

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

Кафедра электронных приборов

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

Учебное пособие
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

Орликов Леонид Николаевич.

Технология приборов оптической электроники и фотоники: Учебное пособие / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2012. - 87 с.

В учебном пособии рассмотрены: подготовка к проведению технологического процесса изготовления приборов оптической электроники и фотоники; технологичность изготовления приборов оптической электроники и фотоники; технология получения высокого вакуума в производстве приборов оптической электроники; межфазные взаимодействия в технологии формирования приборов оптической электроники и фотоники; технология подготовки поверхности оптических материалов к технологическим процессам (очистка); методы формирования нанослоев для приборов оптической электроники и фотоники; процесс эпитаксиального выращивания структур для приборов оптической электроники; основы технологии изготовления оптоэлектронных приборов.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Технология приборов оптической электроники и фотоники».

© Орликов Леонид Николаевич, 2012

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2012 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ФОТОНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

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

Содержание

Введение.....	6
1 Подготовка к проведению технологического процесса.....	8
1.1 Получение материалов для приборов оптической и квантовой электроники.....	8
1.2 Типовой технологический процесс.....	9
1.3 Подобие технологических процессов.....	9
1.4 Законы регулирования параметров процесса.....	10
1.5 Групповые измерительные преобразователи.....	11
1.6 Пневматические устройства управления процессами.....	11
1.7 Уровни математического описания процесса.....	13
2 Технологичность изготовления приборов оптической электроники и фотоники.....	14
2.1 Технологичность процессов изготовления приборов оптической электроники и фотоники.....	14
2.2 Методы оценки параметров технологичности.....	14
2.3 Языки пользователя для программирования технологических процессов.....	18
2.3.1 Язык релейно-контактных символов.....	18
2.3.2 Язык Булевых уравнений.....	19
2.3.3 Языки типа: «Время – команда». «Время – параметр».....	19
2.3.4 Язык управления типа «КАУТ».....	19
2.3.5 Язык программирования измерительной аппаратуры SCPI20.....	22
2.3.6 Языки для программирования логических контроллеров.....	22
2.3.7 Язык LD.....	22
3 Технология получения высокого вакуума в производстве приборов оптической электроники и фотоники.....	23
3.1 Технологические вакуумные системы и установки.....	23
3.2 Типы вакуумных установок.....	25
3.3 Расчет вакуумных систем.....	25
3.4 Согласование откачных средств.....	27
3.5 Измерение парциальных давлений.....	28
3.6 Алгоритм включения и выключения типовых вакуумных установок с масляными средствами откачки.....	31
3.7 Практические рекомендации по поиску негерметичности вакуумных систем.....	32
4 Межфазные взаимодействия в технологии формирования приборов оптической электроники и фотоники.....	34
4.1 Межфазное равновесие процессов.....	34
4.2 Теплота, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, свободная энергия.....	35
4.3 Фазовая диаграмма.....	37
4.4 Применение теории межфазных взаимодействий при формировании высококачественных пленок.....	38

5	Технология подготовки поверхности оптических материалов к технологическим процессам (очистка)	40
5.1	Вакуумная гигиена и очистка материалов	40
5.2	Общая схема очистки материалов для приборов оптической электроники и фотоники	41
5.3	Электрофизические методы очистки	42
5.4	Контроль качества очистки	44
5.5	Ионное травление материалов	44
6	Методы формирования нанослоев для приборов оптической электроники и фотоники	46
6.1	Физико-химические процессы получения наноматериалов	46
6.2	Назначение и типы пленок	49
6.3	Методы получения пленок	50
6.4	Термовакuumное испарение пленок	50
6.5	Процессы термического испарения материалов	51
6.6	Электронно-лучевой метод формирования пленок	53
6.7	Магнетронное формирование пленок	54
6.8	Электродуговое формирование покрытий в вакууме	55
6.9	Формирование пленок с помощью ионных источников	56
6.10	Методы измерения параметров пленок	57
6.10.1	Резистивный метод измерения толщины пленок	57
6.10.2	Емкостной метод измерения толщины пленок	58
6.10.3	Оптический метод измерения толщины пленок	59
6.10.4	Ионизационный метод измерения толщины пленок	59
6.11	Экспресс методы сравнительного анализа толщины пленок	60
7	Процесс эпитаксиального выращивания структур для приборов оптической электроники	61
7.1	Понятие эпитаксии	61
7.2	Виды эпитаксий	62
7.3	Кинетика процесса молекулярно-лучевой эпитаксии	64
7.3.1	Теория кинетики процесса эпитаксии	64
7.4	Теория формирования эпитаксиальной пленки по Френкелю	71
7.5	Теория формирования пленки по Н.Н. Семенову	71
7.6	Фазовая диаграмма процесса роста эпитаксиальных пленок	72
7.7	Методы анализа эпитаксиальных структур	74
7.8	Растровая электронная микроскопия	79
8	Основы технологии изготовления приборов оптической электроники и фотоники	81
8.1	Технология приборов квантовой электроники	81
8.2	Технология одноэлектронных квантовых приборов	82
8.3	Устройства памяти	84
8.4	Технология формирования светоизлучающих структур	84
	Заключение	85
	Рекомендуемая литература	85

Введение

В настоящее время существует потребность в специалистах, разбирающихся в технологии производства приборов оптической электроники и фотоники, в физических процессах и оборудовании для их производства. За последние 30-40 лет в России и за рубежом опубликовано много конкретно ориентированных работ, посвященных технологии приборов оптической электроники и фотоники, применению современных материалов. Однако, создание приборов с размерами порядка десятков нанометров требует знаний по изменению свойств твердых тел при уменьшении размеров.

Эффекты, реализуемые в оптической электронике и фотонике

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 Погкельса), так и нелинейную (эффект Керра) составляющие.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1 Подготовка к проведению технологического процесса

1.1 Получение материалов для приборов оптической и квантовой электроники

Схемонесущими материалами для оптоэлектроники выступают материалы, обладающие пьезоэффектом (ниобат лития, силикат висмута, некоторые керамики и др.) В качестве материалов для одномодовых волноводов могут использоваться материалы, не обладающие пьезоэффектом (стекла, керамики и т.п.). К материалам оптоэлектроники предъявляются следующие основные требования: высокая прозрачность для излучения в требуемом диапазоне длин волн, высокая стойкость против изменений структуры и свойств с течением времени; высокая сопротивляемость влиянию внешних дестабилизирующих воздействий температуры, радиоактивности, влажности и т. п. Это достигается очень малой концентрацией ионов примесей. Например, в световодном слое не должно быть больше одного иона ОН на 10^7 ионов основных компонентов. В соответствии с этими требованиями волоконные световоды изготавливают, главным образом, из кварцевого стекла, многокомпонентных силикатных стекол соответствующего состава и из некоторых полимеров. Перспективными материалами для волоконных световодов связи, являются галоидные, халькогенидные и оксидные стекла, а также кристаллические соединения типа хлоридов, бромидов и йодидов. Многокомпонентные стекла плавятся при более низкой температуре, допускают большие вариации состава и менее сложны для обработки, чем высокотемпературные кварцевые стекла.

Значительная часть приборов оптической электроники и фотоники состоит 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. Например, кварцевые стекла – (кварц – кварц), многокомпонентные стекла – (стекло – стекло) или стекло – полимер, (кварц – полимер). Акустоэлектронный элемент на поверхностных акустических волнах (ПАВ) представляет собой кристалл, на котором сформированы 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.

1.2 Типовой технологический процесс

Процесс называется типовым, если в нем изменяются подобные параметры изделий: форма, масса, температура, давление. 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.

1.3 Подобие 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).

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

$$F = A Eu^m Re^n, \quad (1.1)$$

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 (L/d). 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 процессов предполагает соизмеримость не менее двух параметров.

1.4 Законы регулирования параметров процесса

Законы воздействия на изменение параметров могут быть различными.

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 нестабильности измеряемой величины и ее приходится усреднять. Примером использования может выступать сигнал напряжения зажигания с электроразрядных устройств.

Пропорционально – интегральный закон регулирования с дифференцированием сигнала предполагает наличие так называемого «изодромного звена», отслеживающего скорость изменения управляющего

сигнала. Примером такого управления может выступать система управления температурой печи, которая по мере приближения к заданной температуре чаще выключает нагреватель, предотвращая перегрев. На рис. 1.1 представлены кривые, отражающие законы изменения параметров.

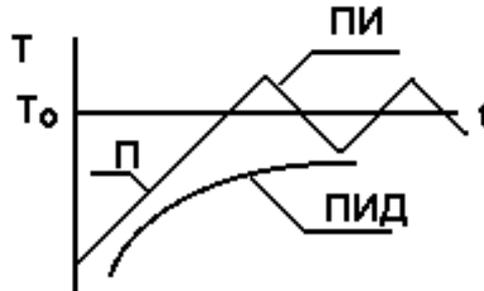


Рисунок 1.1 – Законы изменения параметров управления

Обычно на функциональном оборудовании завод – изготовитель обязан ставить закон регулирования. Многие современные устройства снабжены электронным носителем, в котором предусмотрено изменение закона регулирования.

1.5 Групповые измерительные преобразователи

подавляющая часть электрофизических установок снабжена универсальными первичными 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).

В ряде случаев такие преобразователи снабжены устройствами сопряжения с ЭВМ. Сигнал с датчика (например, с термопары) может быть многократно усилен ($\sim 10^7$ раз) программируемыми измерительными станциями и использован для непосредственного силового управления. Такие станции отслеживают погрешность измерений с точностью до 0,05 %. Среди зарубежных фирм пользуется популярностью фирма National Instruments. Из отечественных разработок популярны блоки: МИНИТЕРМ, ОРИОН, ПИТРА – 1100 и др.

1.6 Пневматические устройства управления процессами

При решении технологических задач наряду с электрическими и электронными средствами широко применяются пневматические устройства на газовых струях. В таких отраслях, как химическая, газовая, пищевая и т.п. пневматические устройства являются основным средством управления. 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 отдельные функциональные устройства. В числе отличительных достоинств пневмоэлементов следует отметить:

- технологическую совместимость с различными технологиями;
- быстродействие (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.

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.

На рис. 1.2 представлены простейшие схемы пневматических элементов.

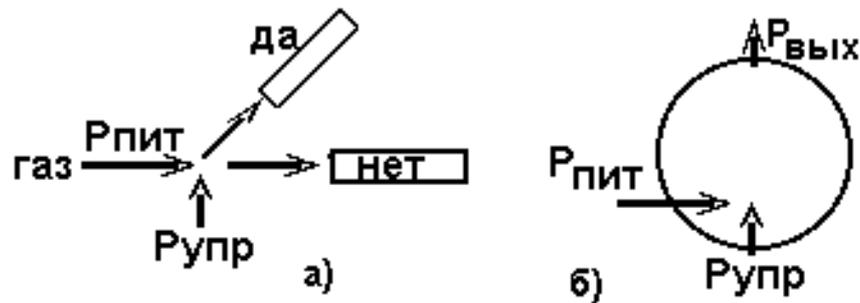


Рисунок 1.2 – а) – схема работы логического пневматического элемента типа триггер с функцией «да – нет»; б) – схема струйного усилителя

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

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

На рис. 1.3 представлены схемы пассивных и активных элементов.



Рисунок 1.3 – а) - схема пассивного пневмоэлемента; б), в) - схемы активных пневмоэлементов

1.7 Уровни математического описания процесса

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

Системы первого порядка описывают процесс и регулятор линейными уравнениями. (Например, насколько поднимается напряжение питания – настолько поднимается температура нагрева).

Системы второго порядка применяются, если регулятор или объект описываются уравнениями второго порядка.

Система третьего порядка применяется для отслеживания колебательных процессов и описывается уравнениями третьего порядка и

математическими рядами. Сходимость ряда – признак устойчивости системы.

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

2 Технологичность изготовления приборов оптической электроники и фотоники

2.1 Технологичность процессов изготовления приборов оптической электроники и фотоники

Разработанный технологический процесс фиксируется в специальных технологических документах. Внесение изменений в документы разрешается только в соответствии с порядком, установленным на предприятии. Содержание документов определяется стандартами (ГОСТ). Основное требование ГОСТ – понятливость. ГОСТ не распространяется на документы демонстрационного и пояснительного характера. Основными документами технологии являются: технологический проект, технологическая карта, маршрутная карта, операционная карта, конструкторская документация (чертежи).

Технологический проект – это документ, в котором описывается суть решаемой проблемы, ее состояние на сегодняшний день; предлагаемые пути решения, данные об исполнителях, сведения об оборудовании, сроки выполнения работ, необходимое финансирование, рынки сбыта продукции.

Технологическая карта – это документ для финансирования проекта. В этом документе описываются сумма необходимых операций, оборудования и рабочих мест.

Маршрутная карта - это документ, в котором описывается последовательность всех технологических операций по изготовлению изделия от заготовки до выходного контроля.

Операционная карта составляется на выполнение каждой операции технологического процесса. В ней указываются режимы и времена их выполнения, переходы и связи между операциями. В последнее время составлению операционных карт производится с помощью компьютерной техники. Для ответственных деталей составляются специальные сопроводительные листы с указанием даты и фамилии конкретного исполнителя.

2.2 Методы оценки параметров технологичности

Известны качественные и количественные методы оценки технологичности. Эти методы позволяют оценить рациональность изготовления изделий. Сущность их сводится к сравнению с эталоном,

который помимо качественной информации может носить элементы количественной оценки. Если предлагается несколько вариантов изготовления изделия, то их технологичность вначале проверяется по экономическим показателям, а затем проводится сравнительная, качественная оценка. Вначале сравнения, независимо от наличия эталона, устанавливаются оценочные критерии технологичности. Такими критериями могут быть сравнение с изделием – аналогом, сравнение с типовой конструкцией или процессом, оценка на основе опыта специалиста.

Качественными методами является также оценка технологичности по патентоспособности. К недостаткам качественных методов следует отнести необходимость использования справочной литературы для уменьшения роли субъективного фактора. Количественные методы позволяют сравнивать отдельные показатели между собой. Стадия разработки играет существенную роль в определении требований к обеспечению технологичности. Конструктор не может перейти от одного этапа конструирования к другому, не обеспечив требований технологичности. Контроль, над соблюдением технологических параметров, возложен на службы технологического контроля.

Оценку технологичности изделия производят по объективным количественным характеристикам (на основании таблицы «за и против») и коэффициентам технологичности.

Коэффициент класса точности характеризует отношение числа деталей, требующих определенного класса точности к классу точности оборудования. Например, литье в форму обеспечивает седьмой класс точности, токарный станок обеспечивает третий класс точности, координатно-расточной станок обеспечивает первый класс точности.

Коэффициент новизны конструкции изделия K_n определяет конструктивные признаки, обуславливающие преемственность конструкции изделия и определяется отношением числа новых деталей N_n к общему числу деталей N :

$$K_n = \frac{N_n}{N} \quad (2.1)$$

Новизна конструкции требует соблюдения унификации его составных частей, типизации структурных компоновок при проектировании.

Коэффициент сложности конструкции изделия K_{cl} выражают отношением общего числа разработанных деталей N к числу подобных в аналоге N_a

$$K_{cl} = \frac{N}{N_a} \quad (2.2)$$

Сложность конструкции существенно влияет на ресурсоемкость изделия, поэтому она часто учитывается при расчетах трудоемкости разрабатываемого изделия по данным аналога.

Коэффициент использования материала K_{II} в изделии массой M_{II} относительно массы заготовки M_3 насчитывается по формуле:

$$K_{II} = \frac{M_u}{M_3} \quad (2.3)$$

Коэффициент использования прогрессивной технологии K_{II} – кроме отношения массы детали к массе заготовки, может быть определен количеством сразу изготовленных деталей N_u , к общему числу черновых заготовок:

$$K_u = N_u / N \quad (2.4)$$

Масса заготовки с учетом базовых показателей технологичности может быть рассчитана по массе аналога M_a через коэффициент изменения размеров K_p :

$$M_3 = M_a \cdot K_p \quad (2.5)$$

Эрготический показатель - это коэффициент автоматизации K , рассчитываемый отношению машинных затрат энергии к общему объему работ (в человеко-часах или киловаттах):

$$K = \sum \mathcal{E}_{\text{маш}} / (\sum \mathcal{E}_{\text{маш}} + \sum \mathcal{E}_{\text{руч}}) \quad (2.6)$$

Время на изготовление партии деталей $t_{\text{изз}}$ обычно больше времени «чистого» изготовления t_i конкретной детали n_i . Это связано со временем подготовки производства $t_{\text{подг}}$, необходимостью времени на контроль t_k всей партии деталей N и увязки организационно-технических вопросов $t_{\text{ом}}$:

$$t_{\text{изз}} = t_{\text{подг}} + \sum_m t_i / n_i + t_k \cdot N + t_{\text{ом}} \quad (2.7)$$

Сокращению времени изготовления способствует преемственность производства к выпуску подобных деталей.

Для ускорения процесса изготовления несколько деталей может изготавливаться одновременно. Применительно к технологическим процессам, с деталью может осуществляться одновременно несколько операций: сверление, зенковка, нарезка резьбы и т.д. Коэффициент параллельности – это отношение времени параллельной работы над деталью к времени всего процесса.

Коэффициент освоенности K_o – есть отношение числа деталей, приобретенных «на стороне» N_c к сумме всех деталей изделия N без крепежных элементов (болтов, гаек, винтов и т.п.):

$$K_o = \sum N_c / \sum N \quad (2.8)$$

Крепежные элементы являются стандартными изделиями, выпускаемыми метизными заводами для всех предприятий и в расчете параметров не участвуют.

Коэффициент стандартизации изделия K_{cm} учитывает число, стандартных деталей в отрасли $N_{cm.o}$ и число деталей, которые покупаются в других отраслях N_n :

$$K_{cm} = (N_{cm.o} + N_n) / N \quad (2.9)$$

В наибольшей степени технологичности отвечают детали, изготовленные по однократной, прогрессивной технологии. Технологичность изготовления может быть также оценена по коэффициенту повторяемости изготовления детали на данном предприятии.

Коэффициент повторяемости: (K_n) – есть отношение числа оригинальных деталей N_{op} , к числу проекций, необходимых для понимания детали N_{np} :

$$K_n = N_{op} / N_{np} \quad (2.10)$$

В процессе изготовления изделий технологичность может быть оценена по разбросу параметров. В этом случае фигурирует отклонение контролируемого параметра.

