некоторые схемы плазменных ионных источников.

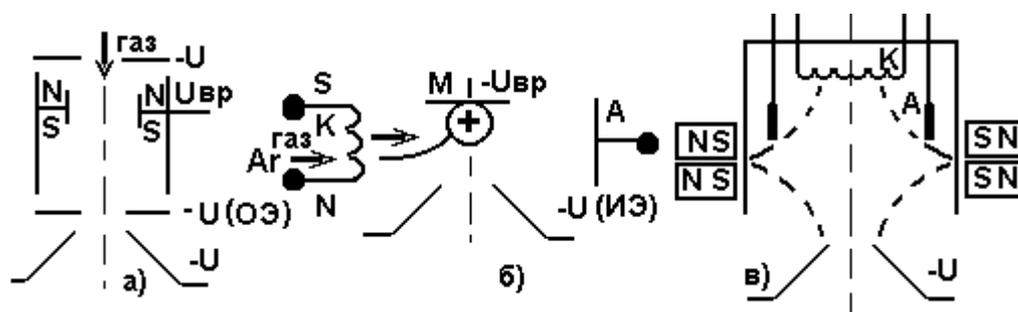


Рисунок 4.2 - Схемы плазменных источников ионов; а) – источник ионов газов, б) – источник газометаллических ионов, в) – монокасповый источник Пеннинга

Плазменный источник (рис. 4.2 а) состоит из рабочей камеры, в которой располагаются катод (К) и анод (А). При обеспечении давления в камере на уровне $0,1^{-1}$ Па и подаче напряжения ($U_{вр} \sim 600$ В) в системе возбуждается разряд и генерируется плазма. Магнитное поле, создаваемое магнитами (NS) способствует закручиванию электронов в магнитном поле. Это увеличивает путь электронов и способствует ионизации напускаемого газа. Ионизации способствует также напряжение на отражательном электроде ($U_{оэ}$). Ионы извлекаются с помощью извлекающего электрода – экстрактора с напряжением $-U$.

В источнике газометаллических ионов (рис. 4.2 б) отрицательный потенциал подается на мишень (М). Ионы из плазмы разряда устремляются на мишень и бомбардируют ее. Из мишени выбиваются атомы металла и ионизируются. Ионы металла мишени и ионы напускаемого газа извлекаются с помощью извлекающего электрода.

Источник в) отличается обострением магнитного поля. (Касп – обостритель англ.). Сосредоточение магнитного поля в области извлекающего электрода способствует более активному движению электронов вокруг магнитных силовых линий. Это позволяет увеличить ионный ток.

Широкоапертурные ионные источники

На рис. 4.3 представлены широкоапертурные ионные источники, получившие широкое распространение в технологических целях. Диаметр пучка на мишени достигает 200 мм.

Источник ионов типа Кауфман (рис.3.13 а), названный по имени автора (H.R. Kaufman), содержит накаливаемый катод (К) и аноды (А1, А2), расположенные между магнитными секциями. При обеспечении в источнике давления 0,1 Па и подаче ионообразующего газа (в частности аргона), между анодами А1 и А2 зажигается вакуумный дуговой разряд низкого давления.

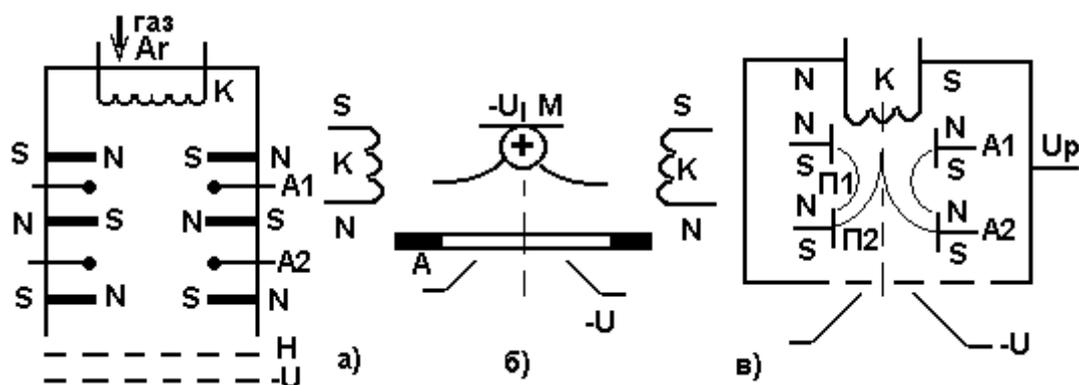


Рисунок 4.3 - Схемы широкоапертурных источников ионов; а) – источник КАУФМАН, б) – источник типа ПИГАТРОН, в) – дуопигатрон

Электроны, эмитируемые из катода, способствуют дополнительной ионизации газа. Поток ионов проходит нейтрализатор (Н) для нейтрализации пространственного заряда ионов. Часто в качестве нейтрализатора пространственного заряда используется сетка из графита, тантала или вольфрама, прогреваемая электрическим током. Источник нашел широкое применение для травления полупроводниковых структур.

Пигатрон

На рис.43 б) представлен источник многозарядных ионов и ионов металлов типа Пигатрон. В основу конструкции источника положена идея вакуумного манометра Пеннинга (Penning Ionisation Gauge – PIG). Два катода размещены напротив кольцевого анода в осевом магнитном поле, образованном магнитами NS. Между катодом и анодом зажигается дуговой разряд. Электроны, испущенные с каждого катода, ускоряются в полой аноде в виде пучка. Часть электронов удерживается в осевом направлении постоянным электрическим полем, а в радиальном – магнитным полем. Магнитное поле способствует ионизации газа электронами. Это способствует дополнительной ионизации и формированию плотной плазмы, из которой вытягивается ионный пучок. В разряде возбуждаются ионы с зарядовым числом до 7. Источники применяются для получения многозарядных ионов металлов из материала мишени (М).

Дуопигатрон

Для генерации ионов удобно иметь две плазмы. Одна – низкоэнергетическая дает генерацию частиц. Другая – высокоэнергетическая обеспечивает параметры ионного пучка.

В дуопигатроне (рис.4.3 в) существует две плазмы. Первая плазма (П1) – низковольтная, которая формируется между анодами. Низковольтная

дуговая плазма (50 А, 600В, 2 мкс) поддерживает концентрацию высоковольтной плазмы на уровне 10^{13} см⁻³. Вторая плазма (П2) – высоковольтная, которая формируется между анодом и высоковольтным электродом. Высокая электронная температура ($T_e \sim 150$ эВ) способствует получению ионов путем электрон-ионных столкновений. С помощью подобного источника в г. Дубне получены ионные потоки различных материалов с зарядностью до 10 для ускорителей.

В последнее время в таких источниках применяются холодные катоды.

Источники газометаллических ионов

На рис.4.4 представлена группа источников газометаллических ионов, в которых применяются ионно-оптические системы для формирования пучков применительно к полупроводниковой технике.

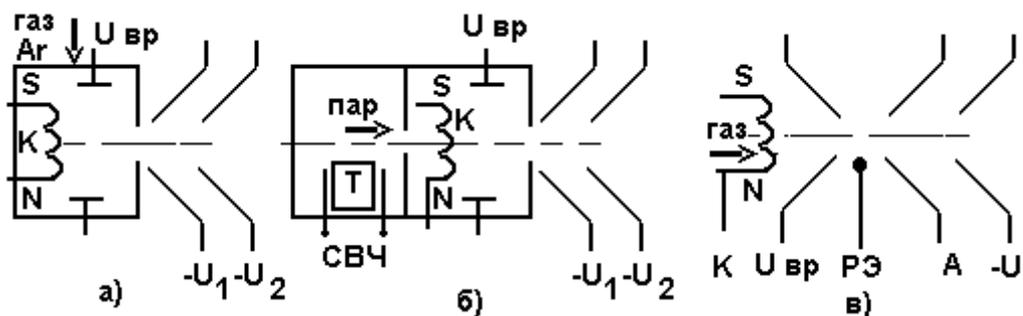


Рисунок 4.4 - Схемы источников газометаллических ионов; а) – источник ионов газов Чордиса, б) – источник ионов металлов Чордиса, в) – дуоплазмотрон.

В источнике газовых ионов Чордиса (рис.4.4 а) обеспечивается тлеющий разряд. Изменение параметров плазмы достигается изменением параметров вспомогательного газового разряда ($U_{вр}$). Изменением напряжения U_1 и U_2 достигается ускорение ионного пучка и изменение его угловых параметров.

В источнике металлических ионов Чордиса (рис.4.4 б) в тигле (Т) располагается испаряемый материал. Пары металла (в частности мышьяка) поступают в камеру ионизации. Ионы извлекаются в направлении ускорительной системы.

Дуоплазмотрон (рис. 4.4 в) содержит две плазменные камеры. В первой камере между катодом и анодом обеспечивается разряд, контролируемый с помощью вспомогательного разряда ($U_{вр}$). Во второй камере помещается распыляемый электрод (РЭ), ионы которого требуется получить. Источник кроме газометаллических ионов, может генерировать многозарядные и отрицательные ионы.

Источники ионов с профильным пучком

На рис.4.5 представлены ионные источники паров металлов с линейным пучком.

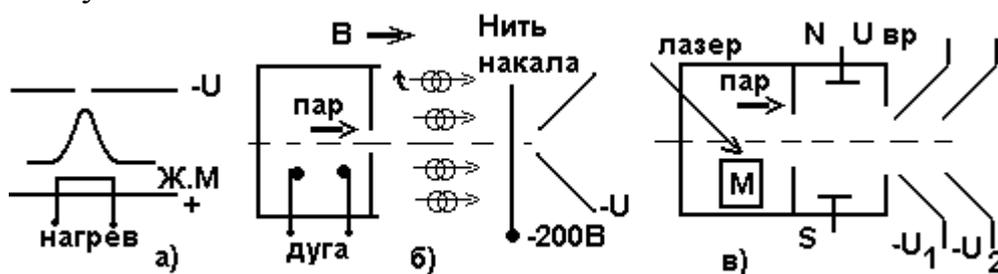


Рисунок 4.5 - Схемы источников ионов металлов с линейным пучком; а) – жидкометаллический источник, б) источник Фримана, в) – лазерно-плазменный источник без магнитного поля

Жидкометаллические ионные источники (рис.4.5 а) нашли широкое применение в полупроводниковой технике для получения относительно моноэнергетических ионных пучков.

В источнике Фримана с ленточным пучком (рис.4.5 б) плазма паров металлов попадает в продольное магнитное поле, что повышает степень ее ионизации. Для нейтрализации пространственного заряда используется накаливаемая нить, находящаяся под потенциалом $-200В$. Такой потенциал «отсекает» низкоэнергетические ионы, что улучшает параметры пучка.

Для получения ионов химически чистых материалов используется лазерный ионный источник. Луч лазера попадает на мишень (М) и производит локальное испарение материала. Далее пар ионизируется. Ионы металлов извлекаются и ускоряются.

Источники многозарядных ионов

Особенность генерации ионов состоит в том, что часть ионного тока, получаемого из источника с ускоряющим напряжением U , обладает энергией равносильной ускорению иона до $2U$ (двухзарядный), $3U$ (трехзарядный) и т.д. Многозарядные ионные источники перспективны для конверсии одних газов в другие, для стимулирования реакций в газе и плазме, для легирования полупроводниковых материалов. Однако в известных источниках доля многозарядных ионов в общем ионном токе невелика. Существуют специальные ионные источники для получения многозарядных ионов, или ионов определенного заряда (однозарядных).

На рис.4.6 представлены схемы источников многозарядных ионов на основе СВЧ разряда и пучково-плазменного разряда.

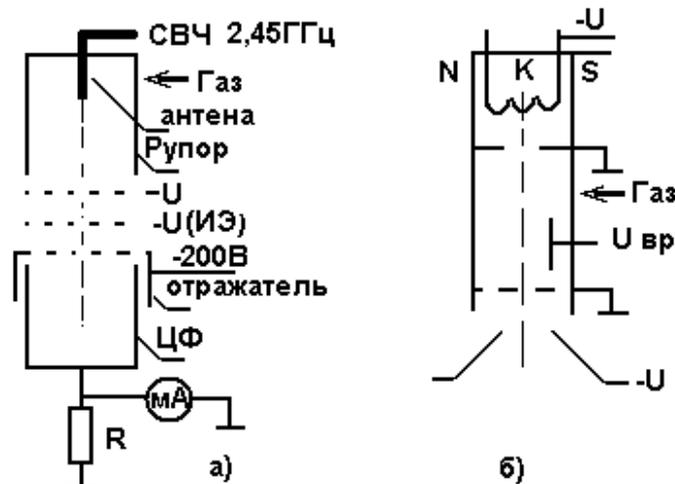


Рисунок 4.6 - Схемы источников многозарядных ионов; а) – СВЧ-источник со схемой индикации пучка, б) – пучково-плазменный источник.

В СВЧ источниках используется свойство плазмы возбуждаться и излучать в широком диапазоне частот. СВЧ источники можно разделить на два типа: источники на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦГ) и источники на нерезонансной СВЧ плазме.

