

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

Кафедра электронных приборов

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ
КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное пособие
для студентов направления
«Электроника и наноэлектроника»

Томск 2018

Орликов Леонид Николаевич.

Специальные вопросы технологии приборов квантовой электроники: учебное пособие для студентов направления «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2018. - 103 с.

В пособии рассматриваются:

- физические принципы формирования приборов квантовой электроники и наноэлектроники;
- основные приемы построения последовательностей технологических операций при формировании и синтезе оптических материалов;
- современные технологии, применяемые при производстве приборов квантовой электроники и наноэлектроники;
- принципиальные схемы последовательностей технологических операций;
- оптимальные режимы проведения технологических операций;
- анализ достоинств и недостатков известных технологий формирования оптических материалов на элементах квантовой электроники и наноэлектроники.

Приведены основы конструирования и сервисного обслуживания вакуумных систем.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Специальные вопросы технологии приборов квантовой электроники»

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2018 г.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОВ
КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие
для студентов направления
«Электроника и наноэлектроника»

Разработчик
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____Л.Н.Орликов
« ____ » _____ 2018 г

Томск 2018

Содержание

Введение	6
1 Вакуумная технология	8
1.1 Средства получения вакуума для приборов квантовой электроники	8
1.2 Диффузионные насосы	12
2 Анализ вакуумных систем	14
2.1 Масс-спектрометрия	14
2.2 Тенденции развития масс-спектрометрии	20
3 Подготовка изделий квантовой электроники к технологическим операциям	24
3.1 Электрофизические методы очистки	24
3.2 Ионное травление материалов	28
4 Пленочная технология, эпитаксия	39
4.1 Процессы конденсации пленок при формировании приборов квантовой электроники	39
4.2 Технология получения высококачественных пленок	43
4.3 Электрофизические методы формирования пленок на вакуумных установках	47
4.4 Искусственная эпитаксия пленок для приборов квантовой электроники	52
4.5 Боковая эпитаксия	57
4.6 Альтернативные методы создания эпитаксиально подобных структур	58
5 Сорбционные процессы на поверхности приборов квантовой электроники	60
5.1 Адсорбция	60
5.2 Десорбционные процессы	60
5.3 Хемосорбция	61
5.4 Абсорбция	61
5.5 Диффузионное газовыделение	62
6 Сертификация технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов квантовой электроники	63
6.1 Общие понятия	63
6.2 Цели и принципы сертификации. Структура Системы сертификации ГОСТ Р	65
6.3 Стандартизация как нормативно-методическая база сертификации и товарной экспертизы	72
6.3.1 Унификация, нормализация и стандартизация в	72

производстве электровакуумных приборов	72
7 Разработка технической документации по методам эксплуатации технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала	82
7.1 Типы документации. Виды инструкций	82
7.2 Правила устройства электроустановок.....	89
8. Компьютеризация технологических процессов.....	92
8.1 Рекомендации по использованию ЭВМ в технологии	92
8.2 Процесс ввода технологической информации в ЭВМ.....	92
8.3 Система «КАМАК».....	93
8.4 Автоматизированные рабочие места (АРМ).....	95
8.5 Системы автоматического управления и регулирования технологическими процессами.....	95
Список литературы.....	102

Введение

Технологией электронных приборов называют область науки и техники, объединяющую совокупность знаний о способах переработки и направленного изменения свойств материалов и изделий, и о методах осуществления технологических процессов.

Технологический процесс является результатом исследований и разработок в следующих областях: общей физики, физики твердого тела, физики тонких пленок, физической химии, кристаллохимии, электрохимии, химической термодинамики, материаловедения, теории взаимодействия высокоэнергетических пучков с поверхностью твердого тела и т. д.

Технология, как наука, имеет своей целью выявления физических, химических, механических и других закономерностей, которые могут быть использованы, для наиболее эффективного производства готового продукта при минимальных материальных и трудовых затратах.

Технология всегда направлена на поиск и выявление новых закономерностей, которые могут быть использованы в производстве, поэтому развитие ее имеет следующую структуру:

1. Научное исследование;
2. Технологическая разработка материалов изделия;
3. Производственное внедрение технологической разработки.

Конечной целью технологии является разработка технологических процессов для массового изготовления изделий.

Специальные вопросы технологии производства приборов квантовой электроники неразрывно связаны с конструкцией и принципом действия изделия. Поэтому для понимания особенностей технологического цикла и анализа совокупности, используемых для его осуществления процессов или явлений необходимо, сначала изучить особенности конструкции электровакуумных, полупроводниковых и микроэлектронных приборов и особенности применяемых при их создании материалов.

Квантовая электроника — область физики, изучающая методы усиления и генерации электромагнитных колебаний, основанные на использовании эффекта вынужденного излучения при возбуждении газа или твердого тела. Сверхкороткие лазерные импульсы дали возможность наблюдать и управлять динамикой быстропротекающих процессов в химии, биологии и физике. Фемтосекундные импульсы используются для изучения динамики молекулярных систем, напр. перестройки связей меж-

ду атомами или группами атомов в молекуле. Аттосекундные импульсы позволяют изучать динамику субмолекулярных систем, электронов и др. лёгких частиц. За создание камеры, использующей фемтосекундные лазерные импульсы и позволяющей получить мгновенные снимки молекул в процессе самых быстрых химических реакций, А. [Зивейл](#) был удостоен Нобелевской премии в 1999. В 2001 были получены лазерные аттосекундные импульсы (10^{-18} с), представляющие собой предельно допустимые по краткости сгустки световой энергии, содержащие неск. колебаний светового поля (вплоть до одного). Аттосекундные импульсы позволяют получить изображение электронной структуры атомов и проследить динамику электронных процессов в атомных системах с большим разрешением.

Объектами изучения дисциплины являются получение принципиально новой элементной базы наноэлектроники на основе электронно-лучевой и плазменной технологии. Дисциплина изучает организацию современных инновационных нанотехнологий на базе компьютерного управления технологическими процессами, позволяющих решать перспективные задачи предприятий.

В дисциплине изучаются такие высокие технологии как технология получения элементов преобразования оптического излучения, элементов акусто - и оптоэлектроники. Изучение данной дисциплины прививает навык прогнозирования ситуаций, возникающих в процессе профессиональной деятельности. Базовые знания, способность к анализу эффективности инноваций позволяют выпускникам быть уверенными и авторитетными руководителями отделов перспективных технологий предприятий, главными инженерами, энергетиками, главными специалистами крупнейших предприятий. Изучение дисциплины устраняет неопределенность выбора профессии, позволяет сформировать программу личного творческого роста, прививает навык адаптации к будущей профессии.

Получение приборов квантовой электроники основано на изучении таких разделов как вакуумная технология, электрофизическая обработка материалов с помощью высоких передовых технологий, процессы получения высококачественных пленок, разработка документации и инструкций по организации производства приборов квантовой электроники.

1 Вакуумная технология

Особенность вакуумных технологий для приборов квантовой электроники состоит в том, что приборы квантовой электроники получают при пониженных давлениях в условиях вакуума. Это связано с необходимостью устранения нежелательных реакций испаряемых материалов с остаточными компонентами атмосферы, а также для обеспечения возможности свободного пробега молекул от генератора пара металла до места конденсации (подложки). В процессе формирования приборов квантовой и оптической электроники пары материала образуют соединения с углеродом (карбиды), с азотом (нитриды), с кислородом (оксиды), с водородом (гидриды). В связи с этим в квантовой электронике в основном применяются специальные средства откачки газа, не содержащие паров масел от применяемого оборудования.

1.1 Средства получения вакуума для приборов квантовой электроники

1.2 Откачные средства специального назначения

Насосы специального назначения предназначены для удаления газов от атмосферного давления с минимальным количеством углеводородов в остаточном газе. На рис. 1.1 *а* представлена схема многопластинчатого форвакуумного насоса типа НВП-6. Такие насосы при скорости откачки 3–6 м³ /с создают вакуум 500 – 1000 Па (5–10 мм рт.ст.) для пневмотранспорта, для ряда технологических целей.

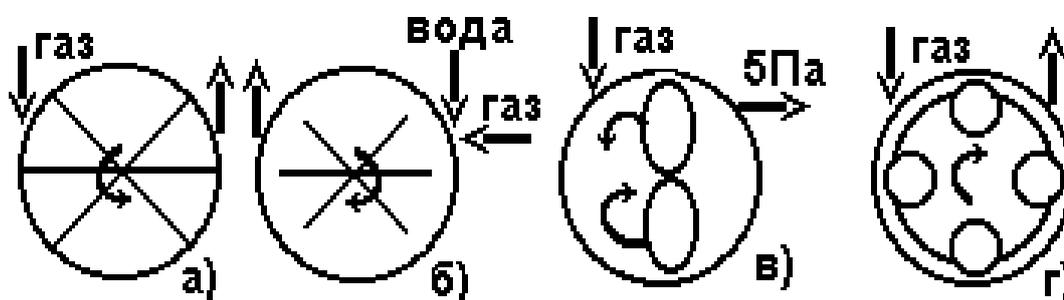


Рисунок 1.1 – Схемы безмасляных форвакуумных насосов;
а) – многопластинчатый; б) – водокольцевой; в) – двухроторный;
г) – эластомерный.

На рис. 1.1 б представлена схема водокольцевого насоса типа ВВН-3. Такой насос откачивает газ до давления 1 кПа (100 мм рт.ст.) вследствие эжектирующего эффекта, создаваемого вращением воды внутри насоса. Широкое распространение подобные насосы нашли для транспортировки сыпучих материалов. На рис. 1.5 в представлена схема двухроторного насоса типа ДВН-50. Подобный насос применяется для быстрого получения высокого вакуума (0,01 Па) при небольшом количестве углеводородов в остаточном газе. На рис. 1.5 г представлена схема механического безмасляного эластомерного насоса. Срок службы таких насосов определяется прочностью эластичной трубки, по которой катаются ролики (~100 час). В последнее время за рубежом появились безмасляные форвакуумные спиральные насосы с фторопластовым покрытием фирмы VARIAN, развивающие вакуум до 10^{-2} мм рт.ст.

Турбомолекулярные насосы представляют собой систему расположенных в полости цилиндра дисков, которые вращаются со скоростью до 40 тыс. об /мин. На рис. 1.2 представлена схема турбомолекулярного насоса типа ТМН-3000 и фрагмент спектра остаточных газов на выходе насоса. В последних разработках этих насосов могут изменяться расстояния между дисками, что позволяет им работать с атмосферного давления без предварительной откачки.

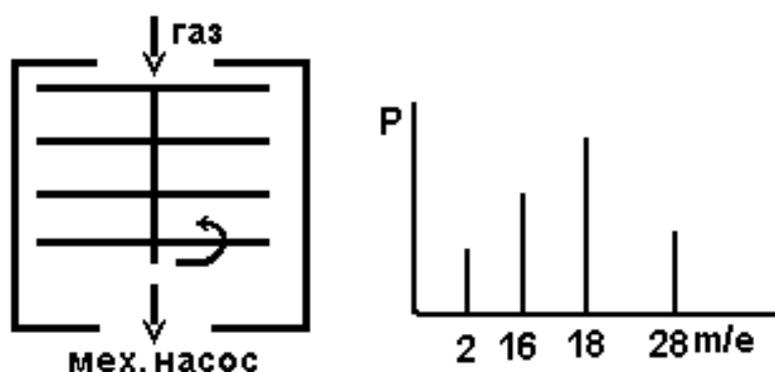


Рисунок 1.2 – Схема турбомолекулярного насоса и спектр остаточных газов на его выходе

Криогенные насосы используют принцип прилипания газов к холодным поверхностям. Насос содержит криопанель в виде медной перфорированной поверхности с трубками, по которым прокачивается жидкий азот или гелий. Криогенные вакуумные насосы, насосы поверхностного действия, предназначены для создания высокого, сверхчистого вакуума. Принцип работы основан на конденсации и

адсорбции газов на рабочих поверхностях, охлажденных до криогенных температур. Они характеризуются гораздо большей скоростью откачки чем у традиционных масляных диффузионных или турбомолекулярных насосов.

Особенностью является то, что с течением времени криогенные насосы требуют очистки от инея и снега (регенерации). Этот недостаток устранен в двухтактных криогенных насосах, когда один насос работает, а второй находится на регенерации.

Геттерные насосы работают на принципе поглощения газа парами испаряемого материала: геттера (чаще титана) с последующим химическим соединением газов с геттером и вмуровыванием в стенки корпуса насоса. Испарение геттера производится термическим нагревом (испарительные насосы), в электрической дуге (электродуговые насосы), в электрическом разряде в магнитном поле (магнитные электроразрядные насосы).

Магнитные электроразрядные насосы. В отличие от ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана в магнитных электроразрядных насосах для получения активных пленок и для ионизации газов используются разряд в магнитном поле и вызванное им катодное распыление титана. Вследствие этого в магнитных электроразрядных насосах устранен такой существенный недостаток, присущий ионно-геттерным насосам, как наличие накаливаемых элементов электродной системы. Они служат для создания сверхвысокого вакуума (10^{-8} Па). На рис 1.3 представлены схемы электродугового (рис. 1.3 а) и магнитного электроразрядного (рис 1.3 б) насоса типа НОРД 250.

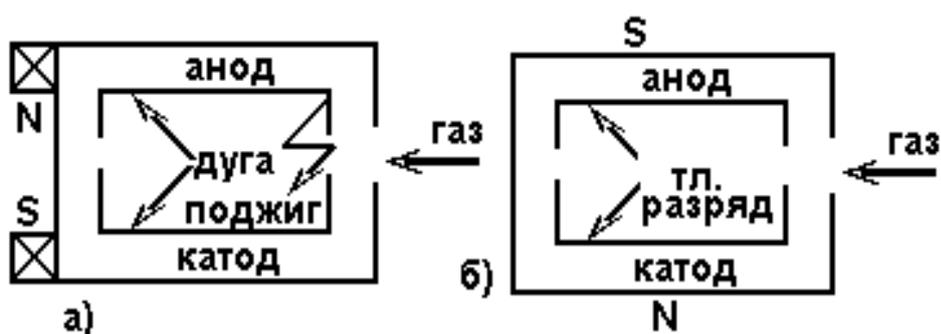


Рисунок 1.3 – Схема электродугового и электроразрядного насосов

Давление запуска для электродугового насоса близко к атмосферному, для электроразрядного насоса – 1 Па. Для уменьшения углеводородов рекомендуется запуск при давлениях 0,01 Па. Первоначально относительно высокая быстрота действия насоса по этим газам постепенно уменьшается, особенно для гелия, не образующего с

титаном твердых растворов. При бомбардировке материала катода ионами тяжелых газов или при нагреве его разрядом до температуры свыше 470 К наблюдается обратное выделение легких газов. Тяжелые инертные газы – аргон, криптон и ксенон – откачиваются благодаря адсорбции ионов катодом. Вследствие больших молекулярных размеров диффузия этих газов в катод затруднена, и первоначально высокая быстрота действия насоса по газам резко уменьшается. Поглощение этих газов происходит в основном на периферийных участках ячеек катодов, куда наносится титан, интенсивно распыляемый тяжелыми ионами из центральных частей ячеек катодов. При откачке аргона с давлением около 10^{-3} Па и при длительной откачке воздуха с давлением больше 10^{-3} Па, содержащего 1% аргона, наблюдается резкое периодическое повышение давления, называемое аргонной нестабильностью. Тем не менее присутствие аргона с парциальным давлением меньше 10^{-3} Па при периодическом обезгаживании насоса оказывается полезным, так как при этом интенсифицируется распыление материала катода и увеличивается скорость откачки активных газов.

Таким образом, важной особенностью магниторазрядных насосов является своеобразная авторегулировка скорости испарения материала катодов, обеспечивающая экономное расходование материала и большой срок службы насоса. Поскольку ионный ток приблизительно пропорционален давлению, он часто используется для оценки давления в насосе и откачиваемом сосуде. Простота устройства и возможность работы в любом положении также выгодно отличают магнитные электроразрядные насосы от других.

Для понимания работы магниторазрядных насосов, помимо различий в механизме поглощения различных газов, необходимо иметь в виду изменение характера газового разряда с изменением давления. При давлении больше 10^{-1} Па ток разряда велик вследствие большой электропроводности разрядного промежутка; чтобы разряд при этом не перешел в дуговой, ток разряда специально ограничивается (в малых насосах используется балластное сопротивление, в крупных насосах используют более сложные электрические цепи), что приводит к уменьшению падения напряжения на разрядном промежутке. При этом уменьшается энергия ионов и, следовательно, резко снижается скорость распыления материала катодов. Поэтому быстрота действия насоса при высоких давлениях невелика, а относительно большой ток вызывает разогрев электродов и сильное газовыделение, вследствие чего давление в системе повышается. В этих условиях целесообразно продолжать откачку

насосом предварительного разрежения до начала периода пуска, когда эффект откачки магнитным электроразрядным насосом становится заметным. В период пуска, который может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от состояния насоса, давление понижается от 10^{-2} до 1 Па и разряд принимает форму, характерную для высокого вакуума. Сопротивление разрядного промежутка увеличивается, ток уменьшается, и происходит рост анодного напряжения, что ведет к увеличению быстроты действия насоса. Период пуска завершается относительно быстрым переходом в область высокого вакуума; ток продолжает уменьшаться пропорционально давлению, анодное напряжение и быстрота действия насоса достигают номинальных значений.