Коэффициент стабильности процесса K_c – есть отношение мгновенного отклонения контролируемого параметра δ_m к средне квадратичному отклонению всех параметров δ :

$$K_c = \delta_m / \sum \delta \quad (2.11)$$

Коэффициент настроенности K_n характеризует технологичность в процессе изготовления детали. Он определяется как отношение среднеарифметического значения получаемого параметра δ_{ca} без технологического допуска на отклонение размеров $\delta_{дон}$ к среднеквадратичному отклонению всех параметров δ , включая цену деления измерительных приборов δ_{np} :

$$K_n = (\delta_{ca} - \delta_{дон}) / \delta + \delta_{np} \quad (2.12)$$

Замена одного технического способа изготовления детали на другой (например, литья на штамповку) решается проведением расчета и технико-экономического анализа вариантов по нескольким показателям технологичности. Для поточного производства технологичность его проектирования может быть оценена по коэффициенту прямоотчности K_{npm} :

$$K_{npm} = S_m / (S_m + S_n) \quad (2.13)$$

где S_m – число прямых внутрипроизводственных связей;

S_n – число обратных связей.

В последнее время для расчетов параметров технологичности используются расчетные (чаще вероятностные), графоаналитические и графические методы.

Принятие решения о приоритетности того, или иного технического решения базируется на применении метода балансов и составлении балансовой таблицы «за» и «против». Информация о технологичности объединяется в базу данных.

Информация о технологичности подразделяется на конструкторский, технологический и управленческий уровень. Для успешного функционирования такой сети необходимо квалифицированное кадровое обеспечение в области программирования, а также достаточные технические средства обработки и передачи данных. Основное требование к автоматизированным системам – возможность применения стандартных программ моделирования и оптимизация возможных путей изготовления изделий. Известно достаточно много информационных систем, предназначенных для конкретного анализа на технологичность. Некоторые из них: АСНИ – автоматизация научных исследований, САПР – система автоматического проектирования, АСОИ – автоматизированная система обработки информации, АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

2.3 Языки пользователя для программирования технологических процессов

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

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

2.3.1 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. 2.4 представлены условные обозначения такого языка по данным фирмы MODICON.

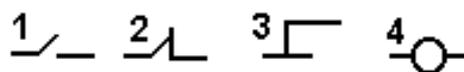


Рисунок 2.4 – Команды языка релейно–контактных символов. 1 – нормально разомкнутый; 2 – нормально замкнутый; 3 – вход в параллельную цепь; 4 – время.

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.

2.3.2 Язык Булевых уравнений

В ряде случаев для отдельного канала оказывается удобным одновременная запись того, что включено и что выключено. В таких случаях удобно пользоваться языком булевых уравнений с использованием операторов типа «и», «или», «не (инверсия)». На рис. 2.5 представлено соответствие булевых и релейных символов.

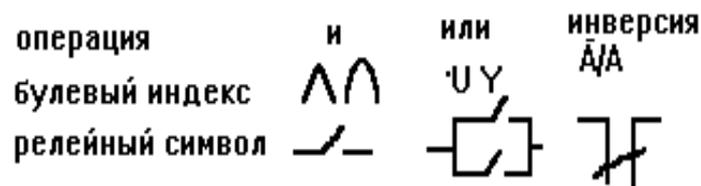


Рисунок 2.5 – Схема соответствия «булевых» и релейных символов

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

В ряде случаев подача команд на проведение последующей операции может производиться по истечении определенного времени или по достижении определенного параметра. 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.

2.3.4 Язык управления типа «КАУТ»

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

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

Язык снабжен ключевыми словами, вводимыми вначале программирования: (ТЕМП – температура, ДАВЛ – давление, НАГРЕВ,

ТАЙМЕР, ВКЛ., ВЫКЛ., ЕСЛИ, ИНАЧЕ, КЛАПАН, ЖДАТЬ и др.). Каждой операции присваивается порядковый номер (кратный пяти для введения дополнительных команд). В начале программы записываются контролируемые величины, регулируемые, включаемые, а также наименование отслеживаемого параметра.

Пример. Программа для установки термического напыления материалов в вакууме.

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 О), текущих операций (индекс М) и собственно напыления (индекс Н) выглядит в следующем виде:

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

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

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

регулируемые: Р1 – нагрев;

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

параметры: П1 – температура; П2 – счетчик.

Пример конкретного исполнения

1. Включение клапана В1.

5. Включение откачки В2

10. ВКЛ. НАГРЕВ

15. ЖДАТЬ 150 (ждать 150 секунд пока нагреется)

20. М 10

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

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

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

2.3.5 Язык программирования измерительной аппаратуры SCPI

Язык SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments – Стандартные команды для программируемых приборов) – это язык приборных команд на основе стандартного кода ASCII международного

стандарта IEEE-488, предназначенный для программирования измерительных приборов.

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;

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

2.3.6 Языки для программирования логических контроллеров

Международной электротехнической комиссией рекомендованы некоторые стандартные языки для программирования контроллеров.

На рис.2.6 представлены языки для программирования контроллеров.

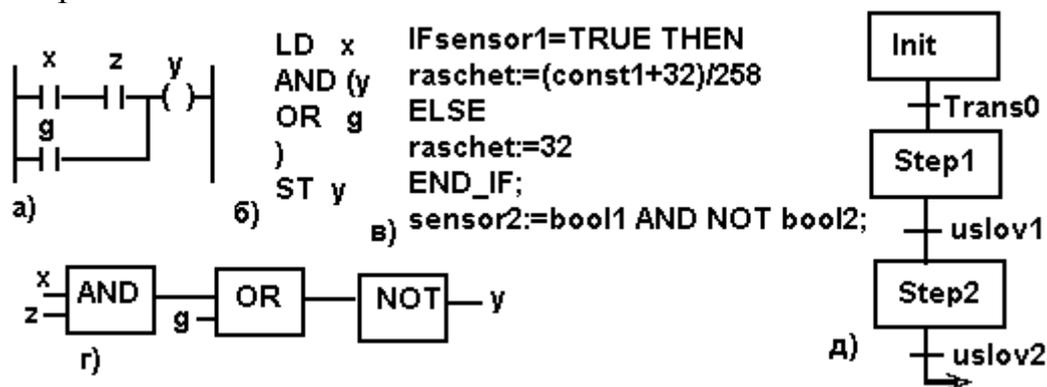


Рисунок 2.6 - Команды языков программирования контроллеров; а) – LD; б) – IL; в) – ST; г) – FBD; д) CFC

2.3.7 Язык LD.

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

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

Язык ST – это аналог языков C, Pascal.

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

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

3 Технология получения высокого вакуума в производстве приборов оптической электроники и фотоники

3.1 Технологические вакуумные системы и установки

Для изготовления приборов различного назначения требуются вакуумные системы с различными функциональными возможностями по скорости удаления газов, по содержанию паров рабочих масел, по предельному давлению и т.д. На рис 3.1 представлены некоторые схемы вакуумных систем различают вакуумные системы и установки следующих типов:

- 1) установки общего назначения (рис.3.1 а);
- 2) централизованные вакуумные системы (форвакуумные насосы вынесены в отдельное помещение или здание);
- 3) системы непрерывного действия (рис 3.1 б);
- 4) системы типа вакуум в вакууме (рис 3.1 в).

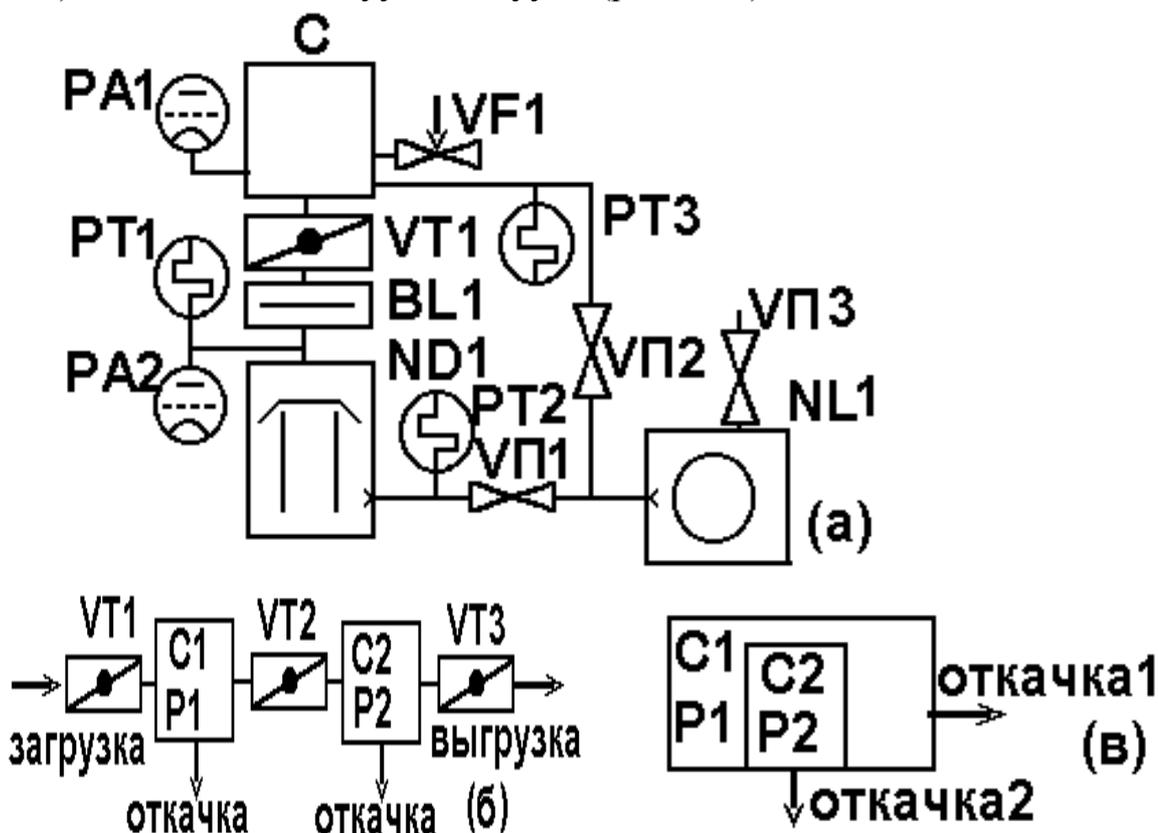


Рисунок 3.1. Типовые схемы вакуумных систем

На рис.3.1 - BL1-ловушка масел; C1, C2- вакуумные камеры, ND1- высоковакуумный насос, NL1- форвакуумный насос, PA1, PA2-датчики

давления; РТ1-РТ3-термопарные датчики, VF1-натекатель газа, VП1-VП-3 - вентили, VT1-VT3- затворы.

Вакуумные системы периодического действия имеют относительно малые габариты, просты в обслуживании и нашли широкое распространение в производстве.

Системы с централизованной откачкой создают более гигиеничные условия работы за счет отсутствия шума, вибрации, у таких систем выше коэффициент использования откачного оборудования. К недостаткам систем с централизованной откачкой следует отнести относительно большие течи вакуумной системы, необходимость аварийной защиты от нерабочих режимов или неквалифицированного обслуживания. Следует отметить, что на крупногабаритных механических форвакуумных насосах труднее получить глубокий вакуум из-за технических трудностей уплотнения по большим поверхностям.

Системы типа вакуум в вакууме широко применяются при необходимости быстрого получения вакуума с минимальным содержанием паров масел.

Повышение производительности, надежности, а также ужесточающие требования к качеству изделий и технологической среды обусловили эволюционное развитие вакуумного оборудования в направлении от установок периодического действия, требующих напуска атмосферы и перезагрузки рабочей камеры каждый технологический цикл, к установкам полунепрерывного и непрерывного действия. Специфические особенности вакуумного оборудования позволяют обеспечить непрерывность технологического процесса лишь с использованием шлюзовых загрузочных систем и дополнительных рабочих камер для проведения вспомогательных операций. Это влечет за собой переход от однокамерных к двух и многокамерным системам. Многокамерные установки, несмотря на высокую стоимость и сложность, обладают рядом существенных преимуществ, обуславливающих их широкое и повсеместное внедрение в производство. Основными их достоинствами являются:

- высокая воспроизводимость технологического процесса, достигаемая установившимися условиями вакуумной среды и предварительной обработкой изделий во вспомогательных рабочих камерах;

- высокая производительность процесса, обусловленная одновременным проведением различных технологических операций в отдельных камерах;

- возможность использования различных физико-химических воздействий в вакуумно-изолированных камерах.

3.2 Типы вакуумных установок

По своему построению установки подразделяются на напылительные, распылительные, ионно-лучевые, ионно-плазменные, смешанные.

Напылительные установки применяются для напыления пленок в вакууме. По типу генератора паров материалов установки делятся на установки с генерацией паров путем прямонакального термического, или электронно-лучевого нагрева (марки УВН, ВУП, ЭЛУ).

Распылительные установки предназначены для распыления материалов путем катодного или высокочастотного распыления или нанесения пленок в разряде или плазме (типа МИР - в магнетронном разряде, типа УРМ - в разряде и плазме). В последнее время успешно развиваются установки смешанного типа (марки КАТОД), которых в одной установке реализованы системы термического и электронно-лучевого испарения, системы высокочастотного и ионно-плазменного распыления материалов.

Отдельную группу составляют высоковольтные лучевые установки для размерной обработки материалов (типа ЭЛУРО), для легирования полупроводниковых материалов ионными потоками (типа ВЕЗУВИЙ), для упрочнения металлов (типа ННВ- 6).

3.3 Расчет вакуумных систем

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

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

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

$$Q = Ag\Omega \quad (3.1)$$

Величины удельного газовой выделения 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 .

$$Q = \kappa N \quad (3.2)$$

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

$$\sum Q = (Ag\Omega)_k + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (3.3)$$

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 $2,4 \cdot 10^{-4}$, т.е

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

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

$$S_n = \sum Q / P_{\text{раб}} \quad (3.4)$$

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

$$S_\phi = \sum Q / P_{\text{вых}} \quad (3.5)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{\text{вых}} = 10$ 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.

Основное уравнение вакуумной техники утверждает, что скорость откачки объекта S_o всегда меньше скорости откачки насоса S_n вследствие конечной пропускной способности вакуумных коммуникаций. Если пропускная способность коммуникаций неизвестна, выбирают скорость насоса с коэффициентом запаса γ :

$$S_n = \gamma S_o, \quad (3.6)$$

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

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

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt \quad (3.7)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q/S_o}{P_2 - \sum Q/S_n} \quad (3.8)$$

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:

$$t = V / S_o (\ln P_1 / P_2) \quad (3.9)$$

При откачке газа в диапазоне от атмосферного давления (10^5 Па) 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:

$$t = 8V / S_n \quad (3.10)$$

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.

3.4 Согласование откачных средств

Из закона сохранения энергии следует: сколько газа поступает в систему (например, на вход диффузионного насоса), столько должно и откачиваться (в частности с выхода диффузионного насоса).

Величина потока на входе диффузионного насоса Q определяется произведением входного давления (P_{ex}) на скорость откачки диффузионного насоса $S_{дн}$:

$$Q = P_{ex} S_{дн} \quad (3.11)$$

В свою очередь форвакуумный насос со скоростью откачки на форвакууме S_{ϕ} принимает весь поток от диффузионного насоса и управляется его выходным давлением $P_{\text{вых}}$.

$$Q = P_{\text{вых}} S_{\phi} \quad (3.12)$$

Необходимая скорость откачки механического насоса определится соотношением:

$$S_{\phi} = Q / P_{\text{вых}} \quad (3.13)$$

Чем больше давление на выходе высоковакуумного насоса, тем более плотный газ, и тем меньшей мощности нужен механический насос для поддержания выходного давления. Выходное давление для подавляющего числа традиционных диффузионных насосов равно 10 Па. Однако имеются новые диффузионные насосы с большим выходным давлением (20 Па – Н400/7000, 35 Па – НД - 630 Э). На практике согласование проводят графически, строя зависимости производительности откачных средств от давления. На рис.3.2 представлен вариант графического согласования диффузионного и механического вакуумных насосов.

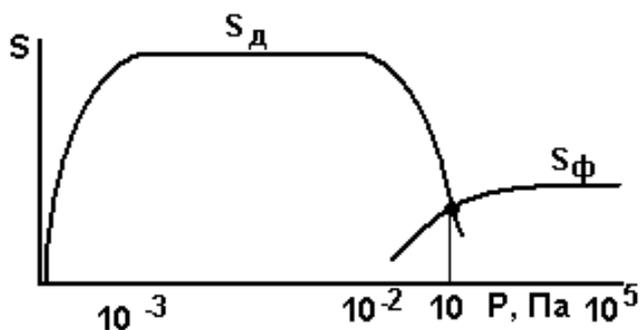


Рисунок. 3.2 – Графическое согласование вакуумных насосов

В точке согласования выходное давление высоковакуумного насоса равно входному давлению форвакуумного насоса, а скорость откачки форвакуумного насоса меньше паспортной, поскольку она зависит от давления.

3.5 Измерение парциальных давлений

Для измерения парциальных давлений известны мас - спектрометры, работающие на принципе разделения масс ионов в магнитном поле, на принципе зависимости ускорения иона от массы и др.

На рис. 3.3 представлена схема спектрометра с магнитной разверткой.

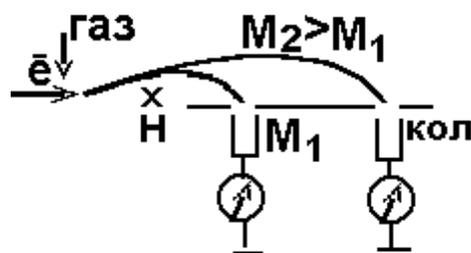


Рисунок 3.3 – Схема спектрометра с магнитной разверткой

Спектрометр состоит из ионизатора исследуемого газа, пролетной камеры, помещенной в магнитное поле и приемного коллектора. Электроны с термокатода ионизируют исследуемый газ. Ионы, влетая в пролетную камеру, искривляют свою траекторию в магнитном поле под действием силы Лоренца. Радиус искривления r обратно пропорционален массе иона M и определяется соотношением:

$$r = 1 / B[2MU / e], \quad (3.14)$$

где B – индукция магнитного поля;

U – разность потенциалов на пути пролета ионов.

Изменяя разность потенциалов и напуская известные газы, производят калибровку спектрометра по массам.