ЭЦГ источники работают на следующем принципе. При обеспечении давления на уровне 0,01 Па и при подаче газа с помощью СВЧ излучения (6-16 ГГц) возбуждается плазма ($n=10^{12} \text{ см}^{-3}$) в однородном магнитном поле. Подача высокого напряжения (более 1 кВ) сопровождается ионизацией газа. При совпадении частоты СВЧ излучения с частотой вращения электрона в магнитном поле (циклотронной частотой) происходит повышение электронной температуры плазмы (до 10 кэВ), происходит максимальная ионизация и происходит генерация ионов с заданным зарядовым числом.

Источники многозарядных ионов на нерезонансной СВЧ плазме работают в области более высоких давлений, чем ЭЦГ (1-0,1Па), при частотах ~ 2 ГГц и при более сильных магнитных полях (2 Тл). В плазме более высокого давления преобладают нерезонансные явления (перезарядка, переизлучение, возбуждение и др.). Это позволяет получать токи многозарядных ионов на два порядка больше токов, получаемых ЭЦГ источниками.

Пучково-плазменные источники

Плазма представляет собой систему с распределением частиц по энергиям и по скоростям. Электронный пучок также представляет собой плазму с распределением частиц по энергиям. Взаимодействие плазмы с пучком приводит к гамме осцилляций частиц в плазме. Извлечение ионов

происходит при одновременной компенсации объемного заряда ионов с помощью пучка вторичных (низкоэнергетических) электронов или электронов плазмы пучка.

Ионное травление материалов. Под ионным травлением понимается процесс разрушения поверхности материала (мишени) под действием ионной бомбардировки. Ионное травление часто применяется в микроэлектронике для локального удаления материала или прodelывания углублений. Материалом распыляемой мишени можно наносить пленки. Системы для распыления материалов делятся на ионно-лучевые, ионно-плазменные и комбинированные. Для стимулирования процесса травления в рабочую камеру кроме инертного газа могут напускаться активные газы (плазмохимическое травление), или газы, дающие активные радикалы (радикальное травление). Примером такого травления является травление в среде водорода:



При напуске активных газов, вступающих в химические реакции с поверхностью, различают реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное травление. Существенное отличие ионно-лучевого травления в наличии ионного источника для генерации ионного луча. Например, в технологии изготовления микросхем в качестве активного газа широко применяется кислород, иногда с небольшими добавками (до 5%) водорода, азота или аргона.

Механизмы ионного травления. Различные материалы травятся по-разному. Существует более десятка теорий, поясняющих особенности ионного травления [10]. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются три механизма ионного травления: механизм прямого выбивания атомов, механизм смещения атомов и механизм тепловых пиков. На рис. 4.7 представлены схемы указанных механизмов.

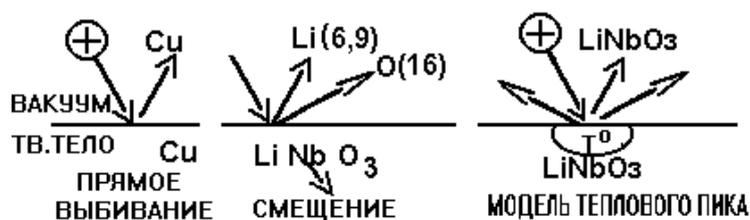


Рисунок 4.7 – Механизмы распыления поверхности под действием ионной бомбардировки

Механизм прямого выбивания характерен для одноэлементных материалов. Количество распыленного материала пропорционально коэффициенту распыления.

Механизм смещения атомов характерен для многоэлементных материалов. Элементы меньшего относительно бомбардирующего иона атомного веса подвержены выбиванию, а более тяжелые – в основном смещаются. В итоге травимый материал обедняется легкими компонентами.

По модели теплового пика считается, что ион в месте падения на поверхность формирует зону локального разогрева за счет пикового, локального роста температуры. Это способствует локальному термическому испарению материала без нарушения состава. Модель дает неплохие совпадения с экспериментом на предварительно прогретых подложках.

Типы распылительных систем для ионного травления

По конструкции распылительные системы для травления материалов принципиально не отличаются от систем ионной очистки. По исполнению такие системы подразделяются на диодные, триодные, тетродные, а также системы с автономными ионными источниками.

Диодные системы имеют всего два электрода: катод и анод. Они просты в устройстве, дешевы, обладают достаточной равномерностью травления, допускают работу на реактивных газах. В числе недостатков таких систем следует отметить зависимость коэффициента распыления от давления газа, нестабильность вольтамперной характеристики, нарушение поверхностного состава (стехиометрии) при нанесении покрытий, малая скорость травления (30 нм/мин).

Триодная система в отличие от диодной имеет дополнительный управляющий электрод, который дает возможность организации дополнительного низковольтного разряда с напряжением 100-150 В. Дополнительный разряд служит источником плазмы и позволяет изменять вольтамперную характеристику без изменения давления газа. Такие системы имеют возможность очистки электродов и способны работать при давлениях близких к 0,1 Па. Уменьшение рабочего давления повышает качество напыляемой пленки. Дальнейшее уменьшение давления может быть достигнуто применением способов, стимулирующих ионизацию газа, например с помощью магнитного поля. Недостатком триодных систем является взаимовлияние разрядов друг на друга и возможность перехода вспомогательного электрода в режим анода.

Тетродные системы имеют две автономных управляющих системы: по высокому напряжению и по низковольтному управлению. На рис. 4.8 представлена тетродная система ионно-плазменного распыления материалов.

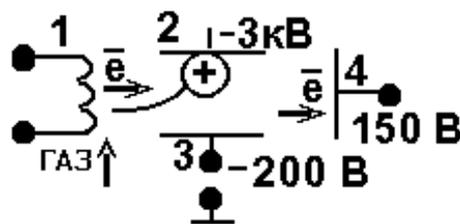


Рисунок 4.8 – Тетродная система ионно-плазменного распыления материалов. 1 – катод, 2 – мишень, 3 – подложка, 4 – анод

Положительно заряженные ионы газа (аргона) бомбардируют мишень 2, находящуюся под отрицательным потенциалом. Накаленный катод 1 служит источником электронов, способствующих ионизации газа. Атомы распыленного материала оседают на подложку 3. Для отсечки низкоэнергетичных ионов, ухудшающих адгезию пленки, на подложку подается отрицательный потенциал (до 200 В). Ток эмиссии электронов поддерживается с помощью анода 4.

В последнее время интенсивно развиваются системы травления на основе автономных ионных источников. На рис. 4.9 представлена принципиальная схема газоразрядного ионного источника. Выход ионов обеспечивается за счет высокого извлекающего напряжения.

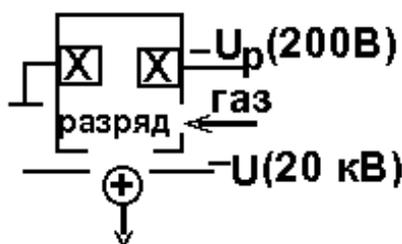


Рисунок 4.9 – Принципиальная схема источника газовых ионов для травления

Травление с помощью автономных ионных источников в меньшей степени зависит от параметров подложки, т.к. ионный пучок можно локализовать в узкий луч.

Факторы, влияющие на скорость травления

Скорость травления зависит от множества факторов. В наибольшей степени на скорость травления влияют род газа, ток и напряжение разряда, давление и расстояние до мишени и подложки. На рис. 4.10 представлены основные зависимости скорости распыления (V) и коэффициента распыления K_p от параметров разряда.

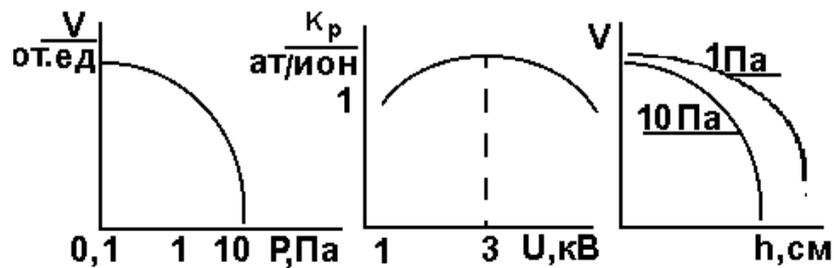


Рисунок 4.10 – Основные зависимости скорости распыления (V) и коэффициента распыления от параметров разряда

Скорость травления прямо пропорциональна плотности ионного тока. Уменьшение скорости травления с увеличением давления или расстояния до подложки связано с увеличением числа соударений электронов и ионов с остаточным газом. С возрастанием напряжения возрастают ударные процессы, что ведет к росту коэффициента распыления.

При напряжениях свыше 3 кВ возрастает доля ионов внедренных в поверхность, что несколько снижает коэффициент распыления.

Оценка параметров травления

Оценка начала травления. Процесс травления материала начинается не сразу. Первоначально ионной обработке подвергаются окислы и остатки органических веществ на поверхности материала. Окислы довольно устойчивы к ионному распылению и имеют коэффициент распыления много меньший единицы. ($10^{-2} - 10^{-4}$). По истечении некоторого времени (~ 20 мин в зависимости от плотности тока) вольтамперная характеристика устройства для травления начинает изменяться, что свидетельствует о начале горения разряда в парах травимого материала. Цвет разряда при этом также меняется.

Оценка скорости травления. При ускоряющих напряжениях до 10 кВ скорость травления V в нм/мин рассчитывается по формуле:

$$V = (6,23 \cdot 10^{25} \cdot J \cdot K_p \cdot M_i) / (N \cdot \rho), \quad (4.35)$$

где J – плотность тока (A/m^2); N – число Авогадро $N=6 \cdot 10^{23}$; ρ – плотность материала kg/m^3 ; K_p – коэффициент распыления материала.

Наиболее удобно измерять скорость травления по изменению толщины пленки во времени. В последнее время установки для травления оснащаются эллисометром или аппаратурой для регистрации ионного тока и толщины пленки, формируемой на индикаторе при проведении процесса. Широкое распространение получил метод кварцевого генератора, при котором эталонная частота сравнивается с частотой, изменяемой вследствие напыления пленки на специальный конденсатор.

Ионная имплантация поверхности

Основными элементами установок ионной имплантации являются безмасляная вакуумная система, источник ионов, масс – сепаратор, ускорительная система. Ионные источники (рис. 4.11) предназначены для ионизации атомов подаваемого газа и генерации ионов в направлении подложки. Ионизация газа производится в ионизационной камере посредством электрического поля между термокатодом (рис.4.11 а), или холодным катодом (рис. 4.11б) и анодом. Ионы извлекаются отрицательным потенциалом.

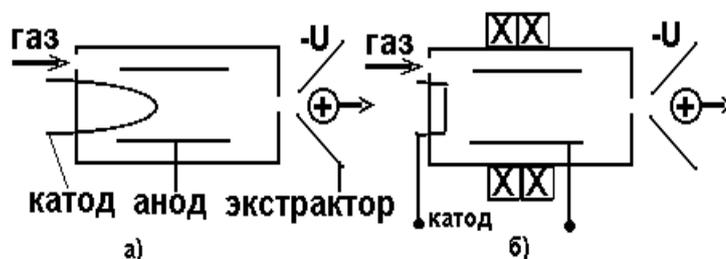


Рисунок 4.11 – Ионные источники для имплантации полупроводниковые материалы

Для повышения эффективности ионизации применяется магнитное поле. Широко используются системы с испарением паров рабочего вещества внутри ионизационной камеры. Мас - спектрометр служит для выделения из общего ионного пучка ионов необходимой массы и заряда. Сепараторами являются магниты, и сетки с отрицательным потенциалом.

Ускорительная система представляет собой систему соосных диафрагм с распределением отрицательного относительно катода потенциалом.

В настоящее время создана серия установок ионной имплантации типа «Везувий». Последние разработки установок снабжены программным управлением, системами шлюзования вакуумной системы и системы сканирования ионного пучка. Производительность установок составляет до 400 подложек в час диаметром 150 мм при времени имплантации 7-10 секунд и дозе 10^{14} см⁻².

Ион, массой M и порядковым номером Z в периодической системе элементов, попадая в материал, испытывает многократные соударения с атомами решетки. Путь иона в материале представляет собой ломаную линию. Существует понятие проекционного пробега R , представляющего проекцию пути на направление движения. Проекционный пробег R , помимо энергии иона, очень сильно зависит от межатомного взаимодействия. Для

упрощения расчетов доз воздействия вводится понятие константы взаимодействия C_2 :

$$R = C_2 M_2 \left[\left((Z_1)^{1/3} + (Z_2)^{1/3} \right) E / Z_1 \cdot Z_2 \right], \quad (4.36)$$

где индексы 1, 2 относятся соответственно к бомбардирующим ионам и ионам мишени; R – проекционный пробег, $[\text{мкг}/\text{см}^2]$; E – ускоряющее напряжение, кВ.

При $E=30$ кВ $C_2=0,5$; При $E=50$ кВ $C_2=0,3$

Магнетронное формирование оптических покрытий

В основу метода положен магнетрон, представляющий собой газоразрядную систему, помещенную в магнитное поле. На рис. 4.12 а представлена схема магнетрона.