1.2 Диффузионные насосы

Диффузионные насосы. На рис. 1.4 представлена схема диффузионного насоса и его зависимость скорости откачки от давления. На дне насоса имеется масло.

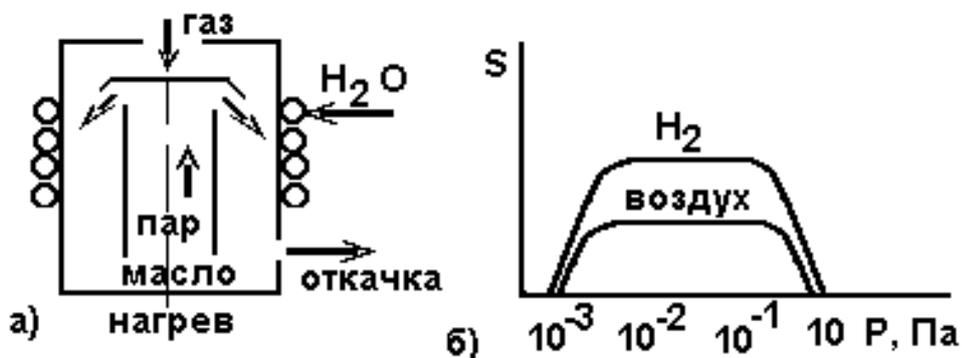


Рисунок 1.4 - а) схема диффузионного насоса; б) зависимость скорости откачки диффузионного насоса от давления

При откачке выхода насоса (форвакуумным механическим вакуумным насосом) в нем обеспечивается давление около 10 Па. Вследствие нагрева пары масел устремляются через круговое сопло на охлаждаемые стенки корпуса. Выходя из сопла, струя пара увлекает молекулы газа за счет эжектирующего эффекта. Пары масел, конденсируясь на стенках корпуса, стекают на дно, где снова возгоняются в пар. Таким образом, при круговороте масла обеспечивается уплотнение газа до давления около 10 Па, при котором возможно его удаление механическим форвакуумным насосом. Предельно достигаемый вакуум

объясняется диффузией паров масел из высоковакуумного насоса в откачиваемый объем.

Бустерные насосы являются разновидностью диффузионных насосов. Особенностью бустерных насосов является более мощный подогрев масла и соответственно более мощная паровая струя. Такие насосы имеют явно выраженный максимум откачки в диапазоне давлений 1 Па.

Для диффузионных насосов нашли применение масла марок ВМ-1, ВМ-5, ВМ-7, обеспечивающие достижение вакуума на уровне 10^{-4} Па и менее. В последнее время для заправки высоковакуумных насосов применяются более термостойкие масла и кремнеорганические жидкости. Это: Алкарен 1, Алкарен -24, 5Ф4Э и др. Для бустерных насосов широко применяются относительно стойкие к окислению масла марок ВМ-3, ПФМС-1, масло «типа Г», Алкарен- 12. Такие масла не боятся прорыва атмосферы в вакуумную систему. Кроме того, заменяя масло на более современное, появляется возможность использовать типовое имеющееся оборудование для получения «безмасляного» вакуума с минимальным количеством углеводородов.

2 Анализ вакуумных систем

2.1 Масс-спектрометрия

Общее давление газа в вакуумной системе по закону Дальтона складывается из суммы парциальных давлений. Приборы для измерения парциальных давлений называются газоанализаторами или спектрометрами. Принцип работы масспектрометра заключается в ионизации газа с последующим разделением тока ионов I_i по массам. В случае однозарядной ионизации *массовое число* иона, отнесенное к заряду (M / e) равно молекулярной массе иона. На рис. 2.1 приведен фрагмент записи спектра масс. В таблице 2.1 приведено соотношение интенсивностей спектральных линий для расшифровки спектра масс.

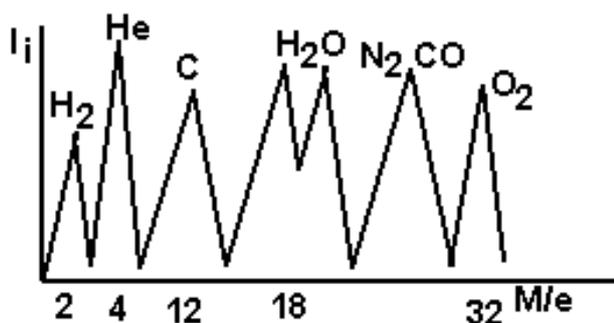


Рисунок 2.1 – Спектр масс

Таблица 2.1 – Соотношение интенсивности спектральных линий для некоторых газов

Газ	Ионы	Масса	Ток, %	Газ	Ионы	Масса	Ток, %
H ₂	H ₂ ⁺	2	100	He	He ⁺	4	100
H ₂ O	H ₂ O	18	100	N ₂	N ₂ ⁺	28	100
O ₂	O ₂ ⁺	32	100	O ₂	O ⁺	16	10
CO	CO	28	100	CH ₄	CH ₄	16	100
	C	12	12		CH ₃	17	81

Для измерителей парциальных давлений характерны следующие параметры:

1) K – газоаналитическая чувствительность к роду газа, равная отношению парциальной компоненты P_n к общему давлению.

2) предел анализа верхнего давления, т.к. с увеличением давления (более 0,01 Па) возрастает рассеяние ионов.

- 3) диапазон измеряемых масс;
 4) разрешающая способность (R) как отношение ионного тока (высоты пика) предполагаемого элемента к разнице масс между пиками:

K – газоаналитическую чувствительность к роду газа можно рассчитать по формуле:

$$K = P_n / P \text{ [Ампер/Паскаль]}.$$

а R - разрешающую способность по формуле:

$$R = M / (M + \Delta M).$$

На рис. 2.2 представлена схема спектрометра с магнитной разверткой.

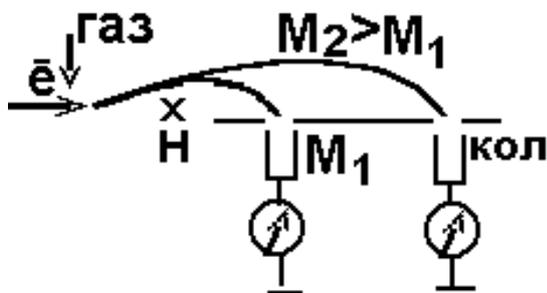


Рисунок 2.2 – Схема спектрометра с магнитной разверткой

Электроны с термокатода ионизируют исследуемый газ. Ионы, в пролетной камере искривляют свою траекторию в магнитном поле под действием силы Лоренца. Радиус искривления r обратно пропорционален массе иона M и определяется соотношением:

$$r = 1 / B [2MU / e], \quad (2.1)$$

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 масс-спектрометрические гелиевые течеискатели ПТИ-6, ПТИ-7, ПТИ-10.

Методика поиска не герметичности в вакуумной системе заключается в следующем. Вакуумная система обдувается гелием. Гелий

проникает через не герметичность в масс- спектрометрическую камеру течеискателя. На горячем катоде течеискателя происходит термическая ионизация молекулы гелия. Образованные ионы формируются магнитным полем на коллектор. Ток коллектора регистрируется прибором и громкоговорителем. При обдуве вакуумной системы гелием, течеискатель позволяет отыскивать малейшие негерметичности. Разрешающая способность подобного класса приборов относительно невелика ($M / \Delta M = 30$). В последнее время появились водородно-гелиевые спектрометры-течеискатели СТИ-11, СТИ-12.

В практике исследований состава газа в области квантовой электроники широкое применение нашел измеритель парциальных давлений омегатронного типа (ИПДО), у которого произведение разрешающей способности R на массовое число M – есть величина постоянная. Это позволяет оперативно определять род газа (M) и разрешающую способность по массам ($\Delta M = M/R$). Например, для реперной точки $M=18$ (H_2O) разрешающая способность прибора постоянна $R=20$. На рис. 2.3 представлена схема датчика масспектрометра.

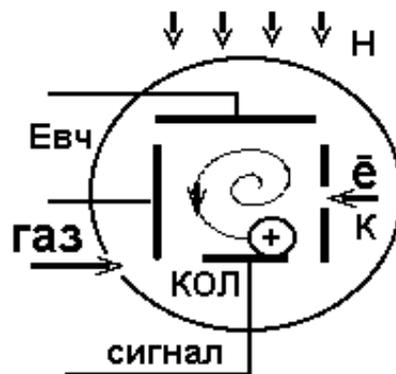


Рисунок 2.3 – Схема датчика омегатрона

При обеспечении в объеме датчика давления менее 10^{-2} Па включается термокатод K и на пластины подается напряжение $E_{вч}$ до 5 В с изменяющейся частотой f от единиц килогерц 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:

$$M = c \cdot B / f , \quad (2.2)$$

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 (2.2) проводить расшифровку спектра. Сигнал с коллектора КОЛ подается на усилитель и записывается на ленту самописца. Разрешающая способность омегатрона R определяется отношением:

$$R = M / \Delta M . \quad (2.3)$$

На рис. 2.4 представлен фрагмент записи спектра масс с расшифровкой по массам.

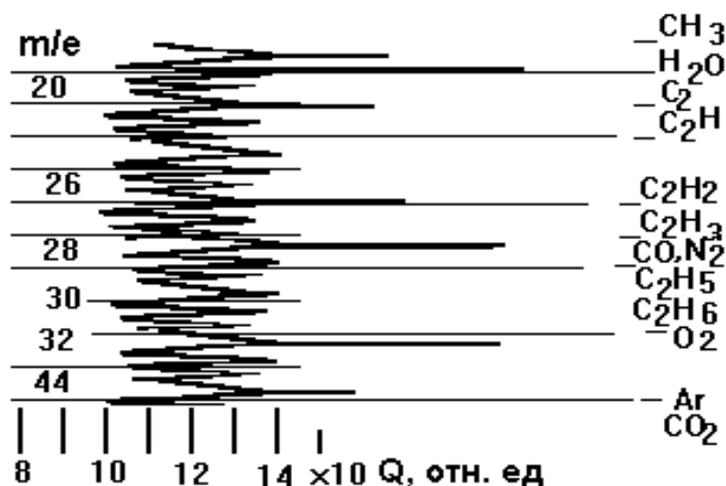


Рисунок 2.4 – Вид диаграммы с расшифровкой спектра

На рис. 2.5 представлена схема времяпролетного масспектрометра (хронотрона). Он содержит стартовую и финишную сетки.

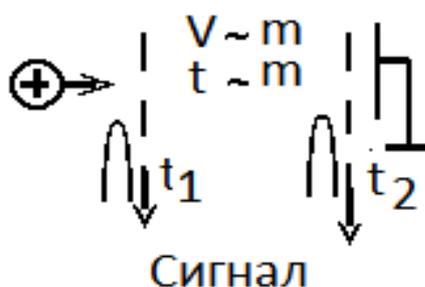


Рисунок 2.5 – Схема время пролетного масспектрометра (хронотрона)

В хронотроне сигнал прихода ионов со стартовой сетки поступает на ждущий осциллограф. Скорость пролета ионов между сетками пропорциональна массе иона и его энергии. Разрешающая способность масспектрометра достигает 200.

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 :

$$Q = Ag\Omega. \quad (1.8)$$

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

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

$$Q = \kappa N. \quad (1.9)$$

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

$$\sum Q = (Ag\Omega)_k + (Ag\Omega)_u + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (1.10)$$

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 $P_{раб}$, при котором проводится технологический процесс.

$$S_n = \sum Q / P_{раб} . \quad (1.11)$$

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

$$S_\phi = \sum Q / P_{вых} . \quad (1.12)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{вых} = 10$ Па (0,1 мм рт ст). Следует выбрать тот механический насос, который обеспечивает требуемую скорость откачки при давлении 10 Па.

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

$$S_n = \gamma S_o , \quad (1.13)$$

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

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

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt . \quad (1.14)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_n} , \quad (1.15)$$

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 (1.16):

$$t = V / S_{\text{э}} (\ln P_1 / P_2). \quad (1.16)$$

Согласование откачных средств

На практике согласование проводят графически, строя зависимости производительности откачных средств от давления. На рис. 1.1 представлен вариант графического согласования диффузионного и механического 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.

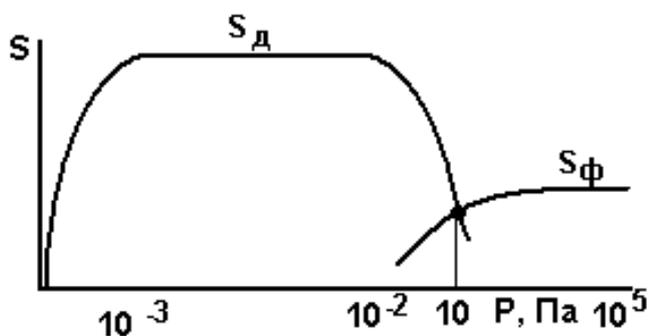


Рисунок 2.1 – Графическое согласование вакуумных насосов

2.2 Тенденции развития масс-спектрометрии

К числу основных методов течеискания в квантовой электронике относятся масс-спектрометрический, галогенный, плазменный, ионизационный, манометрический и др. Они различаются по чувствительности, условиям проведения испытаний и другим параметрам. По-прежнему самым чувствительным, селективным и надежным остается масс-спектрометрический метод контроля герметичности. НПФ «Прогресс» является разработчиком и производителем масс-спектрометрических (серия МС) и галогенных (ИГС) течеискателей, а также аппаратуры и методик, связанных с вакуумной техникой и контролем герметичности.

Масс-спектрометрические течеискатели основаны на принципе ионизации газов и паров с последующим разделением образовавшихся

ионов по отношениям их массы к заряду в скрещенных магнитных и электрических полях. Этот метод наиболее универсален и чувствителен. Течеискатели серии МС представляют собой высокочувствительные статические неюстируемые магнитные масс-анализаторы, настроенные на регистрацию потока пробного газа, как правило гелия, имеющего наибольшую проникающую способность. Однако течеискатель может быть настроен на другие моноатомные газы в диапазоне масс от 1(Н) до 40 (Аг). Конструктивно течеискатель представляет собой автономный модуль в металлическом корпусе, который может быть установлен на транспортную тележку. В корпусе находятся масс-спектрометрический анализатор, настроенный на регистрацию ионов гелия в качестве пробного газа, моноблок вакуумной системы, управляющая электроника, высоковакуумный насос, датчики вакуума и гелиевая течь Гелит 1, предназначенная для настройки анализатора и калибровки потоков пробного вещества, регистрируемых течеискателем. Форвакуумный насос (ФВН) может быть встроен в корпус течеискателя, либо, для высокопроизводительных насосов, со скоростями откачки более 20 м³/час, установлен на нижней полке транспортной тележки. Значение измеряемого потока отображается на цветном, либо монохромном ЖК индикаторе контрольной панели течеискателя.

Отличительной особенностью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей серии МС, выпускаемых научно-производственной фирмой «Прогресс», является применение высоковакуумного насоса гибридного типа (ВНГТ-5, ВНГТ-150), разработанного производителем (патент на изобретение 2490519) и уникального контроллера управления ВНГТ, поддерживающего точность установки скорости вращения ротора на уровне 0,5% . При возможности установки скорости вращения от 1 до 90 тыс. об./мин., оптимальной выбрана скорость вращения ротора ВНГТ равная 20/26 тыс. об./мин. для ВНГТ-5/ ВНГТ-150 соответственно. При этой скорости обеспечивается необходимое для безопасной работы катода масс-спектрометра разрежение в камере анализатора и относительно медленное удаление гелия из области ионизации. В свою очередь увеличение времени нахождения не в камере анализатора повышает вероятность ионизации и, как следствие, приводит к увеличению тока пучка ионов пробного вещества, что с одной стороны существенно увеличивает чувствительность масс-спектрометра (до 5,0Е-13 м³ Па/с), и, с другой, позволяет снизить ток эмиссии катода до величины 15 мкА. Такой малый ток эмиссии обеспечивает ресурс вольфрамового прямонакального катода, применяемого в течеискателе, до 1000 часов при максимальной

стабильности эмиссионных характеристик в течение всего срока службы и минимальных шумах вакуумной системы.

Следует отметить, что отечественные течеискатели на 30-50%, а зачастую и на 100% дешевле импортных, не уступая им по основным техническим характеристикам и критериям надежности. Службы эксплуатации потребителей интересуют прежде всего частота технического обслуживания, ремонтпригодность, наличие, либо отсутствие дорогостоящих импортных комплектующих, сроки их поставки, массо-габаритные характеристики. Основу квантовой электроники составляет новая разработка Центра Проектирования российской компании ЗАО "ПКК Миландр" 1986BE4У – 32-разрядный RISC-микроконтроллер с ядром ARM Cortex-M0 и 8-канальным 24-разрядным $\Sigma\Delta$ АЦП. Микроконтроллер обеспечивает сбор данных с датчиков их первичную обработку информации в реальном времени и управление отдельными узлами течеискателя. К микроконтроллеру можно подключить через специальные формирователи датчики температуры и давления, а также формировать токи и напряжения для питания анализатора течеискателя. К основному контроллеру через внутренний интерфейс RS485 подключается электрометрический усилитель. К сожалению на российском рынке нет отдельных микросхем 24 –разрядных АЦП, поэтому предлагается использовать микросхему 1986BE4У для измерения сигнального тока анализатора, несмотря на его функциональную избыточность. В качестве преобразователя тока в электрометрических усилителях обычно используются специализированные прецизионные операционные усилители со сверхмалыми входными токами. На отечественном рынке в настоящее время им нет замены без потери в качестве измерений. К внутреннему интерфейсу подключается контроллер управления турбомолекулярным насосом. Используемая в производимых устройствах схема управления может быть адаптирована под использование отечественного контроллера 1887BE3Т программно совместимым с используемым. В качестве многофункционального пульта управления и мониторинга предлагается использовать панельный компьютер.

