

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Аппаратные средства микро- и нанотехнологий**

Научно-образовательный модуль  
в системе дистанционного обучения MOODLE

УДК 681.5

Автор-составитель: **Волков Алексей Васильевич**

**Аппаратные средства микро- и нанотехнологий**

[Электронный ресурс] : электрон. научно-образоват. модуль в системе дистанц.

обучения MOODLE / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. А. В. Волков. - Электрон. текстовые и граф. дан. - Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Научно-образовательный модуль предназначен для студентов радиотехнического факультета, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 210100.62 «Электроника и наноэлектроника», изучающих дисциплину «Аппаратные средства микро- и нанотехнологий» в 8 семестре. Модуль разработан на кафедре наноинженерии.

## **1. Введение. Аппаратные средства микро и нанотехнологий.**

Прогресс естественных и инженерных наук привел на рубеже XX и XXI столетий к рождению новой научно-технической отрасли, получившей название «нанотехнология». За последние два десятилетия нанотехнология превратилась из научного лозунга о перспективах в индустриальное стратегическое направление, которое в ближайшем будущем определит лидеров мирового экономического роста.

Перспективность данного направления подтверждают миллиардные средства, выделяемые в мире на нанотехнологию уже сегодня.

Уникальность этой науки состоит в непосредственном применении качественно новых свойств физических, химических и биологических систем, размеры которых менее 100 нм. Таким образом, нанотехнология — это способность манипулирования отдельными атомами и молекулами с целью создания наноструктурированных материалом и нанометровых объектов, представляющих реальный интерес для технологических применений.

В истории развития науки и техники редко случаются прецеденты, когда одна отрасль объединяет в себе интересы и перспективы всех существующих отраслей материального производства. Прогнозируемый вклад нанотехнологии в развитие человечества уже в первой четверти XXI века станет сравнимым с влиянием информационных технологий, достижениями клеточной и молекулярной биотехнологии.

Нанотехнология призвана обеспечить прорывы в таких областях, как производство новых материалов, электроника, медицина, энергетика, защита окружающей среды, биотехнология, информационные технологии, национальная безопасность. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что с нанотехнологией будет связано наступление новой индустриальной революции.

Говорить о практической пользе нанотехнологии безотносительно направлений в этой области — занятие неэффективное.

Интеграция наноматериалов и наноструктур в технологию электроники и микросистемной техники, в оптоэлектронику и другие области техники позволяет реализовывать функции отдельных наноэлементов и их массивов на микро- и макроуровнях.

По своему назначению современные электронные системы охватывают широкую номенклатуру изделий, масштабы функционирования которых простираются от атомно-молекулярного уровня (нано- и микроструктуры) до планетного масштаба (телекоммуникации).

Разработка и производство разнообразных миниатюрных электронных систем является одним из стратегических направлений мирового научно-технического прогресса. Миниатюризация приводит к революционным изменениям в технике, особенно в тех случаях, когда далеко не очевидным образом удастся разработать и использовать технологию массового производства изделия, что позволяет существенно уменьшить его цену, повысить надежность, снизить энергопотребление и т.п. Эффективность миниатюризации наиболее ярко демонстрируют достижения микроэлектроники, компьютерной техники, телекоммуникаций.

Для более чем полувековой истории микроэлектроники характерны высокие темпы миниатюризации, которые описаны эмпирическими законами Мура в различных формулировках. Из наиболее распространенной формулировки следует, что плотность транзисторов в современных интегральных схемах удваивается каждые 18 месяцев. Однако в настоящее время ситуация в этой области качественно отличается от ситуации прошлого века. В недалеком прошлом рекордные достижения миниатюризации при массовом производстве электронных систем характеризовались пространственными масштабами в сотни и десятки микрон. Сейчас же рекордные достижения миниатюризации практически достигли нанометровых пространственных масштабов, т.е. масштабов элементарных физических объектов электроники.

Действительно, элементарными физическими объектами электроники являются атомы, состоящие из атомного ядра и электронов, и электромагнитное поле (фотоны). Типичные размеры атомов составляют десятые доли нанометра, а длина волны фотонов оптического диапазона электромагнитного поля сотни нанометров. Условно радиус электрона можно оценить величиной -  $3 \cdot 10^{-6}$  нм.

Современные электронные системы имеют сложную иерархическую структуру, которые для своего функционирования реально интегрируют физико-химические явления от атомно-молекулярного уровня до макроскопического уровня. По своей архитектуре они неуклонно приближаются к архитектуре живых систем.

Атомы могут образовывать упорядоченные пространственные структуры атомного масштаба: молекулы, кристаллические решетки, фуллерены, нанотрубки и т.д. Так, характерный размер молекулы воды  $\sim 0,3$  нм, а постоянные кристаллической решетки типичных полупроводников  $\sim 0,5$  нм. Существенно, что такой пространственный порядок может сохраняться при определенных условиях до нано-, микро- и даже макромасштабов. Кроме того, пространственное упорядочение на наномасштабах является фундаментальным свойством и живых систем.

В принципе можно использовать две различные стратегии для создания сложных наноэлектронных систем:

- стратегия «сверху вниз» (top-down). В этом случае наноэлектронные системы создаются в объемном материале, как это принято в классических технологиях интегральных схем на основе кремния;
- стратегия «снизу вверх» (bottom-up). В этом случае наноэлектронные системы создаются из элементарных атомно-молекулярных блоков путем их сборки (самосборки) в сложные структуры. Такая стратегия присуща живым системам.

Каждая из этих стратегий имеет свои достоинства и недостатки, что делает привлекательным поиск компромиссных решений на основе

комбинаций этих стратегий, особенно при разработке реальных электронных систем

Развитие современных технологий направлено на миниатюризацию устройств вплоть до нанометровых размеров, усложнение их конструкций. Все меньшие объемы материала становятся ответственными за протекание тех или иных процессов в таких устройствах. Их размеры приближаются к масштабам, характерным для физических явлений, положенных в основу функционирования разрабатываемых изделий. Решение стоящих технологических задач обуславливает поиски новых материалов, обладающих специфическими свойствами и позволяющих достичь уникальной функциональности.

Наноструктурированные и нанофазные материалы, являющиеся новым направлением исследований в материаловедении, привлекают пристальное внимание из-за их потенциального применения в электронике, оптике, катализе и т.д. Одной из фундаментальных особенностей этих материалов является высокая доля атомов, находящихся вблизи границ наноразмерных областей, по отношению к общему их числу. Это может приводить к новым, нехарактерным для обычных материалов взаимным атомным расположениям. Возникающий в наноматериалах атомный порядок оказывает существенное влияние на их физические и химические параметры, обуславливает уникальные свойства, которые связаны с процессами, протекающими как внутри наноразмерных областей, так и на их границах.

Для полного и всестороннего использования потенциальных возможностей наносистем наряду с разработкой новых методов получения наноматериалов необходимо дальнейшее развитие методов их исследования и диагностики, обеспечивающих получение информации об их физических и химических свойствах. Детальное изучение структуры наноматериалов, включающее определение усредненного атомного порядка, а также выявление и идентификацию локальных отклонений от него, является одной из задач этих методов.

Методы исследования структуры наноматериалов могут быть условно разделены на две большие группы, различающиеся в зависимости от способа получения данных об объекте. К первой группе, называемой методами прямого пространства, относятся те из них, которые позволяют непосредственно визуализировать нанообъекты и анализировать их строение. Вторая группа включает методы, в основе которых лежит изучение структуры образца на основе интерференционных и дифракционных эффектов в рассеянии рентгеновских лучей, электронов и нейтронов, и поэтому их называют методами обратного пространства.

Современная просвечивающая электронная микроскопия обеспечивает возможность получения информации об объекте как в прямом, так и в обратном пространствах. Наряду с зондовыми электронно-микроскопическими методами она позволяет визуализировать и исследовать наноразмерные области и, обладая разрешением вплоть до атомарного, проводить детальный анализ атомных расположений. Используя плоскопараллельное освещение или сходящиеся электронные пучки при получении дифракционных картин, в электронном микроскопе можно изучать угловые распределения рассеянных в образце электронов, что сближает просвечивающую микроскопию с методом рентгеноструктурного анализа

Помимо структурных исследований просвечивающая электронная микроскопия позволяет определять химический состав образца, используя методы рентгеноспектрального анализа и спектроскопию энергетических потерь быстрых электронов. Достигаемое пространственное разрешение может быть лучше 1 нм, что дает возможность непосредственного определения элементного состава как нанообразований в материалах, так и отдельных наночастиц.

## 2. Материалы электронной техники.

Технология ИМС предъявляет к полупроводниковому материалу достаточно жесткие требования. Этим требованиям удовлетворяют кремний, арсенид галлия (GaAs) и еще ряд материалов. Однако ИМС изготавливаются в основном на кремнии. Поэтому кремний называют базовым полупроводниковым материалом для ИМС. Таким он стал в результате определенного конкурентного отбора. В оптоэлектронике наиболее широко используются соединения элементов III и V групп таблицы Менделеева, например GaAs.

Получение полупроводникового материала для ИМС рассмотрим на примере кремния. В массовом производстве кремний получают восстановлением песка ( $\text{SiO}_2$ ) в смеси с коксом (C) при высоких температурах. Полученный таким образом кремний называется металлургическим. Его чистота (~2% неконтролируемых примесей) и структура (поликристалл) не позволяют использовать этот материал для изготовления ИМС.

Далее производится глубокая химическая очистка кремния в виде летучего соединения и его разложение в очищенном виде с выделением кремния. Выделенный кремний может иметь очень высокую чистоту, однако его нельзя использовать для изготовления ИМС, так как он является поликристаллическим. Химически очищенный кремний необходимо превратить в монокристаллический слиток. Это реализуется выращиванием слитка на охлаждаемую затравку из тигля, где химически очищенный кремний находится в расплавленном состоянии (метод Чохральского). При выращивании монокристаллического кремния методом Чохральского происходит дополнительная (кристаллизационная) очистка материала от многих примесей. Однако материал тигля (вносит в растущий кристалл свои примеси. Поэтому разработан метод перекристаллизации кремния без использования тигля (*бестигельная зонная плавка*). Выращенный этим методом кремний обладает самой высокой чистотой. При необходимости слитки



кремния в процессе выращивания легируются донорными или акцепторными примесями. Так получают слитки с р-типом проводимости, удельное сопротивление которых может изменяться в широких пределах.

Монокристаллические слитки кремния обычно имеют цилиндрическую форму.

Полупроводниковые слитки режут тонкими стальными дисками с алмазной кромкой на пластины, диаметр и площадь которых определяются диаметром слитка. Чем больше площадь пластины, тем больше элементов ИМС можно сформировать на пластине, тем на большее число чипов ее можно разделить, тем больше ИМС можно получить из одной пластины. В настоящее время для массового производства ИМС выращивают кристаллы кремния диаметром до 300 мм. На пластине такого диаметра размещается более 1000 чипов, на каждом из которых можно сформировать до  $10^9$  схемных элементов. Таким образом, полученные из одной пластины 1000 ИМС могут содержать до  $10^{12}$  активных элементов, что в 100 раз больше, чем нейронов в человеческом мозге ( $\sim 10^{10}$  штук).

Пластина, вырезанная из слитка, не может использоваться для формирования на ней элементов ИМС, так как ее поверхность имеет геометрические и структурные дефекты. Их устраняют шлифовкой и полировкой до 14-го класса чистоты (оптическая полировка). После такой обработки на поверхности пластины сохраняются локальные впадины и выступы порядка 50 нм, и становятся эффективными последующие стадии формирования элементов ИМС методами планарной технологии.

При формировании планарной транзисторной структуры, изображенной, все элементы транзистора выполняются воздействием на полупроводниковую пластину с поверхности. Сначала вводятся донорные примеси, образующие изолирующие карманы п-типа, затем акцепторные — для создания базы (р-типа), и снова доноры — для формирования эмиттера.

Любые примесные атомы нарушают структуру кристалла. Трехкратное введение примесных атомов искажает кристаллическую структуру в такой

степени, что существенно снижается процент выхода годных транзисторов. Поэтому до 1965 г. выход годных ИМС на биполярных транзисторах не превышал 5%. Процент выхода годных был увеличен до 50-70% переходом на формирование транзисторов в тонком слое монокристаллического кремния, наращенного на пластину. Такой слой называется *эпитаксиальным*. Совершенство эпитаксиального слоя не уступает совершенству монокристалла, из которого получена пластина. Если на пластине р-кремния вырастить эпитаксиальный п-слой, то в нем можно сформировать изолирующие карманы, структура кремния в которых значительно более высока, чем в кармане, полученном введением примесных атомов п-типа непосредственно в пластину р-типа с ее поверхности.

Современные ИМС на биполярных транзисторах получают на эпитаксиальных структурах. Поэтому они называются *базовыми полупроводниковыми структурами*.

Эпитаксия — это ориентированное наращивание кристаллических слоев на монокристаллическую подложку. Если на подложке наращивается эпитаксиальный слой того же состава и структуры, то такой вид эпитаксии называется гомоэпитаксией; если иного состава — то гетероэпитаксией. При изготовлении ИМС на кремнии используют гомоэпитаксию (кремния на кремнии). Для получения гетеропереходов (гетероструктур) оптоэлектронного назначения используется гетероэпитаксия. Например, на подложке арсенида галлия (GaAs) наращивают эпитаксиальный слой трехкомпонентного соединения AlGaAs.

При любом способе эпитаксии имеются: источники атомов ростового вещества, среда, в которой эти атомы переносятся к подложке, и подложка. Если средой переноса является вакуум, то это — вакуумная эпитаксия. В вакууме атомы обычно переносятся в виде молекулярных пучков. Поэтому такой вид эпитаксии называется молекулярно лучевой (*МЛЭ*) или молекулярно пучковой (*МПЭ*). Если средой переноса служит газ или пар, то эпитаксия называется газофазной или парофазной. В настоящее время

весьма распространена газофазная эпитаксия из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ). Наконец, если атомы ростового вещества поступают на подложку из жидкой фазы, то это — жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ).

Уже указывалось, что в нанотехнологии по принципу «снизу вверх» целесообразно использовать *механизмы самоорганизации получаемых нанообъектов*. Процесс эпитаксии обладает признаками самоорганизации. При эпитаксии упорядоченный объект (тонкий монокристаллический слой), один из размеров которого (толщина) может соответствовать наномасштабам или иметь внутреннюю наноструктуру, самоформируется по механизму «снизу вверх» из отдельных атомов, первоначально движущихся хаотически.

Из газовой или жидкой среды беспорядочно движущиеся атомы ростового вещества попадают при эпитаксии на подложку, состоящую из атомов, располагающихся в строгом порядке, образуя кристаллическую структуру. Воздействие атомов подложки принуждает атомы ростового вещества из неупорядоченной среды принимать строго упорядоченные пространственные позиции, повторяя кристаллографическую структуру подложки. В микроэлектронике используются и другие процессы, обладающие признаками самоорганизации. В нанотехнологии подобные процессы должны стать доминирующими.

В нанотехнологии находят применение слои, толщина которых лежит в нанодиапазоне (1-100 нм). В более толстых слоях эпитаксия позволяет получать особые наноструктуры, например сверхрешетки.

**Чистым помещением** или чистой комнатой называется помещение, в котором счетная концентрация взвешенных в воздухе (аэрозольных) частиц и, при необходимости, число микроорганизмов в воздухе поддерживаются в определенных пределах.

Под **частицей** понимается твердый, жидкий или многофазный объект или микроорганизм с размерами от 0,005 до 100 мкм. При классификации чистых помещений рассматриваются частицы с нижними пороговыми размерами от 0,1 до 5,0 мкм.

Ключевым фактором является то, что чистые помещения характеризуются именно **счетной концентрацией** частиц, т.е. числом частиц в единице объема воздуха, размеры которых равны или превышают определенную величину (0,1; 0,3; 0,5 мкм и т.д.). Этим они отличаются от обычных помещений, в которых чистота воздуха оценивается по массовой концентрации загрязнений в воздухе. Отсюда вытекают особенности поддержания и определения показателей чистоты, специфические требования к контрольным приборам, счетчикам частиц в воздухе и пр.

Важной характеристикой чистого помещения является его **класс**.

**Класс чистого помещения** характеризуется классификационным числом, определяющим максимально допустимую счетную концентрацию аэрозольных частиц определенных размеров в 1 м<sup>3</sup> воздуха.

Чистое помещение может содержать одну или несколько **чистых зон**. Чистые зоны могут быть и вне чистого помещения. Чистые зоны могут создаваться в локальных объемах: ламинарных шкафах, укрытиях, изоляторах и пр.

Чистые помещения можно условно разбить на две большие группы:

- с **однаправленным** потоком воздуха;
- \* с **неоднаправленным** потоком воздуха.

Под **однаправленным** потоком понимается поток воздуха с постоянной скоростью и примерно параллельными линиями тока по всему поперечному сечению чистой зоны.



**Рис. 1** Чистое помещение производства стерильных растворов на *Армавирской биофабрике*

На практике односторонний поток иногда называют ламинарным потоком, что не вполне строго. Неодносторонний поток часто называют турбулентным потоком.

Границей между ними является класс чистоты 5 ИСО.

От характера потока воздуха в значительной степени зависят требуемые затраты, система обеспечения воздухом и конструктивные особенности чистого помещения.

Различают три состояния чистого помещения:

- **построенное**, когда чистое помещение построено и действует, но технологическое оборудование не установлено или установлено, но не работает, а материалы и персонал отсутствуют;
- **оснащенное**, когда чистое помещение построено и действует, технологическое оборудование установлено и отлажено (действует в соответствии с соглашением между заказчиком и исполнителем), а персонал отсутствует;
- **эксплуатируемое**, когда чистое помещение функционирует в соответствии с заданными требованиями и с установленной численностью персонала, работающего в соответствии с документацией.