При подаче напряжения между электродами зажигается разряд, поддерживаемый магнитным полем. Ионы из плазмы разряда попадают на катод (мишень), из которого выбивают частицы металла (m). Магнитное поле закручивает электроны вокруг силовых линий под действием силы Лоренца. Это способствует ионизации газа и поддержанию разряда.

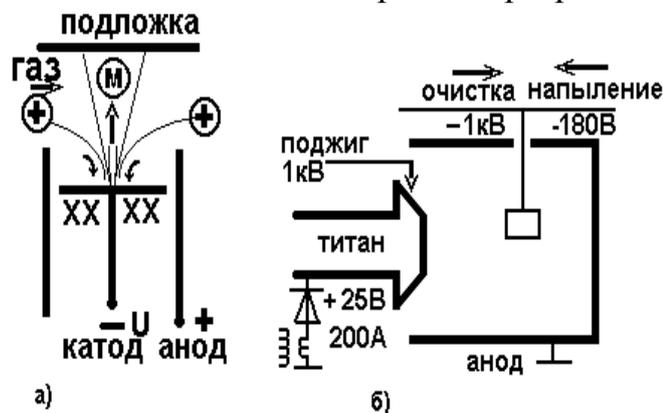


Рисунок 4.12 – а) схема магнетрона, б) схема электродуговой системы напыления установки «Булат»

Зная скорость частицы в направлении, перпендикулярном линиям магнитного поля V , можно найти величину минимального расстояния траектории электрона между катодом и анодом системы, так называемый, ларморовский радиус R

$$R = V m / eZB, \quad (4.37)$$

где V – скорость, перпендикулярная линиям магнитного поля

$$(V = 5,9 \cdot 10^5 \sqrt{U}); \quad (4.38)$$

m – масса частицы; Z – кратность заряда (в первом приближении $Z=1$); e – заряд электрона, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ кл; B – индукция магнитного поля.

Достоинства магнетронных систем состоят в следующем:

- 1) напыление происходит в виде мелкой фракции, что позволяет формировать высококачественные покрытия;
- 2) магнетроны имеют очень большую скорость распыления (близкую к скорости термического испарения материалов в вакууме);
- 3) магнетроны просты по конструкции, устойчивы в работе и могут работать в широком диапазоне давлений.

Недостатки магнетронных систем состоят в следующем:

- 1) на подложку вместе с распыляемым материалом попадает часть электронов, что повышает ее нагрев. Это ограничивает применение магнетронных систем для обработки полимеров. Кроме того, в подложку вмуровывается много газа и интерметаллических соединений.
- 2) все параметры магнетрона взаимосвязаны, что влияет на вольтамперную характеристику при изменении магнитного поля, рода распыляемого материала или геометрических размеров системы.

Электродуговое формирование покрытий в вакууме

Подобная обработка поверхности подразделяется на ряд направлений, различающихся физической картиной формирования упрочняющего покрытия:

- 1) электродуговое распыление материала электродов и его ионноплазменное осаждение на изделие. (Установки марок УРМ типа «Булат»);
- 2) распыление материала электродов с осаждением паров на изделие и последующей ионной имплантацией путем подачи импульсов с напряжением ~ 100 кВ. Модификация поверхности достигает 5-7 мкм за времена около 20 минут;
- 3) воздействие на поверхность разовыми (до 5 раз) импульсными сильноточными ионными или электронными пучками током 10-20 кА и напряжением ~ 100 кВ. Упрочнение происходит без изменения размеров. Глубина модифицированного слоя достигает 130 мкм.

Катодные пятна вакуумной дуги

Для работы электродуговых источников паров металлов важен материал, генерируемый с катодного пятна. При относительно небольшом токе дуги (единицы ампер) на катоде формируется катодное пятно первого рода. Для такого пятна свойственно движение по катоду под действием силы

Лоренца и генерация легких углеводородных фракций с массопереносом 10^{-7} г/кулон. Скорость плазмы составляет 10^7 см/с. С ростом тока дуги до нескольких десятков ампер формируются катодные пятна второго рода, для которых свойственен брызговой вынос материала электродов с массопереносом около 10^{-4} г/кул. Скорость такой плазмы составляет $10^3 - 10^4$ см/с. Такой режим работы дуги наиболее характерен для электродуговых источников частиц. При разогреве катода до температуры, близкой к температуре плавления, возрастает термоэмиссия с катода. В этом случае формируется катодное пятно третьего рода с диффузным испарением материала. Этот режим работы источников пока слабо изучен и на практике почти не применяется.

Технология формирования оптических покрытий методом электродугового напыления

Типичным представителем такого напыления являются установки типа Булат (см. рис. 4.11 б).

Источник состоит из катода (чаще титанового), анода (корпус камеры), электродов для инициирования дуги (поджигающий электрод), и электрода для очистки деталей в тлеющем разряде.

При обеспечении давления на уровне 0,1 Па на деталь подается постоянное напряжение 1 кВ и в камере зажигается тлеющий разряд. Положительно заряженные ионы из плазмы разряда устремляются на деталь, находящуюся под отрицательным потенциалом и производят ее очистку.

При обеспечении в камере давления азота на уровне 10^{-2} Па, между катодом и анодом от дугового трансформатора подается напряжение около 25 -40 В. Затем между катодом и поджигающим электродом подаются импульсы напряжения ~ 1 кВ для организации искрового пробоя. Плазма из окрестности поджигающего электрода попадает в пространство между катодом и заземленным анодом и стимулирует зажигание дугового разряда между ними.

После зажигания дуги током 100- 200 А на деталь подается отрицательный потенциал (-180 В), а в камеру подается рабочий газ – азот и производится формирование покрытия – нитрида титана.

Особенностью работы электродуговых установок напыления является эрозия катода и унос материала с катода. Унос массы «М» при эрозии электродов определяется соотношением:

$$M = gIt, \quad (4.39)$$

где g – удельная эрозия материала, кг; I – ток, А; t – время, с.

Унос массы пропорционален объему эрозии W и плотности материала:

$$M = \rho W \quad (4.40)$$

Особенность работы установок Булат состоит в следующем:

1) осаждение материала связано с нагревом и отжигом деталей, что объясняется значительной долей электронного потока, поскольку коэффициент ионизации в дуговом разряде не превышает 10%;

2) ускоряющее напряжение для ионов в установках «Булат» невелико (-180 В), вследствие чего скорости ионизованных молекул невелики, также невелика адгезия нанесенной упрочняющей пленки;

3) процесс нанесения покрытий неоднозначно связан с расходом газа, температурой изделия и параметрами плазмы. Это объясняется недостаточной изученностью условий протекания газофазных реакций в плазме;

4) при изменении режимов может возникнуть брызговой эффект, характеризующийся нанесением покрытия в виде капель. Избавление от брызгового эффекта производится уменьшением тока дуги, установкой отражателей потока паров под углом к подложке, наложение дополнительных потенциалов на траекторию паров.

4.4 Плазменная технология

В технике часто возникает необходимость наплавки изношенной детали или разрезки толстых крупногабаритных металлов, железобетонных изделий и т.п. при атмосферном давлении. Подобные операции выполняются с помощью плазменных методов обработки материалов. Поток плазмы в виде тонкой струи формируется в специальном сопле плазмотрона при атмосферном давлении. В простейшем виде плазмотрон представляет собой сопло с электродами, между которыми горит дуговой разряд током ~ 500 А и продувается газ с расходом ~ 1 м³/ч. Устойчивость горения дуги обеспечивается присутствием высоковольтной искры от специального высоковольтного трансформатора. Скорость резки листовой нержавеющей стали при продувке кислорода или воздуха, достигает 400 м/ч. Кроме резки, плазма применяется для сварки высокотемпературных, цветных и неметаллических материалов. Следует отметить, что продувка плазмы не позволяет обеспечить высокую локализацию острия факела, вследствие этого при сварке плазмой отношение ширины шва к глубине примерно одинаковое, что свидетельствует о небольшой прочности шва. Струя плазмы может быть очень тонкой и применяться в микроплазменных технологиях для резки или сварки синтетических тканей, листовой резины, стекла, полимеров.

В последнее время плазма применяется для стимулирования реакций синтеза химических соединений, для утилизации токсичных веществ. На рис 4.13 представлены принципиальные схемы некоторых плазмотронов.

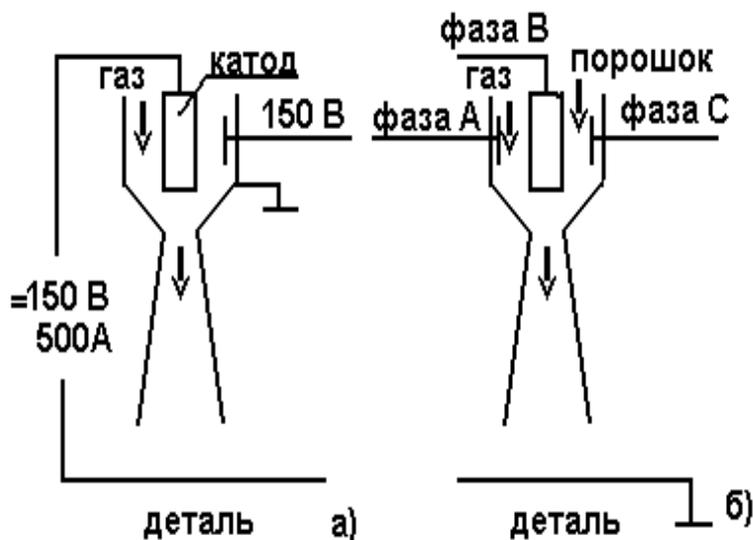


Рисунок 4.13 – Схемы плазмотронов: а) – плазмотрон для резки; б) – плазмотрон для наплавки

В качестве рабочих газов используется аргон, метан, пары воды и др. В ряде случаев при резке толстых плит из нержавеющей стали, в качестве рабочего газа, используется воздух.

Катоды плазмотронов изготавливаются из вольфрама в медной водоохлаждаемой вставке. При работе на воздухе катод изготавливается из лантана, иттрия или гафния.

Анодом может служить деталь (если она металлическая) или корпус плазмотрона.

Сопло плазмотрона для улучшения охлаждения может изготавливаться из меди. При обработке проводящих материалов может быть организован дополнительный разряд между катодом и деталью.

Плазмотрон запитывается от специального трансформатора, который может снабжаться выпрямителем. Для облегчения возникновения разряда плазмотрон снабжается осциллятором. В простейшем виде осциллятор представляет собой портативный «телевизионный» высоковольтный генератор, обеспечивающий искровой пробой в сопле плазмотрона.

Известны следующие марки плазмотронов: ПВР-1– плазмотрон, воздушный, ручной с соплом №1; ПВР-402У (универсальный, автоматический); ПВР-202 (программируемый, марки «Зенит», «Электрон»).

С помощью плазмотрона можно производить наплавку упрочняющих, антикоррозийных и других технологических покрытий.

Наплавляемый порошок (молибден, хром и др.) может подаваться в сопло плазмотрона или наноситься непосредственно на деталь. Для наплавки элементов изделий могут применяться специальные порошковые электроды. В случае проведения особо точных работ после наплавки проводится размерная обработка абразивными материалами. Перед проведением наплавки проводится дефектный анализ изделия, анализируются марки используемых материалов. На ЭВМ просматриваются инструментальные каталоги и документация. В ряде случаев может быть проведен спектрометрический элементный анализ.

Для получения качественных покрытий важен не только выбор марки порошка, но и соотношение тока, напряжения, расхода газа и расстояния до детали. Обычно эти параметры заводятся в память ЭВМ и отслеживаются контрольно-измерительной аппаратурой. После плазменной обработки приповерхностный слой материала детали сильно перемешан и может обладать очень большой твердостью.

5 Автоматизация технологических процессов производства приборов оптической электроники

5.1 Основные понятия

При решении ряда задач по повышению производительности и качества изделий широко применяются средства автоматизации технологических процессов [1-19]. Следует отличать процесс автоматизации от автоматического регулирования.

Автоматизация технологического процесса – это проектирование, моделирование, выбор средств сбора, обработки и вывода информации, а также прогнозирование точности, надежности и аварийных ситуаций. Автоматизация предполагает обработку данных о материалах, кадрах, методах решения задачи, об оборудовании, построение и оптимизацию последовательностей технологических операций.

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

Перед проведением технологической операции следует оценить предыдущие процессы с изделием, познакомиться со справочной литературой, с марками материалов, оценить требования заказчика к результату операции, а также оценить технологические возможности оборудования. Целесообразно процесс подготовки разбить на несколько этапов:

- 1) составление последовательности технологических операций;
- 2) присвоение индексов операциям;
- 3) составление таблицы параметров и времени их выполнения;
- 4) предусмотреть этап возврата на случай брака.

Типовой технологический процесс

Процесс называется типовым, если в нем изменяются подобные параметры изделий: форма, масса, температура, давление. Процессы называются подобными, если в них соизмеримы не менее двух параметров.