В последнее время разработаны датчики не герметичности на основе акустооптических преобразователей. Преобразователь электрического сигнала в акустический (излучатель) основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте, состоящем в механической деформации пьезокристалла под действием внешнего электрического поля. Акустический сигнал представляет собой волну упругих механических

возмущений, распространяющихся в твердом теле со скоростью звука. Преобразователь акустического сигнала в электрический (приемник) основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте – появлении при механической деформации кристалла разделенных зарядов противоположного знака и связанных с ними электрических полей. Для применения наиболее важны поверхностные акустические волны (ПАВ), распространяющиеся в поверхностном слое пьезокристалла толщиной порядка длины волны. Длина волны мала лишь для достаточно высоких частот. Например, в диапазоне 10...1000 МГц, она составляет 100...1 мкм. Поверхностные акустические волны могут генерироваться и управляться с помощью тонкопленочных структур, формируемых на поверхности подложки из пьезокристалла, что и позволяет создавать методами микроэлектроники.

3 Подготовка изделий квантовой электроники к технологическим операциям

3.1 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*). Особенность в том, что стеклоподобные материалы и кристаллы оптоэлектроники не чувствительны 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 др.) 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. 3.1 представлены некоторые системы очистки и травления.

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.

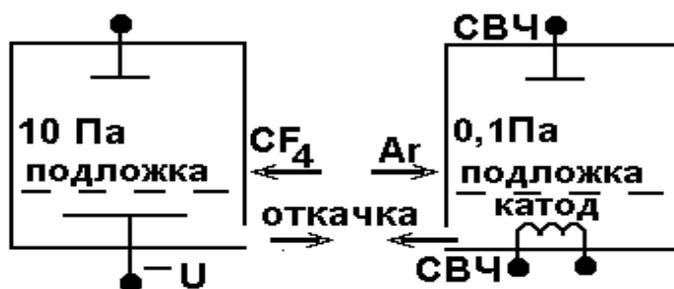


Рисунок 3.1 - Системы плазмохимической очистки

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 отсутствие 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. Для операций очистки необходима плотность тока 3-5 мА/см². При малых плотностях тока возможно формирование нежелательных углеродных пленок. При плотностях тока 5-7 мА/см² происходит травление материала и возникает вероятность имплантации бомбардирующих атомов в материал. 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 газовой выделения 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.

Контроль качества очистки

На практике применяется большое количество различных методов для оценки качества очистки поверхностей деталей квантовой электроники. Существуют разновидности фотометрического метода масс-спектрометрический, различные электрохимические методы, радиохимические, электронная Оже – спектроскопия, метод локального рентгеновского анализа, вторичной ионной масс- спектроскопии (ВИМС), сканирующей зондовой микроскопии

Методы, основанные на смачиваемости поверхности пластин жидкостями, позволяют также фиксировать физическую неоднородность поверхности, обнаруживать органические загрязнения. 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.

Указанным методам присущи недостатки: малая чувствительность при низких концентрациях загрязнений; отсутствие возможности контроля других типов загрязнений.

Метод распыления. По сути, он сходен с предыдущим методом и заключается в том, что на исследуемую поверхность пульверизатором распыляется чистая вода. При этом напылении капельки воды либо смыкаются, образуя непрерывную водную пленку, если поверхность чистая, либо остаются разрозненными, если на поверхности имеются гидрофобные загрязнения. Степень загрязнения поверхности данный метод позволяет выразить количественно. С этой целью берут стеклянную пластинку, на которую наложена прозрачная бумага с миллиметровыми делениями. Далее используется ЭВМ с видеокамерой.

Оценка параметров плазмы

В таблице 3.1 представлены некоторые соотношения и ориентировочные значения параметров плазмы для слаботоочного газового разряда ($I=0,5$ А, $U= 1$ кВ, $d=1$ см).

Таблица 3.1 - Соотношения и ориентировочные значения параметров плазмы для слаботоочного газового разряда

Параметр	Формула	Значение
Скорость электрона в электрическом поле в вакууме	$V_e = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$	$2,6 \cdot 10^7$ м/с
Скорость иона в электрич поле	V_i	$6 \cdot 10^5$ м/с
Сечение столкновения	$\delta = 3 \cdot 10^5 / T_e$	$\delta = 10^{-6}$ – дуга
Электронная температура (T_e)	$\frac{3}{2} kT_e = eU_i$	$1,1 \cdot 10^5$ К
Энергия, получаемая электроном на участке пробега	$\Delta W = eE\lambda_e$	$1,8 \cdot 10^{-19}$ Дж
Энергия теплового движения электрона	$W_T = 3/2 kT_e$	$2,67 \cdot 10^{-19}$ Дж
Коэф термического равновесия	$\Delta W / W_T$	0,67
Плотность электрического тока	$J = I/S_3$	$5 \cdot 10^{-4}$ А/см ²
Напряженность поля	$E = U/d$	$2 \cdot 10^4$ В/м
Концентрация плазмы	$J = en_e V_e$	$1,2 \cdot 10^8$ 1/см ³
Частота столкновений электронов	$\nu_e = (ne^2 / \pi m)^{1/2} = 8980n^{1/2}$	10^{12} Гц
Пробег молекулы газа ($\lambda_{газ}$)	$(\lambda_{газ}) = 5 \cdot 10^{-5} / P$	10^{-3} м
Пробег иона	$\lambda_i = \sqrt{2} \lambda_{газ}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$ м
Кулоновский логарифм	$\Lambda = 23,4 - 1,15 \lg n - 3,45 \lg T_e$	$8,4 < 50$
Ленгмюровская (плазменная) частота	$\omega_0 = \left(\frac{4\pi ne^2}{m_e} \right)^{1/2}$	$5,94 \cdot 10^3$
Ларморовский радиус (B=0,3Тл)	$R = mV/eB$	$5,68 \cdot 10^{-7}$ м
Ларморовская частота	$f = gH/mc$	$2,55 \cdot 10^{-2}$
Ларморовская круговая частота вращения	$\omega = 2\pi f = 1/T$	$5,6 \cdot 10^9$
Период вращения электрона	$T = 2\pi m/eB$	$178,4 \cdot 10^{-12}$
Мера замагниченности	λ/R	10^2
Коэффициент диффузии (B=0)	$D_0 = \lambda_e V_e / 3$	$4,88 \cdot 10^4$
Параметр Холла	$\omega_e \tau_e$	4,93
Коэффициент анизотропии	D_0 / D_{\perp}	$2,6 \cdot 10^{13}$

3.2 Ионное травление материалов

Виды ионного травления

Под ионным травлением понимается процесс разрушения поверхности материала (мишени) под действием ионной бомбардировки. Ионное травление часто применяется в квантовой электронике для локального удаления материала или проделывания 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.

Методы, так называемого, сухого травления хорошо подходят для технологического процесса изготовления приборов квантовой электроники благодаря возможности анизотропного травления, что обуславливает высокое разрешение при переносе рисунка микросхемы. Сухое травление может осуществляться различными методами. При использовании методов ионного травления, включающего ионно-лучевое и ионно-плазменное травление, процесс травления происходит исключительно по механизму физического распыления. Реактивные методы, включающие собственно плазменное травление, реактивное электронно-лучевое травление и реактивное ионно-плазменное травление, основаны на различной степени сочетаний химических реакций, в ходе которых образуются летучие или квазилетучие соединения, и физических взаимодействий, таких, как ионная бомбардировка.

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. 3.2 представлены схемы указанных механизмов.

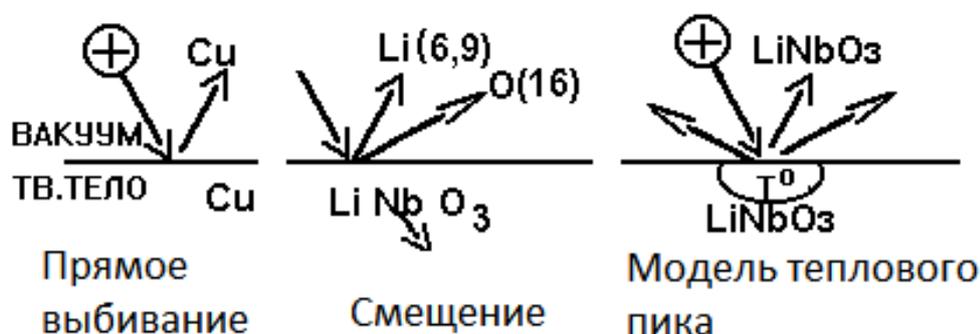


Рисунок 3.2 - Механизмы распыления поверхности под действием ионной бомбардировки

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

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

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

Типы распылительных систем

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

Диодные системы (см. рис 3.1) просты в устройстве, дешевы, обладают достаточной равномерностью травления, допускают работу на

реактивных газах. В числе недостатков таких систем следует отметить зависимость коэффициента распыления от давления газа, нестабильность вольтамперной характеристики, нарушение поверхностного состава (*стехеометрии*) при нанесении покрытий, малая скорость травления (30 нм/мин).

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

Тетродные системы имеют две автономных управляющих системы: по высокому напряжению и по низковольтному управлению. На рис. 3.3 представлена тетродная система ионно-плазменного распыления материалов. Положительно заряженные ионы газа (аргона) бомбардируют мишень 2, находящуюся под отрицательным потенциалом. Накаленный катод 1 служит источником электронов, способствующих ионизации газа. Атомы распыленного материала оседают на подложку 3. Для отсечки низкоэнергетичных ионов, ухудшающих адгезию пленки, на подложку подается отрицательный потенциал (до 200 В). Ток эмиссии электронов поддерживается с помощью анода 4.

В последнее время интенсивно развиваются системы травления на основе автономных ионных источников. На рис.3.4 представлена принципиальная схема газоразрядного ионного источника. Выход ионов обеспечивается за счет высокого извлекающего напряжения.

Травление с помощью автономных ионных источников в меньшей степени зависит от параметров подложки, ионный пучок можно локализовать в узкий пучок. В ионном источнике можно получать не только ионы газов, но и металлов.

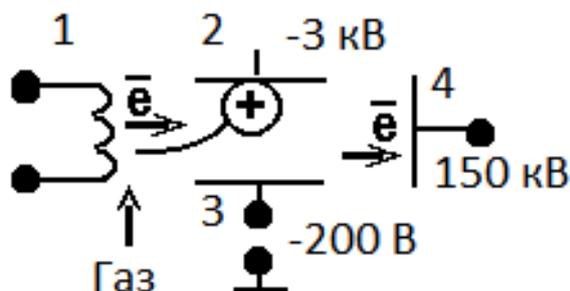


Рисунок 3.3 - Тетродная система ионно-плазменного распыления материалов

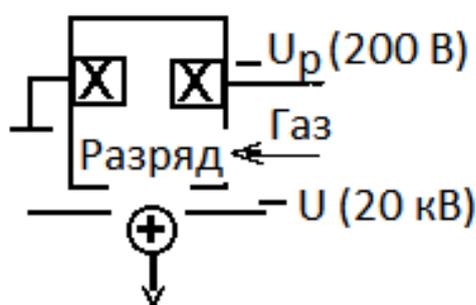


Рисунок 3.4 - Принципиальная схема газоразрядного ионного источника

Ионные источники для проведения технологических операций

Ионный источник должен обеспечивать следующие основные требования:

- величина тока ионов, ускоряющее напряжение, длительность импульса тока, равномерность распределения плотности тока;
- массовый и зарядовый состав ионов, минимальный расход газа, минимальная потребляемая электрическая мощность.

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

Некоторые параметры ионных источников

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

$$\alpha = I_i / I_p \quad (3.1)$$

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

$$\eta = \frac{I_i}{U_p I_p} \quad (\text{А/кВт}) \quad (3.2)$$

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

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

$$P = I_i / U^{3/2} \quad (3.3)$$

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

Газовая экономичность – отношение ионного тока к расходу газа.

$$F = I_i / Q \quad (3.4)$$

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

$$B = I / \Omega \quad (\text{А} \cdot \text{м}^2 \text{стер}) \quad (3.5)$$

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

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

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

$$X = \omega_e \tau_e \quad (3.6)$$

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

Чальд-Ленгмюровский предел плотности извлекаемого тока рассчитывается по формуле:

$$J = 1,72(\xi/A)0,5U^{3/2}/d^2; \quad J - \text{мА/см}^2, \quad \xi - \text{зарядность, } A - \text{ а.е.м.; } d - \text{ см.} \quad (3.33)$$

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

$$Q = \Phi / g = jt / en \quad (3.7)$$

Некоторые параметры сильноточных ионно-электронных источников

Сильноточным источником условно считается источник с током в импульсе более 1 килоампер.

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

$$J_{чл} = 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2} / d^2 \cdot S(Zm_e / m_i)^{1/2} \quad (3.8)$$

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

$$m_i = Y_{АЕМ} \cdot A, \quad (3.9)$$

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

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

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

Параметры плазмы связаны с током извлеченного пучка соотношением:

$$I = e \cdot n \cdot S(kT_e / 2\pi m)^{0,5}, \quad (3.10),$$

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

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

$$I = J \cdot S, \quad (3.11)$$

где S – площадь сечения анода (см^2).

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

Из плазмы можно вытянуть плотность тока:

$$J = 0,4 n_{+,-} (2kT_e / m)^{0,5}, \quad (3.12)$$

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

$$J = 8 \cdot 10^{-16} n (T_e / m)^{0,5}, \quad (3.13)$$

где

$$n = (J \cdot S^{0,5}) / (8 \cdot 10^{-16} T_e^{0,5}). \quad (3.14)$$

Концентрацию движущейся плазмы можно рассчитать из соотношения:

$$J = n \cdot e \cdot V, \quad (3.15)$$

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

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

$$Q = CM \Delta T \text{ (Дж)}, \quad (3.16)$$

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

$$Q=UI\Delta t, \quad (3.17)$$

где t – длительность импульса.

Факторы, влияющие на скорость травления

Скорость травления зависит от множества факторов. В наибольшей степени на скорость травления влияют род газа, ток и напряжение разряда, давление и расстояние до мишени и подложки. На рис. 3.5 представлены основные зависимости скорости распыления (V) и коэффициента распыления K_p от параметров разряда. Скорость травления прямо пропорциональна плотности ионного тока. Уменьшение скорости травления с увеличением давления или расстояния до подложки связано с увеличением числа соударений с остаточным газом. С возрастанием напряжения возрастают ударные процессы, что ведет к росту коэффициента распыления.

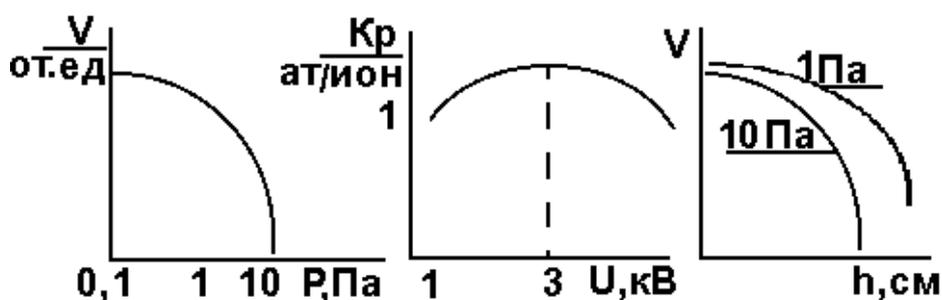


Рисунок 3.5 - Основные зависимости скорости распыления (V) и коэффициента распыления K_p от параметров разряда

Энергия ионов должна быть порядка несколько сотен электрон-вольт для достижения практически приемлемых скоростей ионно-плазменного травления. При энергиях свыше трех киловольт возрастает доля ионов внедренных в поверхность, что несколько снижает коэффициент распыления.

Интенсивность распыления большинства материалов монотонно возрастает по мере повышения энергии ионов в интервале энергий ионов, соответствующем сухому травлению (≤ 2 кэВ), но при энергии свыше ~ 300 эВ скорость этого возрастания уменьшается. Интенсивность распыления зависит от угла, под которым ионы соударяются с поверхностью. При падении ионов на поверхность под наклонным углом возрастает вероятность выбивания атома, поскольку вектор скорости

которого направлен от поверхности подложки. Кроме того, такие ионы передают большую долю своей энергии приповерхностным атомам, вероятность эмиссии которых выше.

Состав рабочего газа - доминирующий фактор, определяющий скорость травления и селективность при плазменном и реактивном ионном травлении. Для процессов травления в технологии приборов квантовой электроники применяются почти исключительно галогенсодержащие газы, за исключением процессов, связанных с удалением фоторезиста и переносом рисунков в органические слои, когда используют плазму O_2 . Это связано с тем, что в результате реакции галогенов с применяемыми для изготовления приборов квантовой электроники материалами образуются летучие и квазилетучие соединения при температурах, близких к комнатной.