По подобному принципу устроены мас - спектрометрические течеискатели ПТИ-6, ПТИ-7, ПТИ-10. При обдуве вакуумной системы гелием течеискатель позволяет отыскивать малейшие негерметичности. Разрешающая способность подобного класса приборов относительно невелика ($M / \Delta M = 30$). Чувствительность ПТИ-10 составляет 10^{-10} Па м³/с при давлениях от 10^{-2} до 10^{-9} Па. В последнее время появились водородно-гелиевые спектрометры-течеискатели СТИ-11, СТИ-12.

В практике вакуумных исследований состава газа широкое применение нашел измеритель парциальных давлений омегатронного типа (ИПДО), у которого произведение разрешающей способности R на массовое число M – есть величина постоянная для всего диапазона измерений:

$$RM = const. \quad (3.15)$$

Это позволяет оперативно определять род газа (M) и разрешающую способность по массам ($\Delta M = M/R$) в широком диапазоне массовых чисел, поскольку для реперной точки $M=18$ (H_2O) разрешающая способность прибора постоянна $R=20$. На рис. 3.4 представлена схема датчика масспектрометра.

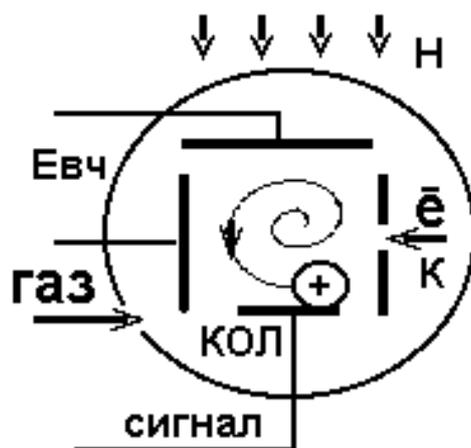


Рисунок 3.4 – Схема датчика омегатрона

В датчике помещены накаливаемый катод K и пластины для создания электрического поля. Датчик помещается между полюсами постоянного магнита с напряженностью H и индукцией B и подсоединяется к вакуумной системе. При обеспечении в объеме датчика давления менее 10^{-2} Па включается термокатод и на пластины подается высокочастотное напряжение $E_{вч}$ до 5 В с изменяющейся частотой f от единиц кГц до 2,5 МГц. Пробный газ подается в датчик, где подвергается ионизации. Ионы начинают вращаться под действием электрического и магнитного полей. Радиус орбиты ионов обратно пропорционален их массе. Масса M , отбираемых коллектором (КОЛ) ионов, обратно пропорциональна частоте вращения ионного облака и определяется выражением:

$$M = c \cdot B / f, \quad (3.16)$$

где c – постоянная прибора; B – индукция магнитного поля прибора; f – частота развертки генератора. (Для ИПДО-1 $c = 15,2$; $B = 0,26$ Тл; $f = 0,1$ кГц–2,5 МГц).

Регулируя частоту генератора можно отбирать на коллекторе ионы определенной массы, а по уравнению (3.16) проводить расшифровку спектра. Сигнал с коллектора КОЛ подается на усилитель и записывается на ленту самописца. Разрешающая способность омегатрона R определяется отношением:

$$R = M / \Delta M. \quad (3.17)$$

Расшифровка спектра проводится в два этапа. На первом этапе расшифровка проводится по формуле (3.16) путем подбора соединений и подсчета их масс. На втором этапе по таблице спектральных характеристик определяется интенсивность и вероятность появления массы в спектре.

На рис. 3.5 представлен фрагмент записи спектра масс с расшифровкой по массам.

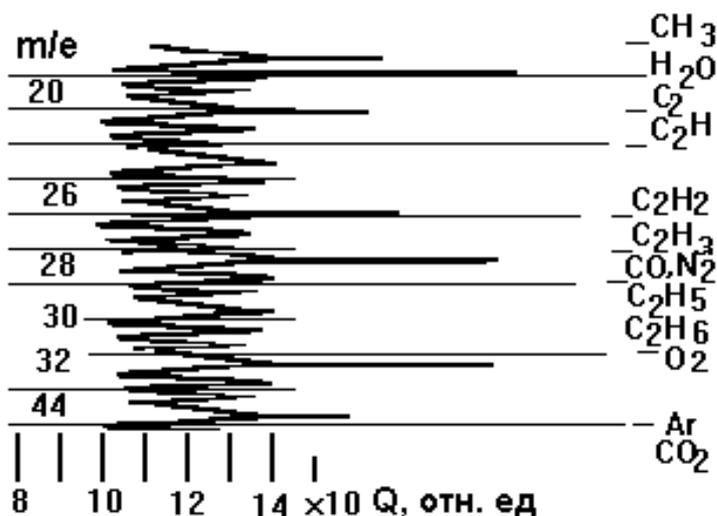


Рисунок 3.5 – Вид диаграммы с расшифровкой спектра

На рис. 3.6. представлена схема времяпролетного масспектрометра (хронотрона). Он содержит стартовую и финишную сетки.

В хронотроне сигнал прихода ионов со стартовой сетки поступает на ждущий осциллограф. Скорость пролета ионов между сетками пропорциональна массе иона и его энергии. По истечении некоторого времени (3-10 мкс) сигнал с финишной сетки свидетельствует о скорости прихода иона. Достоинство подобного масс-спектрометра в отсутствии магнитных полей. Разрешающая способность масс-спектрометра достигает 200. Спектрометр в большей мере удобен для анализа сорта ионов металлов.



Рисунок 3.6 – Схема времяпролетного масспектрометра (хронотрона)

3.6 Алгоритм включения и выключения типовых вакуумных установок с масляными средствами откачки

Алгоритм включения установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) составить вакуумную схему установки;
- 2) закрыть все вентили;

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

При работе категорически запрещается оставлять установку без присмотра, отвлекаться на посторонние дела или проводить работы, не предусмотренные программой процесса.

Алгоритм выключения установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

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

3.7 Практические рекомендации по поиску негерметичности вакуумных систем

Развитие технологий с применением электронных, ионных пучков и плазмы сдерживается тем, что при работе вакуумной системы иногда возникают условия, приводящие к ухудшению вакуума, что ограничивает длину свободного пробега частиц. В числе наиболее часто встречающихся ситуаций следует отметить нарушение герметичности вакуумной системы, газовыделения деталей, помещенных в вакуумную камеру или неисправность откачного средства. Наиболее частыми местами течей являются места проведения профилактических или монтажных работ. Обычно поиск течей следует начинать со снятия распределения давления по последовательно подключаемым элементам вакуумной системы, начиная от откачного средства. На рис. 3.7 представлены варианты распределения давления во времени и характерные для этих случаев неисправности.



Рисунок 3.7 – Кривые откачки для анализа вакуумной системы

Анализ давления проводится как при откачке системы, так и после ее выключения. В случае течи зависимости давления повторяют друг друга. В случае обезгаживания системы, которое начинается обычно с давления 10 Па, кривые изменения давления при откачке и выключении не совпадают. Величины потоков натекания или десорбции из анализа кривых откачки рассчитываются по соотношению:

$$Q = V\Delta P / \Delta t, \quad (3.18)$$

где V – объем измеряемой коммуникации.

С другой стороны поток, откачиваемый вакуумным насосом, определяется соотношением:

$$Q = P \cdot S \quad (3.19)$$

где P – давление в вакуумной системе, S – скорость откачки насоса. Сравнение потоков натекания и откачки позволяет определить место течи.

Среди многообразия методов поиска течи наибольшей популярностью пользуются следующие методы.

- 1) метод опрессовки;
- 4) манометрический метод;
- 5) методы с использованием течеискателей.

Метод опрессовки применяется для поиска грубых течей ($Q > 0,05$ тор · л/с). В этом случае натекание происходит с характерным шипением. Для опрессовки используется мыльная пена и компрессор. Иногда в качестве компрессора используется выхлоп вакуумного насоса с дозированным натеканием. Избыточное давление не должно превышать 1,5 атм.

Манометрический метод поиска течи получил широкое распространение в экспериментальной практике. Метод основан на изменении давления при смазывании подозрительных мест ваткой, пропитанной в жидкости. Жидкость, испаряясь в вакуум, повышает давление, что фиксируется датчиком давления. Если течь мала, то она забивается жидкостью и давление в вакуумной системе уменьшается. Чувствительность метода составляет 10^{-5} Пам³ /с. Для повышения чувствительности иногда используется метод накопления течи, при

котором подозреваемая течь отсекается от средств откачки на некоторое дозированное время, а затем фиксируется изменение давления.

Поиск течей течеискателями стал популярным в последнее время. На производстве появился большой ассортимент течеискателей и систем автоматизированного контроля вакуума с применением ЭВМ. Область их применения - это системы высокого и сверхвысокого вакуума.

В последних разработках течеискателей осуществлен переход от стационарных установок к переносным марки БГТИ карманным вариантам марки ТИМ-1 с автономным питанием. Расширение набора используемых газов (фреон, шестифтористая сера, четыреххлористый углерод) позволило повысить чувствительность за счет регистрации электроотрицательных ионов. Успешно развиваются течеискатели марки ВДО с мембранами избирательной проводимости, а также с сорбционными капсулами.

4 Межфазные взаимодействия в технологии формирования приборов оптической электроники и фотоники

4.1 Межфазное равновесие процессов

Процессы, протекающие без химических реакций, называются фазовыми превращениями. К ним относятся: плавление, затвердевание, испарение, и т.д. Основной характеристикой фазового превращения является температура, при которой фазы находятся в равновесии. Эта температура зависит от давления. Состояние равновесия определяется связью между равновесной температурой и равновесным давлением. Например, за температуру испарения принята та температура, при которой давление паров равно 1 Па. Для определения направления равновесия достаточно вместо давления подставлять константу равновесия K_p .

Газообразные вещества, близкие к сжижению, называют парами. Связь давления пара с температурой хорошо просматривается в диаграмме давление- температура (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Диаграмма зависимости давления от температуры

В точке b вещество находится в твердом состоянии. Кривая c соответствует переходу в пар. Кривая a соответствует сохранению твердого состояния. В тройной точке A вещество находится в равновесии

(условно сразу в трех состояниях: жидкое, твердое, газообразное). Отрезок АВ зависит от типа вещества. Точка В называется солидус, точка А – ликвидус (когда ликвидируется жидкое состояние). Точки А и В могут быть совмещены. Переход по кривой вс соответствует сублимации. Вне тройной точки А совместимы только две фазы. Давление пара над кривой с называется насыщенным паром, т.к. незначительное снижение температуры приводит к переходу пара в жидкость и обратно.

4.2 Теплота, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, свободная энергия

Простейшая термическая характеристика процесса – теплота g . Количество теплоты g , приданное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии ΔU и производство работы A .

$$g = \Delta U + A \quad (4.1)$$

Тепло, передаваемое системе при постоянном давлении, расходуется на приращение функции теплосодержания – энтальпии (H).

$$H = U + PV \quad (4.2)$$

На этом основании можно определить теплоемкость при постоянном давлении C_p или теплоемкость при постоянном объеме C_v

$$C_p = \frac{dH}{dT} \quad (4.3)$$

$$C_v = \frac{dU}{dT} \quad (4.4)$$

Для одноатомных газов (благородные газы, пары металлов) $C_v=3$ кал/моль·град, соответственно $C_p = 5$ кал/моль·град. Для двухатомных газов $C_v = 5$ кал/моль·град, соответственно $C_p = 7$ кал/моль·град.

Из анализа выражения для энтальпии и теплоемкостей следует, что разность теплоемкостей для газов при постоянном давлении и постоянном объеме равна универсальной газовой постоянной R .

$$C_p - C_v = R \quad (4.5)$$

При нагревании твердых тел, работа расширения незначительна по сравнению с изменением внутренней энергии, и составляет

$$C_p - C_v \approx 0,3 \text{ кал/моль} \cdot \text{град}$$

В рамках термодинамики критерием равновесия может быть функция, при которой увеличение количества вещества приводило бы к такому же увеличению вероятности состояния, и эта функция принимала бы максимальное значение. С этой целью вводится понятие функции энтропии S . При возрастании вероятности состояния увеличивается и функция S , значение которой при равновесии максимально.

Связь между теплотой и изменением энтропии имеет простое выражение:

$$\Delta S = \frac{g}{T} \quad (4.6)$$

Изложенное выше уравнение представляет собой второй закон термодинамики. Обычно удельная теплота фазового перехода (плавление, испарение, возгонка и т.п.) приводится в соответствующих справочниках.

Например, изменение энтропии при нагревании моля воды от 0 до 100° С при постоянном давлении составит:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_{273}^{373} dS = \int_{273}^{373} \frac{C_p}{T} dT = S_{H_2O, 373}^0 - S_{H_2O, 273}^0 = C_p \ln \frac{373}{273} = \\ &= 5,62 \text{ кал/град}\cdot\text{моль} \end{aligned}$$

Свободная энергия. В изолированных системах энтропия может только увеличиваться и при равновесии достигает максимума. Она используется для суждения о направлении процесса. Однако на практике большинство процессов неизолированных и связано с изменением давления, объема или температуры. Полезная работа механизма может быть получена только при обратимом процессе. Внутренняя энергия U состоит из двух частей: свободной энергии F и связанной TS .

$$U = F + TS \quad (4.7)$$

Часть внутренней энергии U , которая при обратимом изотермическом процессе может быть превращена в работу, называется свободной энергией F . Если в системе меняется и температура и давление, то состояние такой системы характеризуют изменением изобарно-изотермного потенциала ΔZ . (Часто свободную энергию обозначают буквой G , или просто называют изобарным потенциалом):

$$\Delta Z = \Delta(F + PV) = \Delta U - T\Delta S + PV = \Delta H - T\Delta S = RT \ln P \quad (4.8)$$

В табл.4.1 приведены некоторые термодинамические величины для 20° С.

Таблица 4.1 – Термодинамические величины для 20° С

Вещество	Состояние	ΔH , ккал/моль	ΔZ , ккал/моль	S, кал /град · моль
H ₂ O	Газ	-57,7	-54,6	45,1
H ₂ O	Жидкое	-68,3	-56,6	16,7
CO	Газ	-26,4	-32,8	47
NO	Газ	+21,6	+20,7	50,3
Fe ₂ N	Твердое	-0,9	2,6	24,2

Следует отметить, что величина ΔH равна теплоте реакции образования соединения. Для диссоциации соединения (разложения)

необходимо учитывать теплоту диссоциации, то есть энергию, которую необходимо затратить, чтобы разъединить молекулу на атомы. В частности для углеводородов энергия одной связи С – Н и С – С равна 99 ккал.

Величина изобарного потенциала ΔZ может меняться от $+\infty$ до $-\infty$, проходя через нулевое значение при равновесии. Если $\Delta Z < 0$, то реакция должна протекать в сторону образования соединения, если $\Delta Z > 0$, то будет происходить диссоциация. Таким образом, изобарный потенциал может определяться соотношением:

$$\Delta Z = -RT \ln K_p \quad (4.9)$$

Между $\lg K_p$ и обратной абсолютной температурой ($\frac{1}{T}$) существует приближенно линейная зависимость. (Рис.4.2).

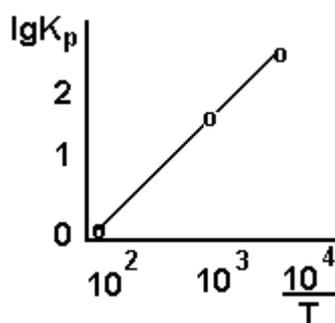


Рисунок 4.2 – Зависимость логарифма константы равновесия от обратной температуры

По величине тангенса наклона прямой линии может быть найдена теплота реакции ΔH .

$$\Delta H = \operatorname{tg} \alpha \cdot R, \quad (4.10)$$

где R – универсальная газовая постоянная.

4.3 Фазовая диаграмма

Для прогнозирования возможных соединений для некоторых материалов составлены фазовые диаграммы, в которых по оси ординат отложена температура, а по оси абсцисс процент поглощенного пленкой газа. На рис. 4.3 а, представлен фрагмент фазовой диаграммы. Следует отметить, что фазовая диаграмма является довольно сложным документом, иллюстрирующим многообразие фазовых переходов. В ряде случаев на практике пользуются понятием изобарного потенциала, определяемого выражением:

$$\Delta Z = -RT \ln P_i, \quad (4.11)$$

где i - обозначает род газа.

На рис.4.3 б представлена диаграмма изобарного потенциала применительно к напылению титана.

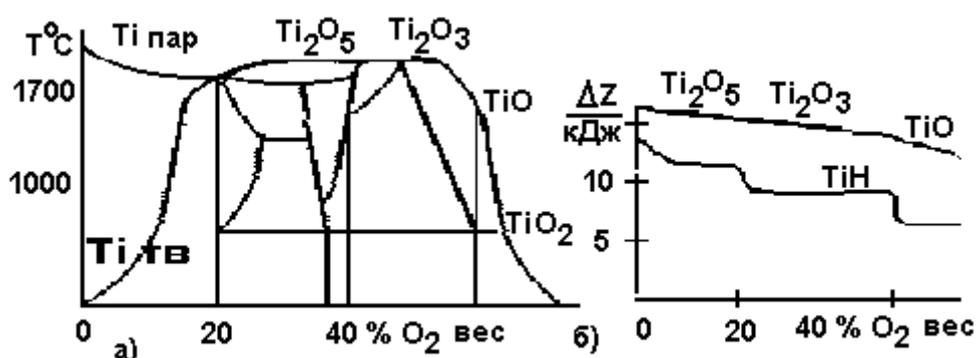


Рисунок 4.3 – а) фрагмент фазовой диаграммы; б) диаграмма изобарного потенциала

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

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

4.4 Применение теории межфазных взаимодействий при формировании высококачественных пленок

Наиболее высококачественные пленки для электронных приборов получают методом термического испарения материалов в вакууме. Процесс испарения материалов в вакууме связан с десорбцией различных материалов вакуумной системы в зависимости от истории ранее проводимых операций. Это приводит к многовариантности протекания газофазных реакций с образованием различных трудно прогнозируемых соединений в составе пленки. В результате воспроизводимость параметров пленок может носить вероятностный характер.

По данным масс-спектрометрии в остаточной атмосфере типовой вакуумной установки основными компонентами являются: вода (8 %), азот (20-30 %), углерод и его производные (40-60 %). Этот состав несколько меняется в зависимости от используемых материалов и методов их обработки. На рис. 4.4 представлена зависимость интенсивности газовой выделений наиболее преобладающих компонент при линейном росте температуры.