Это разделение имеет принципиальное значение при проектировании,

строительстве, аттестации и эксплуатации чистых помещений. В некоторых случаях оно учитывается системой классификации чистых помещений, например. *Правилами производства лекарственных средств Европейского Союза — GMP ЕС.*

### 3.1 Классификация чистых помещений

В таблице 1.1 показана классификация чистых помещений по межгосударственному стандарту ГОСТ ИСО 14644-1 "Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды Часть 1. Классификация чистоты воздуха". Методика определения класса чистоты помещений и порядок проведения испытаний даны ниже.

**Таблица 1.1**

Классификация чистых помещений по ГОСТ ИСО 14644-1

Класс чистоты	Предельно допустимое число частиц в 1 м <sup>3</sup> воздуха с размерами, равными или превышающими, мкм					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
1 ИСО	10	2				
2 ИСО	100	24	10	4		
3 ИСО	1000	237	102	35	8	
4 ИСО	10000	2370	1020	352	83	
5 ИСО	100000	23700	10200	3520	832	29
6 ИСО	1000000	237000	102000	35200	8320	293
7 ИСО				352000	83200	2930
8 ИСО				3252000	832000	29300
9 ИСО				35200000	8320000	293000

**Таблица 1.2**

Классификация чистых помещений по различным стандартам

ГОСТ ИСО 14644-1	ГОСТ Р 50766-95	Стандарт США 209 E	Стандарт США 209 D
1 ИСО	P 1	-	-
2 ИСО	P 2	-	-
3 ИСО	P3 (1)	M 1.5	1
4 ИСО	P 4 (10)	M 2.5	10
5 ИСО	P 5 (100)	M 3.5	100
6 ИСО	P6 (1000)	M 4.5	1000
7 ИСО	P 7 (10000)	M 5.5	10000
8 ИСО	P 8 (100000)	M 6.5	100000
9 ИСО	P 9(1000000)	-	-

Этой классификации соответствовал и первый российский

государственный стандарт по чистым помещениям ГОСТ Р 50766-95 "Помещения чистые Классификация. Методы аттестации. Основные требования". Он отличался тем, что вместо ИСО в нем было дано обозначение Р (*российский*) и для удобства был добавлен в скобках класс чистоты по американскому стандарту 209D. Например, класс 5 ИСО имел обозначение Р 5 (100), что не меняло сути, но облегчало восприятие новой классификации. В связи с введением ГОСТ ИСО 14644-1 принято решение об отмене ГОСТ Р 50766-95.

До последнего времени в мировой практике использовались различные подходы к классификации чистых помещений (таблица 1.2), из них наибольшую известность получила простая и наглядная классификация по Федеральному стандарту США 209.

В 1963 г. в США *Институтом изучения окружающей среды (IES)* был создан первый стандарт по чистым помещениям — **Федеральный стандарт США 209А**. Он оказал решающее влияние на развитие техники чистых помещений и стандартизации в области контроля микрозагрязнений во всем мире.

Дальнейшие его модификации 209В, 209С, 209D имели ту же классификацию. В качестве обозначения класса чистоты по этим стандартам были взяты максимально допустимые числа частиц с размерами 0,5 мкм и более в 1 фут<sup>3</sup> воздуха. Например, в 1 фут<sup>3</sup> воздуха помещения класса 100 должно быть не более 100 частиц с размерами 0,5 мкм и более. Благодаря этой простоте стандарт 209 использовался фактически как международный стандарт в течение нескольких десятилетий, несмотря на обилие национальных стандартов.

В последние годы осуществлен переход к метрической системе в области чистых помещений. Сначала был принят стандарт США 209Е с довольно оригинальной классификацией, а затем международный стандарт ИСО 14644-1, на который уже перешли многие страны мира.

В США в конце 2001 г. Федеральный стандарт 209Е был отменен и введен

в действие стандарт ИСО 14644-1. Стандарт ИСО 14644-1 был принят в России в 2000 г. как ГОСТ Р ИСО 14644-1.

В настоящее время он принят уже как межгосударственный стандарт СНГ - ГОСТ ИСО 14644-1.

Существуют и специализированные системы классификации чистых помещений и чистых зон. Например, в Правилах производства лекарственных средств — GMP ЕС [4] и ГОСТ Р ИСО 13408-1 "Асептическое производство медицинской продукции. Часть 1. Общие требования", отражены особенности чистых помещений для производства лекарственных средств и **изделий** медицинской техники.

Обозначение класса чистоты по ГОСТ ИСО 14644-1 включает не только классификационное число, но и состояния чистого помещения и заданные пороговые размеры частиц, например, класс 5 ИСО; *эксплуатируемое* состояние; рассматриваемые размеры частиц:  $> 0,5 \text{ мкм}$  ( $3520 \text{ частиц/м}^3$ );  $> 5,0 \text{ мкм}$  ( $29 \text{ частиц/м}^3$ ).

ГОСТ ИСО 14644-1 не требует задания всех размеров частиц по таблице 1.1 для данного класса ИСО. Может быть задан один или более размеров частиц.

Требования к чистоте обычно определяются техническими условиями, технологическими регламентами (процессами), соглашением между заказчиком продукции и поставщиком и т.д. Исключением является медицинская промышленность, для которой требования к чистоте устанавливаются государственными нормами. К ним относятся Правила GMP, регламентирующие классы чистоты для производств стерильных лекарственных средств. В некоторых странах (например, в Германии) установлены требования к чистым помещениям в больницах.

### **3.2 Источники микрозагрязнений.**

Окружающий нас воздух содержит большое количество как живых, так и неживых частиц, отличающихся по своей природе и размерам.

Микрозагрязнения выделяются персоналом, ограждающими



конструкциями, оборудованием, проникают в чистое помещение из окружающей среды.



**Рис. 2** Источники микрозагрязнений

В среднем в чистом помещении 70-80% микрозагрязнений приходится на человека, 15-20% — на оборудование, 5-10% — на окружающую среду (рис. 2).

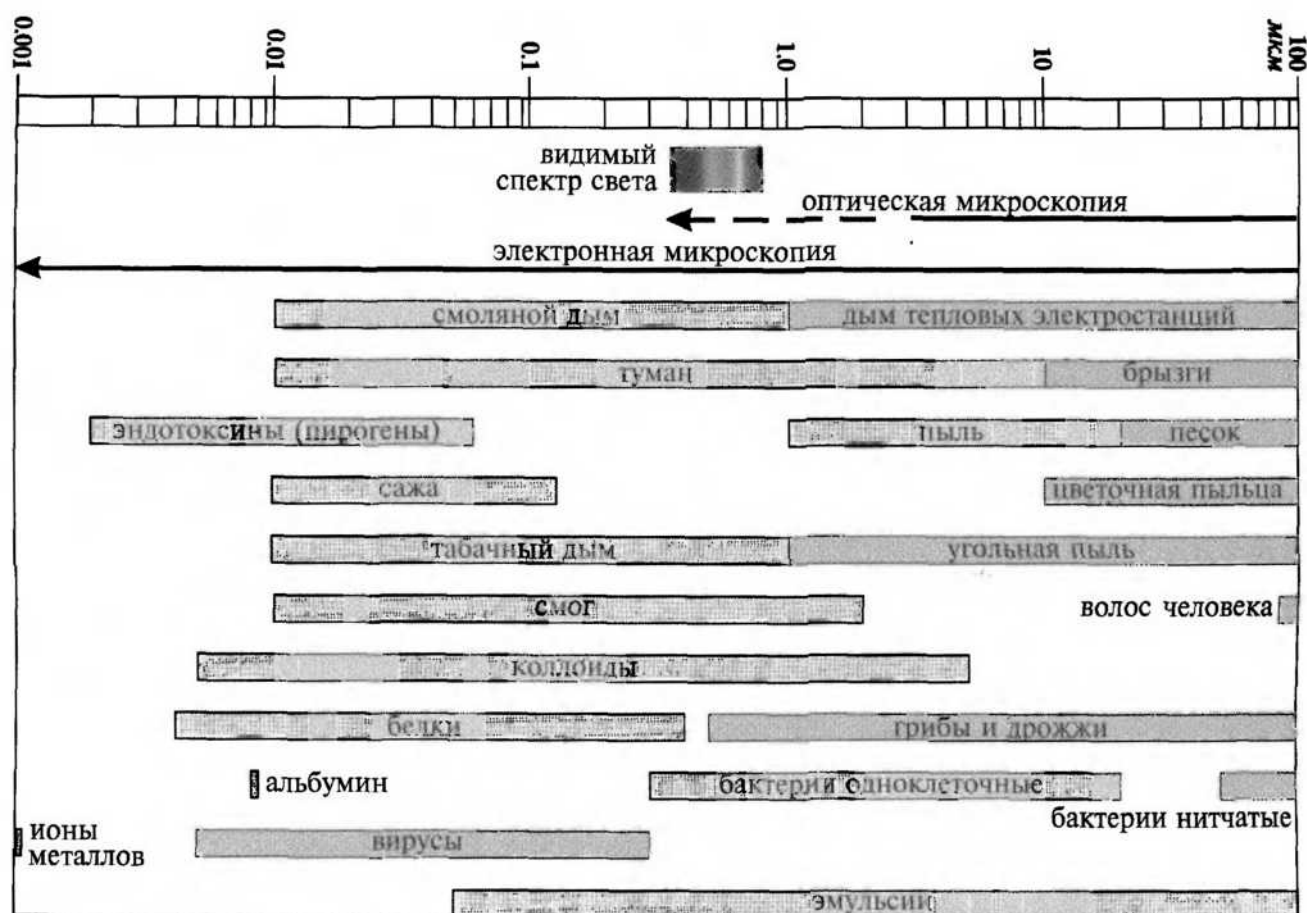
Для микроэлектроники эти данные несколько отличаются. На технологический процесс приходится 25% микрозагрязнений, на оборудование — 25%, технологические газы и химикаты — 8%, воздух — 8%, персонал — 35%, причем влияние персонала снижается с внедрением изолирующих технологий.

Природа микрозагрязнений в воздухе и характерные для них размеры показаны на рис. 3.

Из диаграммы видно, что проблема чистых помещений носит комплексный характер. Недостаточно создать собственно чистое помещение, которое обеспечивает нужный класс чистоты при отсутствии технологического оборудования и персонала. Нужно одновременно применять оборудование, выделяющее минимум загрязнений или не выделяющее их вообще, одеть людей в "непылящую" одежду, научить их правильно себя вести, установить контроль за гигиеной персонала и т.д. Иначе значительные затраты на создание чистых помещений попросту бессмысленны.

Основным источником загрязнений в чистом помещении является, как правило, человек. Это объясняется структурой кожи человека и динамикой ее изменения. Наружный покров кожи человека состоит из множества пластинок (чешуек) с размерами примерно в единицы и десятки

микрометров. Они постоянно отделяются с поверхности кожи таким образом, что каждые несколько дней наружный кожный покров полностью обновляется. Отделившись, они дробятся на более мелкие частицы. В спокойном, неподвижном состоянии человек выделяет в минуту примерно 200 тыс. частиц с размерами 0,5 мкм и более. Даже небольшие движения и трение тела об одежду приводят к резкому увеличению сброса частиц до нескольких миллионов в минуту (рис. 4). При интенсивном движении человек выделяет примерно 10 млн. частиц в минуту. В среднем человек выделяет около 3,5 кг частиц за год или 10 г в день.



**Рис. 3** Природа микрозагрязнений.

При движении в чистых помещениях люди в халатах и лабораторной одежде выделяют в окружающую среду в среднем:

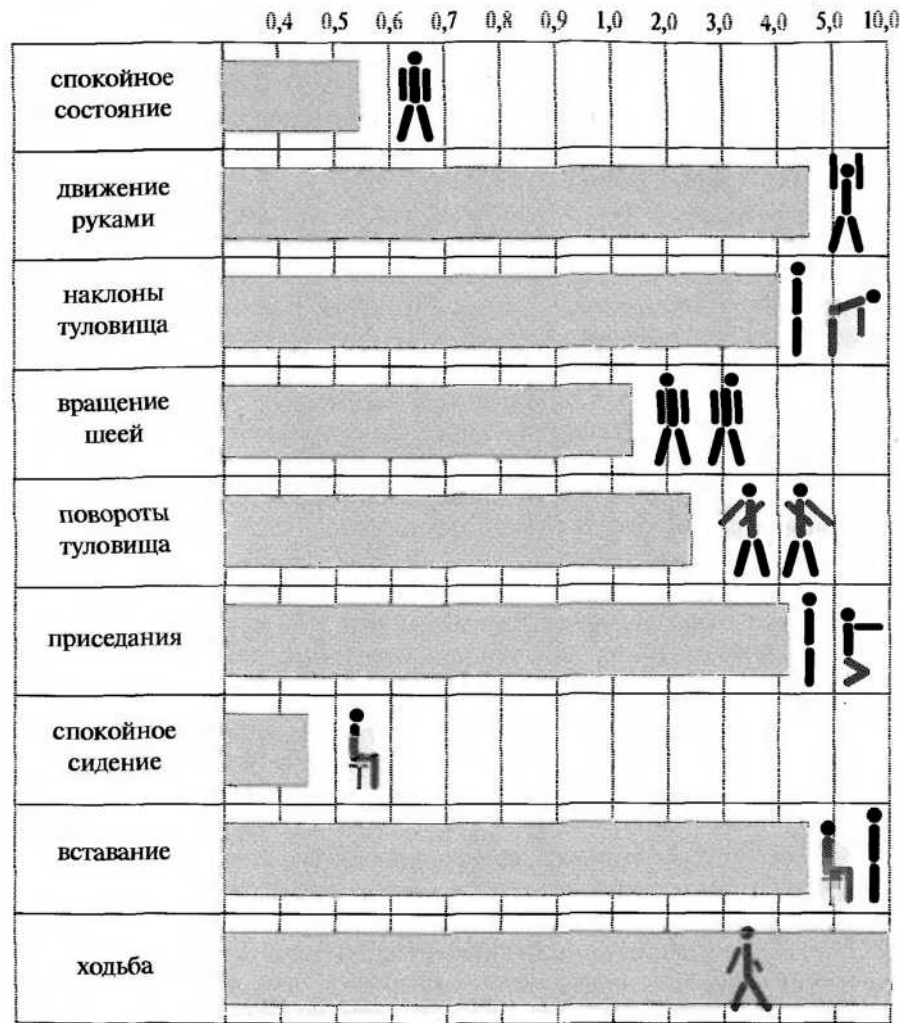
- два миллиона частиц с размерами 0,5 мкм и более,
- триста тысяч частиц с размерами 5,0 мкм и более,
- сто шестьдесят частиц, на которых находятся микроорганизмы.

Мощными источниками выделения частиц являются нос и рот человека. Интенсивность выделения резко возрастает при разговоре, особенно во время громкой речи и крике.

Частицы, отделившись от человека, подхватываются постоянно восходящим вверх естественным конвекционным потоком воздуха, окружающем человека. Далее они распространяются по всему объему помещения и оседают на оборудовании, материалах, продукте, ограждающих конструкциях, других работниках и т.д.

Частицы могут являться носителями микроорганизмов.

Согласно статистике на 1000 взвешенных частиц приходится ориентировочно один микроорганизм. В стандарте *Национального агентства по исследованию космоса США (NASA) NHB 5340* приводится примерное соотношение между числом частиц и микроорганизмов в воздухе (таблица 1.3). Конечно, ввиду множественности факторов, влияющих на микробную загрязненность, эти данные носят приближенный, вероятностный характер, но тем не менее дают представление о взаимосвязи между этими ключевыми параметрами.



**Рис. 4** Выделение частиц с размерами 0,3 мкм и более человеком при движении (в миллионах на человека в минуту)

Стремление получить хотя бы ориентировочную *связь между числом частиц и числом микроорганизмов в воздухе* было вызвано практическими соображениями. Счет частиц в воздухе выполняет быстро и легко. Это

удобно при аттестации чистых помещений и текущем контроле. Анализ же микробной загрязненности требует времени и затрат.

Таблица 1.3

Связь между числом частиц и числом микроорганизмов в воздухе по стандарту NASA NHB 5340

Класс чистого помещения по стандарту США 209 D	Частицы		Микроорганизмы	
	Диаметр, мкм	Количество в 1 фут <sup>3</sup> (л)	Взвешенные в 1 фут <sup>3</sup> (л)	Осажденные на 1 фут <sup>2</sup> /нед. (1 м <sup>2</sup> /нед.)
100	> 0,5	< 100 (<3,5)	< 0,1 (< 0,0035)	1 200 (12 900)
10 000	> 0,5	< 10 000 (< 350)	< 0,5 (< 0,0176)	6 000
	> 5,0	< 65 (< 2,3)		(64 600)
100 000	> 0,5	< 100 000 (< 3 500)	< 2,5 (< 0,0884)	30 000
	> 5,0	< 700 (< 25)		(323 000)

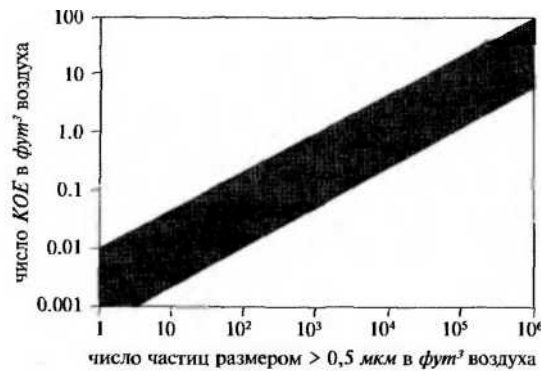


Рис. 5 Связь микробной загрязненности воздуха и числа аэрозольных частиц

График зависимости между числом частиц в воздухе и микробной загрязненностью, согласно исследованиям NASA, показан на рис. 5.