Для реактивного травления часто применяют многокомпонентные смеси, представляющие собой обычно главную компоненту с одной или более добавками, которые вводятся для обеспечения наряду с требуемой скоростью травления других заданных характеристик: селективности, однородности, профиля края. Примером влияния таких добавок на скорость травления служит плазменное травление Si и SiO_2 в смесях, содержащих CF_4 . Скорость травления Si и SiO_2 в плазме CF_4 относительно низкая. При добавлении в рабочий газ кислорода скорость травления как Si, так и SiO_2 резко возрастает и достигает максимума при добавлении 12 и 20 % O_2 , соответственно.

Понижение давления и частоты, а также повышение плотности мощности приводят к увеличению средней энергии электронов и энергии падающих на подвергаемую ионов. Повышение плотности мощности вызывает также повышение плотности радикалов и ионов в плазме. Таким образом, в процессах ионно-стимулируемого травления путем уменьшения давления и частоты или увеличения мощности можно повысить степень анизотропии скорости травления.

Поскольку почти вся прикладываемая мощность в конечном счете рассеивается в виде тепла, при обеспечении очень большой плотности мощности электрического поля необходимо предусматривать охлаждение подложек во избежание нежелательных последствий нагрева, таких, как плавление и подгорание фоторезиста или потеря селективности травления.

Для минимизации бокового травления в условиях ионно-ускоряемых реакций целесообразно вводить в рабочий газ добавки, обеспечивающие рекомбинацию активных компонентов. Функция таких добавок заключается либо в связывании активных веществ на поверхности с

образованием летучих соединений, либо в предотвращении образования пассивирующей пленки. Таким образом, подбирая оптимальный состав рабочего газа, можно обеспечить такие условия протекания процесса, при которых скорость травления будет превышать скорость рекомбинации на облучаемых ионами поверхностях, и в то же время на боковых стенках, где облучение ионами минимально, будет реализовываться обратная ситуация (скорость рекомбинации выше скорости травления). Следовательно, степень анизотропии травления можно управлять, регулируя состав рабочего газа.

Скорость потока рабочего газа определяет максимально возможный приток к подложке реакционноспособных компонент. В действительности приток зависит от равновесия между процессами генерации и рекомбинации в плазме активных элементов. Один из механизмов потерь травящих компонент - унос их вязким газовым потоком.

При обычных условиях протекания процесса скорость потока рабочего газа оказывает незначительное воздействие на скорость травления. Это влияние проявляется при экстремальных условиях, когда, либо скорость потока настолько мала, что скорость травления лимитируется доставкой травителя к подложке, либо скорость травления столь велика, что унос газовым потоком становится доминирующим механизмом потерь активных компонентов.

Температурная зависимость скорости реактивного травления определяется главным образом влиянием температуры на скорость протекания химических реакций. Температура влияет также и на селективность, так как величина энергии активации зависит от вида материала. Для обеспечения однородных и воспроизводимых скоростей травления необходимо контролировать температуру подложки. Основной причиной нагрева теплоизолированных подложек является их разогрев плазмой. Кроме того, заметный вклад в повышение температуры может вносить тепло, выделяемое в результате протекания экзотермических реакций травления.

Оценка параметров травления

Оценка начала травления. Процесс травления материала начинается не сразу. Первоначально ионной обработке подвергаются окислы и остатки органических веществ на поверхности материала. Окислы довольно устойчивы к ионному распылению и имеют коэффициент распыления много меньший единицы. По истечении некоторого времени (в зависимости от плотности тока) вольтамперная

характеристика устройства для травления начинает изменяться, что свидетельствует о начале горения разряда в парах травимого материала. Цвет разряда при этом также меняется.

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

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

где J - плотность тока (A/m^2);

N - число Авогадро $N=6 \times 10^{23}$;

ρ - плотность материала kg/m^3 .

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

4 Пленочная технология, эпитаксия

4.1 Процессы конденсации пленок при формировании приборов квантовой электроники

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

Таблица 4.1 - Сочетаемость некоторых материалов при напылении пленок

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

Коэффициент полезного действия при испарении материалов невысок. Это связано с тем, что не все пары перехватываются подложкой,

кроме того, часть паров рассеивается на газе или образует с ним интерметаллические соединения. При испарении материалов выполняется баланс между числом испаренных молекул ($N_{и}$) и числом конденсированных ($N_{к}$), площадью, в которую происходит испарение ($S_{и}$) и площадью подложки ($S_{п}$):

$$N_{к} S_{п} = N_{и} S_{и};$$

$$КПД = S_{п} / S_{и}.$$

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

$$N_{и} = N_s e^{-E/kT}.$$

Для металлов поверхностная плотность атомов при температуре испарения $N_s = 10^{15}$ 1/см³. Энергии испарения являются табличными величинами (для алюминия $E = 3$ эВ). Удельную скорость испарения материала (г/с с 1 см²) можно определить по формуле:

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

где M - молекулярный вес, T - температура.

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

$$N_{г} = P_{г} / (2 \pi n k T)^{0,5}.$$

Расчет показывает, что при температуре испарения при давлении в камере 10^{-3} Па концентрация газа составляет $\sim 10^{14}$ 1/см³ (т.е. близка к концентрации испаряемых паров). В таблице 4.2 представлена тенденция изменения концентрации испаренных атомов от температуры.

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

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

Даже незначительное увеличение температуры испарения значительно изменяет концентрацию испаренных атомов.

Скорость конденсации пленки при термическом испарении определяется выражением:

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

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

Толщина образующейся пленки определяется по формуле:

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

где G - вес испарившегося вещества, L - расстояние между испарителем и подложкой, ρ - плотность материала кг/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 :

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

где β - угол осаждения конденсата в градусах.

Электронно-лучевое испарение

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

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

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

3) пары испаряемого материала могут попадать в объем электронной пушки, вызывать металлизацию электродов, менять вольтамперную

характеристику, вызывать пробой межэлектродного промежутка. Эти обстоятельства требуют автоматических устройств, для поддержания стабильности напряжения и тока разряда, фокуса электронного пучка и давления газа.

Испарение сплавов

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

Процессы конденсации пленок

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

Конденсация пленки начинается с центров конденсации. Зародышеобразование пленки формируется в местах минимума поверхностной энергии (чаще в местах недостаточно подвергнутых очистке). На рис. 4.1 представлена потенциальная диаграмма и фрагмент реальной поверхности, иллюстрирующие процесс формирования пленки.



Рисунок 4.1 - Потенциальная диаграмма и фрагмент реальной поверхности

В первую очередь на подложку "салятся" молекулы газов с низкой энергией связи. Для таких газов как :N₂, O₂, H₂, CO₂ E_{конд}=0,05 Эв, для

металлов $E \sim 1-2$ эВ. Для повышения качества пленок (в первую очередь адгезии) подложку прогревают для десорбции газов и низкоэнергетичных комплексов. При этом скорость напыления несколько снижается т.к. уменьшается вероятность прилипания паров вследствие Максвелловского распределения энергии молекул.

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

4.2 Технология получения высококачественных пленок

На рис. 4.2 представлена статическая зависимость интенсивности газовой выделения наиболее преобладающих компонент при линейном росте температуры.

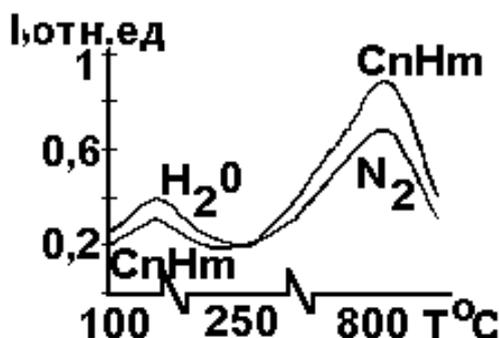


Рисунок 4.2 - Зависимость интенсивности газовой выделения от температуры

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

По данным масспектрометрии в остаточной атмосфере типовой вакуумной установки основными компонентами являются: вода (8 %), азот (20-30 %), углерод и его производные (40-60 %). Этот состав несколько меняется в зависимости от используемых материалов и методов их обработки.

При повышении температуры поток газовой выделения возрастает в следующей последовательности: углекислый газ, азот, окислы азота,

углеводороды. Характер зависимости газовой выделения в диапазоне температур до 250° объясняется разложением поверхностных органических соединений и достижением энергии активации адсорбционной связи. Дальнейшее увеличение температуры способствует приоритетной десорбции углеводородов и азота, а также присутствием термоионизированных атомов на фоне общего роста потока газовой выделения. Наибольшее высокотемпературное газовой выделение наблюдается при температуре близкой к 800° С, что связано с достижением энергии хемосорбции атомов и разложением нестабильных фаз, сформировавшихся в процессе напыления. В первом приближении для формирования определенной газовой фазной реакции на поверхности пленки необходимо соотношение между температурой, давлением, концентрацией и временем проведения процесса (соотношение Гиббса).

Вероятность газовой фазной реакции определяется соотношением:

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

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

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

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

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

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

F - площадь подложки;

t - время процесса;

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

P_i - давление i -той компоненты в составе газа.

В таблице 4.3 приведены отдельные значения количества поглощенного газа при формировании некоторых соединений титана для температуры испарения 1700^0 С

Таблица 4.3 - Количество поглощенного газа при испарении титана

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

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

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

где V - объем камеры.

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

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

где i - обозначает род газа.

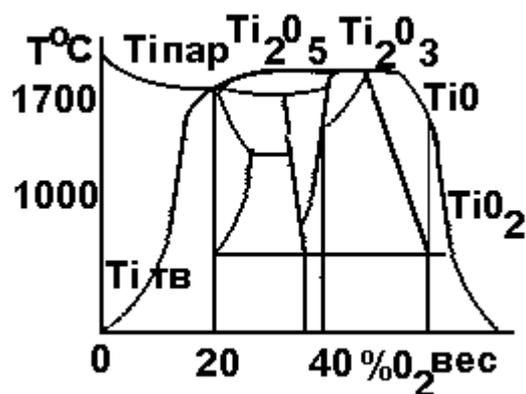


Рисунок 4.3 - Фрагмент фазовой диаграммы

На рис. 4.4 представлена диаграмма изобарного потенциала применительно к напылению титана.

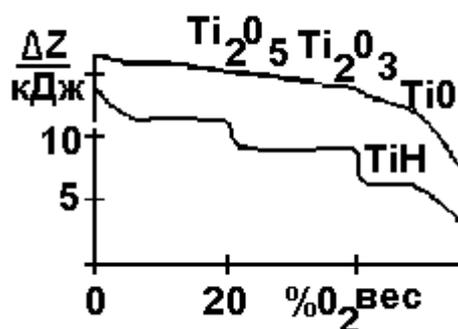


Рисунок 4.4 - Диаграмма изобарного потенциала

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 квантовой электроники 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.

4.3 Электрофизические методы формирования плёнок на вакуумных установках

Магнетронное распыление — технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда — диодного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Технологические устройства, предназначенные для реализации этой технологии, называются магнетронными распылительными системами или, сокращённо, магнетронами (не путать с вакуумными магнетронами — устройствами, предназначенными для генерации СВЧ колебаний).

С точки зрения механизма эмиссии электронов, магнетронный разряд постоянного тока представляет собой аномальный тлеющий разряд. Электроны покидают поверхность катода за счёт ионно-электронной эмиссии под действием ионной бомбардировки. В связи с тем, что коэффициент ионно-электронной эмиссии весьма мал, ионный ток на катод превышает электронный как минимум на порядок. Баланс заряженных частиц в плазме обеспечивается ионизацией нейтральных атомов газа электронами, ускоренными электрическим полем в тёмном катодном пространстве.

Принцип работы магнетрона

В отличие от тлеющего разряда, где электрон, не испытывающий столкновений, будет свободно ускоряться электрическим полем, пока не покинет область катодного падения потенциала (тёмное катодное пространство), наличие поперечного магнитного поля заставляет электрон искривлять свою траекторию под действием силы Лоренца. При достаточной величине магнитного поля электрон вернётся на катод с почти нулевой энергией и вновь начнёт ускоренное движение под действием электрического поля. Траекторией его движения будет циклоида, электрон дрейфует вдоль поверхности катода в направлении, перпендикулярном как электрическому, так и магнитному полю. Электрон находится в «ловушке», покинуть которую он может, только совершив столкновение с другой частицей. Тогда он перейдёт на новую траекторию, расположенную чуть дальше от катода и так до тех пор, пока не ослабнут поля, магнитное — за счёт удаления от полюсов магнитной системы, электрическое — за счёт плазменной экранировки. За счёт наличия ловушки многократно возрастает эффективность ионизации эмитированными электронами, что позволяет, в отличие от обычного

диодного разряда, получать высокую плотность ионного тока, а значит, и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 0,1 Па и ниже. Для того, чтобы ловушка работала эффективно, необходимо исключить утечку электронов на анод вдоль силовых линий магнитного поля, а траектории дрейфа должны быть замкнуты. При столкновении ионов с поверхностью мишени происходит передача момента импульса материалу. Падающий ион вызывает каскад столкновений в материале. После многократных столкновений импульс доходит до атома, расположенного на поверхности материала, и который отрывается от мишени и высаживается на поверхности подложки. Среднее число выбитых атомов на один падающий ион аргона называют эффективностью процесса, которая зависит от угла падения, энергии и массы иона, массы испаряемого материала и энергии связи атома в материале. В случае испарения кристаллического материала эффективность также зависит от расположения кристаллической решетки. Напыление металлов и сплавов производят в среде инертного газа, как правило, аргона. В отличие от технологии термического испарения, при магнетронном распылении не происходит фракционирования мишеней сложного состава (сплавов).

Установки магнетронного ионного распыления (типа «МИР»)

В основу установки положен магнетрон, представляющий собой газоразрядную систему, помещенную в магнитное поле. На рис. 4.5а представлена схема магнетрона.

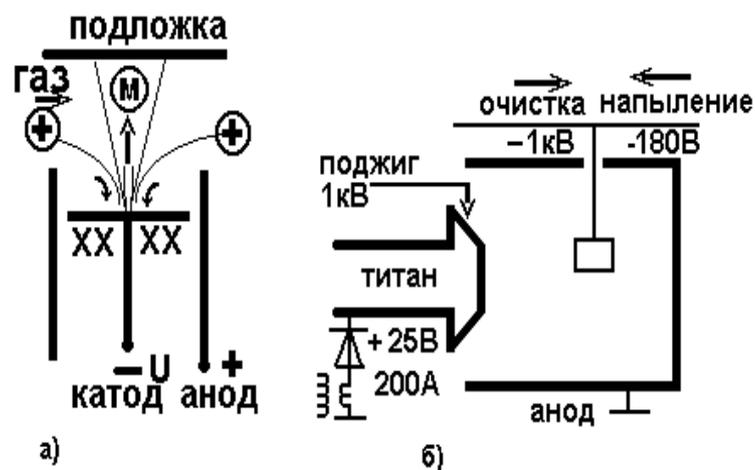


Рисунок 4.5 – Схема магнетронной и электродуговой систем формирования покрытий

При подаче напряжения между электродами зажигается разряд,

поддерживаемый магнитным полем. Ионы из плазмы разряда попадают на катод (мишень), из которого выбивают частицы металла (m). Магнитное поле закручивает электроны вокруг силовых линий под действием силы Лоренца. Магнитное поле обеспечивает движение электронов вокруг силовых линий магнитного поля. Это способствует ионизации газа и поддержанию разряда. Зная скорость частицы в направлении, перпендикулярном линиям магнитного поля V , можно найти величину минимального расстояния траектории электрона между катодом и анодом системы, так называемый, *ларморовский радиус* R :

$$R = V m / eZB, \quad (4.1)$$

где V – скорость, перпендикулярная линиям магнитного поля

$$V = 5,9 \cdot 10^5 \sqrt{U}; \quad (4.2)$$

где 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 вольт-амперную характеристику при изменении магнитного поля, рода распыляемого материала или геометрических размеров системы.

Электродуговое формирование покрытий в вакууме на установках типа Булат

При электродуговом нанесении покрытия испарение металла осуществляется в зоне горения дуги вследствие эрозии электрода. Наиболее широкое применение находит дуговое испарение с холодного расходуемого катода. Генерация газовой фазы осуществляется в зоне действия на поверхность разряда, в локальных участках - катодных пятнах вакуумной дуги, которые представляют собой участки поверхности катода, имеющие размер $\sim 10^{-4} \dots 10^{-2}$ мм. В катодных пятнах протекают также процессы интенсивной электронной эмиссии. В первом приближении считают, что число катодных пятен пропорционально силе тока дугового разряда. Для устойчивого горения дуги необходимо образование на катоде более двух пятен. В катодных пятнах плотность тока может достигать 10^7 А/см² и выделяется мощность $10^7 \dots 10^8$ Вт/см². В результате при горении дуги осуществляется быстрый нагрев материала, его плавление и испарение.

Характерным для электродугового испарения является наличие в газовой фазе большого количества капель и высокая степень ионизации атомов (до 90 %). Размер капель зависит от теплофизических свойств материала катода и режима горения дугового разряда и составляет от 1 до 50 мкм. При испарении тугоплавких катодов (вольфрама, молибдена, тантала и др.) в газовом потоке содержатся капли размером менее 10 мкм, при испарении легкоплавких - $25 \dots 50$ мкм и их доля в потоке возрастает до $10 \dots 30$ %.