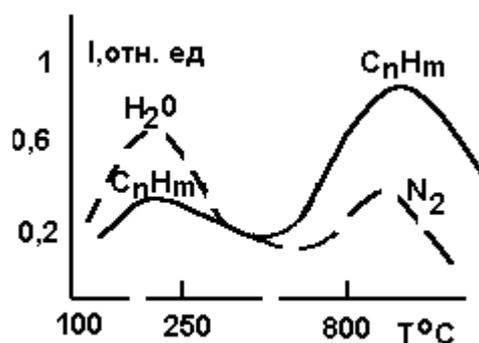


Рисунок 4.4 – Зависимость интенсивности газовой выделенности от температуры

При повышении температуры поток газовой выделенности возрастает в следующей последовательности: углекислый газ, азот, окислы азота, углеводороды. Характер зависимости газовой выделенности в диапазоне температур до 250°C объясняется разложением поверхностных органических соединений и достижением энергии активации адсорбционной связи. Дальнейшее увеличение температуры способствует приоритетной десорбции углеводородов и азота, а также присутствием термически ионизированных атомов на фоне общего роста потока газовой выделенности. Наибольшее высокотемпературное газовое выделение наблюдается при температуре близкой к 800°C , что связано с достижением энергии хемосорбции атомов и разложением нестабильных фаз, сформировавшихся в процессе напыления.

В первом приближении для формирования определенной газовой фазной реакции на поверхности пленки необходимо соотношение между температурой, давлением, концентрацией и временем проведения процесса (соотношение Гиббса).

Вероятность газовой фазной реакции определяется соотношением:

$$\varphi = \left(e^{\frac{\Delta H}{RT}} \right) e^{\frac{\Delta S}{RT}}, \quad (4.12)$$

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

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

В зависимости от энергетического состояния системы возможно протекание определенной газовой фазной реакции распыляемых материалов с формированием нитридов, карбидов, окислов, гидридов и т.д. (Например, для титана соответственно TiN, TiC, TiO, TiH). Направление проходящей на подложке реакции определяет количество поглощенного газа Q по соотношению:

$$Q = \kappa St(P_1 - P_2) / \ln(P_1/P_2), \quad (4.13)$$

где κ – константа реакции ($\kappa=0,2$ при $T=300^\circ\text{C}$; $\kappa= 2$, при $T=1000^\circ\text{C}$);

S – площадь подложки; t – время процесса;

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

P_i – давление i -той компоненты в составе газа.

В табл. 4.2 приведены отдельные значения количества поглощенного газа при формировании некоторых соединений титана для температуры испарения 1700°C

Таблица 4.2 – Количество поглощенного газа при испарении титана

Соединение	Карбиды	Оксиды	Нитриды	Гидриды
Qx10-8 Вт	200	389	250	160

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

$$Q = VdP / dt \quad (4.14)$$

где V – объем камеры.

5 Технология подготовки поверхности оптических материалов к технологическим процессам (очистка)

5.1 Вакуумная гигиена и очистка материалов

Окружающая среда существенным образом влияет на качество изготовления электронных приборов. Для изготовления приборов необходимо соблюдать чистоту, влажность, микроклимат, минимальное присутствие персонала. Важным является срок хранения материалов и полуфабрикатов. По степени чистоты и контролируемости атмосферы здания делят на категории:

1 категория. К этой категории относятся сборочные цеха. В их состав входят белые залы и боксы с отсосом пыли из вентиляционных решеток, встроенных в пол. Запыленность таких залов не должна превышать 20 пылинок на 1 литр воздуха. Обязательным является переодевание и переобувание персонала;

2 категория. К этой категории относятся подготовительные к сборке цеха. Запыленность таких цехов не должна превышать 300 пылинок на 1 литр воздуха. Кратность обмена воздуха в таких помещениях должна быть не менее 10;

3 категория - это заготовительные цеха.

Для очистки воздуха нашли широкое применение полимерные, слоистые фильтры, устанавливаемые на входах в помещения. Внутри помещений применяются электростатические фильтры и фильтры на основе коронного разряда.

5.2 Общая схема очистки материалов для приборов оптической электроники и фотоники

Для очистки применяются жидкостные и сухие методы с использованием физических и химических методов травления. *Селективность* характеризует избирательность воздействия химически активных сред на материал. *Изотропность* характеризует: насколько травление вдоль поверхности, отличается от травления вглубь материала. *Показатель анизотропии* характеризует отношение скорости травления материала вглубь к скорости травления по поверхности. На рис. 5.1 представлена общая схема очистки электронных приборов. В каждой конкретной ситуации в общую схему могут добавляться или исключаться отдельные элементы.

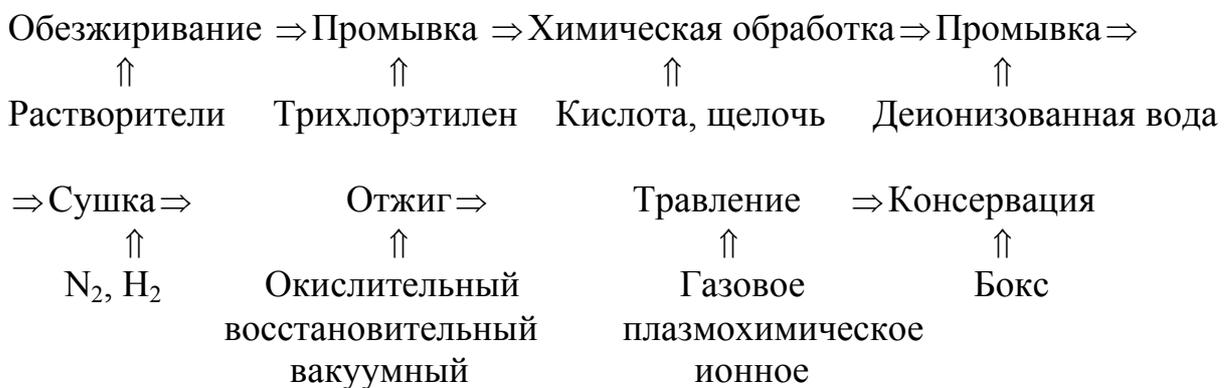
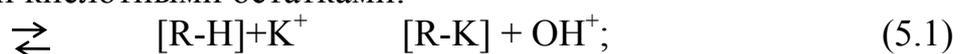
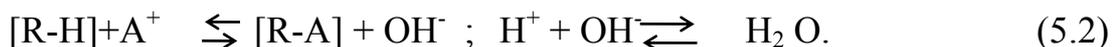


Рисунок 5.1 - Общая схема очистки деталей

Обезжиривание. Наличие жиров препятствует смачиваемости изделий при химической обработке. Индикатором наличия масел является ультрафиолетовое излучение. В последнее время обезжиривание сочетается с операциями промывки и химического травления, проводится с помощью горячих щелочей и моющих средств, с поверхностно-активными веществами. Перемешивание растворов проводится с помощью ультразвуковых колебаний. Находят широкое распространение электрохимические методы очистки и травления как на постоянном токе (с плотностью тока до 100 А/ дм²), так и импульсных токах (порядка килоампер и длительностью несколько микросекунд).

Очистка воды. Вода для технологических целей должна иметь большое удельное сопротивление, не иметь цвета и запаха. В наибольшей степени для этого подходит дисциплированная вода двойной перегонки. В последнее время в больших количествах получают, так называемую, *деионизованную воду* путем обработки водопроводной воды гранулированными ионообменными смолами. В процессе ионного обмена происходит связывание катионов (K⁺) и анионов (A⁻) с примесями, радикалами (R) и кислотными остатками:





Следует отметить, что деионизованная вода имеет ограничения к обработке полупроводниковых материалов. В этом случае используются мембранно-молекулярные фильтры из инертных материалов (в частности из фторопласта). Срок службы деионизованной воды ограничен 1-2 месяцами.

Очистка отжигом. Отжигом достигается разложение органических остатков и их удаление, либо окисление поверхности (окислительный отжиг) и удаление окислов механическими способами. Для ряда материалов, таких как W, Mo, Ni, отжиг проводится в печах с напуском водорода (восстановительный отжиг). В ряде случаев отжиг проводится в вакууме (вакуумный отжиг). Температура отжигов близка к температуре красного каления (600-800⁰ С) и составляет величину:

$$T_{от} = 0,75 T_{пл} \quad (5.3)$$

где $T_{пл}$ - температура плавления.

Исключение составляют материалы, для которых при температуре более 700⁰ С наблюдается *рекристаллизация* (например в вольфраме начинают расти кристаллы WC). В этом случае температура отжига не должна превышать температуру рекристаллизации. Чаще материалы отжигают в восстановительной среде (в водороде или водородосодержащих смесях). Температура восстановительного отжига определяется соотношением:

$$T_в = 0,5 T_{пл} \quad (5.4)$$

Время отжига является экспериментально-расчетной величиной и составляет для большинства процессов 1-2 часа.

Газовое травление. Газовое травление применяется для очистки кремниевых элементов в среде горячих газов HF, HCl, HBr при температурах 600- 100⁰ С. Скорость такого травления составляет около 1 мкм/мин.

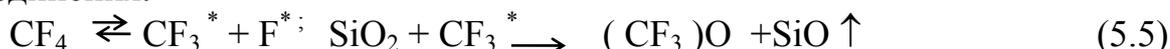
Особенности очистки пластмасс. Пластмасса представляет собой прессованный из гранул материал с возможными органическими и неорганическими включениями. Пластмасса требует более тщательного обезжиривания и активации поверхности. Активация поверхности пластмасс заключается в поочередном промывании с щелочах и кислотах (так называемое декапирование) с последующей промывкой в дисциплированной воде и горячей сушкой.

5.3 Электрофизические методы очистки

Традиционные “мокрые” методы очистки имеют ряд недостатков. Основные из них: насыщение поверхности кислотными и щелочными остатками, вредные экологические соединения, избирательность (*селективность*) травления различных материалов, недостаточное отношение скорости травления вглубь к скорости травления вдоль материала (*показатель анизотропии*). Часть материалов нечувствительны

к кислотам и щелочам. В последнее время успешно развиваются методы очистки и травления материалов в вакууме с применением разрядов и плазмы.

Плазмохимическая очистка. Системы плазмохимической очистки представляют собой вакуумную камеру с электродами, системой подачи галогеносодержащих газов (на основе фтора, хлора и д.р.) и подложкой для материала. При обеспечении в камере давления 1-10 Па и подаче на электроды потенциала до 10 кВ или напряжения сверхвысокой частоты (СВЧ), между электродами возникает разряд. В разряде происходит разложение молекул напускаемого газа на активные частицы, которые производят химические реакции с травимым материалом, образуя летучие соединения.



На рис. 5.2 представлены некоторые системы очистки и травления.

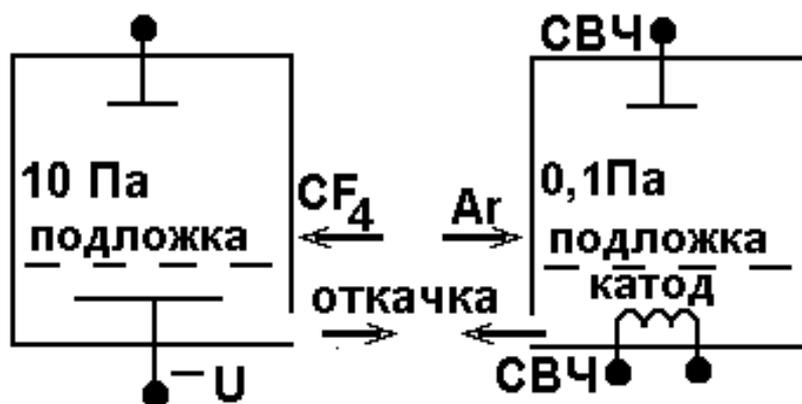


Рисунок 5.2 - Системы плазменной очистки

Достоинства плазмохимического травления перед химическим травлением состоит в возможности расширения ассортимента обрабатываемых материалов, в отсутствии необходимости финишной обработки, в возможности автоматизации процесса с применением ЭВМ.

По экологическим соображениям в последнее время очистка и травление проводятся в среде инертного газа с применением СВЧ излучения. Частота СВЧ колебаний выбирается около 12,5 МГц, что близко к частоте поверхностных колебаний атомов. В ряде случаев система содержит накаливаемый катод для генерации электронов, способствующих ионизации газа. Достоинства применения СВЧ излучения состоит в возможности обработки диэлектрических материалов, в отсутствии зарядки поверхности. В числе недостатков систем с СВЧ излучением следует отметить небольшую скорость распыления (~5 нм/мин), перепыление материала на стенки камеры, необходимость защиты от СВЧ излучения.

Ионная очистка материалов в тлеющем разряде. В ряде электрофизических установок очистка материалов проводится с помощью

тлеющего разряда, зажигаемого в вакуумной камере при напряжениях от 0,5 до 10 кВ и токе до нескольких ампер. Важно, чтобы очищаемая деталь (мишень) находилась под отрицательным потенциалом, что дает возможность бомбардировать поверхность ионами. Обработка поверхности осуществляется при давлениях 1-10 Па. В качестве рабочих газов используется воздух или инертные газы (чаще аргон). Ионная очистка обладает хорошими качественными показателями, но имеет особенности, присущие всем газоразрядным системам:

1) все параметры разряда взаимосвязаны. Скорость обработки зависит от вольтамперной характеристики разрядной системы, расположения электродов, рода и расхода газа и т.д.;

2) для каждого материала существует максимальный коэффициент распыления равный отношению числа выбитых атомов к общему числу ионов на мишень;

3) напуск рабочего газа требует увеличения производительности откачных средств. Кроме того, наличие разряда стимулирует процессы газовыделения из стенок вакуумной камеры;

4) при обработке полупроводниковых материалов возможна генерация дефектов. В связи с этим напряжение обработки выбирается минимальным, однако, это стимулирует полимеризацию масел на обрабатываемых поверхностях. При обработке полупроводников имеет место неодинаковая скорость обработки по направлениям кристаллографических осей.

5.4 Контроль качества очистки

Контроль качества очистки производится из анализа углов смачивания капли травителя. Если капля расплывается на изделии, то оно чистое. Если капля травителя катается по изделию - то оно грязное. На стеклянных изделиях качество очистки проверяется по конденсату влаги при легком дыхании на стекло. Стабильность границы тумана свидетельствует о грязном изделии.

5.5 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 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. Активные частицы получаются в результате диссоциации молекул в плазме газового разряда.

Механизмы ионного травления

Различные материалы травятся по-разному. Существует более десятка теорий, поясняющих особенности ионного травления. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются три механизма разрушения поверхности под действием ионной бомбардировки: механизм прямого выбивания атомов, механизм смещения атомов и механизм тепловых пиков. На рис. 5.3 представлены схемы указанных механизмов.

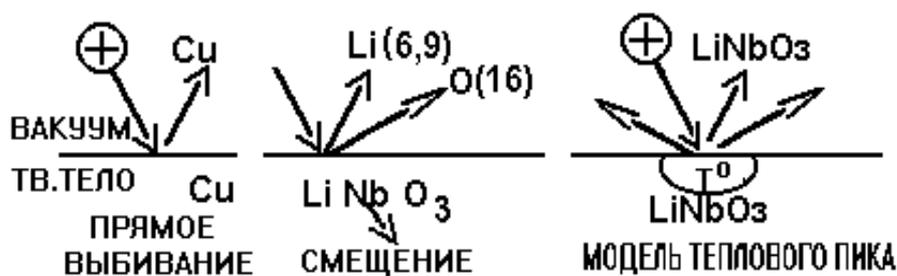


Рисунок 5.3 - Механизмы распыления поверхности под действием ионной бомбардировки

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.

Пример. Технология подготовки поверхности для изготовления оптического волновода.

Для получения хорошей адгезии и воспроизводимости электрофизических свойств нанесенных металлических пленок поверхность волновода 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 деионизированной или дистиллированной воде. Использование ультразвуковой обработки позволяет удалить с поверхности подложек остатки масел и мастик после шлифовки и полировки. 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 волновода.

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.

6 Методы формирования нанослоев для приборов оптической электроники и фотоники

6.1 Физико-химические процессы получения наноматериалов

Наноматериалы – это материалы, полученные манипуляцией не веществом (микротехнологии), а манипуляцией отдельными атомами. Приборами на нанотехнологиях являются квантовые лазеры коротковолнового диапазона длин волн, светоизлучающие коротковолновые диоды, ячейки солнечных батарей, одноэлектронные СВЧ органические транзисторы.

В нанотехнологиях наметилось три направления. 1- изготовление объемных электронных схем, соизмеримых с размерами молекул, 2-

разработка нанодвигателей размером с молекулу, 3- непосредственная манипуляция атомами и молекулами с целью получения эффектов прыжковой проводимости, запоминания информации голограммами при световом сканировании и т.д. При переходе к наномасштабам, на первый план выходят квантовые свойства рассматриваемых объектов.

С позиций квантовой механики электрон рассматривается и как частица, и как волна, описываемая волновой функцией. Распространение волны контролируется эффектами квантового ограничения и возможностью одноэлектронного туннелирования через потенциальный барьер в условиях кулоновской блокады. Перенос заряда через барьер осуществляется порциями, равными заряду одного электрона. Управление формированием проводится с помощью нанолюминесценции, наноядерного магнитного резонанса, одноточечной спектроскопии.

Квантовая яма – это структуры, у которых в одном направлении размер составляет несколько межатомных расстояний, а в двух других – макроскопическую величину. Структура квантовой ямы представляет собой «сэндвич», состоящий из тонкого монослоя полупроводникового материала А, расположенного между двумя слоями другого полупроводника В. Квантовая яма представляет собой минимальный потенциальный барьер, резонансные условия которого контролируются третьим электродом. Существуют более сложные структуры из периодически повторяющихся слоев В/А/В/А... Такие структуры называются многократно повторяющимися квантовыми ямами. Первыми приборами на квантовых ямах явились туннельные транзисторы, представляющие собой двухбарьерный диод на квантовых ямах. Если представить один бит как наличие или отсутствие одного электрона, то схема памяти емкостью 100 Гб разместится в кристалле площадью 6 см². Разработано семейство цифровых переключающих приборов на атомных и молекулярных шнурах. Разработаны логические релейные элементы НЕ – И, ИЛИ – ИЛИ, ДА – НЕТ. Размер такой структуры ~ 10 нм, а рабочая частота ~ 10¹² Гц.