Типовой технологический процесс предполагает следующие операции:

- составление последовательности технологических операций;
- выбор оборудования и инструментов;
- конструкторский анализ чертежей на технологичность, условие сборки, ремонтоспособность;
- разработка маршрута обработки на отдельных видах оборудования;

- анализ кадрового состава;
- составление отчетных документов с соблюдением ГОСТ.

Типовой технологический процесс предполагает классификацию деталей, узлов, инструментов, материалов и операций. В последнее время классификация производится по международным стандартам с применением компьютерной техники. При разработке технологического процесса следует устанавливать оптимальные режимы изготовления изделий. В случае перевыполнения плана более чем на 10-15%, норма выработки считается технически не обоснованной.

Проектирование технологического процесса ставит своей целью получение высококачественных изделий при высокой производительности. Исходными материалами для проектирования являются техническое описание изделия, библиотеки баз данных на инструмент и материалы, договор на освоение изделий, бизнес план на реализацию изделий.

Передаточные характеристики автоматических систем

При передаче сигнала важно, насколько сигнал потеряется по амплитуде, насколько изменится фаза или форма импульса. Обычно при анализе систему разбивают на звенья. Передаточную характеристику звена описывают по аналогии с уравнениями электрической цепи. Например:

$$U=U_0 e^{J\omega}. \quad (5.1)$$

Каждое звено характеризуется полосой пропускания. Для ряда традиционных схем в справочниках приведены амплитудно – фазовые и частотные характеристики. Если таковые не имеются, то ставится эксперимент. Часто состояние системы отражается дифференциальными уравнениями. Исследование системы существенно упрощается при использовании прикладных математических методов. Один из них – это переход от дифференциального уравнения к алгебраическому (так называемое преобразование Лапласа). Например, с точностью до коэффициентов производные могут быть заменены оригиналами изображений при нулевых начальных условиях:

$$dx/dt \approx \Delta x/\Delta t. \quad (5.2)$$

При моделировании работоспособности систем автоматики используют пропускание калиброванных сигналов по цепи. Используются следующие методы:

- метод незатухающих колебаний (модель Циглера – Никольса) для синтеза модели прохождения сигнала;
- метод трапеций, используемый для построения переходных характеристик;

метод передаточных функций, используемый на основе формул, которые реализованы программным путем.

Порядки автоматических систем

По уровню математического описания автоматические системы разделяются на три 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. Ряды исследуются на сходимость, что позволяет анализировать систему на устойчивость.

На практике стараются повысить порядок описания во избежание «эффекта самоуправления» системы из-за неполного описания системы или неточности задания граничных условий применения формул.

Первичная регистрация параметров технологического процесса

Выбор первичного устройства, выделяющего сигнал управления, зависит от уровня сигнала, функции преобразования, согласования с имеющимся оборудованием.

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

- 1) индикаторные головки (термопарные, электроконтактные);
- 2) оптические средства на базе свето- и фотодиодов, лазеров и оптопар;
- 3) базовая поверхность части заготовки;
- 4) пневматические датчики;
- 5) индуктивные датчики.

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

Групповые измерительные преобразователи

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

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

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

Вторичные измерительные преобразователи

В ряде случаев сигнал с датчика (например, с термопары) может быть многократно усилен ($\sim 10^7$ раз) специальными вторичными блоками и использован для непосредственного управления. Такие вторичные измерительные преобразователи отслеживают погрешность измерений с точностью до 0,05 %. Подобные преобразователи представляют собой измерительные станции с выходом на силовые управляющие цепи. Из отечественных блоков можно рекомендовать следующие марки: МИНИТЕРМ, ОРИОН, ПИТРА – 1100 и др. Такие программаторы отслеживают функциональное изменение технологического процесса и имеют встроенные микропроцессоры с выходом на усилитель или ЭВМ.

Пневматические устройства и системы автоматике

При решении задач автоматизации наряду с электрическими и электронными средствами широко применяются пневматические устройства на газовых струях. В таких отраслях, как химическая, газовая, пищевая и т.п. пневмоавтоматика является основным средством автоматизации. Пневматическая аппаратура проста в обслуживании, дешева, пожаро – и взрывобезопасна. Она может работать при очень высоких температурах и сильной радиации. Системы работают от вентилятора при атмосферном давлении. В основу работы пневматических элементов положены эжектирующие эффекты, эффекты перехода турбулентного потока в ламинарный, различные кромочные эффекты, эффекты взаимодействия струй с преградой и струй между собой.

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

- технологическую совместимость с различными технологиями;
- быстрое действие (Гц – кГц);
- небольшие массогабаритные параметры (не превышающие размер микросхем);
- возможность исполнения в виде плат с набором огромного числа элементов.

Система пневмоавтоматики предполагает набор следующих устройств:

- 1) усилители, модуляторы, триггеры, делители;
- 2) генераторы функциональных сигналов;
- 3) вычислительные устройства; шифраторы, дешифраторы;
- 4) логические и функциональные элементы, сдвигающие регистры;
- 5) концевые выключатели, кнопки, тумблеры;
- 6) интеграторы, повторители, дифференцирующие звенья;
- 7) емкости, сопротивления, дроссели и др. элементы;
- 8) аналоговые блоки дискретной автоматики;
- 9) пневматические вычислительные машины.

На рис. 5.1 представлены простейшие схемы пневмоэлементов

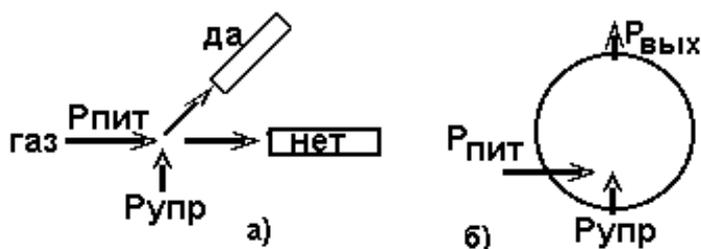


Рисунок 5.1 – а) – схема работы логического пневматического элемента типа триггер с функцией «да – нет»; б) – схема струйного усилителя

В ряде стран: США (фирма MOOR), Германии (фирма DRD), Англии (фирма SUNVIC) нашла применение унифицированная пневматическая система «АУС» блочного типа с элементами логической пневмоавтоматики и пневматическими вычислительными машинами для горячих цехов и взрывоопасных производств.

Пассивные и активные пневмоэлементы

Пассивные элементы способны к самостоятельному выполнению функций на основе газодинамических эффектов. Это пневматические сопротивления, 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.

На рис. 5.2 представлены схемы пассивных и активных элементов.



Рисунок 5.2 – а) - схема пассивного пневмоэлемента; б), в) - схемы активных пневмоэлементов

Передаточные функции пневмоэлементов

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

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

5.2 Алгоритмы преобразования сигналов с датчиков

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

Линеаризация. При этом преобразовании сигнал разбивается на линейные участки и для каждого участка проставляется диапазон его выполнения.

Аппроксимация. В этом случае диапазон действия сигнала продляется линией или функцией.

Функциональное преобразование. В этом случае изменение сигнала описывается функцией. Часто такие функции достаточно сложны. Следует заметить, что попытка описывать процессы простыми уравнениями часто приводит к неустойчивости процесса.

На рис. 5.3 представлен пример линеаризации показаний термопары. Значения коэффициентов вычисляются по промежуточным точкам.

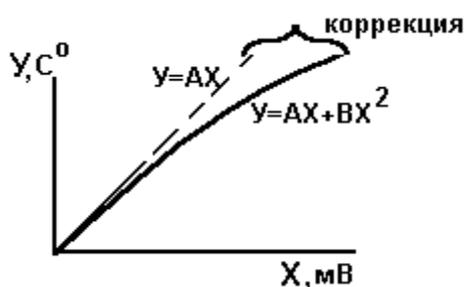


Рисунок 5.3 - Схема линеаризации термопары

Следует учесть, что при преобразовании сигнала погрешность может носить функциональный характер. На рис. 5.4 (а) представлен возможный характер ошибок и возможные функции коэффициентов преобразования сигналов (рис. 5.4 б).

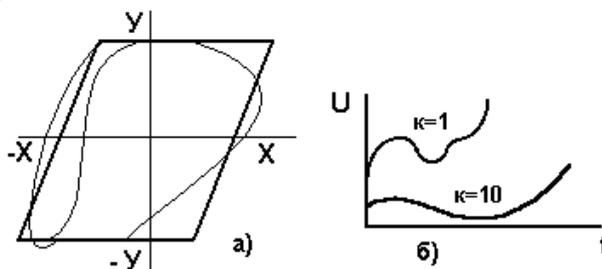


Рисунок 5.4 – а) Поверхность ошибок при преобразовании сигналов; – б) вид функции преобразования программируемого вычитателя

Ниже приведены некоторые функции преобразования:

$$\text{Cos } Z = 1 + 0,235 Z - 0,7(Z)1,5; \quad (5.3)$$

$$\text{Sin } Z = Z - 0,17(Z)2,8. \quad (5.4)$$

Функция преобразования обычно указывается в паспорте модуля – преобразователя.

При функциональном преобразовании сигналов технологических процессов нашли применение программируемые функции. В последнее время начинают широко внедряться программируемые станции, в которых заложено большое количество виртуальных приборов и измерительных модулей, имеющих выход на ЭВМ (компьютерные осциллографы, генераторы),

5.3 Системы автоматического управления и регулирования технологическими процессами

Различают управление и регулирование процесса. Управление – это воздействие на процесс с целью обеспечения требуемого изменения состояния (что надо достичь). Регулирование – это способ технического достижения цели. Регулирование – это частный случай управления.

Управление технологическими операциями облегчается при выполнении следующих рекомендаций:

- использование таймерной системы сопровождения операций;
- применение логических функций протекания процесса;
- использование таблиц, описаний или алгоритмов проведения операций (пуск, остановка, завершение);
- использование аппроксимации, линеаризации и граничных условий.

Общая схема регулирования технологического процесса

На рис. 5.5 представлена наиболее распространенная схема регулирования технологических процессов. Сигнал от задающего устройства и от объекта сравнивается «ноль органом». Затем сигнал рассогласования усиливается и передается на исполнительный механизм. В качестве «ноль органа» может использоваться компаратор, двойной триод и др. Система управления такого типа представляет собой замкнутый контур, в котором обратная связь выполняется от исполнительного механизма через измеритель параметра. Такая система регулирования называется замкнутой. Для упрощения управления система может не иметь обратной связи и называться разомкнутой. На практике чаще применяется комбинированная система автоматического управления технологическим процессом.



Рисунок 5.5 – Общая схема регулирования технологического процесса

Законы регулирования параметров

Законы воздействия на изменение параметров могут быть различными. Наибольшее распространение получили следующие законы:

- детерминированный (алгебраический, пропорциональный (П);

- пропорционально – интегральный (ПИ);
- пропорционально – интегральный с дифференцированием сигнала (ПИД);
- случайный (стохастический);
- частотный;
- фазовый.

Разнообразие траекторий управления технологическими процессами укладывается в три закона регулирования:

- 1) пропорциональный (П);
- 2) пропорционально – интегральный (ПИ);
- 3) пропорционально – интегральный с дифференцированием сигнала (ПИД).

В последнее время появились программаторы с пропорционально – дифференциальным законом управления (ПД).

Пропорциональный закон обеспечивает функциональную зависимость изменяемой величины 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 неустойчивости измеряемой величины и ее приходится усреднять. Примером использования может выступать сигнал напряжения зажигания с электроразрядных устройств.

Пропорционально – интегральный закон регулирования с дифференцированием сигнала предполагает наличие так называемого «изодромного звена», отслеживающего скорость изменения управляющего сигнала. Примером такого управления может выступать система управления температурой печи, которая по мере приближения к заданной температуре чаще выключает нагреватель, предотвращая перегрев. На рис. 5.6 представлены кривые, отражающие законы изменения параметров.

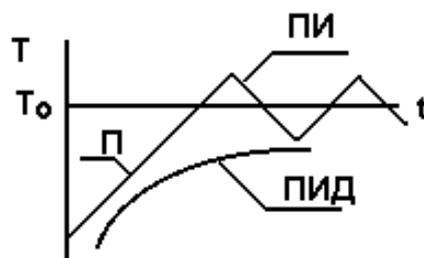


Рисунок 5.6 – Законы изменения параметров управления

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, либо на электронном носителе вводится функциональная программа изменения параметра.

Уравнение ПИД – регулятора

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

$$U(t) = f(t) + du/dt + \int u(t) dt. \quad (5.5)$$

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

Общее уравнение регулирования процесса получается из системы уравнений объекта и регулятора. Обычно в технологическом процессе приоритетно выполняется один из законов регулирования.

Многоуровневые системы децентрализованного управления технологическими процессами

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

первый уровень – обеспечивает защиту персонала и оборудования от аварийных режимов;

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

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

Индикация всех уровней децентрализованного управления выводится на пульт управления.

Перед запуском установки во избежание нештатных и аварийных режимов локальной системой автоматики проводится тестирование оборудования на выполнение отдельных операций как то:

- 1) отслеживание функций (П, ПИ, ПИД);
- 2) тест – проверка (отсутствие течи);
- 3) проверка блокировок (по воде, по фазам, по перегрузке, старт нулевого положения, автоматическое заземление).