При работе электродугового испарителя катодные пятна вследствие взаимного отталкивания стремятся уйти на боковую поверхность катода, что является нежелательным, так как изменяется характер распределения газового потока. Для фиксации катодных пятен в центре катода используют внешнее магнитное поле (испаритель с магнитным удержанием катодных пятен) или экранирование боковых поверхностей катода (испарители с электростатическим удержанием пятен).

Содержание капельной фазы в потоке летучих частиц является одним из основных недостатков электродугового нанесения покрытий. До сих пор однозначно не определен механизм генерации этих капель. Наиболее вероятной причиной образования капель считают кипение в объеме расплавленной ванны и образование газовых пузырей из растворенных технологических газов, находящихся в объеме катода. При их интенсивном выходе на поверхность и происходит образование расплавленных микрочастиц. В пользу этого предположения

свидетельствует тот факт, что при снижении газосодержания в катоде менее 10-6 % образование капель не происходит. Для уменьшения капельной фракции поток испаренного материала пропускают через поток плазмы, электронный или лазерный луч.

Особенность формирования пленочных покрытий на основе дугового разряда – это обилие побочных газофазных реакций. Это ограничивает применение электродуговых методов в электронной промышленности. В основном дуговые методы формирования покрытий применяются в машиностроении для формирования упрочняющих покрытий.

Электродуговое нанесение покрытия имеет следующие достоинства:

- 1) возможность совмещения в едином технологическом цикле процесса нагрева (ионной очистки) поверхности в результате воздействия ионов с процессом нанесения покрытия;
- 2) возможность регулирования в широких пределах скорости нанесения покрытий (путем изменения, например, тока дуги);
- 3) возможность нанесения сложных по химическому составу покрытий, например, реактивным электродуговым осаждением;
- 4) высокая производительность процесса, возможность автоматизации;
- 5) высокие адгезия и сплошность получаемых покрытий.

Основной недостаток рассматриваемого метода, как уже отмечалось, - наличие в газовом потоке капельной фазы. Микрокапли, осажденные на поверхности, определяют неоднородность покрытия, его шероховатость. Разрушение таких покрытий происходит вследствие выкрашивания микрочастиц. Для снижения содержания капельной фазы наиболее часто используют следующие технологические приемы:

- 1) проводят дегазацию катодов (используют катоды, полученные методом вакуумной плавки);
- 2) осуществляют сепарацию плазменного потока в электрическом или магнитном полях;
- 3) оптимизируют режимы испарения. При увеличении тока дуги повышается содержание капельной фазы, которая неблагоприятно сказывается на свойствах покрытия. Рекомендуются проводить испарение при минимальном токе дуги. Однако в этом случае значительно снижается скорость осаждения покрытия, поэтому для получения высокой производительности процесса осаждения установки комплектуются несколькими электродуговыми испарителями. При этом их размещение

под разными углами к поверхности подложки позволяет значительно повысить однородность и равнотолщинность формируемых покрытий.

Технология нанесения покрытий электродуговым испарением включает общую схему очистки изделий. Это механическая или химическая очистка, промывка детали. Наиболее эффективна очистка в ультразвуковой ванне.

Обработка поверхности в дуговом разряде подразделяется на ряд направлений, различающихся физической картиной формирования упрочняющего покрытия:

1) электродуговое распыление материала электродов и его ионноплазменное осаждение на изделие. (Установки марок УРМ типа «Булат»);

2) распыление материала электродов с осаждением паров на изделие и последующей ионной имплантацией путем подачи импульсов с напряжением ~ 100 кВ. Модификация поверхности достигает 5-7 мкм за времена около 20 минут;

3) воздействие на поверхность разовыми (до 5 раз) импульсными сильноточными ионными или электронными пучками током 10-20 кА и напряжением ~ 100 кВ. Упрочнение происходит без изменения размеров. Глубина модифицированного слоя достигает 130 мкм.

4.4 Искусственная эпитаксия пленок для приборов квантовой электроники

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

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

- 1) обеспечение сверхвысокого вакуума (менее 10^{-7} Па);
- 2) оптимальная температура подложки (для кремния 440° С)
- 3) необходима минимальная скорость осаждения пленки (до 10 нм/с). При большой скорости конденсации происходит интенсивное образование зародышей, сопровождаемое неупорядоченной кристаллизацией и аморфизацией пленки;

- 4) необходим жидкий подслоя из золота или специального полимера, (салол) в который напыляются пары для ориентации и формирования зародышей (“льдинок” кристалла) в сплошной монолит;
- 5) на подложке с шагом 50 мкм следует нанести базовый рельеф в виде сетки или канавок с углами, соответствующими типу кристаллической решетки кристаллизуемого материала.

Технология формирования рельефа подложки квантового прибора

На рис. 4.6 представлены рекомендации, по разметке подложки исходя из порядка оси симметрии кристаллической решетки формируемого материала.

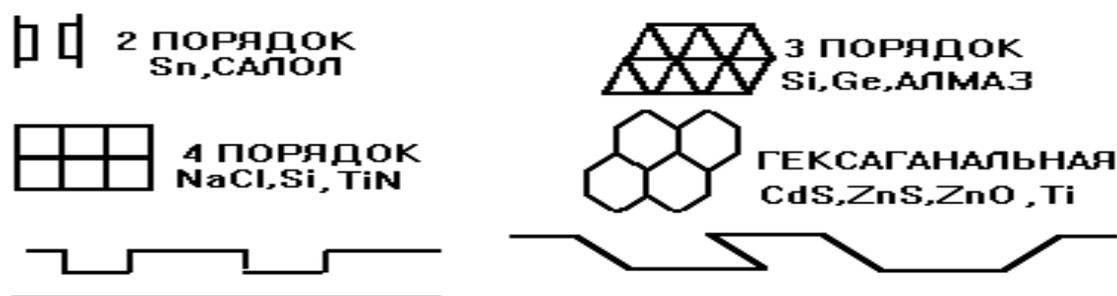


Рисунок 4.6 - Рекомендации по разметке подложки для эпитаксии

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

Механизмы ориентации и формирования кристаллов при искусственной эпитаксии

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

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

- действия закона Архимеда и капиллярных сил. При плавлении кристалла формируется мениск, крутизна которого зависит от расстояния до стенок;
- под действием базового рельефа на подложке;

- под действием температурного рельефа;
- под действием внутренних напряжений и анизотропной деформации.

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

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

Методы ориентированной кристаллизации пленок

Кристаллизация из пара через слой жидкости

Примером такого процесса является выращивание кремния из газовой смеси SiCl_4 . Траектория технологического процесса состоит из следующих этапов:

- подготовка подложки (очистка);
- покрытие подложки слоем 1-5 мкм из золота или серебра. Для улучшения адгезии золото пылят на подслоем из тантала, молибдена или вольфрама;
- нанесение рельефа в виде косой сетки с углами 60 и 120°;
- осаждение паров (например, из газовой смеси по традиционной схеме).

Большую роль играет смачивание подложки и наличие на ней жидкого слоя. Жидкой фазе способствует золото.

Выращивание кристаллов из паров в вакууме

Примером такого выращивания является формирование кристаллов олова на KCl или NaCl путем напыления в безмасляном вакууме при давлении 10^{-7} Па. Родственный тип решетки Sn и щелочногаллоидных материалов (прямоугольный) облегчает процесс эпитаксии и не требует прогрева подложки.

Формирование кристаллов из расплавов

Примером такого формирования является кристаллизация германия на поликристаллическом вольфраме. Последовательность технологических операций подобного процесса выглядит следующим образом:

- 1 - подложку из вольфрама механически царапают через 50 мкм (создают рельеф с углами 60 и 120°);
- 2 - методом испарения наносят слой германия толщиной 1-10 мкм;
- 3 - расплавление пленки и ее перекристаллизация под влиянием рельефа подложки.

Выращивание кристаллов из растворов и электролитов

Этот прием формирования кристаллов не требует вакуума и реализуется за малый отрезок времени. В настоящее время метод широко применяется для получения кристаллов 2 и 4 порядка типа Sn, KCl, NaCl. После разметки подложки готовят пересыщенные водные растворы солей в смеси разбавленных кислот. Методом последовательного окунания намывают кристаллы необходимого размера. В ряде случаев процесс стимулируют пропусканием электрического тока. Зарождение и рост кристаллов зависит от изменения тока и напряжения с течением времени.

Ионно-лучевые методы формирования кристаллов

При этом методе кремниевую мишень распыляют малоэнергетичным (до 15 кВ) ионным пучком. При проведении процесса у отвесных стенок формируются кристаллы кремния. Особенность процесса состоит в необходимости подачи аргона и применении безмасляных откачных средств. Известны зарубежные и отечественные газоразрядные системы для выращивания эпитаксиальных слоев на форвакууме.

Методы анализа пленок на монокристалличность

Для анализа на кристалличность применяются микроскопические исследования и зондовые измерения сопротивлений. В микроскоп с небольшим увеличением (до 100 крат) должны быть видны кристаллы размерами 10 мкм и более. При общем взгляде на пленку угол непараллельности кристаллов относительно друг друга не должен превышать 20°. Поверхностное сопротивление должно быть менее 100 ом/квadrat.

Перекристаллизация пленок

Для ряда приборов, таких как фотоэлементы, бытовая техника и т.п., допускаются эпитаксиальные пленки с некоторым количеством дефектов. Так называемые островковые пленки. Они формируются на субграницах фазовых или температурных переходов и имеют повышенное сопротивление. Часть дефектов обусловлена дефектами в полупроводниках. Такие пленки могут быть улучшены путем дополнительной переплавки и перекристаллизации. Переплавка может быть проведена в вакууме или при атмосферном давлении в ваннах с инертным газом тяжелее воздуха (аргон). В качестве нагревателей используется тепловой узкополосный нагрев, лазерный, электронный или СВЧ нагрев. Применение метода открывает возможность получения принципиально новых приборов: фотодетекторов, фотоответчиков, элементов памяти с фотостиранием и т.д.

Лучевые методы перекристаллизации

Общие требования к лучевым методам в эпитаксии заключаются в возможности менять форму луча для обеспечения температурного рельефа. Для увеличения выхода годных пленок применяют *островковый метод*, заключающийся в разметке подложки по более сложному рисунку (в виде островков).

Электронно-лучевые методы перекристаллизации

В последнее время в практике перекристаллизации наиболее широко распространилось применение электронного луча. Электронный луч относительно дешев, имеет неограниченные возможности по вариации профиля сечения пучка и глубины сосредоточения мощности относительно поверхности пленки. На рис. 4.7 представлены некоторые профили сечения электронных пучков для эпитаксии и профили островков.

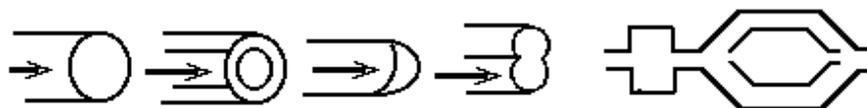


Рисунок 4.7 - Профили сечения электронных пучков для эпитаксии и профили островков

Размеры островков соизмеримы с размерами луча и составляют десятки мкм. Увеличение размеров связано с ростом механических

напряжений и ростом неориентированных нитевидных дендридов. Скорость прохода составляет 1-5 см/с. Очень важен процесс контролируемого остывания островков.

Лазерные методы перекристаллизации пленок

Особенность применения лазера заключается в отражении излучения. Кроме того, важен спектр излучения, поскольку излучение может плохо поглощаться пленкой и хорошо подложкой. Для проведения процесса необходим технологический лазер мощностью около 5 Вт. Состав лазерной Среды зависит от комбинации пленка-подложка. Например, для перекристаллизации кремния на кварце необходим CO_2 лазер, а для арсенид-галлия на ситтале-аргоновый или гранатовый лазер.

Перекристаллизация методом зонной плавки

В основу перекристаллизации методом зонной плавки положено явление перехода примесей и дефектов в более холодное место. В этом случае кроме очистки кристаллов, происходит их температурное ориентирование. На рис. 4.8 представлена схема формирования субграницы, а также схема реализации метода зонной плавки.

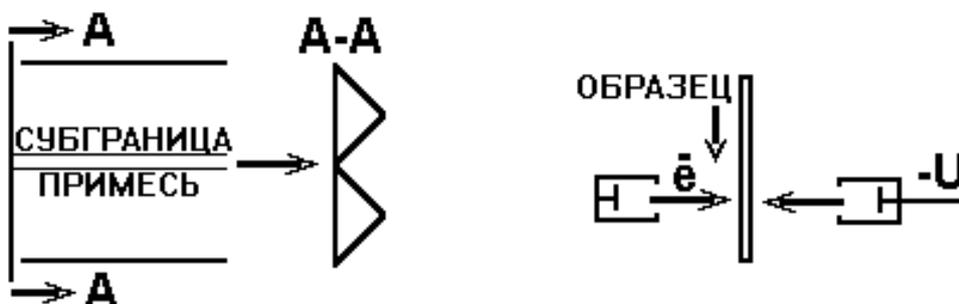


Рисунок 4.8 - Схема формирования субграницы

По окончании зонной плавки получают сильно вытянутые кристаллы размером 1×10 мкм.

4.5 Боковая эпитаксия

Сущность боковой эпитаксии заключается в том, что ориентирующим фактором служит монокристаллическая подложка (*затравка*), от которой пленка растет вбок и переходит на аморфную подложку (чаще от Si на SiO_2). В ряде случаев кристалл-затравку помещают на конце иглы в центр напыленной пленки, подлежащей

кристаллизации. Температурное поле создают радиально симметричным, чтобы кристалл-затравка не расплавился и служил инициатором монокристаллического роста. Этот метод широко применяется в комплексе с методом зонной плавки.

Методы кристаллизации при боковой эпитаксии аналогичны известным методам искусственной эпитаксии. Скорость продвижения фронта кристаллизации от затравки невелика и составляет ~ 5 мкм за 10 часов.

4.6 Альтернативные методы создания эпитаксиально подобных структур

Развитие квантовой электроники, трехмерных интегральных микросхем, фототранзисторов и прочей техники 5-6 поколения требует развития более дешевых способов получения эпитаксиальных структур. Переход к субмикронной технике требует получения более тонких пленок (менее 0,5 мкм), а это связано с нарастанием дефектов.

Ионная имплантация - как альтернатива эпитаксии

Сущность метода состоит в том, что ионы кислорода или азота с энергией 100-200 кэВ внедряют в кремний на глубину 0,1-0,3 мкм. На рис. 4.9 представлена условная схема процесса.

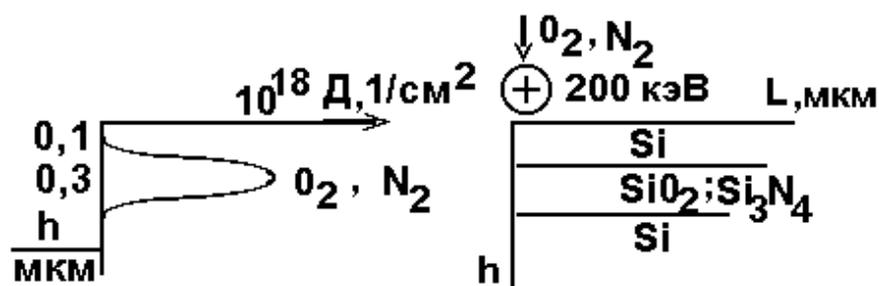


Рисунок 4.9 - Условная схема процесса ионной имплантации

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

Особенности проведения процесса ионной имплантации состоят в следующем:

- существует пороговая доза облучения (D) для протекания процесса;

- нужны источники с током ионов ~ 100 мА с сепаратором ионов по энергиям;
- при облучении полупроводников возможно образование дислокаций.

Селекция затравок при ионном облучении

Этот метод ориентированной кристаллизации основан на взаимодействии ионов с твердым телом. Процесс состоит из следующих стадий:

- на аморфную подложку (керамика) осаждают пленку с некоторой ориентацией кристаллов (кремний);
- экранируют затравочный кристалл от ионного потока и облучают пленку ионами (аморфизация);
- отжигают всю пленку при температуре $500-700^{\circ}$ С.

В итоге получают ориентацию с углами разброса ориентаций граней не превышающих 4° .

5 Сорбционные процессы на поверхности приборов квантовой электроники

5.1 Адсорбция

Адсорбция - это процесс физического притягивания газов к поверхности под действием электростатических сил, действующих на расстояниях порядка 10^{-8} см. В среднем энергия адсорбции для газов составляет величину $E_a \sim 10^6$ Дж/моль (~ 10 ккал/моль). В среднем, даже при давлении порядка 10^{-6} Па на поверхности материала располагается около 80 слоев газа.

5.2 Десорбционные процессы

Время десорбции (ухода) поверхностных газов составляет $t_{дес} \sim 10^{-5}$ сек. Эти газы обеспечивают основной поток газовой выделенности в начальный момент откачки. Такие процессы наблюдаются при получении пленок, когда в силу малой энергии адсорбции пары воды, масел и газов конденсируются на подложке вперед напыляемого материала. Поток адсорбированного газа в относительных PV единицах выражается через поверхностную плотность молекул N и температуру соотношением:

$$Q = 1,34 \times 10^{-23} \times N/T.$$

В таблице 5.1 представлены значения поверхностной плотности молекул для различных газов при комнатной температуре.