Квантовые точки – это структуры, у которых во всех трех направлениях размеры составляют несколько межатомных расстояний. Квантовой точкой называют частицу, размер которой порядка волны Де – Бройля. Это гигантские молекулы из 10³ – 10⁵ атомов. (1 нм содержит не больше 100 атомов). Молекулы создаются из обычных неорганических материалов (Si, InP, CdSe, GaAs). Минимальный размер квантовой точки определяется размером D_{\min} , при котором хотя бы один электронный уровень существует в квантовой точке. Значение энергии разрыва в зоне проводимости ΔE связано с размером квантовой точки соотношением:

$$\Delta E = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{\pi}{D_{\min}} \right)^2 \quad (6.1)$$

где h – постоянная Планка, m_e – масса электрона.

Для систем на основе арсенида галлия минимальный размер квантовой точки должен быть не менее 4 нм. Если расстояние между энергетическими уровнями становится соизмеримым с тепловой энергией (kT), то размерное квантование может быть реализовано при условии, если эта энергия меньше энергии первого уровня квантования.

$$kT \leq E_1 \quad (6.2)$$

Для систем на основе арсенида галлия максимальный размер квантовой точки не должен превышать 12-20 нм.

Квантовые точки получают методами коллоидной химии, когда молекулы не погребены внутри полупроводника, а свободны от натяжения. Рост и размер молекул можно контролировать. Их форма приближается к сферической. Например, гетероструктуры Si – Ge с квантовыми точками на два- три порядка имеют сечение фотопоглощения ($2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$) больше систем на арсениде галлия. Интенсивность фотолюминесценции растет с ростом числа нановключений. Это свидетельствует о перспективности использования систем с квантовыми точками для фотодетекторов.

В последнее время появились сведения о формировании квантовых точек методом ионной имплантации Ge в кремниевую подложку – ионного синтеза. Для этого кремний облучают на сильноточном ускорителе с энергией ионов $\sim 50 \text{ кэВ}$ и дозой $D=10^{17} \text{ см}^{-2}$, а затем образцы подвергают импульсному фотонному отжигу и стравливают слой $\sim 30 \text{ нм}$. В итоге получают наноразмерные структуры в виде островков SiGe высотой до 10 нм и протяженностью несколько десятков нанометров.

На сегодняшний день разработаны и реализованы различные неимплантационные методы получения наносистем типа квантовых точек Si в силицидах типа SiO_2 ($\text{SiO}_2:\text{Si}$) и Ge в SiO_2 ($\text{SiO}_2:\text{Ge}$). Некоторые из них заключаются в получении аморфных пленок методом высокочастотного, или термического распыления материалов в инертном газе при давлении 10^{-1} Па с последующим кратковременным (1-10 мин) фотонным отжигом пленки. Даже непродолжительный отжиг приводит к быстрому росту нанокристаллов и сдвигу спектра фотолюминесценции в длинноволновую часть спектра. Изменяя время отжига, корректируют спектр люминесценции в области 1,5-1,7 эВ, приписываемый квантовым точкам. Прозрачность SiO_2 в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне открывает большие возможности применения этих материалов в оптоэлектронике.

Известен способ получения квантовых точек методом химического осаждения из газовой фазы. В качестве источников использовали $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ и $\text{Ge}(\text{OCH}_3)_4$. В качестве газа- носителя использовался озон. Размер нановключений Ge в матрице SiO_2 составлял 4-6 нм.

Коллоидальные точки – это скопления органических молекул, на которых формируются ионные соединения (CdS, CdSe, InP, GaP, InAs). Такие соединения имеют задержанные фазовые переходы и несколько возбужденных электронно-дырочных состояний. Часто часть оболочки

заменяют неорганическими полупроводниками и получают системы «ядро – оболочка».

Нанотрубки и нановолокна – это элементы в виде трубок или волокон, выполненные из углерода. Нанотрубки и нановолокна применяются как источники питания для наноэлементов, как элементы памяти, как элементы солнечных батарей. Диаметр трубок составляет 100-500 нм. Углеродные нанотрубки имеют свойство конгломерации, т. е. объединяются в пучки, далее в сетки и клубки. Углеродные волокна – являются перспективными материалами для элементов памяти.

Квантовые проволоки – это структуры, у которых в двух направлениях размеры равны нескольким межатомным расстояниям, а в третьем – макроскопической величине.

Металлоорганические соединения – представляют собой пленки с управляемым фазовым переходом на границе затвердевания. Например, материалы A/B с включениями InAs, GaAs, InP, GaP.

Молекулярная самосборка – это эффект формирования собирающихся коллоидных точек (зародышей) в виде пирамид, и прочих фигур. Самоорганизация – это возникновение в системе новых пространственных или временных компонентов симметрии. Таким образом, формируются мультиэкситонные переходы, при которых несколько электронов и дырок формируются или распадаются одновременно. На этом принципе начинается производство самоорганизующихся магнитных решеток (3 нм – это 10 - 15 атомов твердого вещества, выложенного в ряд). Подобная, так называемая HAMR и SOMA технология (Heat Assistant Magnetic Recording, Self- Organized Magnetic Array), осваивается в Японии.

Фуллерены – являются одним из перспективных наноматериалов на основе сферических молекул углерода C-60, получаемого в электродуговой плазме. Они названы по имени архитектора Бакминстера Фуллера). Это молекулы углерода C-60, C-70, C-72. Форма молекул – полая объемная круглая клетка, закрученная в спираль и набранная из 20 шестиугольников для C-60. Две другие модификации углерода – алмаз и графит. В центр клетки может помещаться атом примеси. В зависимости от количества примеси калия, рубидия и др. фуллерен C-60 ведет себя как диэлектрик, проводник, полупроводник и сверхпроводник.

6.2 Назначение и типы пленок

В настоящее время пленки различных материалов применяются в качестве покрытий различного назначения (декоративные, антикоррозионные, диэлектрические, упрочняющие и многие другие). В зависимости от назначения пленки и условий ее эксплуатации пленки наносят различными способами. Это получение пленок из растворов, а также методами напыления в вакууме и при атмосферном давлении, методами осаждения из паров солей и аэрозолей при градиенте

температур, методами распыления материалов ионной бомбардировкой и т.д. В зависимости от конкретных условий осаждения, пленки одного и того же вещества подразделяются на 4 типа:

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

6.3 Методы получения пленок

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

1) напыление пленок методом термического нагрева и испарения материалов в вакууме. По способу нагрева испарителя термовакuumное испарение подразделяют на токовое, электронно-лучевое, лазерное, с использованием СВЧ нагрева и др.;

2) напыление пленок может осуществляться в разряде при ионном распылении материала катода (катодное распыление). Разряд может быть стимулирован продольным магнитным полем (нанесение пленок в разряде Пеннинга) или скрещенным магнитным и электрическим полями (магнетронное напыление). Следует отметить, что этому методу присуща более низкая, по сравнению с термическим методом, скорость нанесения пленки;

3) напыление пленок может производиться из материала электродов, испаряемых при горении дугового разряда.

6.4 Термовакuumное испарение пленок

Среди множества методов изготовления пленок наибольшее распространение получил метод термического испарения материалов в вакууме. На рис.6.1 представлены схемы реализации некоторых методов термовакuumного нанесения пленок. Процесс токового испарения пленки (рис.6.1 а) происходит следующим образом.

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

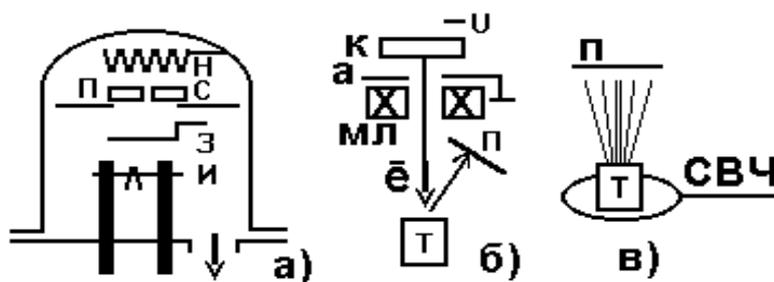


Рисунок 6.1 - Схемы термовакуумного испарения пленок

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

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

На рис.6.1.б представлена схема электронно-лучевого испарения. На катод (К) электронно-лучевой пушки подается отрицательный потенциал. Электроны устремляются в направлении анода (а), фокусируются магнитной линзой (МЛ) и попадают в тигель (Т). Пары материала формируются на подложке (П). На рис 6.1 в представлена схема испарения пленок на основе СВЧ нагрева. Одно из достоинств этого метода заключается в возможности испарения дозированной навески без дорогостоящего тигля (“на лету”) в условиях конвейерного производства.

6.5 Процессы термического испарения материалов

За температуру испарения материала принята температура, при которой давление испаряемых паров равно 1 Па ($\sim 10^{-2}$ мм рт.ст.). Эта температура гораздо выше температуры плавления и приводится в соответствующей справочной литературе. Большинство испаряемых в вакууме веществ являются частичными или полными сублиматорами (т.е. возгоняются с частичным плавлением или без него). Яркие сублиматоры: Cr, Zn, Cd. Частичные сублиматоры: Pb, Ti, Fe.

Для получения качественных пленок к испарителю предъявляется ряд требований:

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

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

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

Удовлетворяют вышеперечисленным требованиям незначительное число металлов. В качестве испарителей, нагреваемых электрическим током, используют W, Mo, Ni, Fe, Ta, Pt. В качестве материалов тиглей используют нитриды, карбиды, оксиды: AlN, TiN, TiC, SiC, ThO, BeO, ZrO, Al₂O₃. Существуют таблицы с рекомендациями предпочтительного метода испарения и материала испарителя. Тугоплавкие материалы рекомендуется испарять электронным лучом или в разряде. В таблице 6.1 представлен фрагмент сочетаемости материалов при термическом испарении пленок

Таблица 6.1 - Сочетаемость некоторых материалов при формировании пленок

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

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

$$N_k S_n = N_u S_u \quad (6.3)$$

$$\text{КПД} = S_n / S_u. \quad (6.4)$$

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

$$N_u = N_s e^{-E/kT} \quad (6.5)$$

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

$$V = 6 \times 10^{-4} \sqrt{M/T}, \quad (6.6)$$

где M - молекулярный вес, T - температура.

Концентрация молекул газа в остаточной среде N_2 в вакуумной камере может быть определено по соотношению:

$$N_2 = P_2 / (2\pi mkT)^{0,5} \quad (6.7)$$

Расчет показывает, что при температуре испарения при давлении в камере 10^{-3} Па концентрация газа составляет $\sim 10^{14}$ 1/см³ (т.е. близка к концентрации испаряемых паров). Даже незначительное увеличение температуры испарения значительно изменяет концентрацию испаренных атомов. Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

$$V = fP / \sqrt{(2\pi mkT)} \quad (6.8)$$

где f -коэффициент конденсации, P - давление паров испаряемого материала, m -молекулярный вес конденсируемого материала, k - постоянная Больцмана ($k=1,38E-23$ Дж/К).

Толщина образующейся пленки определяется по формуле:

$$d = G / 4\pi L\rho \quad (6.9)$$

где G - вес испарившегося вещества,

L - расстояние между испарителем и подложкой, ρ - плотность материала кг/м³.

Можно определить толщину конденсата пленки d , если известна скорость испарения V кг/сек с 1 м², плотность потока $\gamma = 1/\text{м}^3$ и расстояние до подложки r :

$$d = V \cos \delta / 4\pi r^2 \quad (6.10)$$

где δ угол осаждения конденсата в градусах.

6.6 Электронно-лучевой метод формирования пленок

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.

6.7 Магнетронное формирование пленок

В основу метода положен магнетрон, представляющий собой газоразрядную систему, помещенную в магнитное поле. На рис. 6.2 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 (м). Магнитное поле закручивает электроны вокруг силовых линий под действием силы Лоренца. Это способствует ионизации газа и поддержанию разряда.

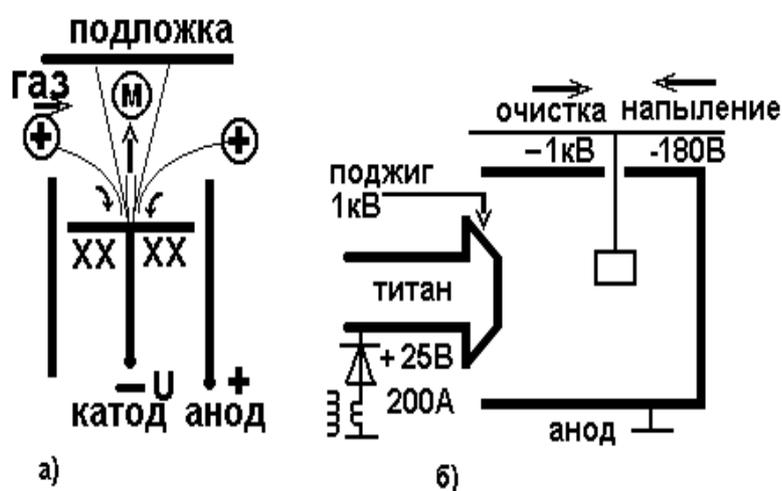


Рисунок 6.2 – а) схема магнетрона, б) схема электродуговой системы напыления установки «Булат»

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

$$R = V' m / e Z B, \quad (6.11)$$

где V' – скорость, перпендикулярная линиям магнитного поля

$$V' = 5,9 \cdot 10^5 \sqrt{U}; \quad (6.12)$$

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.

6.8 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», рис. 6.2 б);

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;

Типичным представителем такого напыления являются установки типа Булат (см. рис. 6.2 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 установок напыления упрочняющих покрытий типа «Булат» является эрозия катода и унос материала с катода. Унос массы « M » при эрозии электродов определяется соотношением:

$$M = gIt, \quad (6.13)$$

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

Унос массы пропорционален объему эрозии W и плотности материала:

$$M = \rho W \quad (6.14)$$

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.

6.9 Формирование пленок с помощью ионных источников

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. На рис. 6.3 представлены ионные источники паров металлов с линейным пучком.

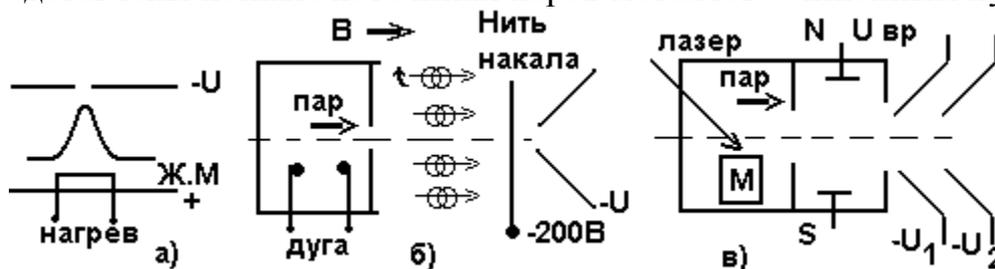


Рисунок 6.3 - Схемы источников ионов металлов с линейным пучком; а) – жидкометаллический источник, б) источник Фримана, в) – лазерно-плазменный источник.

Жидкометаллические ионные источники (рис.6.3. а) нашли широкое применение в полупроводниковой технике для получения относительно моноэнергетических ионных пучков.

В источнике Фримана с ленточным пучком (рис. 6.3 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.

6.10 Методы измерения параметров пленок

На рисунке 6.4. представлены схемы реализации методов измерения толщины пленок, по изменению сопротивления (рис.6.4. а), по изменению емкости (рис 6.4 б), по просвету пленки (рис 6.4. в).

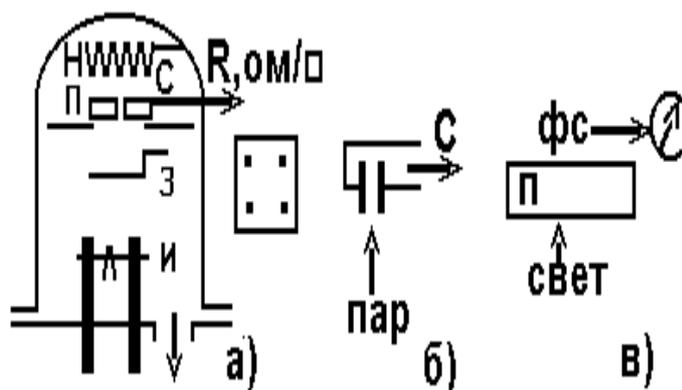


Рисунок 6.5 - Схемы реализации методов измерения толщины пленок

6.10.1 Резистивный метод измерения толщины пленок

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

$$R = \rho L / S \quad (6.15)$$

где ρ - удельное сопротивление пленки.

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

$$S = d \cdot B, \quad (6.16)$$

разрешая исходное уравнение относительно d , находим:

$$d = \rho L / R_n B \quad (6.17)$$

где под R_n - понимается поверхностное сопротивление пленки (неявным образом указывающее на способ его получения). Единица измерения поверхностного сопротивления - ом / \square (ом на квадрат).

Диапазон измеряемых толщин резистивным методом составляет 1-5 мкм.

Для измерения электрического сопротивления в установке для нанесения пленки рядом с рабочей подложкой помещается специальная контрольная непроводящая подложка в виде квадратной пластины, на края которой заранее нанесены проводящие контакты. Эта контрольная пластина включается в одно из плеч мостовой схемы. По мере роста толщины пленки и снижения ее сопротивления происходит разбаланс мостовой схемы. Метод нашел широкое применение при напылении резисторов микросхем.

В числе недостатков метода следует отметить малую чувствительность вначале напыления, а также зависимость удельного сопротивления пленки от параметров технологического процесса (давления газа, скорости конденсации, температуры подложки). В ряде случаев пленка может быть повреждена электрическим пробоем вследствие пропуска высокого напряжения (~ 250 В) измерительными цепями при измерении высоких сопротивлений (\sim МОм). Метод непригоден для измерения толщины диэлектрических пленок.

6.10.2 Емкостной метод измерения толщины пленок

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

Система измерения снабжена опорным кварцевым генератором, а также имеет систему сравнения опорных и измеряемых частот. Метод реализован в приборе типа КСТ-1. Применяется для измерения пленок SiO_2 , Cu, Cr, Mo, Re, W, сапфира, стекла. Погрешность прибора в диапазоне толщин 5-100 мкм не превышает 5% и не зависит от температуры. Прибор снабжен дифференцирующей цепью, что позволяет измерять скорость напыления.