Во время работы оборудования диагностика может проводиться по спектру шумов (писк, визг), по датчикам вибрации, по потребляемому току и т.д. Локальные системы автоматизации на рабочем месте выполняют следующее:

- 1) приводят в соответствие перечень соглашений:
 - а) привод в «0»;
 - б) достижение параметра;
- 2) уточнение задачи по типу:
 - а) ГРУБО – ТОЧНО;
 - б) ПОЛЕ ДОПУСКА;
 - в) РАССОГЛАСОВАНИЕ (точность);
- 3) составление подзадач:
 - а) все ли введено;
 - б) выборка прошлых материалов из памяти;
 - в) индикация начала и конца задачи;
- 4) составление диспетчера задач (объединение и рекомендация параллельности выполнения задач).

Порядок проверки средств локальной автоматизации предусмотрен по ГОСТ, где предусматривается точность метрологии, таблицы погрешностей в статическом и динамическом режимах, диапазон измерений. Оговариваются технические средства измерений, программное обеспечение. В процессе аттестации рабочих мест по каналам связи пропускаются специальные функции Лапласа и определяются погрешности передачи данных.

Для децентрализованного управления процессами компания ОВЕН выпустила на рынок средств автоматизации программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 150 с человеко-машинным интерфейсом в виде русифицированной панели оператора ИП-320. Такая панель не требует персонального компьютера на рабочем месте. Системы децентрализованного управления объединены в промышленную сеть.

Связь панели оператора с персональным компьютером происходит с помощью программного обеспечения Owen Process Manager v.1.2. Поддержка протоколов осуществляется в среде CoDeSys (ОВЕН, Modbus RTU, , Modbus ASC II, DCON, , Modbus TCP, GateWay).

Графическая панель оператора ИП-320 предназначена для отображения до 100 технологических параметров, поступающих с аналоговых и цифровых приборов серии ОВЕН. К таким приборам относятся: восьмиканальный модуль ввода аналоговый МВА8, ПИД-регуляторы ТРМ 101, ТРМ 148, ТРМ 151, ТРМ 210 и др. Связь с контроллерами и приборами, работающими по протоколу Modbus, осуществляется при помощи встроенных в панель портов RS-485 и RS-232. Графический дисплей имеет встроенное программное обеспечение «Конфигуратор 320», позволяющее отображать графики с нескольких приборов и вести запоминание значений. Отдельные элементы схем могут быть созданы в графических редакторах типа Paint и перенесены

на панель оператора ИП -320. Сетевой конфигуратор имеет возможность перезадавания условий без подключения измерительного прибора.

Инструмент программирования контроллера – среда CoDeSys, учитывающая стандарт международного электротехнического комитета МЭК 61131-3 и языки программирования МЭК. Эта среда разработана немецкой компанией 3S-software для ПЛК Wago или Moeller имеет совместимость с ПЛК ОВЕН.

Способы распознавание сигналов с технологических объектов

Различают распознавание сигналов оператором и машинное распознавание.

Распознавание оператором может быть достигнуто за счет таких субъективных факторов, как степень обученности и тренированности.

Машинное распознавание. Сигналы с технологических объектов различают по форме, амплитуде, по времени. В последнее время для отличия истинного сигнала от ложного применяются различные математические приемы, например разложение в ряд Фурье с оценкой четности, максимумов, степени вероятности и т.д.

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

$$\Delta t = 1 / 2F_m, \quad (5.6)$$

где F_m – максимальная частота спектра сигнала. Для повышения достоверности распознавания сигналов по форме признаки распознаваемого сигнала X , сравниваются с соответствующими признаками Y , эталонного сигнала. Поэтому при совпадении параметров входного и эталонного объектов все разбросы при определенной доверительной вероятности должны лежать в установленном диапазоне.

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

Если функция, сложенная относительно оси $\pi/2$, «ляжет сама на себя» – то эта функция четная. У таких функций при разложении в ряд Фурье отсутствуют нечетные гармоники. (Т.е. $k=1, 3, 5$ и т.п. – отсутствуют)

Если функцию сдвинуть на $1/2$ периода (т.е. помножить на -1) и она снова ляжет сама на себя – то это функция нечетная. У таких функций при разложении в ряд Фурье отсутствуют четные гармоники. (Т.е. $k=2, 4, 6$ и т.п.

– отсутствуют). Нечетная функция та, которая повторяется с обратным знаком. [Т.е $f(t) = -f(-t)$].

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

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

$$S(t) = A_0/2 + \sum A_k \cos k\omega_k t, \quad (5.7)$$

где $S(t)$ – функция сигнала; A_0, A_k – коэффициенты амплитуды при разложении функции сигнала в ряд; ω_k – круговая частота.

Настроенный на прием интерфейс сравнивает фронты первого импульса и амплитуду (количество нулей или единиц) с кодом (эталоном), занесенным при программировании интерфейса. Это позволяет отличать истинный сигнал от сигнала помехи.

Статические и динамические характеристики объектов

Учет статических и динамических характеристик объектов необходим для настройки регуляторов на анализ ошибки при включении систем. Примером может быть сравнение мгновенной и стационарной скорости откачки механического вакуумного насоса, сравнение работы вакуумной системы при запуске с атмосферы и при стационарной работе. Часто стационарные системы имеют динамику отклонения параметров с течением времени. Например, уменьшение напряжения запуска электронных систем при их прогреве, ухудшение вакуума при прогреве вакуумной системы и т.д. На рис. 5.7 приведены статическая и динамическая характеристика вакуумного насоса.

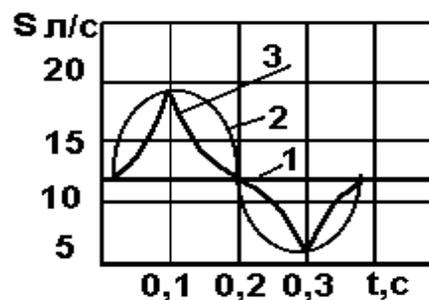


Рисунок 5.7 – Характеристики давления в вакуумной системе: 1 – характеристика давления в паспорте насоса; 2 – давление в вакуумной камере; 3 – истинное давление на входе вакуумного насоса

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

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

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

Переходные процессы в автоматике

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

$$E=LdI/dt \quad (5.8)$$

Причины переходных процессов следующие:

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

При опросе датчиков обычно составляют диаграмму опроса во времени, в которой учитывают времена переходного процесса, задержки опроса по другим датчикам, вероятность появления случайного, редко наблюдаемого сигнала.

Случайные процессы в автоматизированных системах

Любое событие в ходе проведения технологических операций выполняется с определенной вероятностью. Например: вероятность воспроизведения продукции зависит от функции вероятности диффузии (так называемой $erfc$ – функции), вероятности равномерности распределения толщины (это синусоидальная функция), вероятности распределения плотности пара (это функция Гаусса) и т.д. Общая вероятность воспроизведения процесса – это произведение вероятностей. Например если микросхема имеет 100 слоев, то при браке 1 % велика вероятность не получить микросхему вовсе.

При отсчете параметров возникают систематические и случайные ошибки. Случайные ошибки устраняются повторением измерений, а систематические выбором методики измерений или заменой приборов на более точные. Измеряемые величины могут описываться непрерывными и дискретными кривыми. На рис 5.8 представлены кривые непрерывных и дискретных значений погрешности функции $F(x)$.

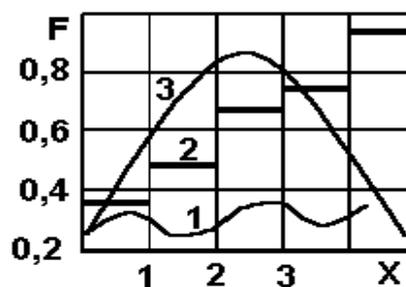


Рисунок 5.8 – Кривые непрерывных и дискретных погрешностей процесса: 1 – случайные процессы; 2 – вероятность погрешности процесса на этапе; 3 – характеристика непрерывного процесса

При анализе процессов принято считать вероятность отклонения квадрата величины. В целом для анализа процесса важна корреляционная функция процесса, которая усредняет весь процесс во времени. На рис. 5.9 приведена корреляционная кривая (1) и график функции ошибок (2) во времени для технологического процесса.



Рисунок 5.9 – Корреляционная кривая (1) и функция ошибок (2).

Обратная связь и коррекция управления между объектами

Обратная связь вводится для корректировки управления. Связь называется положительной, если полярность вводимого сигнала совпадает с полярностью, подаваемой в корректирующий орган. Связь называется отрицательной, если подаваемый сигнал отрицательный по фазе или амплитуде. Обратная связь может быть жесткой и записываться в системе координат уравнением:

$$x_{oc} = k_{oc} y, \quad (5.9)$$

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

Обратная связь может быть инерционной жесткой и записываться в виде:

$$t_{oc}(dx_{oc}/dt) + x_{oc} = k_{oc} y \quad (5.10)$$

Обратная связь может быть гибкой и записываться в виде:

$$x_{oc} = k_{oc} dy/dt \quad (5.11)$$

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

$$t_{oc}(dx_{oc}/dt) + x_{oc} = k_{oc} dy/dt \quad (5.12)$$

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

$$y = kX, \quad (5.13)$$

где X – отклонение; k – коэффициент регулирования.

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

$$y = k(dx/dt) \quad (5.14)$$

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

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

Описание экспериментальных данных

Целью описания экспериментальных данных является выбор эмпирической формулы связи между переменными x и y и определение коэффициентов выбранной формулы.

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

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n. \quad (5.15)$$

В ряде случаев некоторые зависимости путем алгебраических преобразований (например, путем логарифмирования) удается привести к линейному уравнению. Некоторые разновидности графических зависимостей и соответствующие им уравнения представлены на рис. 5.10.

Вопрос выбора кривой часто решается непосредственно по внешнему виду экспериментальной зависимости. Часто бывает, что вид зависимости (линейная, квадратичная, показательная и т.д.) известен из физических соображений. Если преобладают сомнения относительно выбора кривой, то используется полиномиальная модель в виде разложения в ряд Тейлора.

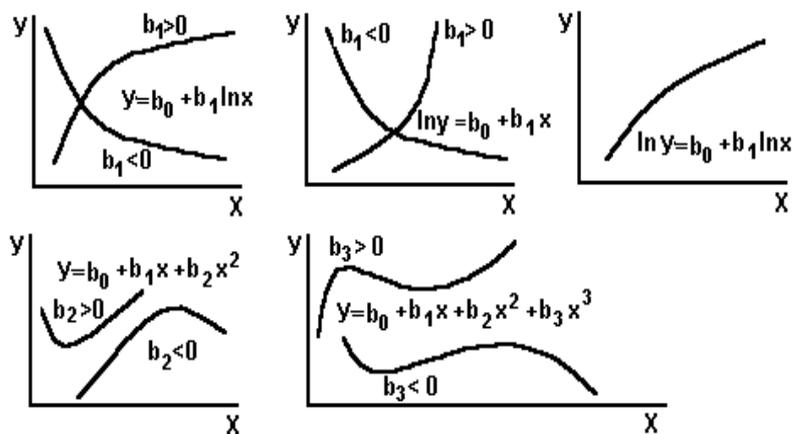


Рисунок 5.10 – Разновидности графических зависимостей двух переменных и возможные уравнения их описания

Корреляционный анализ экспериментальных данных

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n. \quad (5.16)$$

Разброс амплитуды измеряемого параметра определяется постоянными колебаниями и внесенными колебаниями, возникающими при подключении измерителя. Полная отклонение параметра y от среднего значения (дисперсия Sy^2) складывается из двух частей: описываемой уравнением и остатка.

Остаток чаще записывается уравнением в виде: $Sy^2 * (1 - K^2)$. Он не зависит от переменных x , и определяется действием неучтенных факторов.

Чем больше K , тем теснее корреляционная связь, тем сильнее найденная зависимость проявляется среди многообразных, нарушающих ее, воздействий, тем точнее по данным значениям x_i можно предсказать значение y .

Значение K находится в пределах $-1 \leq K \leq 1$. Если $K=1$, то связь между переменными является функциональной, то есть, учтены все факторы, от которых в той или иной мере зависит параметр y . Если $K=0$, то корреляционная зависимость между исследуемыми переменными отсутствует. Если же $0 < K < 1$, то существует более или менее тесная связь между переменными (рис. 5.11).



Рисунок 5.11 – Характер корреляционной зависимости

Обеспечение достоверности обработки экспериментальных результатов

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

Обработка результатов упрощается при наличии обобщенных моделей, учитывающих переходные процессы при подключении датчиков. Для повышения точности измерений вводят понятие динамической погрешности и функции поправок на динамическую погрешность. На рис. 5.12 приведена функция динамической погрешности. В ряде случаев для повышения точности данные измерений берут на половине интервала тактового импульса. В последнее время большое внимание уделяется проблемно ориентированным вычислительным комплексам, позволяющим повысить точность обработки результатов. При обработке частично наблюдаемых сигналов часто возникают ситуации, когда одно событие может повлечь пропадание другого события. Возникают так называемые «мертвые зоны». Появление мертвых зон связано с собственной индуктивностью и емкостью датчиков. При подключении к ЭВМ происходит переходный процесс, в течение которого трудно отличить истинный сигнал от сигнала помехи. Для повышения достоверности оценивают вероятность верного отсчета (чаще 90 %), вводят аппроксимации, оценивают конечность решения уравнений процесса, анализируют критерии подобия технологических процессов.