Чистое помещение — это искусственно созданная среда. Вблизи земной поверхности такого уровня чистоты, как правило, нет. Например, классу 5 ИСО соответствует чистота атмосферного воздуха на высоте более четырех километров и в космосе. Более чистых сред в естественных природных

условиях не существует. Поддержание заданного класса чистого помещения является постоянной борьбой с возможными источниками загрязнений, поддержанием постоянного барьера между ним и внешней естественной, загрязненной средой.

На это и направлена современная технология создания и эксплуатации чистых помещений.

Более подробно физика аэрозолей рассмотрена в главе 10.

### 3.3 Области применения чистых помещений

Сфера использования чистых помещений широка и к настоящему времени охватывает многие области техники, жизни и деятельности человека. В таблице 1.4 показаны основные области применения чистых помещений. Классы чистых помещений даны по ГОСТ ИСО 14644-1.

Таблица 1.4

Примеры применения чистых помещений

Область применения	Класс чистого помещения по ГОСТ ИСО 14644-1					
	3	4	5	6	7	8
<b>Промышленность</b>						
Микроэлектроника	+	+	+	вспомогательные зоны		
Приборостроение, вычислительная техника			+	+	+	+
Оптика и лазеры			+	+	+	+
Космическая промышленность			+	+	+	+
Точная механика, гидравлика и пневматика						+
Прецизионные подшипники						+
Автомобильная промышленность					+	+
Парфюмерия и косметика						+
<b>Здравоохранение</b>						
Производство лекарственных средств:						
- стерильных,			+		+	+
- нестерильных					+	+
Производство изделий медицинского назначения			+		+	+
Больницы:						
- операционные,			+	+	+	
- палаты интенсивной терапии,			+		+	+
- другие помещения					+	+
<b>Пищевая промышленность</b>			+		+	+

Наиболее строгие требования к чистоте воздуха в производственных помещениях предъявляет электронная промышленность, особенно в связи с интенсивным развитием субмикронных технологий. Она является стимулом движения вперед в области ультравысоких требований к чистоте. Определяющим фактором в развитии требований к чистым помещениям является размер топологического элемента микросхемы. Чем дальше идет прогресс, тем меньше становится эта величина (таблица 1.5). Если размер частицы, осевшей на микросхему, превышает 0,1 — 0,2 доли минимального топологического размера, то это может привести к браку. Частицы металлов, ионы, бактерии и пр. являются причиной брака. Степень чистоты воздуха прямо связана с процентом выхода годных в производстве микросхем.

Таблица 1.5

Связь параметров микросхемы и требуемого класса чистоты

Год	1987	1993	1998	2000	2006	2012
Информационная емкость (СБИС ДОЗУ), мегабит ( <i>М</i> ), гигабит ( <i>Г</i> )	1-4М	16-64М	256М	1Г	16Г	64Г
Минимальный топологический размер, <i>мкм</i>	0,8-1,0	0,35-0,6	0,25	0,15	0,10	0,032
Требуемый класс чистоты помещений	4	3-4	2	1	< 1	< 1

Прогресс в развитии функциональных требований к микроэлектронике, исключительно высокий масштаб инвестиций предъявляют строгие требования к уровню качества. Электроника становится самой крупной отраслью мировой промышленности. На микроэлектронику приходится наибольшая доля от всех строящихся в мире чистых помещений, на строительство и эксплуатацию которых расходуются миллионы долларов в год.

Например, компания *Intel* объявила о строительстве в Ирландии завода по производству микроэлектронных элементов на пластинах диаметром 300 *мм* с топологическим размером 0,09 *мкм* (90-nanometer process technology). Общая площадь завода более 100000 *м²*, в т.ч. 16000 *м²* чистых помещений. Пуск завода намечен на 2004 г. Численность персонала 1000 чел. Общая стоимость проекта 2 млрд. долл. США. Это будет четвертое производство с пластинами 300 *мм* в компании *Intel* [10].

#### 4. Основные понятия вакуумной техники. Физические основы вакуумной техники.

Таблица 2

Перевода единиц измерения давления.

	Pa (Па)	Bar (атм.)	Torr (мм. рт. ст.)
Pa (Па)	1	$10^{-5}$	0.0075
Bar (атм.)	$10^5$	1	750
Torr (мм. рт. ст.)	133.3	$1.33 \cdot 10^{-3}$	1

Наиболее полно для определения степени разреженности газа в какой-либо среде использовать безразмерную величину - коэффициент Кнудсена  $K_n$  (Knudsen number) - это отношение средней длины свободного пробега молекул газа  $\lambda$  к линейному размеру вакуумного устройства  $L_{эф}$  (расстояние между стенками сосуда или диаметр трубопровода или расстояние между измерительными электродами). Этот способ, безусловно, очень корректный, но абсолютно неудобный. Более удобный для использования в инженерной науке способ – классификация степени разреженности по давлению.

Классификация глубины вакуума.

Низкий вакуум  $K_n \leq 5 \cdot 10^{-3}$ , давление  $10^5 \dots 10^2$  Па ( $10^3 \dots 100$  мм рт.ст.)

Средний вакуум  $5 \cdot 10^{-3} < K_n < 1.5$ , давление  $10^2 \dots 10^{-1}$  Па ( $100 \dots 10^{-3}$  мм рт.ст.)

Высокий вакуум  $K_n \geq 1.5$ , давление  $10^{-1} \dots 10^{-5}$  Па ( $10^{-3} \dots 10^{-7}$  мм рт.ст.)

Сверхвысокий вакуум  $K_n \gg 1.5$ , давление  $10^{-5}$  Па и ниже ( $10^{-7} \dots 10^{-11}$  мм рт.ст.)

Вакуумметр – манометр для измерения давления разреженного газа (давление которого меньше 1 атм.). Манометр – прибор для измерения давления газа или жидкости. Вакуумметры предназначены для показания общего, полного давления, которое равняется сумме парциальных давлений газов. Для измерения парциального давления газа, т.е. давления конкретного газа, входящего в какой-то технологический газ (смесь газов), как правило, используют масс-спектрометрические методы измерения.

## **Механические вакуумметры**

Гидростатические (жидкостные) манометры. Измеряют разность давлений на поверхности жидкости в U-образной трубке. В настоящее время жидкостные вакуумметры практически не используются.

Компрессионные вакуумметры – разновидность гидростатических манометров, в которых, с целью увеличения измеряемого диапазона, рабочей жидкостью вакуумметра предварительно создается сжатие. Несмотря на то, что приборы неудобны в повседневной работе, они иногда находят своё применение как образцовые (калибровочные) вакуумметры.

Деформационные механические вакуумметры – вакуумметры, предназначенные для измерения низкого вакуума, принцип действия которых основан на деформации рабочего сенсора (пружины или мембраны).

Пружинный и мембранный вакуумметр, в которых для измерения используются только механические части, являются одними из самых дешевых средств измерения низкого вакуума, и обычно имеют стрелочную индикацию. Оба вакуумметра являются газонезависимыми (т.е. показания давления не зависят от типа газа).

Более точной (и соответственно, дорогой) разновидностью мембранного вакуумметра является емкостной диафрагменный вакуумметр. В емкостном вакуумметре изгибаемая мембрана является одной из обкладок конденсатора, емкость которого изменяется при изменении расстояния между обкладками. Учитывая, высокую реакцию емкости конденсатора на изгиб одной из обкладок, а также возможность высокоточного измерения изменения емкости, данные вакуумметры являются одними из наиболее точных. Их относительная погрешность измерения составляет десятые и сотые процента. Емкостные вакуумметры являются газонезависимыми. К недостаткам можно отнести небольшой диапазон измерения (обычно не более четырех порядков) и высокую стоимость.

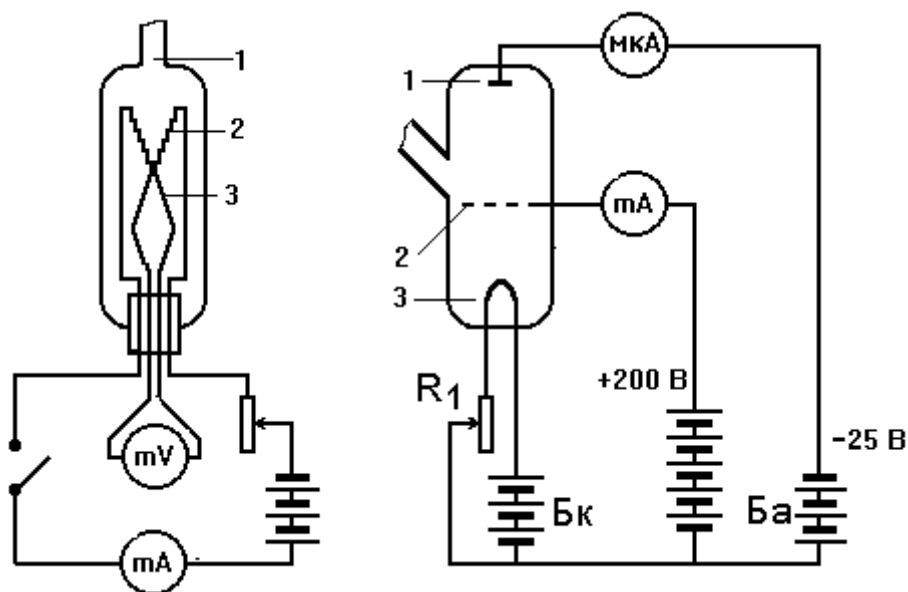
## **Тепловые вакуумметры**

Тепловой вакуумметр – самый распространённый тип измерения



низкого и среднего вакуума ( $10^5 - 10^{-2}$  Па) благодаря приемлемой точности и невысокой стоимости вакуумметра. Тепловой вакуумметр – это вакуумметр для измерения абсолютного давления. Действие вакуумметра основано на принципе изменения теплопроводности газа при изменении давления газа. Тепловые вакуумметры являются газозависимыми вакуумметрами (показываемое давление зависит от типа газа, т.к. разные газы имеют разную теплопроводность при одном и том же давлении). В настоящее время широкое распространение имеют 2 основных типа тепловых вакуумных преобразователей: термопарный и вакуумный датчик Пирани.

Термопарный вакуумный датчик – один из самых дешевых преобразователей для измерения низкого и среднего вакуума рис. 6. Его действие основано на том, что температура нити нагревателя 2, помещенной в герметичный баллон 1, соединенный с измеряемым объемом, при достаточном разряжении газа зависит от давления. В диапазоне давлений, где длина свободного пробега молекул больше размеров лампы, с понижением давления уменьшается коэффициент теплопроводности газа. Из-за этого с понижением давления растет температура нити нагревателя 2 при неизменном токе, протекающем через нить. Температура нити регистрируется с помощью термопары 3 и далее с помощью градуировочных кривых переводится в абсолютное давление.



**Рис. 6.** Электрическая схема  
термопарного вакуумметра

**Рис. 7.** Электрическая схема  
ионизационного вакуумметра

Вакуумный преобразователь Пирани (или вакуумметр сопротивления) также основан на принципе зависимости температуры нагреваемой нити от давления окружающего газа. Но в этом типе преобразователя измеряется сопротивление самой нагревательной нити с помощью мостовой схемы.

Конвекционный вакуумный датчик использует принцип конвекции (перенос теплоты путём перемешивания газа). В конвекционных вакуумных датчиках пространство вокруг нагреваемой нити больше, что обеспечивает возникновение потоков газа и лучшее охлаждение, что повышает их точность по сравнению с термопарными датчиками.

Пьезорезистивные вакуумные датчики служат для точного (по сравнению с тепловыми) измерения вакуума в диапазоне от 1 атм. до 1 Торр, в некоторых моделях – 0,1 Торр. Так как пьезорезистивный эффект зависит непосредственно от давления, то данный тип вакуумных датчиков является газонезависимым.

Вакуум высокой степени (от  $10^{-2}$  до  $10^{-6}$  Па) измеряется с помощью ионизационного манометра рис. 7. На рынке в основном представлены два типа ионизационных высоковакуумных датчиков: магниторазрядный вакуумный датчик (часто называемый вакуумный датчик с холодным катодом) и вакуумный датчик Байард-Альперта (обычно называемый вакуумный датчик с нитью накала). Все ионизационные вакуумметры являются газозависимыми вакуумметрами (т.к. потенциал ионизации у разных газов разный).

Манометра Байарда-Альперта (рис. 5.) представляет собой триод, на сетку 2 которого подан положительный потенциал относительно катода 3 (обычно от +120 до +250 В). К коллектору 1 подан отрицательный потенциал (от - 10 до -30 В). Основная часть эмитируемых нагретым катодом электронов пролетает сквозь сетку: электроны отражаются полем коллектора

и, прежде чем попасть на сетку, совершают многочисленные колебания около нее. При этом происходит интенсивная ионизация молекул воздуха. Образовавшиеся положительные ионы улавливаются коллектором. Отношение регистрируемого гальванометром ионного тока к электронному, измеряемому миллиамперметром, характеризуют давление газа. Таким образом, измерение давления газа сводится в этом случае к измерению ионного тока при заданной эмиссии электронов из катода.

В магниторазрядном манометре происходит ионизации атомов газа в сильном электрическом поле. Ионизация происходит ускоренными электронами, которые благодаря наличию магнитного поля движутся по спиральной траектории, что значительно увеличивает энергию электронов и, как следствие, их ионизационную способность. Преимуществом высоковакуумных датчиков с холодным катодом является их высокая надежность (в «чистых» вакуумных системах высоковакуумные датчики с холодным катодом стабильно работают в течение многих лет). Недостатком, по сравнению с высоковакуумными датчиками с холодным катодом является чуть меньшая точность измерения. Прародителем магнитного электроразрядного высоковакуумного датчика является вакуумный датчик Пеннинга, впервые предложенный в 1937 году.

#### Руководство по выбору вакуумметра

##### 1) Диапазон измерений вакуумметра

Диапазон измерений вакуумметра зависит от принципа работы вакуумметра, от его типа, и конструктивных особенностей данного вакуумметра. Так, все тепловые вакуумметры измеряют давление в диапазоне примерно от 1 атм до  $10^{-3}$  Торр, механические вакуумные датчики – до единиц Торр, пьезорезистивные – от 1 атм до единиц тора, емкостные вакуумметры покрывают диапазон 4 порядка в диапазоне от 1 атм до  $10^{-5}$  торр (поэтому, если необходимо измерять давление с очень высокой точностью в диапазоне 1 атм до  $10^{-5}$  торр, то необходимо использовать два емкостных вакуумметра), ионизационные вакуумметры – от  $10^{-2}$  до высокого

и сверхвысокого вакуума. Налажено производство вакуумметров, в которых в одном корпусе соединены два вакуумных датчика (так называемые широкодиапазонные вакуумметры).

### 1) Принцип вакуумного преобразователя

Для некоторых задач важно знать, какой принцип измерения используется в вакуумметре, чтобы избежать неблагоприятного влияния техпроцесса на показания вакуумметра, или на сам вакуумметр. Так, в магнитных электроразрядных вакуумметрах вокруг вакуумметра создается небольшое постоянное магнитное поле, которое может влиять на некоторые физические эксперименты, чувствительные к внешним магнитным полям. Принцип измерения определяет, зависят ли показания данного вакуумметра от состава газа. Понимая принцип измерения, заложенный в вакуумметр, проще понять, какое обслуживание может быть у вакуумметра и сможет ли пользователь вакуумметра его обеспечить (например, чистку вакуумметра). Понимание принципа измерения и конструкции может много рассказать о надежности вакуумметра. Так, нить накаливания в тепловых вакуумных датчиках и нить накала в высоковакуумных ионизационных вакуумных датчиках является наиболее частой причиной выхода из строя этих вакуумметров. По этой причине компания Тираконт в тепловых вакуумных датчиках Пирани VSP63 использует плоскую пластину и импульсный нагрев (запатентованная технология), что позволило значительно увеличить их надежность и расширить диапазон и точность измерения.

### 3) Точность измерений вакуумметра

Точность измерения является одной из самых важных характеристик вакуумметра. Часто точность измерения конкретного вакуумметра может быть разной для разных диапазонов, в которых измеряет вакуумметр. Так, вакуумметр Пирани, поставляемый для измерения вакуума в диапазоне от 1 атм до 0,001 торр, имеет хорошую точность измерений (обычно порядка 15%) в диапазоне от единиц торр до сотых долей торра, и менее точен в областях 1 атм – единицы торр, 0.01 торр – 0.001 торр (точность измерения

может быть более 100%, т.е. при показании давления в этих диапазонах вакуумметр Пирани ошибается более чем в два раза). Поэтому, при использовании вакуумметра обращайте внимание диапазон измерений, в которых вакуумметр обеспечивает заявляемую производителем точность.

Так, для увеличения точность во всём заявленном диапазоне работы вакуумметра может быть установлен дополнительный манометр. Так, вакуумметр VD85 компании Thyracont состоит из двух вакуумных датчиков (пьезорезистивный вакуумный датчик и вакуумный датчик Пирани), что обеспечивает высокую точность измерений данного вакуумметра от 1 атм до единиц торр.

4) Воспроизводимость показаний – характеристика, которая показывает, насколько значения одного и того же вакуумметра будут отличаться при измерении в одних и тех же условиях (т.е. на данной камере, с данным составом газа, датчик находится в том же положении, и т.п.). Т.е., если ваша вакуумная система не претерпевает никаких измерений, то насколько будут отличаться показания этого конкретного вакуумного датчика при его включении и выключении. Например, вакуумный датчик имеет точность  $\pm 5$  торр. При включении он показывает давление 20 торр. Понятно, что реальное давление лежит в пределах от 15 до 25 торр. При этом, когда вы 5 раз включаете датчик одного производителя, он показывает значения: 20, 19, 18, 16, 23 торр. Включая датчик другого производителя, также имеющего точность  $\pm 5$  торр, вы получаете значения: 20, 21, 21, 20, 20 торр. Воспроизводимость второго вакуумметра лучше.