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

6.10.3 Оптический метод измерения толщины пленок

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

$$I = I_0 \exp(-kd) \quad (6.18)$$

где k - коэффициент поглощения, зависящий от материала пленки.

При использовании этого соотношения необходимо учитывать, что полученная пленка может обладать значительным коэффициентом отражения, и отраженный поток следует вычесть из падающего потока. В табл. 6.2 приведены коэффициенты поглощения для некоторых пленок и материалов.

Таблица 6.2 - Коэффициенты поглощения излучения

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

Оптический метод позволяет измерять полупрозрачные пленки от 100 до 800 ангстрем. В числе недостатков метода следует отметить неудобство использования в процессе напыления вследствие паразитной подсветки накаливаемым добела испарителем. Кроме того, источник подсветки часто запыляется.

6.10.4 Ионизационный метод измерения толщины пленок

В основе метода лежит принцип сравнения сигналов с ионизационных датчиков давления с паром и без пара. На рис. 6.5 представлена схема реализации метода на базе двух ионизационных датчиков давления типа ПМИ-2.



Рисунок 6.5 - Метод на базе двух ионизационных датчиков давления

На экране осциллографа отслеживается разность сигналов. В последних разработках подобных приборов (ИСТИ-1, ИСТИ2)

предусмотрены пересчетные устройства для обработки разности сигналов. Погрешность метода ~10%.

Эллипсометрический метод измерения толщины пленок

Метод основан на эффекте разности коэффициентов отражения поляризованного света от пленки. На рис. 6.6 представлена схема реализации метода. Известно, что свет представляет собой электромагнитную волну.

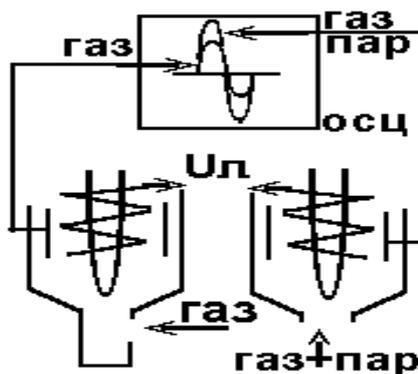


Рисунок 6.6 - Эффект разности хода при эллипсометрическом измерении толщины пленки

Луч света можно представить в виде небольшой окружности с осями Е и Н, аналогично осям Х и У. При освещении подложки под углом Брюстера (для стекла 57°) синусоида Н-волны идет параллельно поверхности и отражается от нее. Синусоида Е-волны идет перпендикулярно поверхности и врезается в нее на толщину пленки. Затем Е-волна отражается от основания пленки и выходит из нее. В результате чего после отражения возникает разность хода Е и Н волн (излучение оказывается эллиптически поляризованным). Разность фаз между Е и Н волнами (Δ) пропорциональна яркости отраженного излучения и несет информацию о толщине пленки. Угол поворота осей эллипса (определяемый поворотом линз поляриметра при минимуме отраженного света) пропорционален показателю преломления пленки. Метод позволяет измерять толщину пленки в пределах 20-15000 ангстрем с точностью 2-3%. К недостаткам метода следует отнести приспособленность в основном к пленкам SiO_2 , сложность настройки и обслуживания эллипсометра.

6.11 Экспресс методы сравнительного анализа толщины пленок

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

1) микроскопический анализ. Анализ пленки производят под измерительными микроскопами типа МИИ-4, МИМ-7. Микроскоп МИИ-4

измеряет толщину по сдвигу интерференционных полос. Микроскоп типа МИМ-7 позволяет непосредственно увидеть и измерить толщину пленки. Для лучшей визуализации деталь с пленкой разрезается, срез полируется и травится в разбавленной азотной или соляной кислоте;

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

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

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

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

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

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

7 Процесс эпитаксиального выращивания структур для приборов оптической электроники

7.1 Понятие эпитаксии

Эпитаксия - это процесс получения высококачественной монокристаллической пленки. В таких пленках испытывают нужду новейшие электронные приборы полупроводниковой и лазерной техники, оптоэлектроники, вычислительной техники и многие другие. При толщине 2-25 мкм эпитаксиальные обладают металлической проводимостью (менее 100 ом на квадрат). С помощью прямого процесса напыления такие пленки получать затруднительно вследствие невозможности исключить неконтролируемые примеси в напыляемой пленке. Таких сверхтонких слоев толщиной от единиц до десятков нанометров с периодически изменяющимся химическим составом в одном электронном устройстве может быть значительное количество. Между слоями требуется создать четкую границу с резким изменением свойств от слоя к слою.

Столь сложные пленочные структуры, называемые сверхструктурами, получают в специальных установках методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

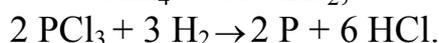
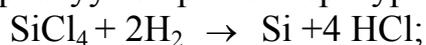
7.2 Виды эпитаксий

Различают газофазную эпитаксию, МОС-гидридная Эпитаксия (эпитаксию металлоорганических соединений), хемозэпитаксия, молекулярно-лучевая (МЛЭ), эпитаксия из расплава солей, пересыщенных растворов и электролитов.

Эпитаксия из расплава солей, пересыщенных растворов и электролитов. Процесс такой эпитаксии представляет собой выдержку подложки в определенных растворах при определенной температуре. Примером такой эпитаксии может служить обработка кристаллов ниобата лития или танталата висмута в бензольной кислоте с целью формирования волноводной пленки.

Хемозэпитаксия – ориентированный рост пленки при химическом взаимодействии подложки с материалом пленки. Примером может быть окисление некоторых металлов, когда скорость диффузии катионов через пленку оксида выше скорости диффузии анионов. Вероятность образования бездефектного эпитаксиального слоя вследствие различия химических свойств по кристаллографическим направлениям в этой форме эпитаксии снижается.

Газофазная эпитаксия. Традиционно для получения и легирования эпитаксиальных пленок кремния используют набор поверхностных гетерогенных реакций в форвакууме при температурах около 1000°C :



На рис.7.1 представлена схема проведения традиционного процесса эпитаксии.

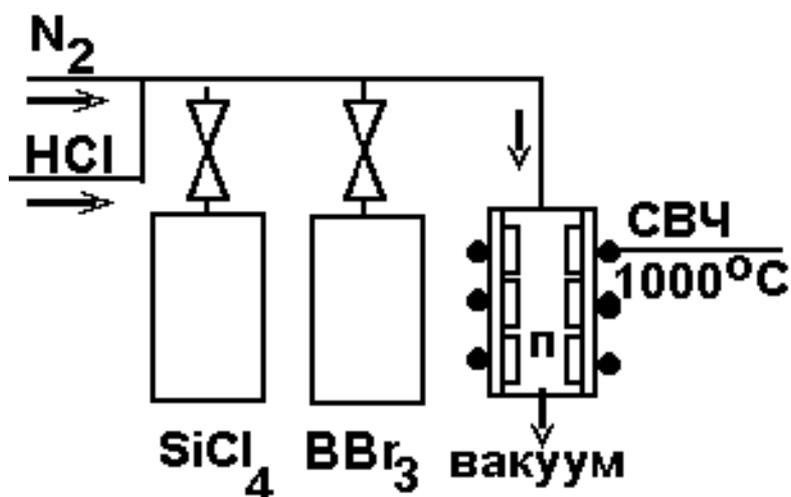


Рисунок 7.1 - Схема проведения традиционного процесса эпитаксии

Недостатки традиционной эпитаксии заключаются в следующем:

- жесткая взаимосвязь потока реагентов с температурой гетерогенной реакции;
- существует степень сегрегации поверхности (часть пленки

всегда формируется поликристаллической);

– присутствуют диффузионные процессы из сформированной пленки в подложку вследствие высокой температуры.

Методы решения проблем заключаются в более высококачественном формировании пленок с последующей ориентацией слоев в виде кристаллической решетки. Такой процесс называется *искусственной эпитаксией*. Для его реализации необходим жидкий подслои из золота или специального полимера, (салол) в который напыляются пары для ориентации и формирования зародышей (“льдинок” кристалла) в сплошной монокристалл. На подложке с шагом 50 мкм желательнее нанести базовый рельеф в виде сетки или канавок с углами, соответствующими типу кристаллической решетки кристаллизуемого материала. Затем пленку перекристаллизовывают путем прогрева теплом, лазерным или электронным лучом.

Выращивание кристаллов на подложке из того же материала, что и подложка называется *автоэпитаксией* (например, Si-Si). Процесс роста кристаллов на инородной подложке называется *гетероэпитаксией* (например, Si- W).

МОС-гидридная эпитаксия. (Эпитаксия металлоорганических соединений).

Такая эпитаксия во многом напоминает газофазную эпитаксию. Отличие состоит в том, что эта эпитаксия проводится при более низких температурах ($700-800^{\circ}$ C) с применением водородосодержащих компонент (например, аммиака). Металлоорганические соединения, представляющие интерес для выращивания полупроводниковых слоев. Некоторые из них: – это триметилгаллий – $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, триэтилгаллий – $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$, триметилалюминий – $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, триметилиндий $\text{In}(\text{CH}_3)_3$. В качестве газа – носителя используется чистый водород, или его смесь с азотом. Металлоорганические соединения помещают в контейнеры, через которые пропускают водород при температуре, близкой к комнатной. Непосредственно в реакторе температура среды поддерживается инфракрасными лампами. Широкое распространение получил метод роста из металлоорганических соединений при пониженном давлении.

Молекулярно-лучевая эпитаксия. (МЛЭ)

Для изготовления новейших приборов (твердотельных носителей информации, лазеров, солнечных батарей и др.) перечисленные выше методы формирования пленок оказались непригодными. Например, для создания приборов на основе соединений типа $\text{A}_{III}\text{-B}_V$ потребовались структуры с периодическим потенциалом. Толщина слоя в ней меньше, чем средняя длина пробега электрона.

Молекулярно-лучевая эпитаксия – это технологический процесс формирования пленок требуемого состава и структуры на кристаллической подложке из направленного потока молекул (или атомов) в условиях сверхвысокого вакуума. При конденсации молекул происходит слоевой рост пленки с последовательной застройкой каждого монослоя. В

результате можно получить монокристаллическую пленку с атомно-гладкой поверхностью. Температура подложки должна поддерживаться оптимальной для миграции атомов по поверхности. В методе МЛЭ эта температура гораздо ниже, чем в процессах газовой эпитаксии и не превышает 450 градусов. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является методом наращивания монокристаллических пленок в сверхвысоком вакууме на монокристаллическую подложку при использовании атомарных пучков элементов, составляющих полупроводниковый материал. В отличие от других методов, данный метод эпитаксиального наращивания позволяет проводить послойное легирование каждого атомного слоя выращиваемого материала. Метод также позволяет контролировать рост каждого атомарного слоя пленки непосредственно в ходе выращивания пленки (например, методом дифракции быстрых электронов).

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

- 1) обеспечение сверхвысокого вакуума (менее 10^{-7} Па);
- 2) оптимальная температура подложки (для кремния 4400 С);
- 3) необходима минимальная скорость осаждения пленки (до 10 нм/с). При большой скорости конденсации происходит интенсивное образование зародышей, сопровождаемое неупорядоченной кристаллизацией и аморфизацией пленки;

Процесс МЛЭ обеспечивает легирование пленки до высоких концентраций (10^{18} - 10^{19} см⁻³), малую взаимную диффузию элементов из соседних слоев и возможность выращивания многослойных монокристаллических пленок. Например, на поверхности пластины из арсенида галлия можно вырастить слои с частичным замещением атомов Ga атомами Al, т. е. получить пленку с составом $Al_xGa_{1-x}As$, где $0.01 < x < 0.2$. Легируя другие слои оловом, германием или магнием можно изменять тип проводимости растущей пленки. Следует отметить, что плотность дефектов упаковки и дислокаций, полученных МЛЭ, почти на порядок выше, чем при получении газозаимным осаждением.

7.3 Кинетика процесса молекулярно-лучевой эпитаксии

7.3.1 Теория кинетики процесса эпитаксии

Для высокого совершенства структуры эпитаксиального слоя необходима взаимная растворимость материалов подложки и пленки, а также определенная температура процесса, которая устанавливается по диаграмме состояния. Взаимодействие падающих на поверхность атомов с атомами подложки приводит к возникновению переходного эпитаксиального слоя. В этом случае наблюдается когерентный переход одной кристаллической решетки в другую. Качество эпитаксиальной

пленки зависит от условий, возникающих на всех стадиях ее формирования.

На начальной стадии атомы из молекулярного потока адсорбируются на поверхности подложки. Адсорбция характеризуется понижением свободной энергии ΔG и убылью энтропии ΔS . Вследствие потери некоторых степеней свободы адсорбированными атомами. Из уравнения $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, следует, что энтальпия должна быть отрицательной, т.е. адсорбция – процесс экзотермический, всегда сопровождающийся выделением энергии.

Если вся поверхность покрывается атомами в один сплошной слой, то возникает мономолекулярная адсорбция. На следующей стадии происходит проникновение атомов нарастающей фазы в объем материала подложки за счет диффузии, растворения, движения по стенкам капилляров и границам зерен. Этот процесс называется абсорбцией. Для активирования этого процесса необходимо затратить энергию. Абсорбция – процесс эндотермический. Неактивированную и полностью обратимую адсорбцию называют физической. Адсорбирующиеся атомы могут образовывать химические связи с атомами с выделением энергии от 80 до 100 кДж/моль. Такой процесс называется хемосорбцией.

При приближении атома к поверхности на него начинают действовать дальнедействующие силы притяжения: электростатические: возникающие при воздействии полярной и неполярной молекул; дисперсионные: проявляющиеся за счет индукционного дипольного взаимодействия; резонансные: действующие при обмене молекул фотонами.

На самой поверхности подложки начинают проявляться короткодействующие силы отталкивания.

В процессе МЛЭ на нейтральных подложках осаждаются обычно неполярные атомы, поэтому наиболее существенно проявляется третий тип сил – дисперсионные. Когда атом приближается к поверхности на малое расстояние и его волновая функция заметно перекрывается с функцией атомов подложки, существенными оказываются короткодействующие силы.

На рис. 7.2 представлены зависимости потенциальной энергии при адсорбции частиц. В зависимости от электронного состояния системы энергия взаимодействия будет описываться кривыми 1 и 2 (рис. 7.2, а) короткодействующих сил. При этом кривая 1 соответствует «антисвязывающим» состояниям, а кривая 2 – «связывающим». На больших расстояниях проявляются дальнедействующие силы притяжения Ван-дер-Ваальса, – энергия взаимодействия изменяется согласно кривой 3.

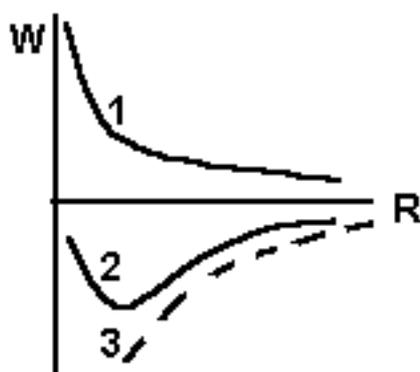


Рисунок 7.2 - Зависимость потенциальной энергии частиц от расстояния

Эта кривая описывает химическую адсорбцию. В результате хемосорбции возникает любая из трех основных химических связей: ионная, ковалентная или координационная.

Система может находиться в «связывающем» или «антисвязывающем» электронном состоянии, и не может быть физической и химической адсорбции одновременно.

Наиболее важные индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост следующие:

- адсорбция составляющих атомов или молекул на поверхности подложки;
- поверхностная миграция атомов и диссоциация адсорбированных молекул;
- присоединение атомов к кристаллической решетке подложки или эпитаксиальным слоям, выращенным ранее;

термическая десорбция атомов или молекул, не внедренных в кристаллическую решетку. На рис. 7.3 представлена модель роста структур в процессе МЛЭ.

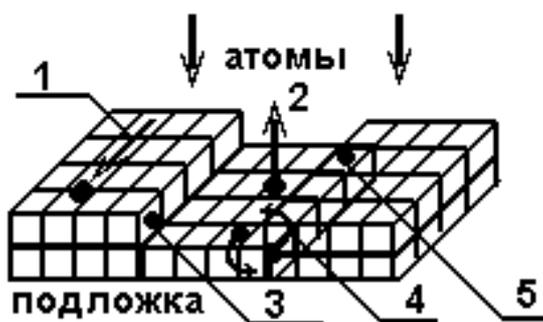


Рисунок 7.3 – Схема процессов при выращивании структур методом МЛЭ. 1 – поверхностная диффузия; 2 – десорбция; 3 – встраивание в решетку; 4 – обмен атомов; 5 – поверхностная агрегация (зародышеобразование)

На этом рисунке поверхности подложки и растущего эпитаксиального слоя разделены на «кристаллические участки», с

которыми взаимодействуют, поступающие на поверхность из молекулярных источников компоненты. Каждый участок поверхности представляет собой небольшой участок поверхности кристалла и характеризуется индивидуальной химической активностью. Конденсация на подложку нового материала из газовой фазы определяется скоростью столкновения атомов или молекул с подложкой. Число частиц, поступающих за единицу времени на единицу площади определяется соотношением:

$$n = \frac{P}{\sqrt{2\pi MkT}}, \quad (7.1)$$

где P – давление паров; M – молекулярный вес частиц; k – постоянная Больцмана и T – температура поверхности.

Частица, конденсированная из газовой фазы, может сразу же покинуть поверхность подложки или диффундировать по поверхности. Процесс поверхностной диффузии может привести к адсорбции частицы на поверхности подложки или растущей пленки или к процессу поверхностной агрегации, сопровождающимся образованием на поверхности зародышей новой кристаллической фазы конденсируемого материала. Адсорбция отдельных атомов, как правило, происходит на ступеньках роста или других дефектах. Атомный процесс взаимодиффузии, при котором атомы пленки и подложки обмениваются местами, играют важную роль в процессе эпитаксиального роста. В результате этого процесса граница между подложкой и растущей пленкой становится более гладкой.

Процессы на поверхности, сопровождающие эпитаксиальный рост при МЛЭ могут быть описаны количественно. Каждый из индивидуальных процессов, рассмотренных выше, характеризуется собственной энергией активации и может быть в первом приближении представлен экспоненциальным законом. Отражение от подложки (десорбция) происходит не сразу. Средняя продолжительность жизни молекулы или атома на поверхности равна:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_d / kT) \quad (7.2)$$

где E_d – энергия активации процесса десорбции, T_s – температура подложки.