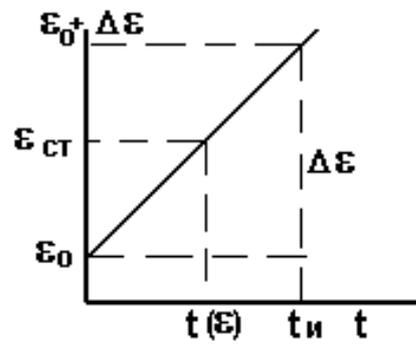


Рисунок 5.12 – Определение динамической погрешности

6. Числовое программное управление в производстве приборов оптической электроники

Числовое программное управление (ЧПУ) нашло широкое применение в автоматизации различных производств, в станкостроительной промышленности, в робототехнике, в электрофизических установках. Степень автоматизации систем может быть средней (до 30 %), низкой (до 20 %), нулевой (менее 20 %).

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:

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

По отзывам специалистов, имеющих многолетний опыт использования ЧПУ (США, Япония, Корея, Англия) системы ЧПУ не оправдывают себя в следующих случаях: ремонтные и заготовительные цеха; сложные детали высокой точности изготовления; малосерийность; отсутствие оснастки; недостаточная точность станка; маленький магазин станка; большая перенастройка.

Для повышения эффективности станков с ЧПУ руководствуются следующими рекомендациями:

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

6.1 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 поправки и новые траектории.

Азимутальные модели объектов. Координаты точек базирования инструментов в системах автоматического управления могут быть заданы полярной системой координат: длиной радиуса – вектора и углом поворота. На рис. 6.1 представлен фрагмент задания информации по принципу цифровой модели циркуля.

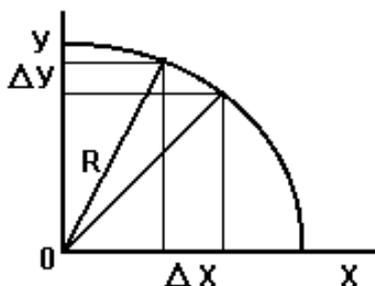


Рисунок 6.1 – Задание информации для цифровой модели азимута

Угол поворота инструмента или держателей детали может выполняться с помощью кодовых дисков с прорезями в комплексе с оптопарами (по аналогии с мышью ЭВМ). Пользователю предлагается набор оценочных функций интерполяции с графической прорисовкой траектории инструмента на дисплее станка. Оценочная функция чаще имеет вид «шаровой функции»:

$$X_2 + Y_2 = R_2 \quad (6.1)$$

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

$$X = R \cos \varphi, \quad Y = R \sin \varphi. \quad (6.2)$$

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

$$\Delta \varphi = 2^n, \quad (6.3)$$

где n - число двоичных разрядов кругового интерполятора.

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».

Для математического описания технологических процессов используются следующие приемы.

- разбиение области исследования на отдельные фрагменты;
- описание поведения фрагментов простыми функциями;
- анализ граничных условий применимости формул при аппроксимации кривых.

6.2 Разновидности программ для ЧПУ

При работе систем ЧПУ возникает необходимость в различных программах цифрового задания траектории инструмента. Перемещение может быть задано: по координатам x , y ; полярными координатами (углом и длиной радиуса вектора); по теореме Пифагора (по приращению осей координат); по формуле или числу импульсов (интерполятором).

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. 6.2 представлена схема изменения параметров при линейной обработке детали.

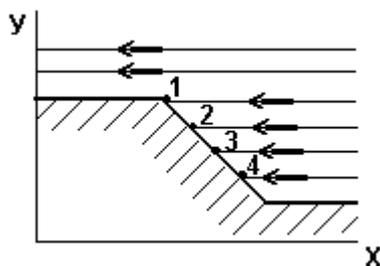


Рисунок 6.2 - Схема построения параметров для программы линейной обработки

Линейная программа с непрерывным изменением аргумента. Примером такой программы может быть операция, при которой резец движется в одном направлении. Например, операция отрезки может быть выражена формулой:

$$N = c \cdot 10^3 / (d \cdot t \cdot S), \quad (6.4)$$

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.

Программы с подпрограммами типа «пакет формул». Подобные программы представляют собой либо совокупность нескольких формул, либо когда переменные находятся в функциональной зависимости от других величин.

Примером может служить операция растачивания изделия. Для проведения операции требуется провести операцию сверления, (применяется первый пакет формул), а затем провести несколько проходов резцом при дискретном изменении координаты y и непрерывном изменении координаты x (применяется второй пакет формул). Коррекция программы будет состоять в учете скорости обработки материала, учете параметров заготовки (применяется третий пакет).

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

6.3 Шифровка деталей, инструментов и операций в системах ЧПУ

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

Перечень технологических операций приводится в справочной литературе. Для упрощения анализа технологического процесса проводится запись деталей и процессов их изготовления в виде таблиц. Фрагмент возможного варианта таблицы представлен в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – 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 T – 15	–	X=9,2; Y=55

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

6.4 Проектирование автоматизированных систем для ЧПУ

Специально для станков с ЧПУ разработана 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 98/ WINDOWS 2000.

Виды обработки распределены между четырьмя модулями:

- фрезерный модуль – для фрезерных, сверлильных, контурно-шлифовальных станков, а также для гравировальных работ;
- токарный модуль;
- электроэрозионный модуль – для лазерных, газорезательных, проволочных станков;
- штамповочный модуль – для координатно - штамповочных станков.

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. Программа имеет приложение для предупреждения столкновений.

6.5 Оптимизация в системах с автоматическим управлением

При оптимизации обеспечивается оптимальное значение одного из параметров функционирования. Поскольку связь между отдельными параметрами обычно противоречивая, то на остальные параметры накладываются граничные условия (значения их должны быть не хуже аналога).

Общие подходы к оптимизации в системах автоматики таковы:

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

6.6 Методы оптимизации при одном факторе воздействия на технологический процесс

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

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

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

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

6.7 Методы оптимизации при числе факторов больше единицы

Технологические процессы отличаются разнообразием всевозможных связей. Движение к экстремуму в многомерном пространстве независимых переменных осуществляется не непрерывно, а шагами. Среди разнообразия методов следует остановиться на трех методах: метод Гаусса – Зейделя, метод градиента, метод крутого восхождения (метод Бокса – Уилсона). На рис. 6.3 представлена схема реализации метода Гаусса – Зейделя.



Рисунок 6.3 – Схема метода Гаусса – Зейделя

При оптимизации методом Гаусса – Зейделя в каждой серии опытов меняется только один оптимизируемый параметр, а остальные остаются

неизменными до достижения частного экстремума. Неудобство метода в необходимости малого шага и большого числа экспериментов.

При оптимизации градиентным методом движение совершается в направлении наибольшего изменения параметра оптимизации. Причем направление движения и шаг постоянно корректируются из различных соображений.

Метод крутого восхождения объединяет характерные элементы методов Гаусса – Зейделя и метода градиента. Движение проводится в направлении максимума изменения функции, но в отличие от градиентного метода, корректировка направления движения и шага проводится не после каждого шага, а после достижения частного экстремума.

6.8 Оптимизация систем автоматики по устойчивости

Часто добавление определенного звена приводит к возникновению колебательных явлений. Причины колебаний могут быть следующими:

- добавление элемента создает внутренний колебательный контур;
- происходит синтез реактивного двухполюсника или четырехполюсника;
- изменяется реактивное сопротивление цепи, происходит преобразование схемы.

На рис. 6.4 представлено исследование процесса регулирования.

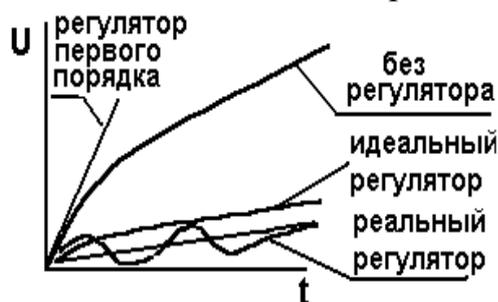


Рисунок 6.4 – Анализ процесса регулирования

Для повышения устойчивости систем автоматики необходимо следующее:

- снабдить схему инерционными звеньями (редукторы, емкости, большие индуктивности);
- придать системе автоколебательный процесс (введение синусоидальных законов, логарифмических) для взаимокompенсации колебаний;

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

Если имеются системы первого, второго и третьего уровня одновременно, то произведение средних коэффициентов каждого уравнения должно быть больше нуля.

6.9 Информационная оптимизация автоматических систем

Методы оптимизации, основанные на информационных представлениях, оказываются более эффективными по сравнению с известными методами параметрического линейного и динамического программирования. Основные положения теории информационной оптимизации базируются на информационных критериях.

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

Существуют функции распределения вероятности ошибок, которые возникают при анализе технологических процессов на оптимальность. Если аппаратура постоянно используется в одних условиях, то распределение ошибок носит Гауссовский характер. Если аппаратура имеет разных пользователей, то ошибка может иметь нефункциональный характер.

Существуют коэффициенты Стюдента в виде таблиц, согласно которым, чтобы провести измерение с вероятностью 96 – 98 % на приборах с погрешностью половины цены деления, необходимо провести не менее 9 – 12 измерений.

При оценке оптимизации важно определить граничные условия применимости формул или математических соотношений.

Условия информационной оптимизации следующие.

– интервал времени управления должен быть меньше времени переходного процесса системы (учитываются динамические свойства системы);

– дискрета управления (шаг изменения параметра) должна быть меньше времени изменения параметра;

Существуют функции оптимизации процесса, построенные по принципу убывающей прогрессии. Однако, линейной информационной модели присущи значительные ошибки, а также сравнительно низкая информационная эффективность и потери информации.

В последнее время наиболее часто применяются два метода оптимизации:

1- й метод – это метод производной. Для максимизации необходимо взять функцию процесса, найти минимум или максимум производной;

2- й метод – это разбиение процесса на отдельные операции. В результате преобразований сложную матрицу описания процесса можно привести к простой или ввести коэффициенты корреляции.

6.10 Многокритериальная система оптимизации «МОМДИС»

Система «МОМДИС» состоит из совокупности двух больших подсистем: подсистемы пользовательского интерфейса и математической подсистемы. Пользовательский интерфейс позволяет гибко управлять процессом проектирования и получать полную информацию в виде графиков и таблиц. Подсистема оптимизации содержит ряд модулей, которые отдельно и в совокупности позволяют найти оптимальное управление или закон управления.

Система может применяться для управления группой оборудования в условиях конфликтов, а также при проектировании производственных систем с выбором компромиссов в условиях несогласованных приоритетов и неопределенности.

На рис. 6.5 представлена структурная схема оптимизации управления объектом.



Рисунок 6.5 – Структурная схема оптимального управления объектом

7 Моделирование технологических процессов производства приборов оптической электроники

7.1 Подobie технологических процессов

Технологические процессы похожи друг на друга (диапазоном давлений, температурой, временем, и др.).

Применение аналогий и закономерностей подобных технологических процессов требует физического и математического моделирования процесса. Физическое моделирование может осуществляться при полном или частичном математическом описании процесса на основе теории подобия.

Различают следующие подобия: простое подобие, геометрическое подобие; физическое подобие; временное подобие; подобие начальных и граничных условий.

Простое подобие предполагает наличие констант подобия однородных параметров (коэффициентов пересчета). Критериями подобия могут выступать безразмерные комплексы и уравнения, связывающие различные величины. Такими критериями могут быть число Рейнольдса ($Re=dV/\eta$ – отношение произведения диаметра отверстия на скорость течения к вязкости), уравнение непрерывности потока ($\rho mV=const$ – произведение плотности на массу и на скорость – уравнение Эйлера), число Кнудсена ($Kn=L/d$ – отношение длины свободного пробега молекулы к характерному размеру).

Моделирование процессов основано на анализе подобия технологических процессов. Для анализа параметров процесса используют критерии подобия, названные по фамилиям известных ученых. Связи различных критериев называются критериальными уравнениями. Такие уравнения не зависят от системы единиц. Часто при анализе процессов прибегают к связи параметров через коэффициенты, которые могут быть функциональными. Например, одно из основных уравнений гидродинамики – уравнение Навье – Стокса в критериальной форме можно записать как:

$$F = AEu^m Re^n, \quad (7.1)$$

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

При геометрическом подобии сходственные размеры данного тела и ему подобного, параллельны, и их отношение выражается постоянным значением. Критерием геометрического подобия может выступать отношение продольного размера L к поперечному d ($L/d=const$). При подобии физических процессов должно соблюдаться геометрическое подобие систем и быть подобны все основные физические величины, влияющие на процесс.