Таблица 5.1 - Значения поверхностной плотности молекул для различных газов

Газ	Ar	CO ₂ , H ₂ O	H ₂
$N \times 10^{19}$	0,85	0,53	1,52
$Q_{рв} \times 10^2$ на 1 м^2 (Па/м ³)	3,43	2,14	6,14

Газ располагается на поверхности островами или слоями в зависимости от давления, температуры и времени. На рис.5.1 представлена модель многослойной адсорбции. Области 1, 2, 3, 4 соответствуют условиям повышения давления или понижения температуры. Практически с давления 10^{-4} Па на внутренних поверхностях вакуумных камер газ располагается монослоем независимо от методов предварительной

подготовки. На рис. 5.2 представлена изотерма адсорбции паров масел при комнатной температуре. По оси ординат отложен коэффициент покрытия относительно монослоя.



Рисунок 5.1 - Модель адсорбции

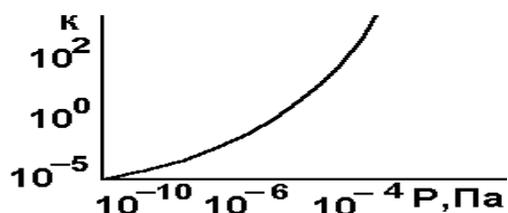


Рисунок 5.2 - Изотерма адсорбции

5.3. Хемосорбция

Хемосорбция - это процесс формирования химического соединения с газом. (Например, твердой пленки карбидов на поверхности инструмента). Энергия активации такого процесса составляет $E_a \sim 400$ Дж/кмоль (22-25 ккал/моль ($\sim 0,8$ эВ)). Время десорбции газов с такими энергиями связи при нормальной температуре составляет $\sim 10^3 - 10^4$ секунд (час и более). Для уменьшения времени десорбции и лучшей адгезии пленок в установках предусмотрена возможность прогрева подложек или обработки в разряде.

5.4. Абсорбция

Абсорбция - это процесс образования твердого раствора типа металл-газ. Такие процессы характеризуются тем, что металл, поглощая газ может регенерировать его при обезгаживании. По растворимости газов металлы делятся на две группы: А и Б. Группа Б характеризуется настолько большим газопоглощением, что кристаллическая решетка "разбухает" от газа. Такие металлы затруднительно штамповать. В таблице 5.2 представлены металлы по убыванию общей поглощательной способности

Таблица 5.2 - Убывающая последовательность поглощающей способности для газов

А	Ni	Fe	Co	Cr	Cu	Ag	Mo	W	Pt
Б	Ti	Zr	La	Ge	V	Th	Nb	Ta	Hf

5.5 Диффузионное газовыделение

Диффузионное газовыделение характеризуется потоком проницаемости газов через материалы и потоком десорбции.

1. *Поток проницаемости.* Диффузионное газовыделение характеризуется потоком проницаемости газов через материалы. Например, гелий при давлении 10^{-7} Па почти свободно проникает через стекло, несортную сталь. Вакуумная резина при давлениях менее 10^{-4} Па практически непригодна для уплотнений.

Число молекул g^1 , проходящих через единицу площади сечения в единицу времени определяется соотношением:

$$g^1 = -D(n_1 - n_2)/2h,$$

где h - толщина материала;

D - коэффициент диффузии;

$n_{1,2}$ - концентрации по обе стороны материала.

При повышении температуры скорость диффузионного газовыделения экспотенциально возрастает.

2. *Поток десорбции.* Поток диффузионного газовыделения уменьшается с повышением температуры, а при постоянной температуре с увеличением времени. Нагрев вакуумной системы совершенно необходим при получении сверхвысокого вакуума (меньшего, чем на традиционных промышленных установках с масляными средствами откачки). Для уменьшения потока диффузионного газовыделения подобные вакуумные системы изготавливаются из заранее отожженных в вакууме материалов (нержавеющей стали, медных уплотнительных прокладок и т.п.).

6 Сертификация технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов квантовой электроники

6.1 Общие понятия

Сертификация (лат. certum — верно + лат. facere — делать) — форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов.

Сертификация — это процедура подтверждения соответствия результата производственной деятельности, товара, услуги нормативным требованиям.

Сертификация — это термин, сформулированный впервые в международной организации по стандартизации под названием ИСО в 1982 году. Сертификация — это процедура подтверждения соответствия результата производственной деятельности, товара, услуги нормативным требованиям, посредством которой третья сторона документально удостоверяет, что продукция, работа (процесс) или услуга соответствует «заданным требованиям». Таким образом, сертификация — основное средство в условиях рыночной экономики, позволяющее гарантировать соответствие продукции требованиям нормативной документации. С позиции государственных интересов, такой инструмент, как сертификация, должен, с одной стороны, обеспечить улучшение качества продукции и услуг и гарантию безопасности их для потребителя, а с другой — не служить препятствием для развития предпринимательства, процедурно и финансово усложняя процесс получения сертификата. Перед началом рассмотрения системы подтверждения соответствия, созданной в настоящее время в нашей стране, и анализом законодательства в этой области необходимо привести используемые в последующем определения терминов и понятий, введенных различными нормативно-правовыми актами Российской Федерации.

Сертификация — деятельность третьей стороны, независимой от изготовителя (продавца) и потребителя продукции, по подтверждению соответствия продукции установленным требованиям.

Сертификация направлена на достижение следующих целей:

- содействие потребителям в компетентном выборе продукции (услуги);
- защита потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя);

- контроль безопасности продукции (услуги, работы) для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- подтверждение показателей качества продукции (услуги, работы), заявленных изготовителем (исполнителем);
- создание условий для деятельности организаций и предпринимателей на едином товарном рынке России, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле.

Само появление понятия «подтверждение соответствия» и наполнение его современным смыслом связано с резким обострением в последнее время проблемы качества товаров и услуг; глобализацией международной торговли; большим разнообразием изделий одного и того же функционального назначения, но разного качества; жесткой конкуренцией товаропроизводителей; необходимостью гарантировать безопасность продукции для потребителя.

Основные понятия в области сертификации

Сертификация продукции является одним из способов подтверждения соответствия продукции заданным требованиям. В мировой и отечественной практике применяются различные методы подтверждения соответствия объектов заданным требованиям, которые выполняются разными сторонами.

Определения понятия "сертификация" даются как в международных, так и в российских нормативных документах.

В соответствии с этими документами сертификация продукции (далее — сертификация) — процедура подтверждения соответствия, посредством которой независимая от изготовителя (продавца, исполнителя) и потребителя (покупателя) организация удостоверяет в письменной форме, что продукция соответствует установленным требованиям. Установленные требования выражаются определенными показателями качества.

Сертификат соответствия (далее — сертификат) — документ, выданный по правилам системы сертификации для подтверждения соответствия сертифицированной продукции установленным требованиям.

Система сертификации — совокупность участников сертификации, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе.

Декларация о соответствии — документ, в котором изготовитель (продавец, исполнитель) удостоверяет, что поставляемая (продаваемая) продукция соответствует установленным требованиям.

Таким образом, подтверждение соответствия проводится посредством не только сертификата, но и декларации о соответствии. Перечень продукции, соответствие которой может быть подтверждено декларацией о соответствии, утверждается Правительством РФ. Декларация о соответствии имеет юридическую силу наравне с сертификатом.

Знак соответствия — зарегистрированный в установленном порядке знак, которым по правилам данной системы сертификации подтверждается соответствие маркированной им продукции установленным требованиям.

6.2 Цели и принципы сертификации. Структура Системы сертификации ГОСТ Р

В соответствии с законом РФ "О сертификации продукции и услуг" (10.06.93 г.) целями сертификации являются:

- содействие потребителям в компетентном выборе продукции;
- защита потребителей от недобросовестности изготовителя (продавца, изготовителя);
- контроль безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества потребителя;
- подтверждение показателей качества продукции, заявленных изготовителем;
- создание условий для деятельности предприятий, учреждений, организаций и предпринимателей на едином товарном рынке РФ, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;
- содействие экспорту и повышение конкурентоспособности продукции.

Принципы сертификации

При проведении сертификации необходимо руководствоваться следующими принципами:

- согласованность правил и рекомендаций по сертификации с международными нормами и правилами;

- обеспечение качества и безопасности продукции (при проведении сертификации показатели качества должны определяться стандартными методами);
- открытость систем сертификации (в работах по сертификации могут участвовать организации независимо от форм собственности, признающие и выполняющие ее правила);
- конфиденциальность (при сертификации должна соблюдаться конфиденциальность информации, представляющей коммерческую тайну);
- общность назначения продукции и (или) требований к ней, а также общность методов испытаний.

Структура Системы сертификации ГОСТ Р. Организационную структуру Системы ГОСТ Р образуют: Госстандарт России; Центральные органы систем сертификации однородной продукции; органы по сертификации; испытательные лаборатории (центры).

Госстандарт РФ — национальный орган по сертификации и выполняет руководящие, координирующие и контролирующие функции.

Главной функцией **Центрального органа системы сертификации** является организация работы по формированию системы сертификации однородной продукции и осуществление руководства ею, а также координация деятельности органов по сертификации и испытательных лабораторий, входящих в систему.

Орган по сертификации продукции проводит идентификацию и сертификацию продукции; выдает сертификаты и лицензии на применение знака соответствия; осуществляет в установленном порядке инспекционный контроль за сертифицированной продукцией; приостанавливает или отменяет действие выданных им сертификатов;

Орган по сертификации должен быть аккредитован Госстандартом РФ на право выполнения работ по сертификации одной или нескольких групп однородной продукции.

Аккредитованная испытательная лаборатория осуществляет испытания конкретной продукции или конкретные виды испытаний и выдает протоколы испытаний для целей сертификации.

Образцы сертификатов

Сертификат Госстроя выдается на продукцию, используемую в строительстве, и подтверждающей, что продукция соответствует требованиям основных нормативно-технических документов, установленных для данной продукции (Гост, Гост-Р, СНИП, ПБ и др.).

Пожарный сертификат является обязательной составной частью сертификата соответствия продукции ГОСТ Р. Порядок организации и проведения сертификации определяется Государственной противопожарной службой по согласованию с Комитетом Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации. Сертификат соответствия ГОСТ Р — свидетельство, удостоверяющее качество фактически поставленного товара и его соответствие условиям договора. В сертификате качества дается характеристика товара либо подтверждается соответствие товара определенным стандартам или техническим условиям заказа.

Виды сертификации для приборов квантовой электроники

Сертификация — это процедура подтверждения соответствия, проводимая независимой организацией. При этом изготовитель, продавец или исполнитель получает документ (т.е. сертификат), который удостоверяет, что продукция соответствует требованиям, установленным законодательством РФ. Так, по принципу сертифицирования, сертификация подразделяется на добровольную и обязательную.

Обязательная сертификация

Требование обязательной сертификации в Российской Федерации действует лишь в отношении некоторых товаров и услуг, соответствие качества которых установленным стандартам является условием безопасности и здоровья отдельных людей и общества в целом. Кроме того, важным критерием, которым руководствуются компетентные органы при включении того или иного товара или услуги в список подлежащих обязательной сертификации, является их распространенность и массовый характер потребления.

Органом, в компетенции которого в нашей страны находятся вопросы обязательной сертификации, является Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, которое известно также как Госстандарт. Именно оно устанавливает требования к качеству того или иного товара или услуги, которым они должны соответствовать для того, чтобы получить обязательный сертификат качества.

В общей сложности перечень товаров и услуг, которые в России подвергаются обязательной сертификации, включает в себя более 70 позиций, среди которых - пищевые продукты, электрические приборы, бытовая техника, оружие и другие позиции. При этом данный перечень периодически обновляется с появлением на рынке новых товаров, а также

в случае ужесточения требований к тем или иным из них. Наиболее известной среди рядовых потребителей системой обязательной сертификации в течение многих лет остается система ГОСТ, обозначение которой можно увидеть на самых разных товарах. Однако Росстандартом поддерживаются и другие системы обязательной сертификации, применяющиеся для отдельных отраслей. Обязательная сертификация подтверждает только обязательные требования, установленные законом (в частности, продукция и услуги обязаны проходить сертификацию на безопасность). Также, например, согласно ст. 6 Закона РФ «Об энергосбережении» энергопотребляющая продукция (в том числе электротовары, радиотовары и пр.) подлежит обязательной сертификации по показателям энергоэффективности. Для определения обязательности сертификации существует Номенклатура продукции (а так же продукция, имеющая код ТНВЭД), в отношении которой законодательными актами Российской Федерации предусмотрена обязательная сертификация. При обязательной сертификации действие сертификата соответствия и знака соответствия распространяется на всей территории РФ.

Добровольная сертификация производится на основании закона РФ «О сертификации товаров и услуг» по частной инициативе заявителей (производителей, поставщиков, продавцов). К сожалению, добровольная сертификация не сможет заменить обязательную сертификацию для товаров и услуг, подлежащих последней. Добровольная сертификация не является популярной из-за высоких расценок на сертификаты и значительные затраты времени на их получение.

Товары квантовой электроники, подлежащие сертификации

Перечень товаров, подлежащих обязательной сертификации, регламентируется в постановлении Правительства РФ «Об утверждении перечня товаров, подлежащих обязательной сертификации, и перечня работ и услуг, подлежащих обязательной сертификации» от 13 августа 1997 г. N 1013 (с изм. от 29 апреля 2002 г., от 10 февраля 2004 г. N 72). Оборудование также подлежит сертификации.

Порядок получения добровольной сертификации

Добровольная сертификация проводится в соответствии с Законом РФ «О сертификации продукции и услуг» по инициативе заявителей (изготовителей, продавцов, исполнителей) в целях подтверждения соответствия продукции (услуг) требованиям стандартов, технических условий, рецептур и других документов, определяемых заявителем.

Добровольная сертификация проводится на условиях договора между заявителем и органом по сертификации.

Добровольная сертификация продукции, подлежащей обязательной сертификации, не может заменить обязательную сертификацию такой продукции. Тем не менее, по продукции, прошедшей обязательную сертификацию, могут проверяться в рамках добровольной сертификации требования, дополняющие обязательные. Допустим, при анализе зубных паст может быть проверена эффективность их действия, при проверке телевизоров некоторых зарубежных моделей — наличие благоприятного биологического воздействия, которые они якобы (согласно рекламным проспектам) оказывают на человека.

Наличие у исполнителя работ (проектировщика, подрядчика) или изготовителя продукции сертифицированной системы качества или сертифицированного производства:

- создает им при прочих равных условиях преимущества при проведении торгов на выполнение соответствующих работ (торгов подряда) или поставку продукции;

- служит основанием для упрощения процедуры сертификации продукции или услуг (переход на схему сертификации по декларации заявителя или отказ органа по сертификации продукции от проведения проверки стабильности производства);

- учитывается органами надзора и лицензирования для установления ими упрощенных процедур по надзору и выдаче лицензий на осуществление проектной, строительной и других видов деятельности.

При сертификации систем качества на предприятиях и в организациях всех видов проверяется деятельность по управлению и обеспечению качества и состояние производственной системы.

В соответствии с правилами, установленными в Системе сертификации ГОСТ Р, при проведении сертификации уполномоченные (аккредитованные) органы по сертификации организуют проведение в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах) первоначальных (типовых) испытаний продукции и оценку ее соответствия установленным требованиям, а в необходимых случаях, предусмотренных схемой сертификации, также оценку и контроль состояния производства путем его сертификации или сертификации системы качества.

На основании результатов испытаний и оценки состояния производства осуществляется выдача сертификатов соответствия и регистрация сертифицированной продукции в Государственном Реестре Системы сертификации ГОСТ Р.

За сертифицированной продукцией, сертифицированным производством или сертифицированными системами качества в зависимости от принятых схем сертификации ведется инспекционный контроль.

Инспекционный контроль за сертифицированной продукцией, сертифицированным производством или сертифицированными системами качества, как правило, осуществляют органы по сертификации, выполнившие эту работу, или соответствующие территориальные органы надзора по договорам с указанными органами по сертификации продукции.

Инспекционный контроль за аккредитованными органами по сертификации и испытательными лабораториями (центрами) осуществляет Госстандарт России за счет лицензионных платежей, получаемых от деятельности по сертификации.

При проведении сертификации производится оценка соответствия приборов квантовой электроники всем требованиям, установленным в государственных стандартах и технических условиях на продукцию, включая область ее применения (соответствие назначению), а также приведенным в нормах и правилах расчетным и другим характеристикам.

По требованию заказчика сертификация продукции может проводиться на соответствие требованиям международных и национальных стандартов зарубежных стран.

Для наиболее полной оценки свойств сертифицируемой новой или импортируемой продукции, связанных с надежностью и долговечностью, органы по сертификации должны разрабатывать и утверждать специальные программы сертификации. Программы устанавливают порядок и правила проведения сертификации данной продукции, а также показатели, подтверждающие соответствие продукции ее функциональному назначению, включая область применения, методики испытаний с учетом особенностей этой продукции, условий ее производства, эксплуатации и т.п.