На феноменологическом уровне различают три основные типа роста тонких эпитаксиальных пленок в зависимости от коэффициента покрытия подложки θ . На рис. 7.4 представлены основные модели эпитаксиального роста: послойный (а), островковый (б), рост слоя с островками (в).

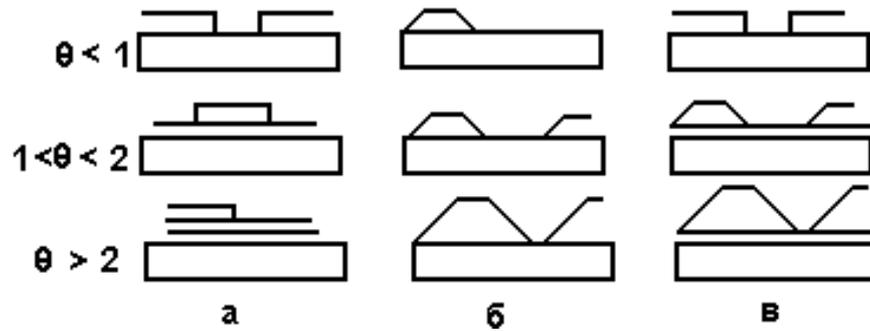


Рисунок 7.4 – Основные модели роста кристалла при эпитаксии; послойный (а), островковый (б), рост слоя с островками (в).

Послойный рост (layer-by-layer growth). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного завершения роста предыдущего слоя. Этот механизм роста называют также ростом Франка-ван дер Мерве (*Frank-van der Merve, FM*). Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов значительно больше, чем между ближайшими атомами в слое.

Островковый рост или рост Вольмера-Вебера (*island growth, Vollmer-Weber, VW*). Этот механизм является полной противоположностью послойному росту. Условием его реализации является преобладание взаимодействия между ближайшими атомами над взаимодействием этих атомов с подложкой. При островковом механизме роста вещество с самого начала оседает на поверхности в виде многослойных конгломератов атомов.

Рост слоя с островками – это промежуточный механизм между первыми двумя механизмами. Это рост Странски-Крастанова (*Stransky-Krastanov, SK, layer-plus-islandgrows*), при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки. К этому механизму могут приводить многие факторы, в частности достаточно большое несоответствие между параметрами кристаллических решеток пленки и подложки.

Условие, разграничивающее реализацию того или иного механизма роста, можно получить из анализа соотношений между коэффициентами поверхностного натяжения между подложкой и вакуумом δ_S , между пленкой и вакуумом δ_F и между подложкой и пленкой $\delta_{S/F}$. (рис. 7.5). Коэффициент поверхностного натяжения поверхности равен свободной энергии единицы поверхности. Соответственно эти коэффициенты определяют силы поверхностного натяжения, действующие на единицу элемента длины границы раздела. Согласно этому определению сила dF , действующая на бесконечно малый элемент dl границы раздела двух сред.



Рисунок 7.5 – Схема, поясняющая механизм формирования пленки.

Из условия равновесия для любого элемента длины линии соприкосновения подложки, трехмерного островка пленки и вакуума получим

$$dF = \delta dl$$

$$\delta_s = \delta_{s/F} + \delta_s \cos \varphi$$

где φ - краевой угол, т.е. угол, образованный касательной к поверхности островка пленки и поверхностью подложки.

Если краевой угол равен нулю, то островок “растекается” тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует послойному механизму роста. Это условие приводит к следующему соотношению между коэффициентами поверхностного натяжения:

$$dF = \delta dl \quad (7.3)$$

$$\delta_s \geq \delta_s + \delta_{s/F} \quad (7.4)$$

послойный рост ($\varphi=0$).

Если ($\varphi>0$) реализуется механизм роста островков.

Для более полного вывода условий, при которых реализуется тот или иной механизм роста, необходимо учесть влияние на условие равновесия между формируемой пленкой и подложкой газовой фазы в области роста пленки.

Если молекулы адсорбата взаимодействуют друг с другом слабее, чем с подложкой, то имеет место послойный режим, а зародыши имеют форму диска, который растет преимущественно в ширину. При слабом взаимодействии с подложкой образуются куполообразные зародыши в форме полусферы (островковый рост).

Послойный режим обычно реализуется в системах с близкими параметрами решетки, например, металл-металл или при автоэпитаксии. Данный режим может нарушаться с увеличением числа слоев. В этом случае от слоя к слою нарастает несоответствие параметров решетки подложки и адсорбата, что приводит к островковому росту. Тогда имеет место промежуточный режим. Но условие близости не является достаточным для реализации послойного роста структур. Из экспериментальных данных следует, что в этом случае необходимо задание оптимальных внешних параметров (температуры подложки и молекулярного потока). При уходе от оптимальных условий фронт роста становится трехмерным.

Столкновение атома из молекулярного пучка с поверхностью подложки не всегда приводит к его адсорбции, атом может не задержаться долго на поверхности и десорбироваться. Для десорбции атома необходимо подвести энергию извне, поэтому десорбция – процесс активированный. Вероятность адсорбции на поверхностном центре характеризуется коэффициентом прилипания α .

Скорость хемосорбции энергией активации E процесса коэффициентом заполнения поверхности ранее сорбированными атомами. Скорость хемосорбции U для однородной поверхности оценивается по выражению:

$$U = \frac{\alpha \cdot p}{\sqrt{2\pi M k T}} \cdot f(\theta) \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (7.5),$$

где α – коэффициент прилипания; p – давление; M – молекулярная масса сорбируемой частицы; T – температура поверхности; k – постоянная Больцмана; $f(\theta)$ - коэффициент заполнения поверхности.

Количество адсорбционных центров оценивается числом 10^{15} см⁻². При комнатной температуре хемосорбция одиночных атомов, например атомов паров металлов, у которых отсутствуют вращательные и колебательные движения, характеризуется коэффициентом $\alpha \approx 0.1$.

Для возникновения и протекания процесса эпитаксии необходимо, чтобы были соблюдены правила структурно-геометрического соответствия, которые состоят в следующем.

- 1) сетка атомных плоскостей осажденного вещества должна быть идентичной по форме и почти одинаковой по размерам кристаллической решетке поверхности подложки;
- 2) предельное отклонение периодов решеток не должно превышать 15%, иначе невозможно ориентированное наращивание;
- 3) ионы осаждаемого на ионный кристалл вещества занимают место соответственно своей полярности.

Однако в ряде случаев наблюдается отклонение от первого и второго правил, когда в плоскости срачивания период наращивающейся решетки из-за упругой деформации может быть равным периоду подложки («поверхностный псевдоморфизм»). Однако слой с аномальной решеткой не должен иметь значительной толщины. По-видимому, обе решетки сопрягающихся кристаллов упруго деформируются. При значительном несоответствии их периодов геометрическое различие ликвидируется частично, а в зоне срачивания появляются дислокации несоответствия кристаллических решеток.

В зависимости от числа направлений, в которых наблюдается соответствие в ориентировках, регулярное сопряжение может быть одно-, двух- и трехмерным.

7.4 Теория формирования эпитаксиальной пленки по Френкелю

Согласно теории Френкеля поверхность можно представить в виде потенциального рельефа с чередующимися буграми и впадинами. В условиях динамического равновесия часть атомов десорбируется с поверхности, тогда как оставшиеся на ней могут мигрировать по впадинам. Они сталкиваются между собой, образуя комплексы из двух, трех атомов и более. Образование подобных комплексов сопровождается выделением энергии (увеличение глубины потенциальной впадины), поэтому последующее испарение и разъединение их затруднено. Следовательно, происходит процесс образования зародышей кристаллизации.

Если интенсивность поступления атомов на поверхность превысит некоторую критическую величину, то стационарное состояние адсорбированного слоя нарушается, плотность его непрерывно возрастает, т.е. происходит непрерывное образование пленки. Критическая интенсивность подачи атомов на подложку зависит от температуры ее поверхности:

$$I_{кр} = \frac{1}{4\delta_o\tau_o} \exp\left(\frac{E_o + \Delta E_1}{kT_{кр}}\right), \quad (7.6)$$

где δ_o – эффективная площадь, занятая изолированным адсорбированным слоем; E_o – энергия десорбции атома; ΔE_1 – энергия связи атома с соседним адсорбированным атомом.

Основные выводы теории Френкеля сводятся к следующему.

Атомы мигрируют по поверхности в течение некоторого времени τ ;

Мигрируя атомы сталкиваются и образуют двумерные частицы;

Время жизни адсорбированного атома экспотенциально зависит от температуры подложки;

Существует критическая интенсивность поступления атомов, выше которой наблюдается рост пленки. Такой механизм роста называется «пар – кристалл» (ПК)

7.5 Теория формирования пленки по Н.Н. Семенову

Другая теория формирования эпитаксиальной пленки была предложена Н.Н. Семеновым. Мигрирующие по поверхности атомы рассматриваются как двумерный газ, переходящий в двумерную жидкость. Жидкость затем кристаллизуется. По мере кристаллизации происходит наращивание моноатомных слоев. Такой механизм получил название «пар – жидкость» (ПЖ)

Двумерный газ характеризуется критическим давлением, ниже которого на поверхности должен быть разреженный газ, а выше – двумерная моноатомная пленка жидкости. Критическое давление конденсации выражается зависимостью:

$$P_{кр} = D \exp\left(-\frac{E_{\delta} + \Delta g}{kT_{кр}}\right), \quad (7.7)$$

где E_{δ} – теплота десорбции; Δg – теплота испарения двумерной жидкости; $T_{кр}$ – критическая температура подложки, D – коэффициент конденсации

Обе теории подтверждаются экспериментально.

7.6 Фазовая диаграмма процесса роста эпитаксиальных пленок

При определенной для выбранного вещества критической температуре один механизм конденсации сменяется другим. На рис. 7.6 представлен фрагмент фазовой диаграммы для висмута, на которой имеется область жидкой фазы «Ж», область пара – «П», область твердой фазы кристалла – «К», а также область тройной точки «А».

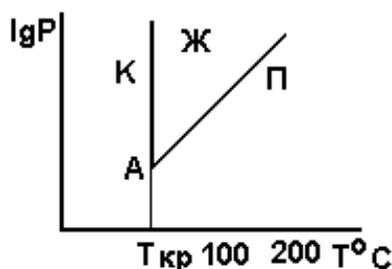


Рисунок 7.6 – Фазовая диаграмма равновесных состояний висмута

В зависимости от давления пара в молекулярном пучке – P , и температуры T реализуется механизм ПК (пар-кристалл) или ПЖ (пар-жидкость). Механизм ПЖ реализуется при давлениях выше тройной точки. На монокристаллических подложках сильнее проявляется ПК – механизм роста. Жидкая фаза неустойчива и кристаллизуется (переход ЖК). Но в конденсате остаются различные дефекты кристаллической структуры.

Согласно термодинамической теории зародышеобразования, система, в которой возникли критические зародыши со скоростью роста большей, чем скорость распада, должна обладать минимальной свободной энергией. Термодинамический подход справедлив для зародышей с большим числом (50-100). В этом случае устанавливается равновесие между паром и адсорбированными зародышами. При значительном времени жизни атомов на поверхности зародыши могут присоединяться друг к другу, мигрировать. Для начала образования пленки необходимо преобладание сорбции над десорбцией и фазовое превращение. Новая фаза образуется лишь в системах с пересыщением. Относительное пересыщение характеризуется отношением давлений. Изменение химических потенциалов двух фаз в таком случае можно выразить через коэффициент

пресыщения как

$$\Delta\mu = kT \ln(P_1 / P_2). \quad (7.8)$$

Для установления связи между радиусом сферического зародыша и давлением пара используют соотношение Гиббса — Томсона:

$$RT \ln \frac{P_r}{P_\infty} = \frac{2\delta V_m}{r_{кр}}, \quad (7.9)$$

где P_r — давление пара над зародышем в виде сферы с радиусом r ; P_∞ — равновесное давление пара над плоской поверхностью жидкости; V_m — молярный объем; $r_{кр}$ — радиус критического зародыша; δ — удельная поверхностная энергия. Как следует из анализа этого соотношения, для достижения малых значений $r_{кр}$ следует использовать большие пресыщения. Оценки по вышеприведенной формуле дают значения $r_{кр} \sim 1$ – 10 нм.

Если рассматривать возможные атомные модели зародышеобразования, то следует заметить, что при низких температурах подложек критический зародыш может рассматриваться как одиночный атом, но маловероятно, чтобы рост пленки в этих условиях был ориентированным. Ориентирование становится возможным при установлении стабильных двойных связей.

Для возникновения процесса эпитаксии необходимо, чтобы были соблюдены правила структурно-геометрического соответствия:

- 1) сетка атомных плоскостей осажденного вещества должна быть идентичной по форме и почти одинаковой по размерам кристаллической решетке поверхности подложки;
- 2) предельное отклонение периодов решеток не должно превышать 15%;
- 3) ионы осаждаемого на ионный кристалл вещества занимают места соответственно своей полярности.

В процессе нарастания слоев изменение периодов образующейся фазы может достигать десятков процентов. В плоскости срачивания разница периодов может приводить к упругой деформации (поверхностный псевдоморфизм). При значительном несоответствии периодов геометрическое различие ликвидируется возникновением дислокаций.

В зависимости от числа направлений, в которых наблюдается соответствие в ориентировках, регулярное сопряжение может быть одно-, дву- и трехмерным.

Итак, для проведения процесса эпитаксии необходимо физико-химическое взаимодействие поступающих на поверхность атомов с подложкой. В результате этого взаимодействия образуется переходный кристаллический слой, обеспечивающий постепенный переход одной решетки в другую. Для получения высокого совершенства структуры необходимы взаимная растворимость веществ молекулярного потока и подложки и строго поддерживаемая в определенном интервале

температура процесса. Этот интервал определяют по диаграмме состояний взаимодействующих веществ.

Часто в литературе рассматривают еще один механизм роста – *статистическое осаждение*. При этом механизме роста пленки атомы осаждаемого вещества располагаются на поверхности согласно распределению Пуассона так, как если бы их бросали случайно и они просто прилипали бы на месте падения.

Итак, для проведения процесса эпитаксии необходимо физико-химическое взаимодействие поступающих на поверхность атомов с подложкой. В результате этого взаимодействия образуется переходный кристаллический слой, обеспечивающий постепенный переход одной решетки в другую. Для получения высокого совершенства структуры необходимы взаимная растворимость веществ молекулярного потока и подложки и строго поддерживаемая температура процесса. Эту температуру определяют по диаграммам состояний взаимодействующих веществ.

Структура эпитаксиального слоя будет определяться следующими условиями:

- 1) природой испаряемого вещества;
- 2) степенью чистоты подложки и ее микрорельефом;
- 3) температурой подложки;
- 4) соответствием структур пленки и подложки;
- 5) интенсивностью молекулярного потока;
- 6) составом и давлением остаточной газовой среды в рабочей камере;
- 7) углом падения молекулярного потока на поверхность;
- 8) толщиной эпитаксиальной пленки.

7.7 Методы анализа эпитаксиальных структур

Для наблюдения за ходом технологического процесса и управления им используют несколько видов анализа. При этом если в ходе процесса эпитаксии будет выявлен рост нежелательных структур или нарушение кристаллической решетки, можно остановить процесс или внести коррективы в режим нанесения пленки. Сложная комбинация методов контроля нужна для оперативного управления процессами МЛЭ с использованием ЭВМ.

Эллипсометрия – служит для измерения скорости роста пленки с использованием лазерного эллипсометра.

Дифрактометрия - это метод анализа химического состава (дифракция медленных электронов с энергией до 1,5 кэВ) и анализа типа и формы растущих кристаллов (дифракция быстрых электронов с энергией 20-30 кэВ).

Структуру подложки и пленки контролируют обычно с помощью

двух дифрактометров: на быстрых и медленных электронах. При работе дифрактометра медленных электронов во время контроля требуется перекрывать пучок, так как метод чувствителен к самому верхнему слою адсорбированных атомов.

ОЖЕ- спектроскопия идентифицирует химический состав поверхностного слоя толщиной 1-3 нм и определяется электронным оже-спектрометром с чувствительностью порядка 10^{-3} монослоя. Водород и гелий не идентифицируются этим методом. Для проведения послойного оже-анализа используется ионная пушка, ускоренный поток ионов из которой фрезерует участок выращенной пленки перед оже-анализом.

В *электронной оже-спектроскопии* (ЭОС) измеряются энергия и количество оже-электронов с поверхности мишени в результате электронной бомбардировки. Оже-эффект связан с ионизацией атома при соударении первичного электрона с электроном внутренней оболочки атома (K,L,M,N...). За очень короткое время (10^{-14} - 10^{-16} с) происходит переход электрона с более высоких оболочек на образовавшуюся вакансию. Выделившаяся в результате такого перехода энергия может либо перейти в энергию γ -кванта (радиационный переход), либо перейти к электрону одной из внешних оболочек, который покидает атом и регистрируется как оже-электрон. Поскольку вероятность радиационного перехода растет с ростом атомного номера, как функция Z^4 , вероятность эмиссии оже-электронов, соответственно, падает. Для легких элементов она составляет 95%, а для элементов с $Z=70$ и выше – не превышает 10%.

Растровая оже-спектроскопия (РОС) позволяет изучать физические и химические свойства поверхности, осуществлять входной и выходной контроль полупроводниковых материалов, оценивать степень чистоты обработанных пластин и выполнять анализ отказов изделий электронной техники. Сочетая на одном приборе растровую электронную микроскопию (РЭМ) с электронной оже-спектроскопией (ЭОС), можно получать информацию, как о структуре, так и о химическом составе материала с очень высокой локальностью по глубине.

Основными элементами растрового оже-спектрометра являются электронная пушка, энергоанализатор электронов, вакуумная система и устройство сканирования первичным пучком электронов.

Электронная пушка формирует электронный зонд диаметром 5-50 мкм. Переход к малым диаметрам неизбежно сопровождается уменьшением силы тока зонда и снижением отношения сигнал/шум. С целью сохранения достаточной величины этого отношения приходится сужать рабочую полосу частот или же, что одно и то же, увеличивать время анализа элементарной площадки поверхности. Требования к стабильности силы тока пушки, параметров блока питания и регистрации значительно возрастают. Электронная пушка РОС может быть заимствована из других устройств, в частности из видикона ЛИ-428 со стандартной электронной оптикой, обеспечивающей искусственный кроссовер диаметром 0.005-0.01 мм при силе тока 10^{-8} - 10^{-6} А.