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

При временном подобии предполагается геометрически подобное изменение параметров во времени для аналога и подобного объекта. Подобие начальных и граничных условий для объекта и модели предполагает определенность геометрических, физических и временных параметров.

При анализе процесса необходимо соблюдать такую последовательность операций:

- выявить доминирующие факторы, влияющие на процесс;
- записать по возможности все уравнения, связывающие факторы и параметры процесса;
- ввести граничные условия или начальные значения для всех переменных, входящих в уравнения. При этом начальных значений должно быть столько же, сколько имеется дифференциальных уравнений (в пересчете на дифференциальные уравнения первого порядка);
- составить алгоритм и программу решения модели на ЭВМ;
- провести оптимизацию процесса.

Изучение процесса заканчивается составлением перечня параметров оптимизации. При многочисленности параметров процесса применяются матричные схемы. На практике получили широкое распространение графоаналитические методы моделирования с применением геометрической интерполяции.

7.2 Моделирование устойчивости систем автоматики

Устойчивость оценивается при работе системы на различных режимах. Система называется устойчивой, если после снятия воздействия по окончании переходного процесса система приходит в исходное состояние или в состояние равновесия. Выходная и входная величины системы связаны с помощью дифференциального уравнения.

$$X(t) = X_{вын}(t) + X_{св}(t) \quad (7.2)$$

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

Различают несколько типов управляющих систем. Некоторые из них следующие:

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

Устойчивость системы автоматики определяется критерием Вышнеградского, критерием Гурвица, критерием Михайлова, критерием Найквиста.

Критерий Вышнеградского. Согласно критерию Вышнеградского для устойчивости системы необходимо, чтобы произведение средних коэффициентов уравнения, описывающего процесс, было больше произведения крайних коэффициентов.

Например. Если звено системы автоматического управления напуском газа в вакуумную систему отслеживается уравнением:

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

то, критерий Вышнеградского определится соотношениями:

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

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

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

$$A(p) = a_0 P^n + a_1 P^{n-1} + \dots + a_{n-1} + a_n. \quad (7.3)$$

Для определения устойчивости по критерию Гурвица необходимо из коэффициентов уравнений процесса составить определитель. На рис. 7.1 представлен вид определителя.

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

Рисунок 7.1 – Определитель Гурвица

В первой строке определителя пишутся коэффициенты с нечетными индексами, во второй – с четными. Концы строк заполняются нулями. Число

столбцов – n соответствует порядку уравнения. Третья и четвертая строки получаются сдвигом первых двух на одно место вправо и т.д. (Всего строк n). Система устойчива, если определитель положителен. На границе устойчивости $\Delta=0$, $a_n=0$, $a_0=0$.

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

$$A(j\omega) = X(\omega) - jY(\omega), \quad (7.4)$$

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

На рис. 7.2 представлен вид графика устойчивости (так называемого годографа Михайлова).

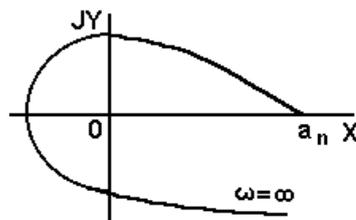


Рисунок 7.2 – Годограф Михайлова для системы четвертого порядка

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

Критерий устойчивости Найквиста предназначен для определения устойчивости систем с изменяющимися амплитудными и фазовыми характеристиками. Условие устойчивости сводится к требованию, чтобы амплитудно – фазовая частотная характеристика не захватывала отрицательную ось. На рис. 7.3 представлены две амплитудно – фазовые частотные характеристики, иллюстрирующие критерий устойчивости Найквиста.

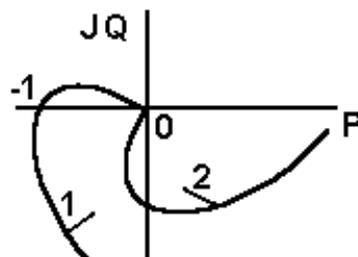


Рисунок 7.3 – Критерий устойчивости Найквиста: 1 – система неустойчива; 2 – система в основном устойчива

Устойчивость систем со случайной подстройкой моделируется при обработке статических выходных данных. В этом случае программный модуль должен быть наделен следующими функциями:

- ввод передаточной функции объекта коэффициентами полиномов, или значениями передаточной функции;
- нахождение критической частоты регулирования;
- расчет параметров заданного закона регулирования;
- анализ частотных и динамических характеристик объекта;
- возможность вывода графиков на принтер.

7.3 Моделирование работы технических систем

Принцип Кюри в системах автоматики

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

Ядро технологического процесса

Основная задача автоматизации заключается в выделении наиболее главной операции (ядра), обеспечивающего достаточно полный контроль процесса. При выработке рекомендаций по выделению ядра, в качестве целевой функции может быть принят коэффициент потенциальной асимметрии, который учитывает «вес» элементов на данном этапе процесса и вероятность появления параметров.

Для построения ядра технологического процесса следует провести следующие операции:

- провести распечатку задания с вычиткой текста по абзацам;
- провести разметку узлов. Например: первый узел – операции монтажа в вакуумной камере; второй узел – обеспечение вакуума; третий узел – напыление пленки;
- разработать математические модели процесса в виде формул и предполагаемых графиков и таблиц;
- провести лексический анализ задачи. Цель лексического анализа заключается в уточнении метода достижения задачи с учетом технических

возможностей оборудования. Например: провести формирование волноводного слоя путем напыления пленки титана на ниобат лития с последующей диффузией пленки на воздухе означает, что необходимо в вакууме сформировать пленку окисла титана, а затем провести диффузию на воздухе с функциональным изменением температуры.

В последнее время большое внимание уделяют аппаратно – программному ядру, реализующему типичные (базисные) функции для реализации процесса. Перспективным является реализация принципа развивающегося ядра, когда структура комплекса собрана из стандартных сертифицированных сменных интерфейсов.

8 Компьютеризация технологических процессов

8.1 Процесс ввода технологической информации в ЭВМ

В ходе технологического процесса возникает необходимость преобразования поступающей аналоговой информации от датчиков в цифровую форму с последующим вводом в микропроцессор. После обработки следует преобразование цифровых управляющих сигналов в аналоговую форму для воздействия на исполнительные аналоговые механизмы.

Эти функции выполняют специальные устройства, получившие название интерфейсных устройств ввода – вывода аналоговой информации.

В последнее время наибольшее распространение получили два метода ввода информации: оцифровка аналогового сигнала и его нормализация; ввод сигналов через сканерные устройства или фотоматрицы.

Нормализация данных

Данные о технологическом процессе поступают от датчиков различными по амплитуде и частоте. Нормализация, обрезает помехи и сильные сигналы, дотягивает слабые сигналы. Она подобна системе автоматического усиления в телевизионных приемниках. Различают три формы нормализации: первый, второй, третий.

Первая нормальная форма соответствует описанию уравнениями первого порядка.

Вторая нормальная форма соответствует описанию процесса уравнениями второго порядка.

Третья нормальная форма соответствует неоднозначной зависимости параметров друг от друга. На практике для нормализации используется несколько компьютерных программ.

На рисунке 8.1 представлена блок – схема ввода информации с использованием нормализации.



Рисунок 8.1 – Блок схема обработки данных с применением ЭВМ

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

максимальной амплитуды напряжения сигнала U_c к квадрату напряжения шума.

$$(C/Ш) = (U_c / U_{ш})^2 \quad (8.1)$$

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

8.2 Языки пользователя для программирования электрофизических установок

При проведении технологических операций нет необходимости в применении больших ЭВМ. В основном требуются машины с возможностью выработки сигнала коммутации исполнительного устройства (например, машины фирмы MAKINTOSH). В настоящее время нашли применение, так называемые, языки пользователя [4-10]:

- 1) Ассемблер; Паскаль; Си, C⁺⁺, Java;
- 2) язык релейно-контактных символов;
- 3) язык «Время – команда»; «Время – параметр»;
- 4) язык булевых уравнений.

5.2.1 Язык релейно-контактных символов

Для различных систем робототехники, систем автоматизированных станков и кузнечнопрессового оборудования широко применяется язык, основанный на аналогии включения или выключения контактов электрических схем. На рис. 8.2 представлены условные обозначения такого языка по данным фирмы MODICON.

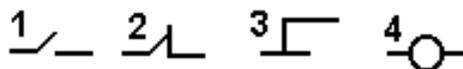


Рисунок 8.2 – Команды языка релейно–контактных символов. 1 – нормально разомкнутый; 2 – нормально замкнутый; 3 – вход в параллельную цепь; 4 – время.

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.

Язык Булевых уравнений

В ряде случаев для отдельного канала оказывается удобным одновременная запись того, что включено и что выключено. В таких случаях удобно пользоваться языком булевых уравнений с использованием операторов типа «и», «или», «не (инверсия)». На рис. 8.3 представлено соответствие булевых и релейных символов.

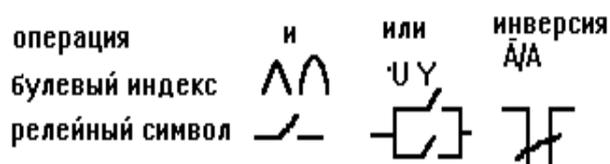


Рисунок 8.3 – Схема соответствия «булевых» и релейных символов

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

В ряде случаев подача команд на проведение последующей операции может производиться по истечении определенного времени или по достижении определенного параметра. Подобные реле времени рассчитаны на коммутацию канала в течение времен от секунд до недели и имеют до 48 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 и включает в себя технические нормалы на материалы, инструменты, а также технические допуски на изготовление и базу данных кадрового обеспечения.

Язык управления типа «КАУТ»

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

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

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

контролируемые величины, регулируемые, включаемые, а также наименование отслеживаемого параметра.

Пример. Программа для установки термического напыления материалов в вакууме.

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 – кратно пяти. Такое присвоение позволяет дополнительно включать промежуточные операции, возникающие при оптимизации технологического процесса. В нашем случае последовательность технологических операций для очистки изделий (индекс O), текущих операций (индекс M) и собственно напыления (индекс H) выглядит в следующем виде:

(O5, O10, O15...), (M5, M10, M15, M20...), (H5, H10, H15...).

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

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

регулируемые: P1 – нагрев;

включаемые: B1 – клапан; B2 – откачка; B3 – нагрев;

параметры: П1 – температура; П2 – счетчик.

Пример конкретного исполнения

1. Включение клапана B1.

5. Включение откачки B2

10. ВКЛ. НАГРЕВ

15. ЖДАТЬ 150 (ждать 150 секунд пока нагреется)

20. M 10

25. ЕСЛИ K ТЕМП = 250, ПЕРЕХОД НА M 45 (напыление)

ИНАЧЕ M20 (нагрев) (Комментарий: если температура подложки достигнет 250 градусов, перейти на напыление, в противном случае продолжить нагрев).

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

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.

Команды языка SCPI имеют иерархическую структуру. Родственные команды сгруппированы в общем узле. В качестве примера показана часть подсистемы SENSE (СЧИТЫВАНИЕ).

SENSe: (считывание)

VOLTage: (вольты)

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

DC:RANGe? [MINimum| MAXimum] (порядок считывания)

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?

Синтаксис командного языка показывает большинство команд в виде наборов прописных и строчных букв.

SENSe является ключевым словом команды. VOLTage и FREQuency – ключевыми словами второго уровня. DC и VOLTage – ключевыми словами третьего уровня. Ключевое слово предыдущего уровня от ключевого слова более низкого уровня разделяется двоеточием (:).

Например: VOLTage: DC: RANGe {<range>/MINimum| MAXimum} означает измерение напряжения; DC – постоянный ток; цифровой разряд показаний, в скобках указаны предел, минимальные и максимальные значения.

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.

Двоеточие (:) разделяет команды от ключевого слова более низкого уровня.

Аппаратура автоматически программируется на измерения командой MEASure и для более точных измерений командой CONFigure.

Например:

MEASure: VOLTage: DC? {<range>| MIN| MAX| DEF}, {<resolution>| MIN| MAX| DEF}– производится измерение постоянного напряжения. Показания пересылаются в буфер вывода. DEF- означает автоматическое переключение пределов равное 51/2 разрядам

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

MEASure:RESistance? – производится измерение сопротивления резистора.

Среди различных простых команд наиболее распространенными являются:

AUTO- автоматическое переключение пределов;

BUS – по шине; OFF/ON- выкл/вкл;

GETCh- передача показаний из внутренней памяти прибора в буфер вывода и далее в контроллер.

Языки, для программирования логических контроллеров

Международной электротехнической комиссией рекомендованы некоторые стандартные языки для программирования контроллеров.

На рис.8.4 представлены языки для программирования контроллеров.