Воспроизводимость вакуумметра – важная характеристика, которая влияет на стабильность работы вашей вакуумной системы (и как следствие – воспроизводимость параметров вашего конечного продукта, получаемого в этой технологической вакуумной установке). Покупая вакуумметр с высокой воспроизводимостью, вы частично компенсируете негативный факт невысокой точности данного вакуумметра, при этом экономя средства, т.к. вам не надо приобретать высокоточный вакуумметр (например, емкостной,

который может быть дороже в 5-10 раз). Настроив и подобрав параметры для своей вакуумной технологической установки, вам необходимо, чтобы какой-то этап техпроцесса начинался тогда, когда именно данный вакуумметр показывает 20 торр. Вы не проводите эксперимент, и для вас не важно, что реальное давление составляет 23 или 24 торра. Для вас важно, чтобы как только в вакуумной камере возникли нужные вам условия и параметры, вакуумметр показал именно 20 торр (или наиболее близкое к 20 торрам значение). Возможно, купив через тройку лет новый аналогичный вакуумметр, вам придется заново настроить систему, т.к. нужные вам характеристики вашего конечного продукта будут, если новый вакуумметр будет показывать 17 торр. Теперь всегда, когда вакуумметр показывает 17 торр, начинается ваш техпроцесс.

Вам опять не важно, что реальное давление 23 торра – вам важно, чтобы при достижении в вакуумной камере требуемого для техпроцесса давления вакуумметра всегда показывал одну и ту же величину.

#### 5) Гистерезис вакуумметра

Посмотрим, какое значение будет показывать вакуумметр, если реальное давление в камере равно 10 торр, и мы измеряем в этой точке, проходя «вниз» и «вверх». При вакууммировании давление понижается, и мы видим, что давление на вакуумметре, который изначально показывал 750 торр, начинает падать. Проходя точку с реальным давлением в 10 торр, наш вакуумметр показал 10,5 торр. Откачав камеру, напускаем воздух. Теперь, проходя точку 10 торр, вакуумметр показал 9.5 торр. Разность между этими двумя давлениями ( $10,5 - 9,5 = 1$  торр) отнесенная к реальному давлению (10 торр) даёт нам гистерезис данного вакуумметра 10%.

#### 6) Разрешение вакуумметра

Рассмотрим два стрелочных вакуумметра с индикаторами разных диаметров, у обоих шкала 0-1000 мбар. У вакуумметра с меньшим индикатором шкала разбита на 20 делений, у вакуумметра с большим индикатором шкала разбита на 100 делений. У первого вакуумметра

разрешение равно 50 торр, у второго вакуумметра разрешение составляет 10 торр.

Рассмотрим два цифровых вакуумметра, измеряющих в диапазоне от 0 до 1000 торр (многие пользователи, работающих с низким вакуумом, в случае, если давление упало ниже 0,1 торр, считают, что весь воздух откачен и давление в камере равно нулю). Один вакуумметр показывает только целые числа, второй вакуумметр еще показывает одну цифру после запятой. Разрешение первого вакуумметра составляет 1 торр, разрешение второго вакуумметра в этом примере составляет 0,1 торр.

Чем лучше разрешение у вакуумметра, тем меньшее изменение давления вы сможете отслеживать.

#### 7) Стабильность показаний вакуумметра

Стабильность вакуумметра показывает, как сильно параметры вакуумметра (точность, воспроизводимость, и т.д.) изменяются со временем. Обычно не документированная производителями вакуумметров величина.

#### 8) Зависимость показаний вакуумметра от типа газа

Одна из главных характеристик вакуумметра. Вакуумметры делятся на газозависимые (показания вакуумметра зависят от типа газа) и газонезависимые (показания вакуумметра не зависят от типа газа). Например, все тепловые вакуумметры зависят от типа газа, так как теплопроводность у разных газов при одном и том же давлении разная, значит по разному будет охлаждаться нить нагрева вакуумметра. Для тепловых вакуумметров следует использовать поправочные коэффициенты, если вы работаете не с воздухом или с азотом (по которым обычно вакуумметры калибруются)

#### 9) Чувствительность вакуумного датчика

Чувствительность вакуумного ионизационного вакуумметра – это коэффициент, связывающий ионный ток ( $I_i$ , ток положительно заряженных ионов, образовавшихся в результате ионизации внутри вакуумного датчика), ток электронной эмиссии ( $I_e$ , ток электронов, которые создаются для ионизации атомов газа) и давление  $P$

$I_i = S \times I_e \times P$ , где  $S$  – чувствительность.

Чувствительность высоковакуумного ионизационного вакуумметра необходимо знать, если вы приобретаете высоковакуумный датчик в одном месте, а контроллер – в другом.

#### 10) Возможность измерения давления химически активных газов

Большинство вакуумметров не предназначены для работы с химически активными газами.

#### 11) Требования к материалам вакуумного датчика, контактирующих с вакуумом

Данное требование относится не только к тому, как будет работать вакуумметр с химически активными газами. Использование низковакуумных датчиков в сверхвысоковакуумных системах также может накладывать определенные ограничения на материал, который контактирует с вакуумом (например, ввиду большой дегазации полимеров).

#### 12) Температурная стабильность

Указывает влияние температуры на показания вакуумметров. В последних моделях вакуумметров многие производители вакуумных датчиков используют термостабилизированные сенсоры, чтобы уменьшить влияние температуры на показания вакуумного датчика.

13) Кажется, всё ясно – датчик должен работать от +5 до +40°C. Но не всё так однозначно. Если датчик установлен на высоковакуумной камере, которая прогревается до +80 °C, то вакуумный датчик будет также нагреваться до этих температур. Поэтому некоторые производители предлагают вакуумные датчики со съёмной электроникой, что позволяет прогревать несъёмную часть вакуумметра до 80 °C.

#### 14) Наличие аналогового выхода

Некоторые вакуумные датчики имеют выходной 0-10 В, некоторые – 4-



20 мА. Аналоговый сигнал вакуумного датчика может быть линейризован.

#### 15) Наличие цифрового выхода

Наличие цифрового сигнала у вакуумного датчика или вакуумметра облегчит его интеграцию в систему управления, позволит избежать влияния электромагнитных полей, появления наводок и помех, которые могут появиться в некоторых вакуумных приложениях при использовании аналогового выхода.

В данный момент можно найти вакуумметры с RS-232, RS-485, USB и другими цифровыми интерфейсами.

Некоторые производители поставляют программное обеспечение, позволяющее работать с вакуумным датчиком, у которого есть цифровой сигнал. Учитывая небольшую стоимость данного ПО, возможно получение значительной экономии денег, если для отображения значений вакуумметра использовать уже имеющийся ПК или ноутбук и данное ПО вместо контроллера (блока управления и отображения информации).

Так, широкодиапазонные вакуумметры VSM72 (комбинация вакуумного датчика Пирани и вакуумного датчика с холодным катодом) и VSH82 (комбинация вакуумного датчика Пирани и вакуумного датчика Байард-Альперта) компании Thyracont могут работать с ПО Vacuugraph этой же компании, которое позволяет отслеживать текущее давление, и в режиме реального времени выводит график изменения давления во времени.

#### 16) Наличие установок (контрольных точек, блокировочных точек)

Многие современные вакуумметры и вакуумные датчики имеют функцию установки (или программирования) контрольных точек. Что это такое? При достижении заранее выставленного на вакуумметре давления с аналогового или цифрового выхода вакуумметра поступает сигнал, который система управления вакуумной камеры может использовать для управления другими элементами вакуумной системы (послать сигнал на закрытие клапана или включение высоковакуумного насоса). Наличие у вакуумметра установочных точек облегчает создание системы управления вакуумной

системой.

17) Встроенная в корпус индикация показаний или работа с внешним контроллером (блоком управления). Некоторые вакуумметры могут иметь встроенный в корпус вакуумного датчика дисплей для отображения измеряемого вакуума. Наличие встроенного дисплея удешевляет стоимость вакуумметра (по сравнению, если приобретаются отдельно вакуумный датчик и контроллер), что является преимуществом, особенно при создании недорогой, например, системы низкого вакуума. Вакуумметр с дисплеем должен располагаться в удобном месте на вакуумной камере, позволяющим легко просматривать отображаемое значение вакуума.

18) Уровень максимально допустимого давления. Обращайте внимание на уровень максимально допустимого рабочего давления и максимально допустимого давления в системе, на которой установлен датчик (некоторые датчики допускают избыточное давление 2 атм, другие – 4 атм, что необходимо учитывать, особенно если в вашей системе используется сжатый газ).

19) Прочность конструкции и узлов вакуумного датчика

Так, высоковакуумный датчик может иметь стеклянный или металлический корпус. Корпус самого вакуумметра может быть пластиковым или из нержавеющей стали. Всё это в определённых приложениях может иметь значение.

20) Чувствительность к магнитным и электромагнитным полям

Все ионизационные вакуумные датчики чувствительны к сильным электромагнитным полям. В таком случае необходимо предпринять шаги по защите вакуумметра от сильного электромагнитного воздействия.

21) Тип присоединяемого фланца

Как правило, манометры имеют 3 основных типа соединения с измеряемым объемом:

- ConFlat - уплотнение через медную прокладку, фланцы крепятся болтами;

- NW - стандарт ISO, уплотнение с помощью центрирующего кольца с витоновым уплотнителем, фланцы крепятся накидными хомутами;
- через партрубок - может иметь внутреннюю или внешнюю резьбу, быть гладким или иметь на конце оливу для надежного закрепления вакуумного шланга.

## 22) Массо-габаритные требования к вакуумметру

Несмотря на меньшую стоимость отечественных вакуумметров, многие отечественные вакуумметры имеют много большие вес и размер по сравнению с импортными вакуумметрами.

## 23) Наличие сертификата о внесении вакуумметра в Реестр средств измерений РФ

Многие предприятия МинОбороны, РосКосмоса, РосАвиации, МинАтома и иных специализированных ведомств требуют наличия сертификата о внесении вакуумметра в Реестр средств измерений, в котором уполномоченным на то институтом даны характеристики вакуумметра, методика его поверки.

Учитывая, что получение такого сертификата – трудоёмкий, длительный и дорогостоящий процесс, его получение также говорит о факте длительного и тесного партнерства между поставщиком и производителем вакуумметров, что является дополнительной гарантией поддержки (в том числе сервисной) поставщиком приобретаемого вами вакуумметра.

## 23) Калибровка вакуумметра

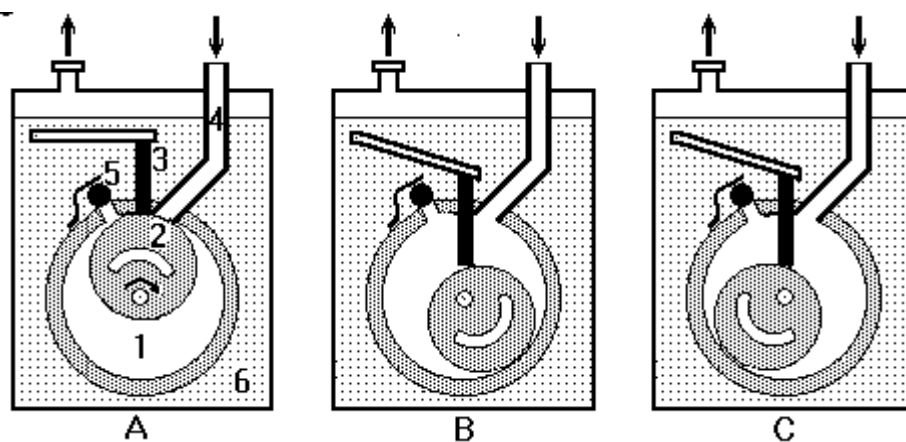
Калибровка вакуумметра осуществляется специализированными институтами, имеющими лицензию на её проведение. Однако при покупке вакуумметра за дополнительные деньги вы можете сразу заказать его калибровку.

## 5. Принципы построения вакуумных систем. Техника сверхвысокого вакуума.

### Вакуумные насосы

Вакуум может быть получен в достаточно герметичных установках (стеклянных или металлических) с помощью специальных насосов. Предварительное разряжение до  $10^{-3}$  мм рт. ст. обычно создается с помощью форвакуумных насосов (рис.8).

Рабочая полость насоса представляет собой цилиндрическую камеру 1, в которой вращается ротор 2, расположенный эксцентрично по отношению к оси своего вращения. В роторе имеются полости для смещения центра тяжести к оси вращения. Пластина 3 скользит вдоль прорези в стенке камеры и при этом плотно прижимается к внешней поверхности ротора пружиной. Газ всасывается через впускное отверстие 4 и выталкивается через клапан 5, состоящий из шарика, прижатого пружиной, в масло 6, которым залита коробка насоса.



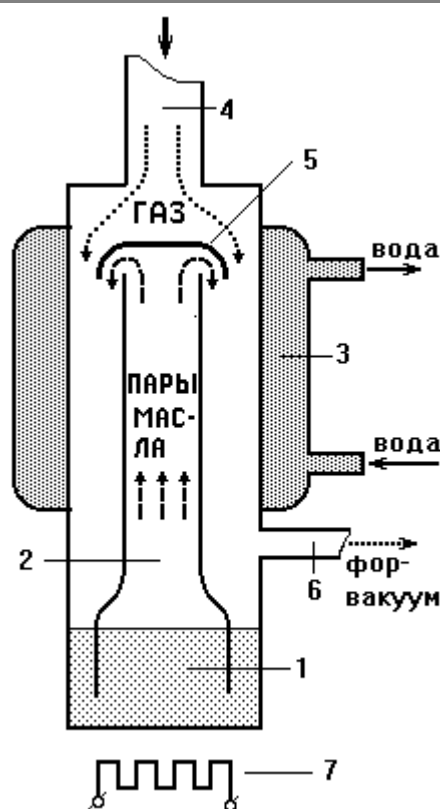
**Рис.8.** Принципиальная схема пластинчато-статорного механического насоса.

Процесс откачки происходит следующим образом. Положение А - ротор находится в исходном состоянии. Положение В - ротор подвинулся вниз, и в камере создается разряжение со стороны впускного отверстия. Через это отверстие газ поступает из откачиваемой системы. Одновременно происходит сжатие газа в сторону выпускного клапана. Положение С - происходит дальнейшее всасывание газа из вакуумной системы и выход сжатого газа через выпускной клапан. У лучших одноступенчатых насосов

полное остаточное давление зависит от состава и состояния масла и достигает  $(1-5) \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст.

Гораздо лучшие показатели имеют двухступенчатые насосы, у которых выход первой ступени соединен со входом для второй. Ротор вращается со скоростью несколько сот оборотов в минуту. Места соприкосновения внутренней поверхности цилиндрической камеры с ротором и пластиной должны быть хорошо смазаны. Для этого вся рабочая часть насоса помещается в коробку, в которую наливается масло. Насосы такого типа называются ротационными насосами или насосами Геде.

Для создания разряжения газа от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  мм рт. ст. в вакуумных установках последовательно с насосами, создающими предварительное разряжение, включаются пароструйные насосы. Наилучшими считаются диффузионно-конденсаторные паротртутные и паромасляные насосы (рис.9).



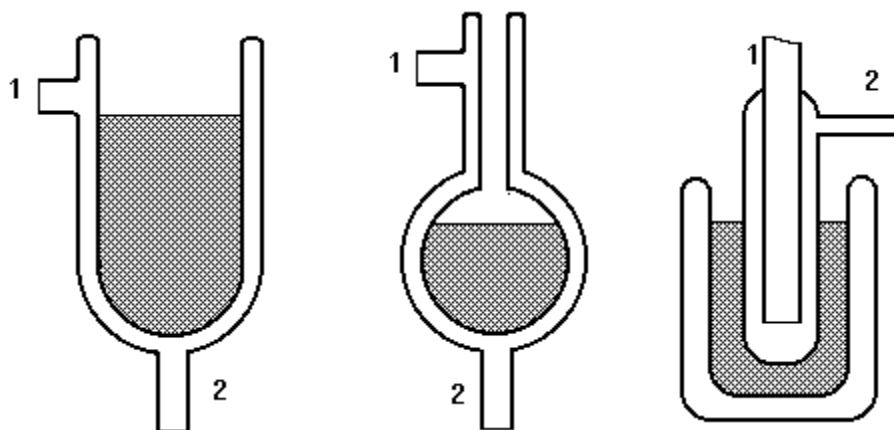
**Рис. 9.** Принципиальная схема диффузионного паромасляного насоса

Принцип действия диффузионного паромасляного насоса основан на использовании откачивающего действия струи пара рабочей жидкости. Струя

пара, образовавшегося в подогреваемом испарителе 1, проходит через паропровод 2 в сопло 5, после чего оказывается в объеме, соединенном с патрубком 6 предварительного вакуума. Молекулы газа из откачиваемой системы через впускное отверстие 4 адсорбируются парами рабочей жидкости и вместе со струей пара уносятся к основанию насоса. Здесь пары конденсируются вследствие охлаждения корпуса насоса водой, циркулирующей в водяной рубашке 3. В результате конденсации паров адсорбирующая поверхность резко уменьшается, что приводит к освобождению адсорбированных молекул газа, которые поступают в выходной патрубок 6.

Чтобы диффузионный насос мог действовать, требуется предварительный вакуум порядка  $10^{-2}$  мм рт. ст. При таком вакууме средний свободный пробег молекулы газа уже достаточно велик для того, чтобы происходила диффузия газа в струю пара и молекулы пара могли без столкновений достигать холодных стенок насоса и конденсироваться.

Для предотвращения попадания в откачиваемый объем паров рабочей жидкости за пароструйным насосом устанавливается специальная ловушка (ловушки различных конструкций представлены на рис.10.).