Нестабильность силы тока пучка не превышает 10^{-4} за 1 ч эксплуатации.

Сканирование зонда по поверхности осуществляется подачей на отклоняющие электроды пушки парафазных напряжений кадровой и строчной частоты, которые вырабатываются в блоке сканирования и усиливаются усилителем отклонения. Такие же напряжения из блока сканирования через кадровый и строчный усилители подаются на отклоняющие системы двух ЭЛТ, являющихся индикаторами. С экрана трубки с высоким разрешением ведется фотографирование изображений, с помощью другой трубки с длительным послесвечением наблюдают объект.

Для визуализации топографии поверхности объекта и его структуры используется ток в цепи объекта, протекающий через нагрузочный резистор R . Напряжение с этого сопротивления усиливается и модулирует интенсивность или отклонение воспроизводящих лучей на экранах ЭЛТ. Канал усиления в этом случае состоит из предварительного и окончного видео усилителей, а в случае модуляции отклонения – из кадровых усилителей ЭЛТ.

Вторичные, не упруго - и упруго рассеянные электроны из объекта попадают в цилиндрический энергоанализатор, настроенный на пропускание электронов с энергией, соответствующей оже-переходу выбранного химического элемента. Сила тока электронов, дошедших до коллектора анализатора, усиливается электронным множителем ВЭУ и создает модулированное напряжение на нагрузочном сопротивлении или резонансном контуре. Этот сигнал после предварительного усиления поступает на вход синхронного дифференциального усилителя, на опорный вход которого через фазовращатель подается модулирующее напряжение. На выходе выделяется производная силы тока анализатора. Сигнал из синхронного усилителя поступает на окончный видеоусилитель и далее на экраны ЭЛТ. Чувствительность обоих трактов усиления выбирается переключателями $S1$ и $S2$. В тракте усиления оже-сигнала предусмотрено подключение резонансного контура.

Для расширения практических возможностей спектрометра предусмотрено два вида обработки сигнала анализатора: прямое усиление и дифференцирование. Выбор режима проводится переключателем $S3$, а переключатель $S4$ позволяет выбирать вид информации, выводимой на ЭЛТ, причем в положении « Σ » сигналы из обоих каналов суммируются.

Режимы сканирования и индикации определяются положением переключения $S6$. В положении «Растр» информация выводится на экраны ЭЛТ в виде телевизионного изображения, причем характер модуляции (по яркости или отклонению) выбирается переключателем $S7$.

В положении «Строка» на экранах ЛТ можно наблюдать осциллограмму исследуемого элемента по выбранной линии на поверхности объекта. В этом случае кадровые выходы блока сканирования отключаются от усилителей отклонения пушки и ЭЛТ, поэтому электронный зонд перемещается только по линии на образце, а

воспроизводящий – по центральной строке экранов ЭЛТ. Для получения осциллограммы видеосигнал подается на кадровые усилители ЭЛТ.

В положении «Спектр» усилитель отклонения электронной пушки отключается от блока сканирования, и электронный зонд останавливается в выбранной точке поверхности. пилообразное напряжение кадровой частоты из блока сканирования через буферный усилитель подается на блок развертки анализатора. Выходной сигнал синхронного усилителя, представляющий собой спектр оже-электронов в выбранном энергетическом диапазоне, подается на кадровый усилитель ЭЛТ. При подключении строчного усилителя ЭЛТ к кадровому выходу блока сканирования появляется возможность наблюдения оже-спектров непосредственно на экране ЭЛТ. При необходимости спектр может быть записан на двух координатном самописце, подключаемом к измерительной схеме переключателем S5. Предусмотрена также возможность развертки отклоняющего потенциала анализатора от собственного интегратора блока развертки.

ВИМС - это времяпролетная ионная массспектрометрия. В этом методе ионная пушка применяется и для исследования состава подложки, растущей пленки и снятия концентрационных профилей залегания примесей по глубине методом вторичной ионной масс спектроскопии (ВИМС). Квадрупольный масс-спектрометр используется для контроля состава молекулярных пучков, остаточной газовой среды и анализа вторичных пучков. Масс-спектральный анализ вторичных ионов с поверхности, состава остаточной среды в камере, а также молекулярных потоков выполняются квадрупольным масс-спектрометром типа $Q=156$. Перед квадруполем устанавливается дополнительный энергоанализатор, отсеивающий нейтральные частицы и пропускающий ионы с определенной энергией. Вторично-электронный умножитель на выходе масс-спектрометра установлен несоосно с квадрупольной системой, благодаря чему увеличивается отношение сигнал-шум. Масс-спектрометр может работать в режиме регистрации как положительных, так и отрицательных вторичных ионов, что особенно ценно для анализа состава, как подложки, так и растущей пленки.

Энергоанализаторы. представляют собой систему электродов, обеспечивающую требуемую конфигурацию анализирующих электрического, магнитного полей или их комбинации. При воздействии анализирующего поля на движущиеся заряженные частицы происходит их разделение в пространстве по энергиям. В аналитических установках более удобно использовать не электромагнитные, а электростатические системы, так как диапазон энергий частиц весьма широк. Для их разделения не требуется большой напряженности электрического поля. Поле можно легко локализовать между электродами малых габаритов. Масса электростатических систем невелика. Кроме того, системы проще экранировать от воздействия внешних полей, а затраты мощности при эксплуатации малы даже при высоких требованиях к стабилизации

напряжений.

Электростатические анализаторы в отличие от магнитных разделяют заряженные частицы по энергиям, а не по скорости, поэтому масса частиц при заданной энергии не играет роли.

Дисперсионные анализаторы настраиваются на определенную энергию. В них не происходит расфокусировки моноэнергетического пучка частиц, но изображение источника этих частиц смещается в пространстве. Дисперсия D – это величина, равная смещению dx изображения моноэнергетического источника при малом изменении dE энергии настройки, отнесенном к относительному изменению этой энергии dE/E , т.е.

$$D = E \cdot \frac{dx}{dE} . \quad (7.10)$$

Ширина S_0 линии изображения точечного источника монокинетических частиц зависит от сферической аберрации и для небольших углов α ее можно выразить в виде ряда:

$$S_0 = \alpha \cdot a_1 + \alpha^2 \cdot a_2 + \alpha^3 \cdot a_3 + \dots, \quad (7.11)$$

где a_1, a_2, a_3, \dots – постоянные коэффициенты. Для фокусировки изображения источника в линию меньшей ширины требуется более высокий порядок фокусировки, а малая ширина линии обеспечивает разделение соседних спектральных изображений.

В реальных приборах ширина линии на коллекторе определяются не только сферической аберрацией, но и массой частиц «М», шириной входной щели спектрометра S_1 , шириной приемной щели спектрометра S_2 , взаимным расположением щелей S , а также расталкивающим действием пространственного заряда пучка Q . Разрешающая способность R энергоанализатора определится:

$$R = \frac{D}{MS_1 + S_0 + S_2 + S + Q} \quad (7.12)$$

Следовательно, повышение разрешающей способности спектрометра, требует увеличения дисперсии энергоанализатора и использования малой ширины изображения источника заряженных частиц.

Дифракция медленных электронов дает информацию о кристаллографической структуре самых верхних слоев, которую невозможно получить методами, имеющими дело с частицами более высоких энергий. В частности, по дифракционной картине оператор может определить элементарную ячейку поверхностного слоя пленки. Однако этот метод невозможно использовать в процессе выращивания пленки, т. е. необходимо на время измерений перекрыть молекулярный поток. Дифрактометр электронов с низкой энергией состоит из электронной пушки (энергия 10-1500 эВ), четырех сеточной оптической системы и флуоресцентного экрана.

Дифракция быстрых электронов – этот метод несет информацию о форме растущего кристалла и типе формируемой решетки. (Более

подробно этот метод будет рассмотрен ниже).

7.8 Растровая электронная микроскопия

Растровая электронная микроскопия – это метод исследования поверхности образца, использующий энергетическое и пространственное распределение электронов, эмитированных из приповерхностного слоя образца под действием остророфокусированного электронного пучка (зонда).

Для создания изображения структуры поверхности в растровом электронном микроскопе (РЭМ) регистрируются либо вторичные электроны, либо упруго рассеянные первичные электроны. Для этого электронный луч последовательно должен проходить все участки поверхности образца (сканирование луча), а эмитируемые электроны с поверхности – попадать на коллектор электронов.

Когда первичные электроны пучка соударяются с поверхностью образца, в энергетическом спектре испускаемых с поверхности электронов условно можно выделить три типа электронов: истинно вторичные электроны, неупругоотраженные электроны, упруго отраженные электроны.

Истинно вторичные электроны имеют энергии, не превышающие 50 эВ, наиболее вероятная их энергия 3-5 эВ. Это электроны самого анализирующего вещества, которые смогли преодолеть потенциальный барьер (работу выхода) на границе твердое тело – вакуум. Необходимую для этого энергию они приобрели в результате столкновений с электронами пучка. Коэффициент истинно вторичной эмиссии S определяется как среднее число эмитированных вторичных электронов, приходящихся на один первичный.

$$S = \int_0^{\infty} n(x, E) f(x) dx, \quad (7.13)$$

где $n(x, E)dx$ – среднее число электронов, образованных одним первичным в слое dx на глубине x . Вероятность $f(x)$ выхода каждого электрона с поверхности обычно записывают:

$$f(x) = B \cdot \exp(-\alpha x), \quad (7.14)$$

где α и B – постоянные для данного вещества. Число вторичных электронов можно определить так:

$$n(x) = \frac{1}{E_g} \left(\frac{dE}{dx} \right)_g, \quad (7.15)$$

где E_g – энергия вторичных электронов; $(dE/dx)_g$ – эффективные энергетические потери в материале.

Глубина выхода истинно вторичных электронов не превышает 10 нм и обычно лежит в интервале 1-5 нм.

В узле регистрации вторичных электронов могут быть использованы

различные способы их детектирования:

- под углом к образцу расположен металлический коллектор с положительным потенциалом и силу тока вторичных электронов измеряют с помощью ВЭУ и усилителей тока;

- непосредственно у образца смонтирован каналовый электронный умножитель. При этом необходима экранировка, чтобы не исказить информационный сигнал высоковольтным полем умножителя;

- коллектор выполнен в виде полупроводникового детектора, представляющего собой высокоомную полупроводниковую пластину с заранее сформированным в поверхностном слое диффузионным р-п переходом. Вторичные электроны генерируют в таком коллекторе электронно-дырочные пары в обедненном слое основного объема. Перемещение носителей тока под действием приложенного к р-п переходу напряжения создает ток во внешней цепи, который затем усиливается. Детектор регистрирует силу 10^{-10} - 10^{-9} А, но ему свойственны повышенные шумы;

- с помощью сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) выносят из аналитической камеры часть регистрирующего тракта. В виде примера на рис. 7.7 представлена схема регистрации с использованием сцинтиллятора и ФЭУ как наиболее широко распространенная и обеспечивающая высокую детектирующую способность.

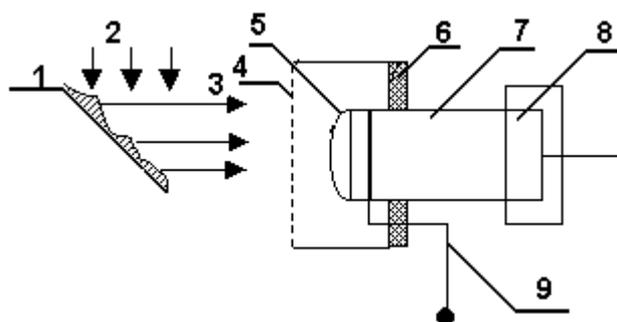


Рисунок 7.7 – Схема регистрации вторичных электронов: 1 – объект; 2 – электроны зонда; 3 – вторичные электроны; 4 – сетка; 5 – сцинтиллятор; 6 – изолятор; 7 – световод; 8 – ФЭУ; 9 – высоковольтный ввод.

Алюминированный полусферический сцинтиллятор монтируется внутри цилиндрической экранирующей камеры. На ее входе установлена сетка под регулируемым потенциалом. Это позволяет менять соотношение детектируемых истинно вторичных и упруго рассеянных электронов, т. е. изменять контраст изображения. Если коллектор размещен вне прямого пути движения электронов к нему, то можно обеспечить сбор только истинно вторичных электронов. Удары ускоряемых затем до энергий 10-12 кэВ электронов о поверхность сцинтиллятора вызывают световые вспышки. Световые кванты через световод передаются в ФЭУ, который преобразует их в электрические сигналы и усиливает последние.

Регистрируемая сила тока 10^{-13} - 10^{-12} А, полоса пропускания 10 МГц; шумы относительно небольшие, но узел сцинтиллятора обладает свойственным газовыделением. Кроме того, по поверхности сцинтиллятора иногда наблюдаются пробои.

8 Основы технологии изготовления приборов оптической электроники и фотоники

8.1 Технология приборов квантовой 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.

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. 8.1 представлена структура и зонная диаграмма квантового транзистора.

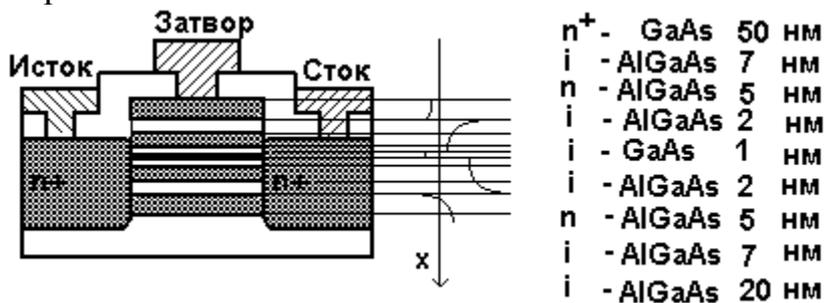


Рисунок 8.1 - Структура квантового транзистора и его зонная диаграмма.

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.

8.2 Технология одноэлектронных квантовых приборов

В одноэлектронных приборах реализуется принцип размерного квантования энергии в присутствии квантовой точки. Принципиальная схема одноэлектронного транзистора представлена на рис.8.2

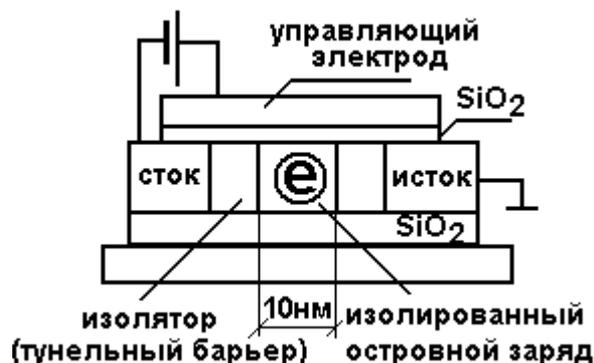


Рисунок 8.2 - Схема одноэлектронного транзистора

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

$$E = \frac{Q^2}{2C}, \quad (8.1)$$

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

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

$$\Delta E = \frac{e^2}{2C}. \quad (8.2)$$

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

$$\Delta E \gg kT, \quad (8.3)$$

где k – постоянная Больцмана

Кроме того, это изменение должно превышать квантовые флуктуации:

$$\Delta E \gg \frac{hG}{C}, \quad (8.4)$$

где G – проводимость туннельного перехода.

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

$$G \ll R^{-1}, \quad (8.5)$$

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.

8.3 Устройства памяти

На рис.8.3 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.

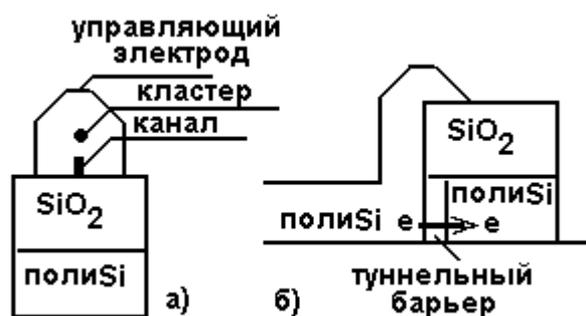


Рисунок 8.3 - а) схема формирования одноэлектронного устройства памяти, б) схема формирования одноэлектронного транзистора.

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.

8.4 Технология формирования светоизлучающих структур

В связи с энергосбережением стоит задача разработки высокоэффективных источников света. Достигнут мировой уровень световой отдачи 60 лм/Вт на люминесцентных лампах. На кристаллах из нитрида галлия световая отдача достигает 120 лм/вт. Однако изготовление источников на основе нитрида галлия сдерживается малой производительностью выращивания кристалла и огромной стоимостью продукта. Неплохие результаты получены на излучающих структурах полупроводник- (GaN)-металл-(Au)- диэлектрик (полиSi- сапфир).

Подобные структуры могут быть получены методом горячего прессования под давлением порядка 100 тысяч атмосфер (flip-flee smd технологии).

Заключение

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

Рекомендуемая литература

1. Рожанский В. А. Теория плазмы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань». — 2012. — 320 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). Режим доступа <http://e.lanbook.com/view/book/2769/page1/>
2. 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 : Экз – 103
3. Александров С. Е., Греков Ф. Ф. Технология полупроводниковых материалов: Учебное пособие. 2 е изд., испр. — СПб.: Издательство

«Лань», 2012. — 240 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1290 7 Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/3554/>

4. Блюменштейн В. Ю., Клепцов А. А. Проектирование технологической оснастки: Учебное пособие. 2 е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 224 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1099 6 Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/628/>

5. Основы физики плазмы: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. / Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. - СПб.: Издательство "Лань", 2001. - 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6. Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/1550/>

Периодическая литература (за последние 5 лет).

Технология машиностроения: обзорно-аналитический, научно-технический и производственный журнал. - М.: Технология машиностроения. - ISSN 1562-322X. -

Компоненты и технологии: научно-технический журнал. - М. : Издательство Файнстрит.

Современные технологии автоматизации . - М. : СТА-Пресс. - ISSN 0206-975X. Выходит ежеквартально (Есть прилож.: эл. опт. диск (CD-ROM) - Шифр ЭН 308)

Журналы: “Известия вузов, серия физика”, “Автоматизация и современные технологии” и др.

Реферативные журналы: ”Электроника”, “Физика”

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Технология приборов оптической электроники и фотоники
Учебно-методическое пособие по самостоятельной работе

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