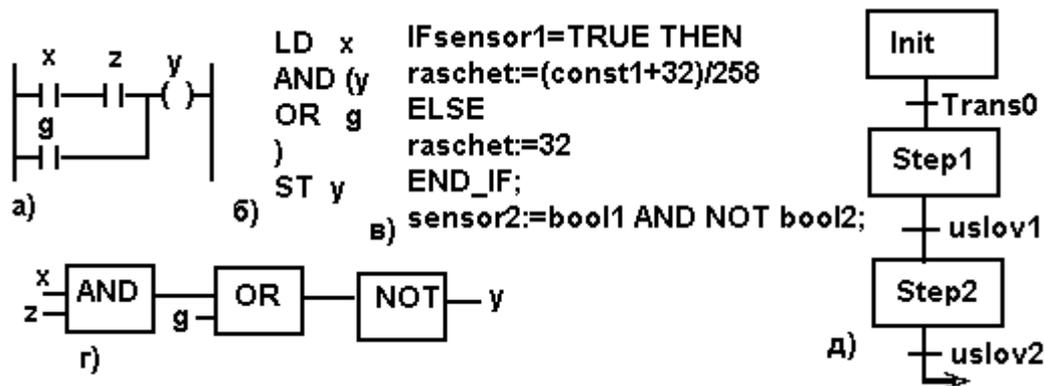


Рисунок 8.4 - Команды языков программирования контроллеров; а) – LD; б) – IL; в) – ST; г) – FBD; д) CFC

Язык LD

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

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

Язык ST – это аналог языков C, Pascal.

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

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



Рисунок 8.5 – Изменение сигнала во времени при передаче данных

8.3 Система «КАМАК»

Система КАМАК – это многоуровневая система, способная принимать и обрабатывать сигналы с технологического оборудования.

Первый уровень ответственен за диагностику и обеспечение работоспособности оборудования. В отличие от систем децентрализованного управления диагностика работоспособности проводится путем функциональной (программной) проверки и путем непосредственного тестового сигнала на датчик.

Второй уровень обеспечивает программную обработку данных.

Третий уровень обеспечивает моделирование процессов. Система КАМАК содержит библиотеку программных продуктов и вспомогательные функции по обработке эксперимента. Система позволяет одновременно поддерживать и обрабатывать около десятка установок различного профиля в реальном масштабе времени система

При относительно небольших массогабаритных параметрах система КАМАК является дорогой и требует высококвалифицированного обслуживания узкими специалистами. Перед использованием системы рекомендуется провести ряд этапов по оценке целесообразности; решению проблемы кадрового и технического обеспечения.

Способы соединения приборов в системе «КАМАК» определяются возможностями сети и ее интерфейсами. Наиболее широкое распространение нашли следующие способы соединения приборов:

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

На рис. 8.6 представлена общая схема подключения преобразователей к системе КАМАК.



Рисунок 8.6 – Схема подключения датчиков к системе «КАМАК»

9. Системы автоматического управления технологическими процессами

9.1 Автоматизированные рабочие места (АРМ)

АРМ – это система централизованного управления, которая одновременно обслуживает несколько автоматизированных рабочих мест (АРМ). Как правило, это системы, к которым имеет доступ руководящее звено производства. Система имеет много общего с системой «КАМАК». Она проводит наблюдение за заданием цеха, проводит корректировку режимов, следит за соблюдением технологии. 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.

9.2 Робототехнические комплексы и автоматизированные рабочие места

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.

Основные технические характеристики роботов и манипуляторов следующие:

- степень подвижности 2 – 7;
- грузоподъемность 1 – 40 кг;
- скорость перемещения 1 – 2 м/с;
- угол поворота – до 180 градусов;
- погрешность координат ± 1 мм;
- управление – ручное или автоматическое.

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).

В последнее время разработаны унифицированные системы управления дешевыми узкоспециализированными роботами. 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.

Распознающие системы роботов

Распознавание образа производится с помощью многослойной фотоэлектрической матрицы. Элементы матрицы имеют сопротивление, меняющееся от интенсивности света. Если приложить к элементу матрицы эталонное и распознаваемое изображение, то общий ток будет соответствовать степени совместимости двух изображений.

Для решения задач распознавания используются два метода, основанных на корреляционном анализе изображений. Один из них базируется на подсчете коэффициентов корреляции с заранее сформированными эталонным и входным изображением. Второй основан на статистической обработке входных изображений.

Широкое распространение получили распознающие системы роботов, основанные на двух основных принципах: сравнение яркостей и сравнение голограмм. Сравнение голограмм является очень молодым направлением,

поэтому в настоящее время 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. 9.1 представлены некоторые вероятностные модели функции синтеза объектов.

В заключение просчитывается рассогласование системы и проводятся мероприятия по увеличению резкости: оценка соседних яркостей, сравнение с эталоном и усреднение, решение уравнений яркости объектов (чаще уравнений Лапласа), представление фотографии объекта как функции яркости.

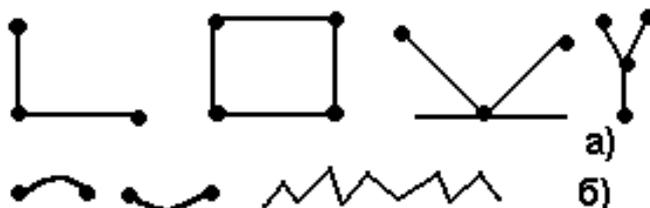


Рисунок 9.1 – Функции синтеза объектов (а); функции стыковки изображений (б).

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

Системы цветового зрения роботов

Ранее было показано, что в первом приближении солнечный свет можно представить в виде суммы красного, зеленого и синего цветов. Удобно представить эти цвета в виде декартовой системы координат с осями X, Y, Z . Соотношение компонент красного цвета R , зеленого G и синего B позволяют получить любой цвет. Точка в пространстве координат характеризует определенный цвет. Насыщенность (масштабный коэффициент) соответствующего цвета задают величинами r, g, b .

Цветовое уравнение выглядит следующим образом:

$$C = Rr + Gg + Bb. \quad (9.1)$$

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

$$R^* = R + \Delta G + \Delta B. \quad (9.2)$$

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

9.3 Нейронные сети в технологических процессах

В последнее время значительная часть работы технологических систем переносится с блоков на программный уровень [16-19]. 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. При обучении системы повторяющиеся команды запоминаются. Подбором весовых коэффициентов достигается минимум рассогласования калиброванного сигнала с измеряемым сигналом.

9.4 Примеры разработки систем автоматизации некоторых технологических процессов

Пример 1. Исследования спектра газовой выделения материалов в вакууме

На рис. 9.2 представлен нейрон и фрагмент нейронной сети для исследования спектра газовой выделения материалов в вакууме. Исследование спектра проводится на установке УВН – 2М. Установка оснащается измерителем парциальных давлений типа ИПДО – 1.

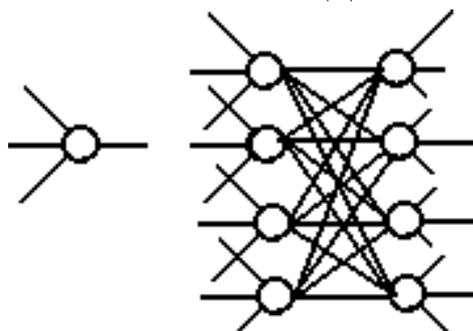


Рисунок 9.2 – Нейрон и фрагмент нейронной сети

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

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (9.3)$$

Комплекс распознавания спектра сформирован в виде блока программ, содержащих топологические слои функций. 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. Она представляет собой гибкую систему, в которой задаются количество скрытых слоёв и количество нейронов в каждом из них. Количество входов и выходов одинаково и равно единице.

Предварительное обучение сети проводится по известным газам: гелий, аргон, азот, вода. Сигнал с коллектора записывался на электронный потенциометр и одновременно оцифровывается и подается на СОМ – порт персонального компьютера, где находится программа, реализующая нейронную сеть. Обучение сети проводилось путем подачи на входы нейронной сети нормированных отчетов:

$$t_i = (t - t_{cp}) / \sqrt{S^2}, \quad (9.4)$$

где t – среднее значение выборки временных значений входов;

S – дисперсия значений входов нейронной сети.

На выходы нейронной сети подаются соответствующие значения функции t_i , описывающей пик. Если спектральный пик описывается некоторой суммой функций, то на вход поступает суперпозиция пиков. Вследствие этого функция, отображаемая на его экране, есть как сумма функций всех пиков:

$$f(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t_i) \quad (9.5)$$

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

Достоинство проведенного исследования в том, что благодаря применению нейронных сетей обнаруживаются скрытые компоненты спектра газов. Открытые части пиков позволяют спрогнозировать скрытую часть пика и посчитать площадь под пиком.

Пример 2. Автоматизация контроля дуговых электродов.

Особенностью рассматриваемых электротехнологических объектов является то, что реакция получения целевого продукта протекает за счет тепловой энергии, выделяемой при прохождении переменного

электрического тока через рабочую электродную зону, содержащую исходное сырье, промежуточные и конечные продукты. Состояние технологического процесса отражается и в свойствах рабочей зоны как токопроводящей среды. На рис. 9.3 представлена схема процесса плавки и ее эквивалентная схема.

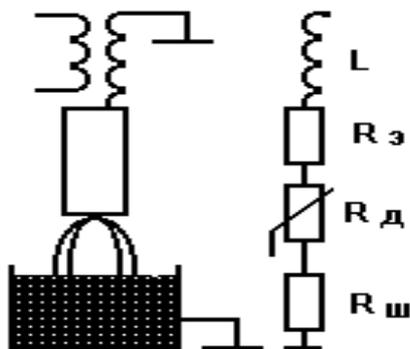


Рисунок 9.3 – Типовая схема плавки в электродуговой печи и ее электрическая модель

Рабочие токопроводящие среды (руда, металлолом) представляются в виде моделей, эквивалентных схем замещения. Электрические параметры и характеристики элементов схемных моделей связаны с физическими, химическими и технологическими процессами, протекающими в электропечи, а структура модели отражает взаимодействие между внутренними процессами и переменными.

При построении моделей дуговых рудно – термических электропечей рабочую зону представляют в виде соединения сопротивлений области электрической дуги R_d , последовательно включенной с ней области расплава шихты $R_{ш}$. Электрическая дуга имеет нелинейную вольтамперную характеристику и представлена нелинейным сопротивлением. Индуктивность L представляет собой эквивалентную индуктивность цепи электрода, определяемую индуктивностью электрода, ванны печи и гистерезисом дуги. Наличие нелинейности в цепи приводит к не синусоидальности токов и напряжений на электродах. Линейные и нелинейные элементы цепи проявляют свои свойства в форме периодических функций мгновенных значений тока и напряжения в соотношении их спектральных составляющих. Это позволяет использовать спектральные составляющие в качестве источника информации при идентификации нелинейных схемных моделей.

Предложенная методика использовалась для идентификации хода технологического процесса промышленной электропечи ОКБ – 955 Н при выплавке карбида хрома, а также при обработке данных по выплавке

феррохрома в электропечи типа РКЗ – 33, снабженной ЭВМ. Производство титана вакуумно-дуговым способом плавления предъявляет повышенные требования к повышению качества выхода годного продукта. Изучение процесса плавления позволило разработать адаптивную систему управления по параметрам частоты капельных замыканий ($F_{к.з}$) и падения напряжения на плазме дуги (U_d).

В результате проведенных экспериментов установлена зависимость частоты капельных замыканий и падения напряжения дуги от длины дуги (L) на различных токах дуги и токах соленоида. В итоге проведенной обработки результатов был выявлен оптимальный дуговой промежуток между торцом сплавляющегося электрода и ванной жидкого металла. Поведение $F_{к.з}$ и U_d , а также вакуума (V) в этом промежутке являлось оптимальным: $F_{к.з}$ – была минимальна, а U_d и V сохраняли постоянное значение. Проанализировав падения напряжения на плазме дуги от изменения дугового промежутка, была предложена новая модель $U_d = f(L)$.

В новой математической модели введена логарифмическая зависимость напряжения дуги от длины дуги. Благодаря этому идентичность полученной модели стала на 10 – 15% выше, а после статистической обработки коэффициент регрессии R составил 0,95 – 0,98.

На базе этих особенностей была разработана и внедрена в действие автоматизированная система управления вакуумно-дуговым переплавом, позволяющая поддерживать оптимальный дуговой промежуток на базе контроллеров фирмы Allen – Bradley.

Разработанная система управления позволяет оператору – технологу качественно оценить состояние процесса плавления стали по следующим параметрам: длине дугового промежутка, напряжению дуги, частоте капельных замыканий, весовой скорости сплавления электрода, скорости движения электрода, глубину жидкой ванны, давления в кристаллизаторе, тока дуги.

Список литературы

1 Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А. А. Барыбин - М.: Физматлит, 2006. – 423 с.

2 Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро - и нанотехнологий. Томск, 2005, 400 с.

3 Данилина Т.И. Технология СБИС : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, - Томск : ТУСУР, 2007. - 287 с..

4 Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 525 с. ISBN 5-03-003432-3

5 Молекулярно-лучевая эпитаксия : учебное пособие / Л. Н. Орликов ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2007. - 107 с :

6 Процессы микро- и нанотехнологии : учебное пособие для вузов / Т. И. Данилина [и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2005. - 316 с ISBN 5-86889-244-5:

Периодическая литература (за последние 5 лет).

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

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы технологии приборов оптической электроники

Учебное пособие по дисциплине «Специальные вопросы технологии
приборов квантовой электроники»

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