**Рис.10.** Различные конструкции лабораторных азотных ловушек.

Ловушка включается в вакуумную систему через вводы 1 и 2, в нее наливают жидкий азот, и пары рабочей жидкости пароструйного насоса вымораживаются на охлаждаемой поверхности. Вакуум от  $10^{-7}$  до  $10^{-11}$  мм рт. ст. может быть получен при использовании ионных насосов, а также

специальных поглотителей (геттеров).

### **Материалы вакуумной техники**

Любая вакуумная система выполняет две основные задачи:

- 1) получение требуемого конечного давления в откачиваемом объекте;
- 2) возможность получения требуемой эффективной быстроты откачки объекта.

Выполнение этих задач возможно лишь при условии, если есть достаточная герметичность материалов, нет выделения газов или паров внутри вакуумной системы и сопротивление трубопровода сведено к минимуму. С точки зрения удовлетворения этих условий и надо рассматривать материалы для вакуумных систем. Основными материалами, применяемыми для изготовления вакуумной аппаратуры, являются обычно стекло, металл и резина. Все чаще начинают применять вместо стекла пластмассы (полиэтиленовые, полихлорвиниловые и др.) и керамические материалы (фарфор, силикат магния).

#### **Стекло**

Стекло является нерастворимым в воде силикатом соли кремневой кислоты, в состав которой могут входить такие элементы, как Na, Ca, Br, Pb и др.

Стекло выгодно отличается от других материалов своими свойствами, из которых важнейшими являются:

- а) прозрачность в видимом диапазоне;
- б) хорошие электроизолирующие свойства;
- в) ничтожно малое давление насыщенного пара;
- г) легкость очистки поверхности и удаления адсорбированных газов;
- д) легкость придания формы в процессе изготовления.

Практически стекло считается газонепроницаемым, дает прочные и герметичные соединения: стекло - стекло и стекло - металл. Основные марки стекол, применяемых в вакуумной технике: С-90-1; С-89-2; С-84-4; С-49-5; С-48-8; С-39-17; кварцевое стекло.

## Металл

Хрупкость стекла заставляет в ряде случаев прибегать к металлическим соединениям и деталям, которые изготавливаются путем сварки стальных листов. Металлические отливки из-за своей пористости находят довольно ограниченное применение. Из стального проката наибольшее применение находит малоуглеродистая конструкционная сталь марки 20. Для изготовления вращающихся деталей, а также деталей, находящихся под нагрузкой, применяют сталь марки 45. Сталь Ст. 3 в основном применяется для изготовления рам, кронштейнов и других невакуумных деталей.

Из нержавеющей стали в вакуумных установках чаще всего применяется немагнитная сталь марки X18H9T и сталь марки 3X13 или 4X13. Для вакуумных трубопроводов обычно используют цельнотянутые и цельнокатаные трубы из углеродистой стали (ГОСТ 8732-58) или нержавеющей стали (ГОСТ 9941-62). Из цветных металлов широкое применение находят медь марки М-1, алюминий марки АД1, дюралюминий марок Д1 и Д6 и латуни марок Л62, Л68, ЛС59-1.

## Резина

Благодаря своей эластичности, прочности и газонепроницаемости резина получила весьма широкое применение в вакуумной технике. Натуральная и синтетическая резины имеют много общих свойств, из которых главнейшие:

а) несжимаемость - какой бы деформации ни подвергалась резина, она сохраняет свой объем. Это свойство резины делает ее одним из самых надежных уплотняющих материалов;

б) остаточная деформация - она тем больше, чем выше температура, при которой находилась резина во время деформации. Поэтому рабочая температура резины не должна превышать 90-125° С.

Основное применение резина находит в качестве прокладочных материалов во фланцевых соединениях и вакуумных вентилях, а также в виде толстостенных резиновых шлангов с внутренним диаметром 3, 6, 9, 12, 15 и 30 мм и толщиной стенок, равной внутреннему диаметру. Наибольшее



применение в вакуумной технике получила резина сорта 7889 и 9024. Если в процессе эксплуатации температура около мест установки прокладок может достигать 100-125° С, то вместо резиновых прокладок следует применять прокладки из фторопласта. В вакуумных уплотнениях применяются следующие материалы прокладок при различных температурных диапазонах:

Прокладочный материал / Температурный диапазон

Резина \_\_\_\_\_ от - 30 до +125° С

Фторопласт \_\_\_\_\_ от - 80 до +200° С

Свинец \_\_\_\_\_ от - 200 до +160° С

Алюминий \_\_\_\_\_ от - 200 до +320° С

Медь \_\_\_\_\_ от - 200 до +600° С

При проектировании и монтаже вакуумных установок следует обратить особое внимание на уплотнение разъемных соединений, на правильный подбор вакуумной арматуры.

Прокладочный материал

Прокладочный материал, используемый для создания герметичности разъемных соединений, должен обеспечить полное устранение течи при незначительном выделении газа из самой уплотняющей прокладки. К прокладочным материалам предъявляются следующие основные требования:

а) герметичность, характеризуемая количеством газов, попадающих в вакуумный объем в единицу времени за счет натекания путем диффузии через материал уплотнения и десорбции газов с поверхности уплотнителя, соприкасающейся с вакуумным объемом;

б) термическая стойкость, определяемая предельной температурой нагрева соединения без ухудшения его плотности ниже допустимой;

в) механическая прочность и химическая стойкость;

г) простота изготовления и монтажа.

Если вакуумная установка работает с инертными газами или воздухом при обычных температурах, то в качестве прокладочного материала применяется

листовая резина. Из листовой резины обычно делают прокладки наружным диаметром не более 300 мм. Прокладки диаметром более 300 мм делают из резины круглого сечения. В тех случаях, когда вакуумные установки работают с агрессивными или горячими газами, применяются прокладки из фторопласта.

Фторопластовые прокладки можно применять в любых агрессивных средах, при любых смазках, так как никакие органические растворители на прокладку из фторопласта не действуют. Прокладки из фторопласта имеют хорошие эксплуатационные свойства при температурах не выше + 150°С. При высоких температурах, порядка 400-500° С, применяются фланцевые соединения только с металлической прокладкой. Металлические прокладки представляют собой медные, свинцовые и алюминиевые кольца.

#### Вакуумные уплотнители

Вещества, применяемые в вакуумной технике для повышения герметичности различных соединений, деталей и приборов, называются вакуумными уплотнителями. Требования, предъявляемые к вакуумным уплотнителям:

- а) все уплотнители должны обладать возможно меньшим давлением насыщенных паров;
- б) уплотнители должны быть термостойкими;
- в) уплотнители должны обладать определенными механическими и физическими свойствами: твердые и пластические уплотнители, не твердеющие после остывания, и лаки, не твердеющие после высыхания, должны иметь гладкую поверхность, не должны быть хрупкими и не должны давать трещины. Жидкие и вязкие уплотнители должны по возможности дольше сохранять свою первоначальную вязкость;
- г) уплотнители должны обладать способностью растворяться в соответствующих растворителях.

Основные вакуумные уплотнители, применяемые в вакуумной технике: эмалевая краска, шеллачный лак, глип-талевый лак, пицеин, замазка

Менделеева, касторовое масло. При пользовании уплотнителями необходимо предохранять их от загрязнений. Общими растворителями для всех уплотнителей применяют бензин, бензол или трихлорэтилен.

### Вакуумная арматура

В вакуумных установках для разобщения отдельных участков системы, присоединения к установке измерительных приборов и для других целей применяется вакуумная арматура: краны, вентили, задвижки и различные запорные устройства. В лабораторных и небольших производственных вакуумных установках, как правило, применяются стеклянные и металлические краны с притертой пробкой. Такие краны смазываются специальной полужидкой смазкой, обычно смазкой Рамзая. При эксплуатации вакуумной установки краны следует вращать как можно реже, медленно и осторожно, чтобы сохранить смазку. Краны являются малонадежными деталями вакуумной установки, так как они часто дают течь вследствие появления рисок на поверхности шлифа. Поэтому приходится периодически разбирать их и производить притирку.

Существенным недостатком кранов является и то, что при поворотах смазка с пробки счищается краями отверстий; излишек смазки может изменять величину проходного сечения отверстия. В промышленных вакуумных установках часто применяются металлические вакуумные вентили и затворы.

Для трубопроводов с условным проходом до 100 мм наибольшее распространение получили вакуумные вентили с резиновым, сильфонным или мембранным уплотнением. Для трубопроводов с условным проходом свыше 100 мм наиболее целесообразно применение вакуумных затворов с резиновым или сильфонным уплотнением. Такие затворы применяются для проходных сечений диаметром до 1500 мм.

С помощью затворов не только увеличивается проходное сечение, но и значительно сокращается время открытия и закрытия соединительного

отверстия вследствие механизированного управления затвором. При высоком вакууме необходимо применять специальную вакуумную арматуру, которая обеспечивает большую герметичность и лучшую надежность в работе.

## **6.Литографические методы. Электронная, ионная литография**

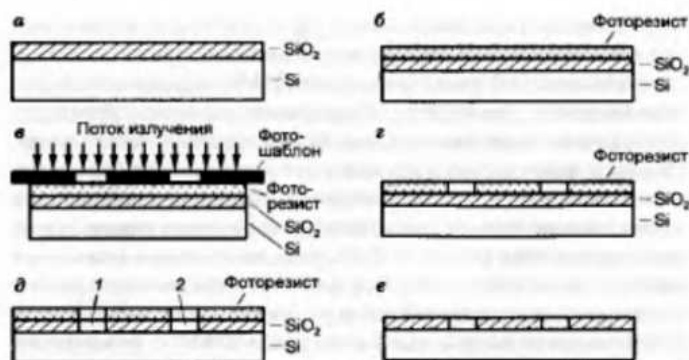
Методы формирования p-n переходов, металлических и диэлектрических слоев, описанные в предыдущих параграфах, не позволяют придавать элементам ИМС достаточно малые размеры в плане. Чтобы превратить эти слои в элементы ИМС, необходимо подвергнуть их микрогравировке. Различные методы микрогравировки слоев обобщенно называются литографией. Различают фотолитографию, рентгеновскую литографию, электронно лучевую литографию и т. д. Постоянное совершенствование методов литографии открыло возможность перехода микроэлектроники к нанoeлектронике, в рамках которой литография продолжает успешно развиваться.

Суть литографии можно уяснить на примере фотолитографии, простейшего вида литографии. Фотолитография представляет собой метод фотохимической микрогравировки металлических, диэлектрических и полупроводниковых слоев. Основные этапы фотолитографии на пластине кремния:

нанесение на пластину слоя диэлектрика, обычно диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . (рис. 11 а);

нанесение на слой диэлектрика фоточувствительного слоя — фоторезиста (рис. 11 б);

наложение (при контактной фотолитографии) на слой фоторезиста фотошаблона, который отображает соответствующую часть топологической схемы ИМС, например размеры, форму и взаимное расположение эмиттеров всех транзисторов, которые должны быть сформированы на данной пластине; в таком случае



**Рис. 11.** Основные этапы контактной фотолитографии

фотошаблон представляет собой непрозрачную пластину с прозрачными участками, дублирующими форму и местоположение будущих эмиттеров (рис. 11 в);

экспонирование фоторезиста (в простейшем варианте видимым или ультим»фиолетовым светом); экспонирование изменяет скорость последующего рн (творения фоторезиста в специальном травителе (на рис. 11в экспонирование отображено системой стрелок); кроме контактной существуют и другие методы литографии;

удаление фотошаблона;

проявление (травление) фоторезиста; участки, подвергнутые воздействию света, вытравливаются до слоя окисла (рис. 11 г);

вытравливание отверстий («окон») в слое диэлектрика через отверстия в фоторезисте (1 и 2 на рис. 11 д);

удаление фоторезиста (рис. 11 е).

Полученные окна в диэлектрике используются для формирования соответствующих элементов на пластине, например эмиттеров всех транзисторов. Если данный элемент формируется диффузией примесей, то вещество диэлектрического слоя выбирается так, чтобы скорость диффузии данной примеси в нем была значительно меньше, чем в кремнии. И таком случае легированными окажутся лишь участки кремния, не укрытые слоем диэлектрика. Диффузию большинства типичных доноров и акцепторов в кремниевой технологии хорошо блокирует диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Наименьший размер элемента ИМС определяется возможностями

литографии. Разрешающая способность литографии ограничивается как техническими, так и физическими факторами. Принципиальные физические ограничения связаны главным образом с явлением дифракции излучения на деталях фотолитографического рисунка при экспонировании. Дифракционное размытие изображения отверстия тем меньше, чем меньше длина волны используемого излучения. Оптическая литография обеспечивает получение элементов ИМС с размерами до  $0,5\text{ мкм}$ . Использование ультрафиолетовых лучей позволяет сместить этот предел до  $0,1\text{ мкм}$ . Рентгеновская литография сдвигает указанный предел в нанобласть.

Аналогичные возможности открывает электронно-лучевая литография и литография с использованием потоков ускоренных ионов. В электронно-лучевой и ионной литографии практически нет дифракционного предела, так как длина волны де Бройля для электронов и ионов, движущихся с достаточно большими скоростями в пучках частиц, падающих на образец, при литографии много меньше деталей шаблона. Напомним, что длина волны де Бройля (микрочастицы) уменьшается с увеличением скорости и массы используемых частиц.

## **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ**

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) — промышленная технология, имеющая высокую разрешающую способность. Основные области применения: 1) технология ИМС с размерами элементов менее  $100\text{ нм}$ ; 2) изготовление шаблонов для рентгенолитографии и фотолитографии в дальнем ультрафиолете.

Принципы и основные этапы электронной литографии и фотолитографии аналогичны, различие в том, что в ЭЛЛ вместо световых потоков для экспонирования используются пучки электронов, ускоренных электрическим полем.

Электронно-лучевая литография в настоящее время рассматривается как один из альтернативных методов нанолитографии, поэтому интенсивно ведутся разработки по усовершенствованию и увеличению разрешающей

способности ЭЛЛ.

Важнейшее достоинство метода — отсутствие дифракционных ограничений на разрешающую способность. Для экспонирования используются высоковольтные пучки (ускоряющее напряжение составляет 10-200 кВ) и низковольтные пучки (ускоряющее напряжение равняется 1 - 10 В). В первом случае процесс проводится на специальных установках или с помощью пучков сканирующих электронных микроскопов. Во втором случае используются пучки сканирующих туннельных микроскопов. Длина волны де Бройля электронов, движущихся со скоростью  $v$ , равна:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_{кин}}} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}, \text{ формула 1}$$

где  $U$  — ускоряющее напряжение,  $m$  — массе электронов.

При средних значениях ( $U = 50$  кВ и  $U = 5$  В находим  $\lambda = 0,6 \cdot 10^2$  нм и  $\lambda = 0,6$  нм соответственно, что много меньше реальных значений  $a_{min}$ . Поэтому дифракционные ограничения при использовании ЭЛЛ в нанoeлектронике не возникают, что следует из формулы (1). Благодаря малости  $\lambda$ , электроны могут быть сфокусированы в пучок диаметром – 1 нм.

Высоковольтные пучки, проникая в подложку, создают в поверхностном слое полупроводника высокую плотность радиационных дефектов. Это сказывается на качестве элементов ИМС. При понижении энергии электронов глубина проникновения в подложку уменьшается, плотность радиационных дефектов снижается. ЭЛЛ присуща большая глубина резкости передаваемого изображения, поэтому не происходит искажения рисунка при увеличении глубины рельефа или не плоскостности пластины.

На практике применяют два вида ЭЛЛ — сканирующую и проекционную.

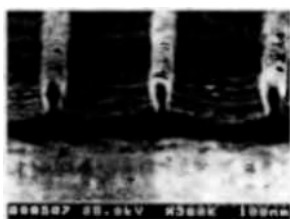
Сканирующая электронно-лучевая литография. В этом методе сфокусированный пучок электронов, управляемый компьютером, перемещается по поверхности подложки, покрытой резистом, вычерчивая заданный рисунок. Метод является серийным и применяется в тех случаях, когда оптическая литография не удовлетворяет требованиям по точности совмещения и



глубине фокуса. Достоинство метода — возможность наносить рисунок на резист без шаблона. Недостаток — длительность формирования рисунка, что ограничивает производительность метода. Скорость движения луча, в зависимости от тока в пучке и чувствительности резиста, может меняться в пределах 1 мкм/с- 1 мм/с. Скорость лимитируется тем, что облучение участка резиста должно проявляться на полную глубину слоя. Для этого доза облучения должна быть достаточно высокой. (Чувствительность резиста равна этой дозе, выраженной в Кл/см<sup>2</sup>.)

Разрешающая способность сканирующей ЭЛЛ. В настоящее время промышленные установки и сканирующие электронные микроскопы работают в интервале напряжений 100 - 200 кВ при диаметрах пучка 1-10 нм. С использованием чувствительных резистов получают  $a_{\min} = 30$  нм с высокой степенью воспроизводимости. Исследования показывают, что можно достичь разрешения менее 10 нм.

Роль электронрезистов. Так как дифракционный предел практически не играет роли, а сфокусированный электронный луч имеет диаметр -1 нм, то ограничения разрешающей способности ЭЛЛ обусловлены свойствами резиста. Во-первых, при экспонировании происходит рассеяние первичных и вторичных электронов во все стороны от направления первичного пучка, в резист проникают также электроны, отразившиеся от подложки. В результате область экспонирования расширяется. Во-вторых, при близком расстоянии между соседними линиями области рассеяния электронов перекрываются, и может произойти искажение рисунка или слияние соседних линий (эффект близости). Для улучшения разрешения необходимо наносить тонкие (< 50 нм) слои резиста или увеличивать ускоряющее напряжение.