Участники сертификации несут установленную руководящими документами Системы сертификации ГОСТ Р ответственность за выполнение принятых на себя обязательств:

– изготовитель (исполнитель, разработчик, поставщик) — за обеспечение соответствия выпускаемой им с сертификатом Системы сертификации ГОСТ Р продукции (выполняемых работ, услуг) требованиям соответствующих нормативных документов, за правильность использования знака соответствия и соблюдение других условий сертификации;

– испытательная лаборатория — за соответствие проведенных ею сертификационных испытаний требованиям нормативных документов, за достоверность и объективность результатов этих испытаний;

С позиции государственных интересов, такой инструмент, как сертификация, должен, с одной стороны, обеспечить улучшение качества продукции и услуг и гарантию безопасности их для потребителя, а с другой — не служить препятствием для развития предпринимательства, процедурно и финансово усложняя процесс получения сертификата. Перед началом рассмотрения системы подтверждения соответствия, созданной в настоящее время в нашей стране, и анализом законодательства в этой области необходимо привести используемые в последующем определения терминов и понятий, введенных различными нормативно-правовыми актами Российской Федерации.

Сертификация — это деятельность третьей стороны, независимой от изготовителя (продавца) и потребителя продукции, по подтверждению соответствия продукции установленным требованиям.

Сертификация направлена на достижение следующих целей:

При сертификации систем качества должны соблюдаться и другие принципы сертификации:

- без дискриминационный доступ к участию в процессах сертификации;
- воспроизводимость результатов оценок;
- достоверность представленных заявителем доказательств соответствия систем качества и производств нормативным требованиям;
- использование сведений, полученных от пользователей продукции и потребителей услуг, для оценки систем качества и производств.

Изготовители (продавцы, исполнители) продукции квантовой электроники, подлежащей обязательной сертификации и реализуемой на территории Российской Федерации, обязаны:

- реализовывать эту продукцию только при наличии сертификата, выданного или признанного уполномоченным на то органом;
- обеспечивать соответствие реализуемой продукции требованиям нормативных документов, на соответствие которым она была сертифицирована, и маркирована ее знаком соответствия в установленном порядке;
- указывать в сопроводительной технической документации сведения о сертификации и нормативных документах, которым должна

соответствовать продукция, и обеспечивать доведение этой продукции до потребителя (покупателя, заказчика);

- приостанавливать или прекращать реализацию сертифицированной продукции, если она не отвечает требованиям нормативных документов, на соответствие которым сертифицирована, по истечении срока действия сертификата или в случае, если действие сертификата приостановлено либо отменено решением органа по сертификации;

- обеспечивать беспрепятственное выполнение своих полномочий должностными лицами органов, осуществляющих обязательную сертификацию продукции и контроль за сертифицированной продукцией;

- извещать орган по сертификации в установленном им порядке об изменениях, внесенных в техническую документацию или в технологический процесс производства сертифицированной продукции.

Наряду с сертификатом подтверждение соответствия на территории Российской Федерации может существовать в виде декларации о соответствии, принятой изготовителем (продавцом).

6.3 Стандартизация как нормативно-методическая база сертификации и товарной экспертизы

6.3.1 Унификация, нормализация и стандартизация в производстве электровакуумных приборов

Обязательное требование к конструкции каждого прибора - максимально использование унифицированных, нормализованных и стандартизованных материалов, деталей и узлов.

Под *унификацией* понимают применение в приборе материалов, деталей и узлов, уже используемых в других приборах. Унификация значительно облегчает освоение и выпуск новых приборов, так как сокращает объем подготовки производства и номенклатуру плана заготовительных цехов. На современных электровакуумных предприятиях массового производства коэффициент унификации доходит до 75%. Это значит, что 75% наименований деталей используется в двух или более приборах.

Нормализация является дальнейшим развитием унификации и предусматривает принудительное ограничение числа типоразмеров и материалов, деталей и узлов. Если при унификации конструктор может выбрать из числа используемых любые материалы, детали или узлы, то

при нормализации этот выбор ограничен заранее разработанной номенклатурой.

Документы, относящиеся к нормализованным изделиям, - чертежи, технические условия и т. п. - называются нормами. Для удобства нормы оформляются в виде таблиц и альбомов. В зависимости от масштабов применения различают изделия заводской, ведомственной и междуведомственной нормализации.

Высшей степенью нормализации является стандартизация предусматривающая выпуск нормалей в виде государственных стандартов, применение которых обязательно на всей территории России. Разработка технических требований и конструктивного оформления изделий при стандартизации производится наиболее тщательным образом и с учетом требований максимально широкого круга потребителей. В стандартах оговариваются требования, связанные с гарантией качества стандартизованных изделий. Государственные стандарты имеют силу законов, и их нарушение карается, как нарушение законов.

Широкое применение унификации, нормализации и стандартизации позволяет специализировать отдельные производства, использовать высоко-механизированные и автоматизированные технологические процессы, развивать межпроизводственную кооперацию. Это в свою очередь ведет к уменьшению трудоемкости изготовления приборов квантовой электроники и снижению их себестоимости.

Во избежание изготовления большого количества типов электронных приборов, сходных по параметрам, производится разработка «Основопологающих стандартов» (отраслевых нормалей) на параметрические ряды. Этими документами определяется сетка основных параметров приборов данного класса и заказчикам необходимо укладываться в одну из ячеек этой сетки. Имеется также нормализация основных узлов и нормализация инструмента.

При оценке качества товаров, проведении сертификации и товароведной экспертизы устанавливают соответствие (несоответствие) качества товара или отдельных его характеристик определенным нормам и требованиям. Разработкой норм, требований и правил занимается стандартизация.

"Стандартизация — это деятельность по установлению норм, правил и характеристик в целях обеспечения:

- безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества потребителей;

- технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции;
 - качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;
 - единства измерений;
 - экономии всех видов ресурсов;
 - безопасности хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
 - обороноспособности и мобилизационной готовности страны"
- (закон Российской Федерации "О стандартизации" от 10.06.93 г. №5154-1, в ред. от 27.12.95 г. №211-ФЗ).

Стандартизация в Российской Федерации организуется и проводится в соответствии с общегосударственными законами "О стандартизации" (10.06.93 г.), "О защите прав потребителей" (1996 г. с доп. 17.12.98 г.), "О сертификации" (10.06.93 г.) и другими законодательными актами.

В процессе стандартизации вырабатываются нормы, правила, требования, характеристики, касающиеся объекта стандартизации, которые оформляются в виде **нормативного документа**.

К нормативным документам относят:

- стандарты (государственные, международные, региональные, стандарты отраслей, стандарты предприятий, стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений);
- регламенты (технические регламенты);
- правила, нормы и рекомендации по стандартизации;
- общероссийские классификаторы технико -экономической информации.

Стандарт — это нормативный документ по стандартизации, разработанный на основе согласия заинтересованных сторон и утвержденный признанным органом. В стандартах устанавливаются для всеобщего и многократного применения общие принципы, правила, характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов. Стандарты содержат как обязательные для выполнения требования к объекту стандартизации, так и рекомендательные.

Обязательными требованиями государственных стандартов являются:

- требования безопасности продукции, процессов и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества потребителей;

- требования технической и информационной совместимости и взаимозаменяемости продукции;
- единство методов контроля;
- единство маркировки.

В зависимости от специфики объектов стандартизации различают виды стандартов: основополагающие стандарты (организационно-технические и общетехнические), стандарты на продукцию (услуги), стандарты на работы (процессы), стандарты на методы контроля (испытаний, измерений). Основополагающие стандарты содержат общие и руководящие положения для определенной области. Примером основополагающих стандартов могут быть стандарты Государственной системы стандартизации (ГСС) в России (ГОСТ Р 1.0-92, ГОСТ Р 1.2-92, ГОСТ Р 1.4-93 и др.).

В зависимости от уровня управления хозяйственной деятельностью различают категории стандартов: государственные стандарты (ГОСТ), стандарты отраслей (ОСТ), типовые стандарты предприятий (СТП), стандарты научно-технических, инженерных и других общественных организаций (СТО – стандарт типовой отраслевой). Государственные стандарты России (ГОСТ Р) принимает федеральный орган исполнительной власти в области стандартизации — Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации и метрологии (Госстандарт России); отраслевые стандарты — государственные органы управления (например, министерства, комитеты и др.); стандарты предприятий и общественных объединений — соответствующие службы по стандартизации предприятий и объединений.

Регламент — это нормативный документ, содержащий обязательные правовые нормы и принятый органами власти. Разновидностью регламентов являются технические регламенты, содержащие технические требования к объектам стандартизации.

Они могут касаться терминологии, упаковки, маркировки и других объектов стандартизации. В соответствии с ГОСТом Р 1.0-96 к техническим регламентам следует относить законодательные акты и постановления правительства Российской Федерации, содержащие требования, нормы и правила технического характера; государственные стандарты Российской Федерации в части устанавливаемых в них обязательных требований; нормы и правила федеральных органов исполнительной власти, в компетенцию которых в соответствии с законодательством Российской Федерации входит установление

обязательных требований. Соблюдение регламента (технического регламента) обязательно.

Правила, нормы и рекомендации по стандартизации по своему характеру являются документами методического содержания по различным вопросам стандартизации. Общероссийские классификаторы технико-экономической информации предназначены для межведомственного согласования потоков информации о товарах, услугах населению, предприятиях и организациях с целью стандартизации. На сегодняшний день действует около 20 общероссийских классификаторов, но число их будет расширяться по мере интеграции России в мировую экономику.

Организационные структуры системы стандартизации.

На предприятиях электронной промышленности проверку соответствия продукции требованиям стандартов осуществляет отдел стандартизации. Для облегчения процесса унификации ИЭТ отдел стандартизации разрабатывает стандарты предприятия (СТП). Те же функции в масштабе всей электронной промышленности выполняет организация Электронстандарт, которая разрабатывает отраслевые стандарты (ОСТ). В государственном масштабе действует государственный комитет Госстандарт. Государственные стандарты действуют во всей промышленности вне связи со специализацией предприятий. Стандарты, оставшиеся в наследство от СССР, называются ГОСТ. Постепенно они заменяются новыми российскими стандартами, называемыми ГОСТ-Р. Все стандарты нижнего уровня (СТП и ОСТ) не должны противоречить стандартам верхнего уровня, а могут только дополнять их и детализировать для конкретных областей применения.

В международном масштабе действует организация ISO (International Standard Organization), в состав которой входит Международная электротехническая комиссия (IEC). Исторически IEC возникла раньше, чем ISO, поэтому она вошла в ISO, сохранив свои организационные структуры. Стандарты ISO имеют рекомендательный характер и не обязательны для всех участников организации. Однако международная торговля ориентируется именно на стандарты ISO. Поэтому, участники организации стремятся привести в соответствие национальные и международные системы стандартов.

Отметим наиболее важные и известные группы стандартов.

ISO-9000 – определяет принципы организации системы контроля качества промышленного предприятия, а также документы по организации контроля. Стандарт ISO-9001 наиболее полный и включает 20 разделов, в

которых описаны процедуры контроля качества при разработке, производстве, распространении и технической поддержке промышленной продукции. Стандарты ISO-9002 и ISO-9003 являются частями ISO-9001 и действуют на предприятиях занимающихся только производством или технической поддержкой продукции. Российские предприятия, имеющие опыт работы с Представительством заказчика, быстро осваивают требования стандартов серии ISO-9000, так как структуры контроля качества на этих предприятиях уже есть. Основная проблема в создании автоматизированного документооборота, который требует серьезных затрат на оборудование и обучение персонала. Если система контроля качества предприятия соответствует стандартам ISO-9000, то это предприятие может пройти международный аудит и получить соответствующий сертификат. Сертификат – это пропуск на мировой рынок, но он не гарантирует сбыт продукции.

6.3.2 Сертификация

Основные этапы сертификации

1. Представление заявки в орган по сертификации. Заявителем может быть отечественная или зарубежная организация, индивидуальный предприниматель и т. п.

2. Рассмотрение представленных заявителем документов и проведение первичной идентификации изделий.

3. Принятие решения по заявке, в том числе заключение договора на проведение работ и выбор схемы сертификации.

Схема сертификации — это состав и последовательность действий третьей стороны при оценке соответствия продукции (работ, услуг). При выборе схемы учитываются особенности производства, испытаний, поставки и условий эксплуатации конкретного вида товара, требуемый уровень доказательности, возможные затраты заявителя. Основным критерием выбора схемы является обеспечение доказательности сертификации при минимизации затрат на ее проведение. В системе ГОСТ Р предусмотрено 16 возможных схем сертификации. Схему сертификации предлагает заявитель, но окончательное решение принимает Орган по сертификации.

4. Формирование групп однородной продукции для выбора типового представителя. Группы однородной продукции формируются в соответствии с правилами систематизации Общероссийского классификатора продукции, Товарной номенклатуры

внешнеэкономической деятельности и Перечня групп однородной продукции.

5. Выбор аккредитованной испытательной лаборатории. Орган по сертификации, учитывая предложения заявителя, определяет испытательную лабораторию, которая аккредитована на право проверки данной однородной группы продукции.

6. Отбор образцов от однородных групп и их идентификация. Перед отбором проб орган по сертификации проводит идентификацию продукции.

Идентификация — это установление соответствия конкретной продукции образцу и (или) ее описанию для подтверждения, что образцы будут аналогичны всем остальным изделиям в партии. Идентификацию проводят на соответствие:

- заявленному наименованию;
- документам, подтверждающим происхождение поставляемой продукции и содержащим сведения об ее ассортименте, качестве и количестве;
- принадлежности к данному изготовителю;
- требованиям (показателям качества), обеспечивающим функциональное использование продукции;
- кодам Общероссийского классификатора продукции до уровня не менее пятого знака ОКП;
- кодам Товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности (для ввозимой продукции).

По результатам идентификации эксперт Органа по сертификации составляет заключение. Затем производится отбор образцов. Отбор образцов оформляют актом, который подписывают представители Органа по сертификации и представитель заявителя.

7. Проведение испытаний. Испытательная лаборатория проводит сертификационные испытания образцов методами, установленными в нормативных документах. Образцы считают не выдержавшими испытания, если хотя бы один показатель не соответствует требованиям нормативных документов. Результаты испытаний оформляют протоколом, который направляется в Орган по сертификации.

8. Орган по сертификации проводит анализ результатов испытаний и проверок сертифицируемой продукции и принимает решение о возможности выдачи или отказе в выдаче сертификата. В случае положительного решения выдается сертификат соответствия, в случае

отрицательного решения заявителю направляют аргументированное решение об отказе.

9. Оформление и выдача сертификата и лицензии на применение знака соответствия и внесение сертифицированных изделий в государственный реестр.

Орган по сертификации оформляет сертификат по форме и правилам, установленным Госстандартом России. Срок действия сертификата устанавливает Орган по сертификации с учетом состояния производства, результатов испытаний, но не более трех лет или срока действия санитарно-эпидемиологического заключения.

Действие сертификата на партию продукции распространяется на срок реализации этой партии (но не более чем на один год или на срок действия гигиенического заключения).

Сертификат регистрируют в государственном реестре и выдают заявителю.

При проведении обязательной сертификации Орган по сертификации одновременно с сертификатом выдает заявителю лицензию на право применения знака соответствия. В лицензии указывается место проставления знака соответствия. В дальнейшем маркирование каждой единицы продукции (либо единицы упаковки) знаком соответствия осуществляет заявитель.

10. Инспекционный контроль за сертифицированной продукцией проводит Орган по сертификации совместно с испытательной лабораторией и, при необходимости, с территориальными органами Госстандарта России.

Инспекционный контроль осуществляется в форме периодических и внеплановых проверок в течение всего срока действия сертификата и лицензии на применение знака соответствия.

11. Разработка и контроль выполнения мероприятий при выявлении несоответствий продукции установленным требованиям и неправильном применении знака соответствия.

По ст. 43 закона Российской Федерации "О защите прав потребителей" за федеральным органом по стандартизации, метрологии и сертификации в пределах его компетентности закреплено право налагать штраф:

– за продажу товаров (выполнение работ, оказание услуг), в том числе импортных, без сертификатов, подтверждающих соответствие товаров (работ, услуг) обязательным требованиям стандартов, — в размере стоимости проданных товаров (выполненных работ, оказанных услуг);

- за нарушение правил обязательной сертификации товаров (работ, услуг) органами по сертификации, а также за предоставление недостоверных результатов испытаний товаров (работ, услуг) испытательными лабораториями (центрами) при обязательной сертификации — в размере двукратной стоимости соответствующих товаров (работ, услуг и др).

6.3.3 Метрологическое обеспечение производства

Метрологическое обеспечение - установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности проводимых измерений.

Основы метрологического обеспечения

Объектом метрологического обеспечения являются все стадии жизненного цикла (ЖЦ) изделия (продукции) или услуги.

ЖЦ — это совокупность последовательных взаимосвязанных процессов создания и изменения состояния продукции от формулирования исходных требований к ней до окончания эксплуатации или потребления. Так, на стадии разработки продукции для достижения высокого качества изделия производится

- выбор контролируемых параметров;
- выбор норм точности;
- определение допусков;
- выбор средств измерения, контроля и испытания;
- осуществляется метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации.

Сформировались и развиваются три взаимосвязанных раздела метрологии:

- 1) теоретическая метрология,
- 2) законодательная метрология;
- 3) прикладная метрология.

Теоретическая метрология, являясь базой измерительной техники, занимается изучением проблем измерений в целом и образующих измерение элементов: средств измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и др.