**Рис. 12** Электронная и фотография квантовых проволок, полученных с помощью ЭЛЛ

Наиболее широко используется в качестве резиста полиметилметакрилат (ПММА). Чувствительность ПММА  $-10^4$  Кл/см<sup>2</sup>, разрешающая способность - 10 нм при минимальном расстоянии между линиями 30-50 нм. С целью повышения разрешающей способности электроннолучевой литографии разрабатываются новые резистивные материалы. Ниже приводятся примеры резистов ультра- высокого разрешения.

1. Диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>). Обеспечивает  $a_{\min} = 7-10$  нм, при минимальном расстоянии между линиями 10 -11 нм. Облучение вызывает увеличение скорости травления SiO<sub>2</sub> в травителях, содержащих HF. Недостаток резиста — малая чувствительность (2-4 Кл/см<sup>2</sup>), которая ограничивает его практическое применение.

Фтористо-литиевый резист (LiF), легированный молекулами AlF<sub>3</sub>. На облученных участках резист улетучивается. Для слоя резиста толщиной 40 нм получено разрешение 3-4 нм при таком же расстоянии между линиями. Для LiF необходима доза облучения в 30 раз больше, чем для ПММА-резиста.

Органические резисты, например,  $\alpha$  - метилстирол. Разрешающая способность  $\leq 10$  нм при толщине резистов 20-30 нм. Однако чувствительность на порядок ниже, чем у ПММА-резиста.

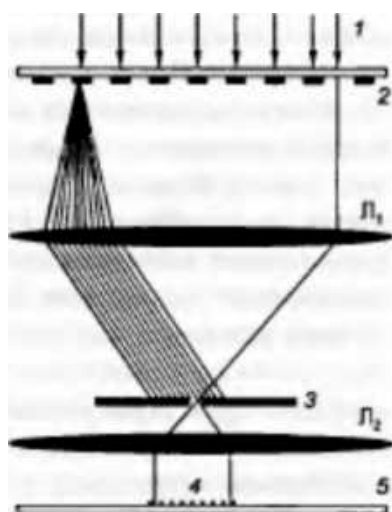
Пример применения ЭЛЛ для формирования наноструктур. Изготавливались квантовые проволоки In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As высокого качества при помощи пучков электронного микроскопа (200 кВ). Для таких высоких энергий электронов эффект близости значительно ослабляется, что позволяет получать низкоразмерные структуры с малым периодом.

На буферный слой InP толщиной 200 нм эпитаксиальным методом наращивался слой InGaAs толщиной 5 нм, в затем — слой InP толщиной 8 нм. Квантовая яма образована слоем узкозонного InGaAs между двумя широкозонными слоями InP. На верхний слой InP наносился слой резиста ПММА толщиной 100 нм и экспонировалась система параллельных полос шириной 15 нм с расстоянием между ними 60 нм. После проявления резиста сверху наносился слой золота толщиной 20 нм. Затем резист, оставшийся

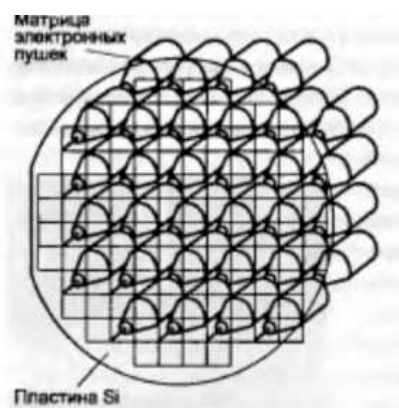
после проявления, покрытый золотом, удалялся, и на верхнем слое InP оставались полосы золота шириной 15 нм, служившие масками при последующем травлении. Травлением удалялся материал между масками с заходом в нижний слой InP. В результате из квантовой ямы вырезались квантовые проволоки шириной 16-18 нм. Слой InGaAs толщиной 5 нм расположен на 8 нм ниже верха структуры.

При ориентации проволоки направлении  $[011]$  стенки проволок были практически вертикальными. На рис. 12 приведена микрофотография рассматриваемой структуры, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Увеличение производительности сканирующей ЭЛЛ. Как уже отмечалось, промышленные установки с высоковольтными пучками обеспечивают разрешение 30 нм. Исследования показывают, что, в принципе, возможно достичь разрешения менее 10 нм. Однако производительность сканирующей ЭЛЛ низка, она ограничена скоростью сканеров, а последняя во многом зависит от чувствительности резиста. Один из способов увеличения производительности — использование матрицы параллельных электронных пучков для формирования рисунка на большой площади (рис. 13). Указанные пучки создаются системой электронных микропушек. Микропушки содержат источники электронов, фильтры, микролинзы.



**Рис. 13** Схема матрицы параллельных электронных пучков для прямого экспонирования



**Рис. 14** Схема проекционного нанесения рисунка на пластину системы SCALPEL

Использование матриц предъявляет жесткие требования к характеристикам каждого источника электронов по интенсивности и методам управления пучком. Уменьшение времени экспонирования сдерживается ограничениями величины тока на пучок, так как источники должны работать при низких энергиях.

Другой способ увеличения производительности — разработка высокочувствительных резистов.

Проекционная электронно-лучевая литография SCALPEL. Существенно более высокую производительность в нанoeлектронном диапазоне может дать проекционная электронно-лучевая литография, которую отличают высокое разрешение, большое поле изображения и значительная глубина фокуса. Применение этого метода сдерживало две причины: 1) разогрев масок в результате поглощения электронов падающего пучка непрозрачными участками; 2) отсутствие электронной оптики, которую не требовалось бы менять в связи с увеличением диаметра пластины и уменьшением минимальных размеров элемента.

В 1997-1999 гг. фирмой Bell Laboratories— Lucent Technologies разработана новая проекционная ЭЛЛ, не имеющая указанных недостатков; она названа «SCALPEL» (Scattering with Angular Limitation Projection Electron beam Litography - проекционная электронно-лучевая литография с ограничением по углу рассеяния). Разработки производились с расчетом на

промышленное применение. Программа SCALPEL — комплексная и включает разработку литографического оборудования, масок и резистов. Главное отличие метода SCALPEL — в конструкции масок и методике экспонирования. В соответствии с конструкцией масок литографический процесс проводится по принципу степпер-сканера. Предельная разрешающая способность метода — 35 нм. Она ограничена взаимодействием электронов в пучке, приводящим к его «размазыванию». По производительности SCALPEL-литография сравнима с фотолитографией, но имеет более высокую разрешающую способность.

ИОНОЛИТОГРАФИЯ. Принцип и основные этапы технологии такие же, как в других видах традиционной литографии. Экспонирование производится ионными пучками: широким пучком, сфокусированным пучком или через проекционную систему на основе промышленных установок ионной имплантации.

Фокусированные ионные пучки используются для рисования по резисту и могут применяться для непосредственной модификации подложки. В связи с тем, что ионный пучок создает дефекты в поверхностном слое, в несколько раз изменяется скорость растворения подложки в некоторых растворителях. Поэтому создается возможность отказаться от резиста, так как поверхностные слои материалов сами ведут себя как резисты.

Обычно при ионной литографии используют те же резисты, что и в электронографии; для экспонирования применяются легкие ионы  $H^+$ ,  $He^{++}$ . Длина пробега легких ионов с энергиями 50–100 кэВ примерно равна толщине резиста, используемой в технологических процессах. Ионы всю энергию передают резисту и не проникают в подложку, как электроны. Поэтому чувствительность резистов к ионному пучку на 1.5–2 порядка выше, чем к электронному, время экспонирования ионным пучком значительно меньше, и соответственно — выше производительность процесса литографии. Разрабатываются также специальные резисты.

В ионолитографии отсутствует дифракционное ограничение, так как из-за большой массы ионов длина волны де Бройля для ионов на 1,5 порядка меньше, чем для электронов при тех же ускоряющих напряжениях. Ионные пучки не испытывают обратного рассеяния, вторичные электроны в резисте имеют малую энергию, а следовательно, — малую длину свободного пробега. Пучок тяжелых по сравнению с электронами, ионов испытывает слабое угловое рассеяние. Благодаря этим факторам ионолитография обеспечивает разрешение до 10 нм.

Проекционные установки имеют высокую разрешающую способность и производительность. Однако из-за сложности создания источников ионов, систем развертки и фокусировки ионных пучков метод пока не получил распространения в серийном производстве.

## **7. Введение в физику поверхности. Адсорбция. Атомная структура чистых поверхностей**

Большинство исследований в физике поверхности начинается с приготовления чистой поверхности подложки. Поэтому знание об атомной структуре чистых поверхностей очень важно. Известно, что структура поверхности большинства кристаллов (особенно, что касается полупроводников) сильно модифицирована по отношению к структуре соответствующих атомных плоскостей в объеме кристалла. В этой главе сначала будут определены основные типы этих модификаций (релаксация и реконструкция), а затем они будут проиллюстрированы на реальных примерах. Эти примеры, конечно, не могут охватить все многообразие атомных структур, но они должны дать представление не о том, как может выглядеть чистая поверхность кристалла и какие физические явления могут отвечать за формирование конкретной структуры поверхности.

### **Релаксация и реконструкция**

Представим, что бесконечный кристалл расколот вдоль определенной кристаллографической плоскости, и рассмотрим атомную структуру поверхности полубесконечного образца, образовавшуюся в результате скола. Из-за того, что атомы с одной стороны отсутствуют, характер межатомных сил на поверхности должен измениться. В результате равновесная структура верхнего атомного слоя должна отличаться от соответствующей атомной плоскости в объеме. Это, в самом деле, и происходит в реальности, и поверхность имеющая атомное строение подобно плоскости в объеме, скорее исключение, чем правило. Выделяют два основных типа атомной перестройки поверхности:

релаксация;

реконструкции.

Релаксация. В свою очередь релаксация подразделяется на нормальную и латеральную (последнюю называют также параллельной или тангенциальной). *Нормальная релаксация* соответствует случаю, когда

атомная структура верхнего слоя та же, что и в объеме, но расстояние между верхним и вторым слоем отличается от расстояния между плоскостями в объеме, (рис. 15 а). В чистом виде нормальная релаксация наблюдается в металлах. В большинстве случаев имеет место уменьшение первого межслоевого расстояния. Для более глубоких слоев отклонение от объемного значения межслоевого расстояния затухает с глубиной (часто осцилляторно). В дополнение к нормальной релаксации иногда имеет место однородное смещение верхнего слоя параллельно поверхности. В этом случае говорят о *параллельной* или *тангенциальной релаксации* (рис. 15. б). Она наблюдается в основном на высокоиндексных плоскостях с низкой концентрацией атомов.

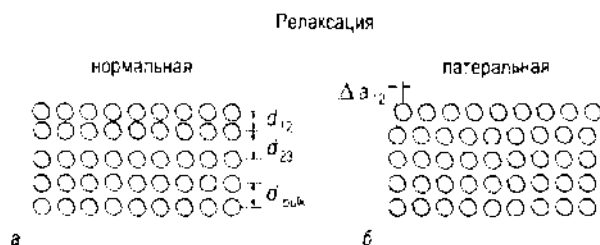


Рис. 15. Схематическая иллюстрация,

а - нормальной; б - латеральной релаксаций верхнего атомного слоя полубесконечного кристалла

Реконструкция. Многообразие случаев, когда атомная структура верхнего слоя модифицирована, характеризуется термином реконструкция. В большинстве случаев реконструированная поверхность имеет симметрию и периодичность, отличающиеся от таковых для плоскостей в объеме. Однако даже в том случае, когда решетка  $1 \times 1$  сохраняется, но атомное строение двумерной элементарной ячейки (то есть базиса) изменилось, тоже говорят о реконструкции.

В зависимости от того, сохранилось ли неизменным число атомов в верхнем слое (или слоях), любую реконструкцию можно отнести к одному из двух типов, а именно:

консервативной реконструкции;

неконсервативной реконструкции.

При *консервативной реконструкции* число атомов сохраняется и реконструкция заключается только в смещении поверхностных атомов из их идеальных положений. Поэтому консервативную реконструкцию в литературе *иногда* называют *сдвигающей (displacive)*. Простой пример консервативной реконструкции - это спаривание атомов верхнего слоя (образования димеров), которое приводит к удвоению периода (рис. 16 а). Более сложный пример консервативной многослойной реконструкции показан на рис. 16 в: хотя число атомов в каждом из трех верхних слоев отличается от числа атомов в объемных слоях их суммарное число соответствует целому количеству объемных слоев (в данном случае двум).

При *неконсервативной реконструкции* число атомов в реконструированном слое отличается от объема. Наглядный пример - это реконструкция с отсутствующими рядами (missing-row reconstruction) (рис. 16 б), в которой каждый второй атомный ряд удален, в результате чего в верхнем слое остается половина атомов. На рис 16, г представлен пример неконсервативной реконструкции, в которую вовлечены три верхних слоя. В этом примере суммарное число атомов не равно числу атомов в целом количестве объемных слоев.

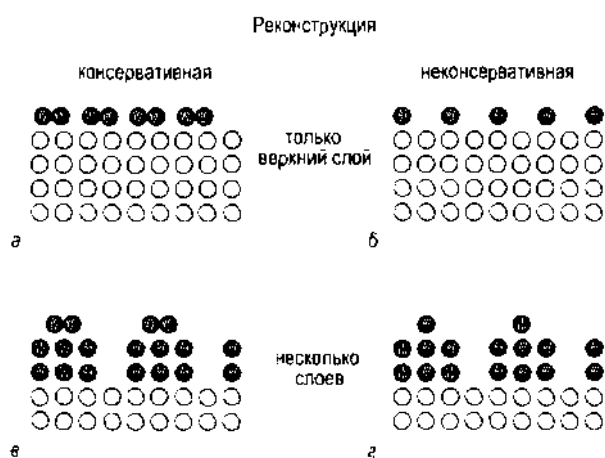


Рис. 16. Схематическая иллюстрация возможных типов реконструкций, а и в представляют консервативные реконструкции, то есть случаи, когда



концентрация поверхностных атомов сохраняется; б и г представляют неконсервативные реконструкции, то есть случаи, когда концентрация поверхностных атомов изменяется. На рис. а и б только атомы самого верхнего слоя участвуют в реконструкции; на рис. в и г в реконструкцию вовлечены атомы нескольких верхних слоев

В то время как реконструкция наблюдается для ограниченного числа металлических поверхностей, она является характерной чертой для большинства поверхностей полупроводников. В случае полупроводника объемоподобная свободная поверхность нестабильна из-за наличия большого количества, ненасыщенных (оборванных) связей. Для того чтобы уменьшить свободную энергию поверхности, атомы смещаются из своих первоначальных положений, чтобы образовав связи друг с другом, насытить оборванные связи. Дальнейшее уменьшение энергии поверхности происходит за счет переноса заряда между оставшимися ненасыщенными связями (в результате некоторые из них становятся незаполненными, а другие заполненными). Этот механизм называют *автокомпенсацией*. С другой стороны, смещение атомов приводит к возникновению механических напряжений в решетке, что увеличивает свободную энергию поверхности. Результат противодействия этих двух тенденций и определяет конкретную структуру реконструированной поверхности. Обычно реконструкция верхнего слоя сопровождается релаксацией более глубоких слоев.

### **Адсорбция и десорбция**

К явлению адсорбции десорбции относятся следующие, такие как адсорбат, подложка, физическая адсорбция, хемическая адсорбция, покрытие. Явления адсорбции и десорбции будут рассмотрены в рамках кинетического подхода, Этот подход заключается в установлении связи между скоростями адсорбции и десорбции атомов или молекул как функции внешних переменных, таких как давление пара, температура подложки и пара, структура поверхности подложки и так далее. Кинетика - это внешнее проявление динамических процессов атомного масштаба, происходящих на поверхности. Анализ

кинетических данных позволяет заглянуть внутрь атомных механизмов, задействованных в адсорбции и десорбции. В частности, энергетику адсорбции и десорбции (высоту энергетических барьеров и глубину потенциальных ям) обычно определяют именно из экспериментальных кинетических данных,

Кинетика адсорбции. Рассмотрим применение кинетического подхода для случая однородной поверхности в контакте с газом адсорбата. Согласно кинетической теории газов поток  $I$  молекул (атомов) газа, попадающий на поверхность, описывается выражением:

$I = \frac{p}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$  где  $p$  - парциальное давление газа адсорбата,  $m$  масса молекул (атомов) газа,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $T$  температура.

Однако не все попадающие на поверхность молекулы адсорбируются на ней и дают вклад в скорость адсорбции. Отношение потока адсорбции к падающему потоку определяется как коэффициент прилипания (sticking coefficient) или вероятность прилипания  $s$ . Таким образом, скорость адсорбции  $r_a$  равна

$$r_a = sI$$

Общее выражение для коэффициента прилипания в случае активационной адсорбции записывается как

$$S = \sigma F(\theta) \exp(-E_{act}/k_B T)$$

Он содержит следующие члены:  $\sigma$ , называемая коэффициентом конденсации, отвечает за ориентационные эффекты (стерический (пространственный) множитель (steric factor)) и за передачу энергии адсорбированных молекул.  $F(\theta)$  функция, зависящая от покрытия, которая описывает вероятность молекулы найти адсорбционное состояние. Тип реакции адсорбции (то есть с диссоциацией молекулы или без), статистика заполнения состояний и подвижность молекул и прекурсорном адсорбционном состоянии (если такое имеется) влияют на член  $F(\theta)$ /

Больцмановский член, зависящий от температуры,  $\exp(-E_{act}/k_B T)$

обусловлен энергетикой активационной адсорбции.

Модель адсорбции Лэнгмюра. В качестве отправной точки рассмотрим простейший случай, известный как модель адсорбции Лэнгмюра. Эта модель основывается на следующих предположениях.

- Адсорбция ограничена монослойным покрытием,
- Все адсорбционные места эквивалентны.
- Только одна молекула может занять адсорбционное место.

## **8. Физические основы плазменных процессов. Техника плазмы низкого давления.**

Тенденции развития мирового рынка электронной техники, а также экономические аспекты полупроводникового производства ведут к увеличению степени интеграции полупроводниковых приборов на поверхности подложек. Степень интеграции, в свою очередь, напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве пластин, так и с уменьшением геометрических размеров полупроводниковых приборов на их поверхности. Сегодня размеры используемых подложек возросли до 300 мм, а степень интеграции выросла до одного миллиарда полупроводниковых приборов на одной пластине и более. Размеры элементов, формируемых на пластине, уменьшились до 0,09 мкм в серийном производстве.

С повышением требований к выпускаемой продукции растут соответственно требования к технологическим процессам, применяемым в производстве. Для новых более совершенных технологических процессов требуется создание принципиально нового вакуумного технологического оборудования, использующего перспективные физические принципы обработки и обеспечивающего непрерывность вакуумного цикла формирования элементов микросхем в рабочих камерах (концепция так называемых кластерных систем обработки). Для решения проблемы формирования микроструктур с размерами элементов в субмикронной области наиболее перспективны ионно-плазменные процессы в непрерывном вакуумном цикле с нанесением. В настоящее время лидерство по-прежнему удерживают высокоэффективные системы обработки, использующие плазму, генерируемую в скрещенных электрическом и магнитном полях. В последние годы возрос интерес к системам и методам, реализующим ионно-плазменную обработку при использовании резонансных явлений в ВЧ- и СВЧ-плазме. Обеспечивая генерацию плазмы высокой плотности (более  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и высокие скорости обработки, в то же время эти системы создают низкий

уровень теплового и зарядового воздействия на обрабатываемые структуры, а также обеспечивают высокую чистоту процесса, поскольку работают при сравнительно низких давлениях и сводят к минимуму возможность паразитного распыления элементов внутрикамерного устройства.

В сухом плазменном травлении, плазма высокой плотности используется при низком давлении для высокоскоростного анизотропного травления кремния оксида кремния и поликремния.

В подобных устройствах используются три основных принципа создания плазмы: устройства на электронном циклотронном резонансе ЭЦР (ECR), геликонные источники плазмы, а также плазменные источники на индуктивном ВЧ-разряде (ICP). ЭЦР источники позволяют получить однородную плазму большого диаметра при низком давлении газа (до  $10^{-1}$  Па), они дороги вследствие необходимости создавать сильные (до 1 кГц (875 Гс на частоту 2,45 ГГц)) магнитные поля и применять мощные генераторы электрического поля СВЧ-диапазона.

Источники, использующие плазму, создаваемую распространяющимся в ней геликоном имеют гораздо более низкую стоимость при сравнимых рабочих давлениях и плотностях плазмы, однако необходимость создавать даже более слабое (50—100 Гс) магнитное поле ведет к удорожанию установки и трудностям с получением однородной плазмы при увеличении размера обрабатываемых подложек. Поэтому в современных технологических линиях все шире используются источники плазмы высокой плотности на основе ВЧ-разряда, формирующие так называемую «трансформаторно—связанную (или индуктивно-связанную) плазму» (принятая латинская аббревиатура TSP или ICP — Inductively Coupled Plasma). TSP-разряд позволяет травить материалы микроэлектроники высоким разрешением (менее 0,2 мкм) и осаждать слои из парогазовых смесей (плазменно стимулированный CVD-процесс), обеспечивая при этом высокую эффективность и качество проведения процесса [4].

Многие ведущие производители оборудования для плазмохимического

травления, такие, например, как Applied Materials Inc (Санта Клара, Калифорния), LSI Logic Corporation (Милпилас, Калифорния), LAM Research Corporation (Фремонт, Калифорния), в настоящее время активно занимаются разработкой реакторов такого типа. Особенностью ТСР-реакторов являются высокая концентрация плазмы (порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), низкий потенциал плазмы, характерный для индукционного разряда, возможность независимого регулирования плотности плазмы и энергии ионов с помощью подачи независимого смещения на подложку, высокая равномерность ионного тока на подложку большого диаметра.

В настоящее время внимание разработчиков технологического оборудования направлено на изучение высокочастотных источников плазмы высокой плотности, которые позволяют методом ионно-плазменного травления получать высокую однородность травления подложек с высокой селективностью.

Физические процессы и модели высокочастотного разряда низкого давления.

К высокочастотным обычно относят разряды, создаваемые внешним переменным полем с частотой, лежащей в диапазоне радиочастот (1— 100 МГц). При этом обычно верны следующие ограничения на частоту:

1. За период одного колебания внешнего поля распределения плотности и температуры электронов остаются квазистационарными, т. е. для частоты внешнего поля выполняются соотношения  $\omega \gg v_{en}(2m/M)$  и  $\omega \gg v_i$ , где  $v_{en}$  - частота транспортных столкновений электронов,  $v_i$  - частота ионизации,  $m/M$  - отношение масс электрона и иона (нейтрала).

Естественно также положить размеры описываемой системы ( $L$ ) много большими амплитуд колебания частиц под действием внешнего поля:  $\omega^2 \gg e|E|/mL$ ; где  $e$  - элементарный электрический заряд,  $|E|$  - амплитуда внешнего ВЧ-поля.

Высокочастотные разряды делятся на индуктивные, поддерживаемые замкнутым вихревым электрическим полем, не пересекающим границу

плазмы, и емкостные, электрическое поле которых пересекает границу плазмы, создавая на ней пространственные заряды. В последнем случае ВЧ-поле обычно выпрямляется на нелинейности в слое пространственного заряда, создавая вблизи границы постоянное поле, ускоряющее ионы. Поэтому цена одного электрона в емкостном разряде обычно больше, чем в индуктивном (т. е. при равном вкладе ВЧ-мощности в равный объем генерируемой плазмы ее концентрация в случае индукционного разряда будет выше, чем у емкостного).

Кроме того, большие электрические поля и высокие энергии ионов, необходимые для стационарного существования емкостного разряда, могут привести к пробое диэлектрика на подложке, с другой стороны иногда оказываются полезными, например, при ионном травлении подложек распылением в благородных газах.

Источники плазмы на ВЧ-разряде обладают следующими преимуществами по сравнению с источниками плазмы постоянного тока.

1. Отсутствие дрейфа частиц в постоянном поле уменьшает потери частиц, поэтому ВЧ-разряд удастся зажечь при более низком давлении, чем на постоянном токе.

2. ВЧ-разряду не нужны электроды (катод и анод), поэтому не страшно распыление их материала. Кроме того, отсутствие металлических (а тем более накаливаемых) электродов позволяет работать длительное время с химически активными газами.

3. Возможно регулирование энергии ионов, бомбардирующих обрабатываемые подложки изменением ВЧ-потенциала на подложкодержателе, причем такая регулировка возможна даже для диэлектрических подложек.

Для оценки параметров и расчета ВЧ-источников плазмы, так же как и других газоразрядных устройств (например, источников света) используется балансовый метод.

Этот метод включает в себя рассмотрение:

1. Баланса частиц в плазме.

2. Баланса энергии в плазме

3. Условий передачи энергии от ВЧ-поля электронам плазмы.

Условий возбуждения ВЧ-поля в разряде и передачи энергии ВЧ-генератора, возбуждаемому в плазме ВЧ-полю.

Функция распределения электронов по энергиям в разряде очень часто отличается от максвелловской, поэтому температуру электронов определяют соотношением  $3kT_e/2 = \langle e \rangle$ , где  $\langle e \rangle$  - средняя энергия электронов. Кроме того, обычно при рассмотрении баланса предполагается, что температура электронов постоянна по всему объему реактора, что существенно упрощает задачу. Это условие выполняется, если давление рабочего газа достаточно мало (размер рабочей камеры  $L$  больше длины обмена энергией  $\lambda_{en}(M/2m)^{1/2}$ ). Здесь  $\lambda_{en}$  - длина свободного пробега электронов. Если плотность электронов достаточно велика (выполнено условие  $\nu_{ee} > \nu_{en}(2m/M)^{1/2}$ , где  $\nu_{ee}$  — частота межэлектронных столкновений), то функцию распределения электронов по энергиям можно считать максвелловской.



## 9. Физико-химические основы тонких пленок. Рост тонких пленок.

Когда покрытие адсорбата превышает монослойный диапазон, то говорят о росте тонких пленок. Ориентированный рост кристаллической пленки на монокристаллической подложке называется эпитаксией, которая, в свою очередь, подразделяется на гомоэпитаксию (когда материал пленки и подложки один и тот же) и гетероэпитаксию (когда материалы пленки и подложки различны). Рост пленки управляется конкуренцией термодинамики и кинетики. Общие тенденции в росте пленки можно понять в рамках термодинамического подхода в терминах относительных энергий поверхности и границы раздела. С другой стороны, рост пленок - это неравновесный кинетический процесс, в котором лимитирующие стадии определяют механизм роста. В этой главе обсуждаются поверхностные процессы, участвующие в росте пленок, и их влияние на механизм роста, структуру и морфологию пленок.

### Механизмы роста

Обычно выделяют три основных механизма роста пленок (рис. 17).

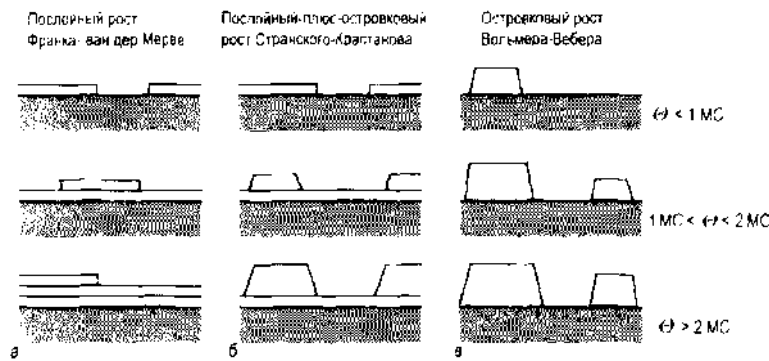
Эти механизмы названы по именам их авторов и перечислены ниже.

1. *Послойный рост по механизму Франка - ван дер Мерве (Frank- van der Merve)*, (рис. 17. а) относится к случаю, когда атомы пленки сильнее связаны с подложкой, чем друг с другом. В результате, пока не завершено формирование одного слоя, не начинается рост следующего, то есть имеет место строго двумерный рост.

2. *Островковый рост по механизму Вольмера -Вебера (Vollmer - Weber)* (рис. 17. в) соответствует ситуации, когда атомы пленки сильнее (связаны между собой, чем с подложкой. В этом случае трехмерные островки зарождаются и растут прямо на поверхности подложки.

3. *Послойный плюс островковый рост по механизму Странского-Крастанова (Stranski-Krastanov)* (рис. 17. б) представляет промежуточный случай между послойным и островковым ростом. После завершения формирования двумерного слоя идет рост трехмерных островков. Природа и толщина промежуточного слоя (часто называемого слоем Странского Крастанова) зависит от конкретного случая (например, этот слой может быть субмонослойной поверхностной фазой или напряженной пленкой толщиной в

несколько монослоев).



**Рис. 17.** Схематическое представление трех основных механизмов роста пленок.

*а* - послойный рост Франка-ван дер Мерве; *б* - послойный-плюс-островковый рост Странского-Крастанова; *в* - островковый рост Вольмера-Вебера

Существование различных механизмов роста можно качественно понять в терминах натяжения поверхности и границы раздела  $\chi$ . Напомним, что поверхностное натяжение определяется как работа по созданию поверхности (или границы раздела) единичной площади. Имея в виду, что может быть также проинтерпретирована как сила, действующая на единицу длины границы, рассмотрим точку контакта между островком пленки и подложкой (рис. 18). Если угол смачивания равен  $\phi$  то равновесие сил можно записать в виде:

$$\gamma_S = \gamma_{S/F} + \gamma_S \cos \phi \quad (4)$$

Где  $\gamma_S$  - поверхностное натяжение поверхности подложки,  $\gamma_F$  - поверхностное натяжение поверхности пленки, а  $\gamma_{S/F}$  - поверхностное натяжение границы раздела «пленка\подложка».

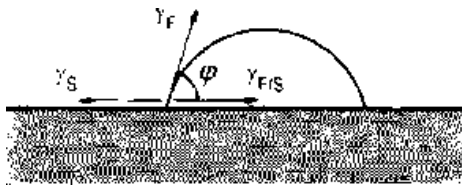
В случае послойного роста  $\phi=0$  следовательно из выражение (4) можно получить следующие условие:

$$\gamma_S \geq \gamma_{S/F} + \gamma_F \quad (\text{послойный рост})$$

Для островкового роста  $\phi > 0$  и, следовательно, соответствующее условие имеет вид:

$$\gamma_S < \gamma_{S/F} + \gamma_F \quad (\text{островковый рост}) \quad (5)$$

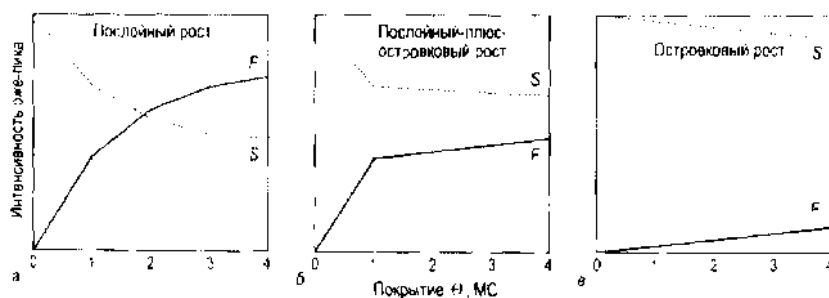
Для послойно-плюс-островкового роста сначала выполняется условие (4) для послойного роста, но формирование промежуточного слоя изменяет величины  $\gamma_S$  и  $\gamma_{S/F}$ , в результате чего выполняется условие (5) для последующего островкового роста.



**Рис. 18.** Схематическое изображение островка пленки на поверхности подложки.  $\gamma_S$  - поверхностное натяжение поверхности подложки,  $\gamma_F$  - поверхностное натяжение поверхности пленки, а  $\gamma_{S/F}$  поверхностное натяжение границы раздела «пленка/подложка», Баланс сил, действующих вдоль поверхности подложки, дает выражение (4).

Механизм роста можно определить экспериментально, контролируя изменения оже-сигнала от пленки и подложки в ходе роста пленки. Типичные зависимости представлены на рис. 19.

Послойный рост проявляется в виде кривых, состоящих из линейных сегментов, как показано на рис. 19 а. Островковый рост



**Рис. 19** Схематические графики зависимости амплитуд оже-пиков от пленки (F) и подложки (S) от количества осажденного материала - для трех основных механизмов роста.

а - послойного роста; б - послойно-плюс-островкового роста; в - островкового роста. Приводит к очень медленному росту и затуханию сигналов от пленки и подложки соответственно (рис. 19. в). Рост по механизму Странского Кр астапова (рис. 19. б) характеризуется начальным линейным участком, соответствующим (формированию промежуточного слоя, до точки перегиба, после которой оже-амплитуды меняются очень медленно, что соответствует островковому росту поверх двумерного слоя Странского-Крастанова.

Зарождение и рост островков. Поверхностная концентрация островков.

Основные элементарные процессы, происходящие при формировании и росте островков,

проиллюстрированы на рис. 20. Атомы поступают из газовой фазы со скоростью  $R$  и остаются на поверхности в виде адатомов с энергией связи  $E_{ads}$ . Это создает плотность одиночных адатомов  $n_1$  на поверхности подложки с количеством посадочных мест  $n_0$  на единицу площади. Адатомы мигрируют по поверхности с коэффициентом диффузии  $D = (v/4 n_0) \exp(-E_{diff}/k_B T)$  до тех пор, пока не исчезнут в результате одного из следующих процессов. Во-первых, если температура подложки достаточно высока, то адатомы могут испариться назад в газовую фазу. Этот процесс характеризуется временем жизни адатома  $t_{ads} = v^{-1} \exp(E_{ads}/k_B T)$ . Во-вторых, адатомы могут присоединиться к существующим островкам или дефектам, таким как ступени. В-третьих, адатомы могут соединиться вместе и образовать островок (кластер). Маленькие островки, как правило, нестабильны и часто распадаются назад на отдельные атомы. Однако, по мере роста, островки становятся все более стабильными, и вероятность их роста превышает вероятность их распада. Размер критического островка  $i$  определяется как минимальный размер островка, присоединение к которому лишь одного атома делает островок стабильным.



Рис. 20. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая атомные процессы, задействованные в зарождении и росте островков на поверхности

## **10. Техника магнетронного распыления тонких пленок. Газофазное осаждение тонких пленок.**

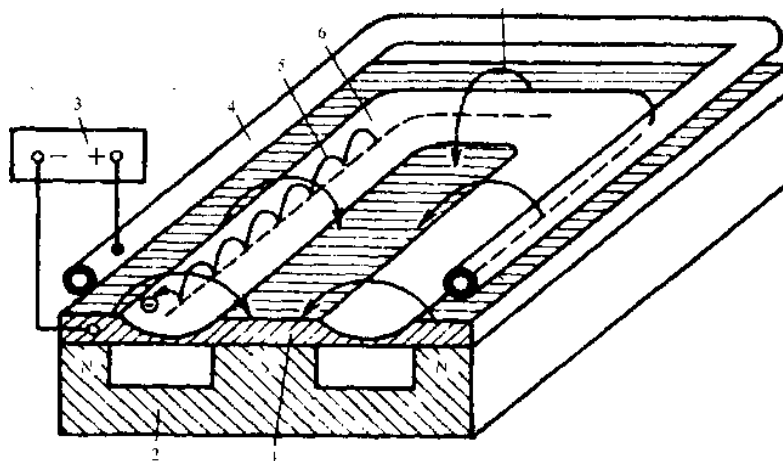
С появлением и развитием магнетронных источников магнетронное распыление прочно вошло в практику получения металлизации современных гибридных интегральных схем. Магнетронное распыление применяется в большом числе различных напылительных установок, как вновь разрабатываемых, так и модернизируемых вакуумных установках предыдущих годов выпуска. Подробнее о магнетронном распылении и магнетронных установках будет рассказано дальше.