Законодательная метрология - разрабатывает и внедряет нормы и правила выполнения измерений, устанавливает требования, направленные

на достижение единства измерений, порядок разработки и испытаний средств измерений, устанавливает термины и определения в области метрологии, единицы физических величин и правила их применения.

Прикладная (практическая) метрология - освещает вопросы практического применения разработок теоретической и положений законодательной метрологии. И именно с ее помощью осуществляется метрологическое обеспечение производства.

Агрегатирование - это метод конструирования машин и оборудования путем применения ограниченного числа унифицированных и стандартных деталей и сборочных единиц, обладающих функциональной и геометрической взаимозаменяемостью. Агрегатирование в метрологии – стандартизованный набор СИ для конкретного технологического процесса, например, для прокатного стана будет один набор датчиков, для управления котельной или распределительной станцией – другой.

Метрологическое обеспечение производства включает в себя:

- анализ состояния измерений;
- установление рациональной номенклатуры измеряемых величин и использование средств измерений (рабочих и эталонных) соответствующей точности;
- проведение поверки и калибровки средств измерений;
- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации;
- аккредитацию на техническую компетентность.

При этом за траты на метрологическое обеспечение производства должны соответствовать масштабам производства, сложности технологических циклов и в конечном счете не только окупаться, но и приносить доход.

7 Разработка технической документации по методам эксплуатации технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала

7.1 Типы документации. Виды инструкций

Типы документации. Виды инструкций. Инструкции по сервисному обслуживанию. Инструкции по технике безопасности. Инструкции по нештатным ситуациям.

Типы документации

1. Документация по вводу в эксплуатацию- 46 документов
2. Документация сопроводительная на установки в виде схем
3. Документация (Справочная)
4. Документация (отчетная)

Виды инструкций

1. Инструкции по технике безопасности, пожарной безопасности, чрезвычайным ситуациям.
2. Инструкции по сервисному обслуживанию
3. Инструкции для технического обслуживания

Инструкции по сервисному обслуживанию

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.

Инструкции по сервисному обслуживанию безмасляных вакуумных установок

подавляющая часть современных вакуумных установок с безмасляными средствами откачки используют масляный механический вакуумный насос для создания вакуума от атмосферы до 1 Па (10^{-2} мм рт ст). Форвакуумный тракт должен иметь прогреваемую электрическим током ловушку масел, а также ловушку, охлаждаемую жидким азотом. При давлении ~ 2 Па необходимо залить жидкий азот в форвакуумную ловушку. (Более раннее заливание азота может привести к сильному росту инея, уменьшению проводимости вакуумных коммуникаций и выделению воды). Понижение давления до 0,1- 0,01 Па (10^{-3} - 10^{-4} мм рт ст) проводится криогенными или криосорбционными насосами. Дальнейшее понижение давления проводится электроразрядными или турбомолекулярными насосами. Запуск электроразрядных насосов на давлении более 10^{-2} Па нежелателен из-за «науглероживания» вследствие прогрева элементов и газовыделения углеводородов.

Для создания глубокого вакуума существуют сверхвысоковакуумные прогреваемые турбомолекулярные насосы, но они требуют особых условий по соблюдению вертикальности установки.

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

Следует учесть, что криогенные насосы требуют время на регенерацию и испарение газов с криопанелей. На входе электроразрядных и турбомолекулярных насосов необходимо иметь сетки, предупреждающие попадание посторонних предметов.

Инструкции по нештатным и аварийным ситуациям на типовых вакуумных установках

Несоблюдение последовательности включения или выключения установки, отключение электричества или воды приводит к повышению давления в горячем диффузионном насосе и выгоранию в нем масла. Это потребует проведения разборки установки и ревизии ее элементов.

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

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

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

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

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

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

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

7) начали измерение высоковакуумным датчиком ПМИ –2 при форвакууме в вакуумной системе. Последствия – сгорает катод датчика. В этом случае работают, ориентируясь по терморпарному датчику, а давление

определяют из формулы для оценки времени высоковакуумной откачки. Обычно время достижения предельного высокого вакуума от 0,1 до 10^{-2} Па не превышает 15 минут.

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

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

Инструкции и рекомендации по техническому обеспечению работоспособности оборудования

Разработанный технологический процесс фиксируется в специальных технологических документах. Технологическая карта – это документ для финансирования проекта. В этом документе описываются сумма необходимых операций, оборудования и рабочих мест. Технологическая карта включает в себя трудоемкость и металлоемкость изделий и оснастки, необходимой для работоспособности оборудования.

Операционная карта (ОК) - есть технологический документ, содержащий описание одной технологической операции. Операционная карта является основным технологическим документом на рабочем месте

Расчетные методы оценки технологичности

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 преимущество

конструкции изделия и определяется отношением числа новых деталей N_n к общему числу деталей N :

$$K_n = N_n / N \quad (7.1)$$

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

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

$$K_{сл} = N / N_a \quad (7.2)$$

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

Коэффициент использования материала K_u в изделии массой M_u относительно массы заготовки M_z насчитывается по формуле:

$$K_u = M_u / M_z \quad (7.3)$$

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

$$K_i = N_u / N \quad (7.4)$$

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

$$M_z = M_a \cdot K_p \quad (7.5)$$

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

$$K = \sum \mathcal{E}_{маш} / (\sum \mathcal{E}_{маш} + \sum \mathcal{E}_{руч}) \quad (7.6)$$

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

$$t_{изг} = t_{подг} + \sum_m t_i / n_i + t_k \cdot N + t_{от} \quad (7.7)$$

Сокращению времени изготовления способствует преємственность 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.):

$$K_o = \sum N_c / \sum N \quad (7.8)$$

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

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

$$K_{ст} = (N_{ст.о} + N_n) / N \quad (7.9)$$

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

$$K_n = N_{op} / N_{np} \quad (7.10)$$

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 :

$$K_c = \delta_m / \sum \delta \quad (7.11)$$

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 $\delta_{доп}$ к среднеквадратичному отклонению всех параметров δ , включая цену деления измерительных приборов $\delta_{пр}$:

$$K_n = (\delta_{ca} - \delta_{доп}) / \delta + \delta_{пр} \quad (7.12)$$

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 прямоточности $K_{прм}$:

$$K_{прм} = S_m / (S_m + S_n) \quad (7.13)$$

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.

7.2 Правила устройства электроустановок

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

Классы и номенклатура оборудования

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

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

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

Некоторые марки установок расшифровываются следующим образом: УВН – установка вакуумного напыления; ВУП – вакуумный

универсальный пост; ЭЛУ – электронно-лучевая установка; МИР – установка для формирования пленок в магнетронном разряде; УРМ – установка реактивно-магнетронного распыления в плазме или в дуге (УРМ 387.2 – БУЛАТ). Обычно после марки установки стоят цифры, отражающие модификацию разработки.

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

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

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

Для монтажа установок составляется план помещения с указанием мест энергопотребления электричества, воды, сжатого воздуха и т.д. К плану прилагается расчет токовой нагрузки во время каждой операции, данные по расходу воды, сжатого воздуха. При расчете энергопотребления составляется ориентировочная последовательность технологических операций с указанием потребляемой мощности. Обычно при проектировании электропотребления учитывают так называемую «пиковую нагрузку», при которой может потребляться максимальная мощность. При этом подключение нагрузки должно равномерно распределяться на три фазы питающей сети. Подключение измерительной аппаратуры должно производиться через специальные фильтры прямо от подстанции, минуя линии подключения сварочных, электродуговых, плазменных и ударных установок. При разработке проекта электропитания установки следует обратить внимание на поэлементную проверку схемы на пропускаемый ток и напряжение.

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

Установка должна располагаться так, чтобы был свободный доступ ко всем элементам во время проведения пусконаладочных и профилактических работ. Проходы между установками должны составлять не менее 1,2 м по выступающим частям. От стены проход должен составлять не менее 0,7 м для удобства технического обслуживания. В

помещении должна располагаться только одна высоковольтная установка и не содержать оборудование, непосредственно не относящееся к процессу.

Все профилактические и сервисные работы должны проводиться при выключенном питании установки. Особое внимание следует обращать на установки, содержащие конденсаторы. Запрещается эксплуатация установок без высокоомных резисторов, предназначенных для шунтирования выводов емкостей и предназначенных для разряда конденсаторов.

После ввода оборудования в действие отдел энергетика и служба техники безопасности проводит посещение рабочих мест на соблюдение техники безопасности.

Перед проведением технологического процесса рекомендуется составить последовательность технологических операций с режимами и временами их проведения. Это позволит сократить время технологического процесса за счет подготовки изделий и параллельно проводимых операций. Обычно время проведения процесса составляет около 5% от времени его проектирования. При работе с напряжением более 1000 В запрещается работать одному человеку. Система выхлопа газа из механического вакуумного насоса должна иметь выход на специальный фильтр (например, фирмы Man, Германия), или в атмосферу через герметичный трубопровод.

8. Компьютеризация технологических процессов

8.1 Рекомендации по использованию ЭВМ в технологии

На сегодняшний день компьютеризация технологических процессов является достаточно дорогим мероприятием, оправданным только в условиях массового конвейерного производства или в условиях вредности производства. ЭВМ позволяет оптимизировать параметры процессов или провести его диагностику.

8.2 Процесс ввода технологической информации в ЭВМ

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

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

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

Нормализация данных

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

Первая нормальная форма соответствует описанию уравнениями первого порядка.

Вторая нормальная форма соответствует описанию процесса уравнениями второго порядка.

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

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



Рисунок 8.1 – Блок схема обработки данных с применением ЭВМ

Критерий оценки качества сигнала определяется отношением сигнал – шум (С/Ш). Этот критерий вычисляется через отношение квадрата максимальной амплитуды напряжения сигнала U_c к квадрату напряжения шума.

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

При обработке сигнала учитывают время установления сигнала и вероятность его искажения. Обычно вероятность искажения сигнала учитывается через табличную функцию вероятности процесса «erfc» (она берется на уровне 90 %). На рис. 8.2 представлена схема изменения сигнала при обработке данных.

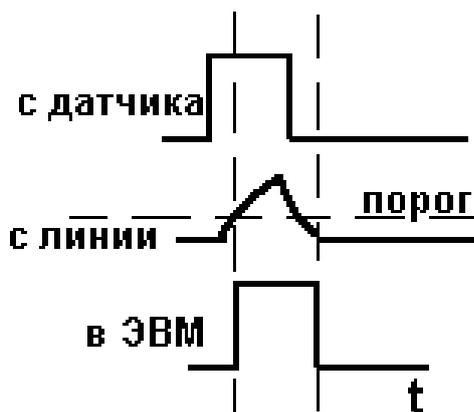


Рисунок 8.2 – Изменение сигнала во времени при передаче данных

8.3 Система «КАМАК»

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

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

Второй уровень обеспечивает программную обработку данных.

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

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

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

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

На рис. 8.3 представлена общая схема подключения преобразователей к системе КАМАК.



Рисунок 8.3 – Схема подключения датчиков к системе «КАМАК»

8.4 Автоматизированные рабочие места (АРМ)

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

АРМ – это многоуровневая система. На первом уровне осуществляется система диагностики и обеспечения работоспособности оборудования. Второй уровень обеспечивает программную обработку данных. Третий уровень обеспечивает моделирование процессов.

8.5 Системы автоматического управления и регулирования технологическими процессами

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

Управление технологическими операциями облегчается при выполнении следующих рекомендаций:

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

Общая схема регулирования технологического процесса

На рис. 8.4 представлена наиболее распространенная схема регулирования технологических процессов. Сигнал от задающего устройства и от объекта сравнивается «ноль органом». Затем сигнал рассогласования усиливается и передается на исполнительный механизм. В качестве «ноль органа» может использоваться компаратор, двойной триод и др. Система управления такого типа представляет собой замкнутый контур, в котором обратная связь выполняется от исполнительного механизма через измеритель параметра. Такая система регулирования называется замкнутой. Для упрощения управления система

может не иметь обратной связи и называться разомкнутой. На практике чаще применяется комбинированная система автоматического управления технологическим процессом.



Рисунок 8.4 – Общая схема регулирования технологического процесса

Законы регулирования параметров

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

- детерминированный (алгебраический, пропорциональный (П));
- пропорционально – интегральный (ПИ);
- пропорционально – интегральный с дифференцированием сигнала (ПИД);
- случайный (стохастический);
- частотный;
- фазовый.

Разнообразие траекторий управления технологическими процессами укладывается в три закона регулирования:

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

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

Пропорциональный закон обеспечивает функциональную зависимость изменяемой величины от задающей. Типичным примером исполнения такого закона может выступать интегратор, вырабатывающий число импульсов, пропорциональное напряжению.

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

Пропорционально – интегральный закон регулирования с дифференцированием сигнала предполагает наличие так называемого «изодромного звена», отслеживающего скорость изменения управляющего сигнала. Примером такого управления может выступать система управления температурой печи, которая по мере приближения к заданной температуре чаще выключает нагреватель, предотвращая перегрев. На рис. 8.5 представлены кривые, отражающие законы изменения параметров.

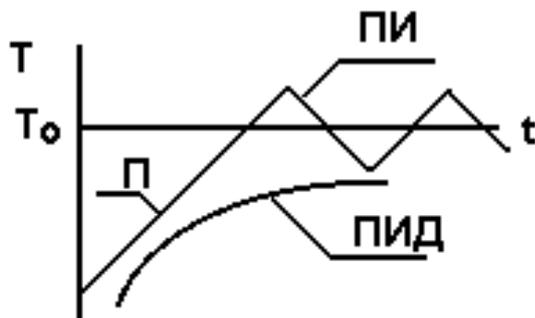


Рисунок 8.5 – Законы изменения параметров управления

Обычно на функциональном оборудовании завод – изготовитель обязан ставить закон регулирования. Многие современные устройства снабжены микропроцессором, в котором предусмотрен переход из одного закона регулирования в другой, либо на электронном носителе вводится функциональная программа изменения параметра.

Уравнение ПИД – регулятора

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

$$U(t) = f(t) + du/dt + \int u(t) dt. \quad (8.2)$$

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

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

Многоуровневые системы децентрализованного управления технологическими процессами

В ряде технологических процессов часть операций управления выведена из поля зрения ЭВМ и оператора. Степень «собственного»

управления подразделяется на три уровня децентрализованного управления:

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

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

Третий уровень – обеспечивает общую работу всей системы и отвечает за работу конечных выключателей и исполнительных механизмов.

Индикация всех уровней децентрализованного управления выводится на пульт управления.

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

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

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

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

Порядок проверки средств локальной автоматизации предусмотрен по ГОСТ, где предусматривается точность метрологии, таблицы погрешностей в статическом и динамическом режимах, диапазон измерений. Оговариваются технические средства измерений, программное

обеспечение. В процессе аттестации рабочих мест по каналам связи пропускаются специальные функции Лапласа и определяются погрешности передачи данных.

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

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

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

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

Способы распознавание сигналов с технологических объектов

Различают распознавание сигналов оператором и машинное распознавание.

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

Машинное распознавание. Сигналы с технологических объектов различают по форме, амплитуде, по времени. В последнее время для

отличия истинного сигнала от ложного применяются различные математические приемы, например разложение в ряд Фурье с оценкой четности, максимумов, степени вероятности и т.д.

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

$$\Delta t = 1/2F_m, \quad (8.3)$$

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

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

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

Если функцию сдвинуть на $1/2$ периода (т.е. Помножить на -1) и она снова ляжет сама на себя – то это функция нечетная. У таких функций при разложении в ряд Фурье отсутствуют четные гармоники. (Т.е. $K=2, 4, 6$ и т.п. – отсутствуют). Нечетная функция та, которая повторяется с обратным знаком. [Т.е $f(t) = -f(-t)$].

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

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

$$S(t) = A_0/2 + \sum A_k \cos k\omega_k t, \quad (8.4)$$

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

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

Список литературы

1. Барыбин, А.А. Физико-технологические основы макро-, микро, и наноэлектроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Барыбин, В.И. Томилин, В.И. Шаповалов. — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2011. — 784 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59756>. — Загл. с экрана.
2. Браун Я., Келлер Р, Холмс А и др. Физика и технология источников ионов. – М.: Мир, 1998. – 500 с.
3. Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал наноэлектроники. //уч. пособие для вузов. Сер.Мир материалов и технологий. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
4. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов [Электронный ресурс] : словарь / под ред. Калюжного С.В.. — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2010. — 528 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59750>. — Загл. с экрана.
5. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А, Величко А.А. Процессы микро– и нанотехнологии. – Томск: ТУСУР, 2005. – 315 с.
6. Розанов Л.Н. Вакуумная техника – М.: Высшая школа, 1990.- 320 с.
7. Орликов Л.Н. Технология и автоматизация производства электронных приборов. – Томск: ТМЦДО, 2001. – Ч.1-2. – 150 с.
8. Орликов Л.Н. Специальные вопросы технологии. – Томск: ТУСУР, 2007.– 229 с.
9. Вакуумные и специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники: / Л. Н. Орликов. Томск: ТУСУР, 2013. -102 с.
10. Орликов, Л.Н. Основы технологии оптических материалов и изделий. Часть 1 Фотоника и оптоинформатика [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л.Н. Орликов. — Электрон. дан. — Москва : ТУСУР, 2012. — 88 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/5432>. — Загл. с экрана.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Специальные вопросы

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

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