### **Принцип действия магнетронного источника распыления**

Магнетронными называются системы, в которых используются неоднородные скрещенные электрическое и магнитное поля. Магнетронные распылительные системы получили свое название от СВЧ-приборов магнетронного типа, хотя, кроме наличия скрещенных электрического и магнитного полей, ничего общего с ними не имеют. Электрические параметры разряда в магнетронной системе в значительной степени зависят от рабочего давления, величины и конфигурации магнитного поля, конструктивных особенностей распылительной системы [1]. Магнетронные системы относятся к системам ионного распыления, в которых распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующихся в плазме аномального тлеющего разряда. Высокая скорость распыления, характерная для этих систем, достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

Принцип действия магнетронной распылительной системы показан на рис. 21. Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно

распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени.



**Рис. 21.** Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью: 1 — катод-мишень; 2 — магнитная система; 3 - источник питания; 4 - анод; 5 — траектория движения электрона; 6 — зона распыления; 7 — силовая линия магнитного поля

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны совершают движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны — отрицательно заряженной поверхностью мишени, отталкивающей их. Электроны совершают циклическое движение в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию и диффундирует на границу плазмы по направлению к аноду. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение атомов рабочего газа (чаще всего — аргона), что

значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, а, следовательно, и скорости осаждения пленки. Средние скорости осаждения различных материалов с помощью магнетронной распылительной системы, имеющей плоскую дисковую мишень диаметром 150 мм при мощности источника 4 кВт и расположении подложки на расстоянии 60 мм от поверхности мишени, составляют от 10 до 70 нм/с.

Следует отметить, что плазма разряда существует, в основном, в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени, и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля. Создание магнитной ловушки у распыляемой поверхности мишени представляет собой простое, но весьма эффективное решение проблемы увеличения скорости распыления в плазменных распылительных системах. Но помимо этого достоинства магнетронная распылительная система обладает рядом специфических свойств, основным из которых является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетическими вторичными электронами.

Известно, что при распылении материалов в плазме тлеющего разряда высокоэнергетические вторичные электроны с мишени являются основным источником нагрева подложек. В магнетронной распылительной системе вторичные электроны захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку, что обеспечивает ее сравнительно низкую температуру. Источниками нагрева подложки в этой системе служат кинетическая энергия и энергия конденсации осаждаемых атомов, энергия отраженных от мишени нейтрализованных ионов и энергия ионов вторичной плазмы, а также излучение плазмы.

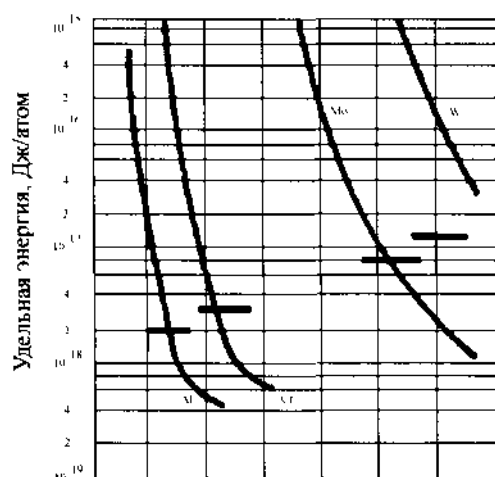
Энергия конденсации составляет 3-9 эВ/атом, кинетическая энергия в зависимости от распыляемого материала от 5 (для алюминия) до 20 эВ/атом (для вольфрама), а излучение плазмы 2-10 эВ/атом. Энергия вторичных

ионов в зависимости от конструкции магнетрона и подложкодержателя может составлять 30-50 эВ/ион. Плотность ионного тока на подложку зависит только от концентрации вторичной плазмы в области подложки, а она, в свою очередь, зависит от мощности магнетронного разряда и конфигурации и напряжённости магнитного поля магнетрона. Магнетроны условно подразделяются на «сбалансированные» и «разбалансированные» с разной степенью разбалансированности. Эту степень разбалансированности можно характеризовать отношением плотности тока вторичных ионов на подложку к плотности потока падающих на нее распыленных атомов.

От степени разбалансированности магнетрона зависит и крутизна вольтамперной характеристики разряда, и термическая нагрузка на подложки, и во многих случаях, качество и структура напыляемых пленок.

Сравнение этих результатов с данными, полученными для метода термического испарения в вакууме, показывает (рис. 22), что при сравнительно низких скоростях испарения последний характеризуется более высокой тепловой энергией на подложку. Это объясняется тем, что в данном случае основным источником нагрева подложки является радиационное излучение с поверхности расплавленного материала. Однако при высоких скоростях испарения начинает преобладать нагрев за счет энергии конденсации. Во многих случаях нагрев подложки в магнетронных системах сравним, а при испарении тугоплавких материалов даже ниже, чем при методе термического испарения. Это дает возможность использовать магнетронные системы для нанесения пленок на подложки из материала с низкой термостойкостью (пластики, полимеры, оргстекло и бумагу).





**Рис. 22.** Удельная тепловая энергия, рассеиваемая на подложке при электронно-лучевом испарении (диаметр тигля 5 см) различных металлов. Горизонтальными линиями показаны средние значения энергии при распылении тех же материалов в магнетронной системе.

Основные рабочие параметры магнетронных распылительных систем — напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От величины и стабильности перечисленных параметров, которые взаимно связаны между собой, зависят стабильность разряда и воспроизводимость процесса нанесения пленок.

Магнетронные системы относятся к низковольтным системам распыления. Напряжение питания постоянного тока не превышает 700—800 В. Однако, для удобства поджига разряда, особенно при низких давлениях, применяется «поджигающее» напряжение, которое составляет обычно от 1200 до 1350 В. Источник «поджигающего» напряжения имеет круто падающую вольтамперную характеристику и при токе магнетрона более 100—200 мА напряжение на разряде становится «рабочим».

Рабочее напряжение обычно составляет 300—700 В, причем на мишень подается отрицательный потенциал, а анод обычно имеет нулевой потенциал. Однако в магнетронных системах с плоским катодом для более полного улавливания вторичных электронов рекомендуется на анод подавать небольшое положительное смещение (40—50 В). В некоторых системах

предусматривается подача отрицательного напряжения смещения на подложку (до 100 В) для реализации осаждения со смещением.

Ток разряда зависит от многих факторов, например, от рабочего напряжения, давления и рабочего газа, индукции магнитного поля, конфигурации магнетронной системы, распыляемого материала, и определяется мощностью источника питания. Плотность тока на мишени очень велика и для систем с плоским катодом может достигать — 200 мА/см<sup>2</sup>, причем максимальные плотности тока в центральной части зоны распыления могут быть значительно выше. Значения удельной мощности выделяемой на поверхности мишени за счет ионной бомбардировки в магнетронных системах с плоским катодом — 100 Вт/см<sup>2</sup> и выше. Предельно допустимая мощность определяется условиями охлаждения мишени и теплопроводностью распыляемого материала.

Магнетронная распылительная система может работать в диапазоне давлений от 10<sup>-2</sup> до 1 Па и выше. Важнейшими параметрами, во многом определяющими характер разряда в ней, являются геометрия и величина магнитного поля, индукция которого у поверхности мишен 0,03-0,1 Т.

## **11. Жидкостное и «сухое» травление. Типы сухого травления**

Существует два основных типа травления материалов для получения микро и наноструктур: жидкостное травления (травления в жидких реагентах), сухое травление (травления в газовой среде или плазме).

Жидкостное травление имеет ряд недостатков. Прежде всего в таком процессе приходится иметь дело с разнообразными вредными химически активными веществами. Производственная линия жидкостного травления должна снабжаться как минимум плавиковой и фосфорной кислотами, едким калием, азотной, уксусной ( для травления алюминия) кислотами.

Анизотропное травление с использованием масок на поверхностях плоскостей (100) и (110) кремния. Для жидкостного травления полупроводников разработано множество составов травителей различного назначения, зависящих от свойств полупроводника и условий применения.

В основе жидкостного травления лежит химическая реакция жидкого травителя и твердого тела, в результате которой образуется растворимое соединение. Подбором химического состава, концентрации и температуры травителя обеспечивают заданную скорость травления (порядка 0,1 мкм / мин) и толщину удаляемого слоя. Локальное травление осуществляют через маску.

Сухое травление обеспечивает более высокую разрешающую способность нежели жидкостное травление, более безопасно и допускает автоматизацию. Кроме того, оно не зависит от толщины фоторезиста в той степени, как это имеет место при жидкостном травлении, что особенно важно, когда травление должно проводиться поэтапно из-за отсутствия какого-либо другого адекватного способа установления момента окончания процесса травления.

Плазменное травление позволяет изготовить профиль в любом материале с точностью и качеством поверхности, недостижимыми для обычного жидкостного травления. Это обусловлено возможностями анизотропного режима материала, высокой управляемостью и стабильностью

технологических процессов.

С повышением степени интеграции ПС, требующим сокращения линейных размеров их элементов при обеспечении воспроизводимости результатов методы жидкостного травления оказываются непригодными. На смену им приходят методы сухого травления, использующие принципы физического (механического) удаления материала пленки (травление путем распыления при бомбардировке материала ионами инертного газа) или реактивного газового (плазменного, реактивного ионного) травления либо сочетание этих двух принципов - реактивное ионно-лучевое травление.

Подобно пленкам БФСС скорости травления пленок БСС и ФСС зависят от уровня легирования и условий осаждения. Они могут быть оптимизированы для одновременного получения высокой селективности жидкостного травления к термическому окислу и высокой селективности плазменного травления к монокремнию.

Травление других типов поверхностей отличается более или менее выраженной селективностью. В ряде случаев для поверхностей 1120 и 0112 хорошие результаты дает жидкостное травление в смеси  $\text{H}_3\text{PO}_4$  -  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при температуре 250 - 300 С с последующим освежением поверхности в реакторе по методике, изложенной ранее.

Сухое травление обеспечивает более высокую разрешающую способность нежели жидкостное травление, более безопасно и допускает автоматизацию. Кроме того, оно не зависит от толщины фоторезиста в той степени, как это имеет место при жидкостном травлении, что особенно важно, когда травление должно проводиться поэтапно из-за отсутствия какого-либо другого адекватного способа установления момента окончания процесса травления.

Если материал пленки плохо поддается травлению (например,  $\text{Al}$ ), то применяют так называемую обратную, или взрывную, фотолитографию. На пластине / (рис. 2.20, а) сначала формируется фоторезистивная маска, а затем наносится пленка 2 и производится жидкостное травление.

Материалы для удаления фоторезистов. Посредством травления удаляют слои диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), металлов и поликремния, а также резисты в соответствии с желаемыми рисунками, сформированными резистом. Существует два основных вида травления: жидкостное и сухое. Чаще применяется жидкостное травление. В основе его лежит использование растворов, содержащих травители (обычно это кислотные смеси) нужной концентрации, которые вступают в химическую реакцию с материалами, подлежащими удалению. Сухое травление включает применение реактивных газов в вакуумной камере с высоким напряжением, что также позволяет удалять слои, не защищенные резистом.

Жидкостное травление имеет ряд недостатков. Прежде всего в таком процессе приходится иметь дело с разнообразными вредными химически активными веществами. Производственная линия жидкостного травления должна снабжаться как минимум плавиковой и фосфорной кислотами, едким калием, азотной, уксусной (для травления алюминия) кислотами.

Важнейшим достоинством сухого травления является его анизотропия: травление идет преимущественно в вертикальном направлении в котором движутся частицы. Размер вытравленной области весьма точно соответствует размеру отверстия в маске. Процесс позволяет получать отверстия в слое  $\text{SiO}_2$  меньших размеров, чем при жидкостном травлении. Количественно анизотропия оценивается отношением скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Если вертикально смонтированные подающие воздух колпаки используются вместе с разбрызгивающими приспособлениями и вытяжной вентиляцией, могут создаваться области воздушной турбулентности внутри установки жидкостного химического травления. В результате может снижаться эффективность локальной вытяжной вентиляции, удаляющей летучие посторонние вещества, поступающие в воздух от ванн для травления. Главная опасность при жидкостном травлении состоит в возможности попадания концентрированных кислот на кожу.

Различные смеси растворов химических кислот используются в пластмассовых ваннах систем травления с локальной вытяжкой; некоторые из них снабжены вертикальными системами подачи со слоистыми фильтрами НЕРА. Так же как при обработке кремниевых пластин, перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) применяется с серной кислотой, а гидроокись аммиака ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) обеспечивает каустическое травление. Цианидный раствор (натрия или калия) также используется для травления алюминия. Однако цианидное травление медленно вытесняется по мере создания других травителей для этого процесса.

## 12. Физико-химические основы плазмохимического травления.

### Техника плазмохимического травления.

Рассмотрим теперь некоторые практические конструкции плазменных технологических высокочастотных реакторов. Емкостной реактор рис. 23.

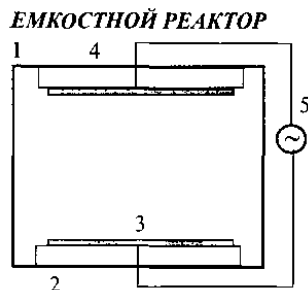


Рис. 23. Диодный емкостной плазменный реактор

Емкостной реактор содержит помещенные в вакуумную камеру 1: активный электрод 2, с расположенной на нем обрабатываемой подложкой 3, подключенный к ВЧ-генератору 5 и заземленный электрод 4. Электрическое поле создается между пластинами, к которым приложено ВЧ-напряжение, и может быть рассчитано как поле в конденсаторе с неоднородным заполнением (включая плазму и слои пространственного заряда), т. е. основной модели является уравнение непрерывности полного тока. Некоторым оправданием такой модели служит утверждение, что характерный размер разряда много меньше длин волн, распространяющихся в плазме, однако оно нуждается в дополнительных подтверждениях.

Вариант триодного емкостного реактора представлен на рис. 24. По сравнению с диодным реактором он содержит дополнительную сетку 6, расположенную

### **ИНДУКТИВНЫЙ РЕАКТОР**

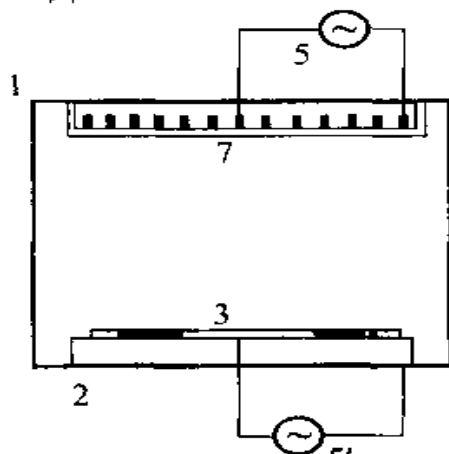


Рис. 24. Индуктивный плазменный реактор

### **ТРИОДНЫЙ РЕАКТОР**

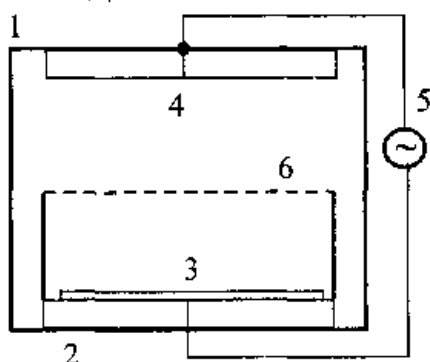


Рис. 25. Триодный емкостной плазменный реактор

между электродами и находящуюся под плавающим потенциалом. При этом в пространстве между сеткой и активным электродом реализуется эффект «полого катода». Плотность заряженных частиц вблизи подложки в триодном реакторе увеличивается в 3—4 раза, а автосмещение на электроде уменьшается в 4-5 раз.

Источники на индуктивно связанной плазме. Пример такого разряда приведен на рис. 26. Электрическое поле обычно возбуждается как поле индукции, возбуждаемое антенной в виде плоской или цилиндрической катушки индуктивности (рис. 26). К антенне подводится ВЧ-мощность от генератора 5. Подложка 3 обычно размещается на подложкодержателе 2, представляющем собой плоский электрод. Для независимого управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, к подложкодержателю



подводится ВЧ-напряжение от дополнительного ВЧ-генератора 5', частота которого может не совпадать с частотой основного генератора 5. Электростатическое экранирование индуктивных антенн (рис. 26) применяется, когда необходимо дополнительно уменьшить емкостную составляющую поля.

С точки зрения численного расчета, электрическое поле катушки наиболее удобно рассчитывается с помощью скалярного  $\varphi$  и векторного  $\mathbf{A}$  потенциалов.

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t},$$

которые удовлетворяют уравнениям

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}, \nabla^2 \varphi + \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon_0, \mu_0$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума,  $\mathbf{j}, \rho$  — распределения плотности тока и пространственного заряда в антенне. Решение этих уравнений имеет стандартный вид

$$\mathbf{A} = \mu_0 \iiint_V \frac{\mathbf{j} \exp(-ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad \varphi = \frac{1}{\varepsilon_0} \iiint_V \frac{\rho \exp(-ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) d\mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|},$$

где  $k$  — групповая скорость,  $c$  — скорость света. В идеальной антенне с линейным током и отсутствием пространственного заряда

$$\mathbf{A} = I \oint_L \frac{\exp(-ik|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) d\mathbf{l}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|},$$

где интегрирование идет вдоль проводника, по которому течет ток,  $\mathbf{r}'$  — координата точки проводника

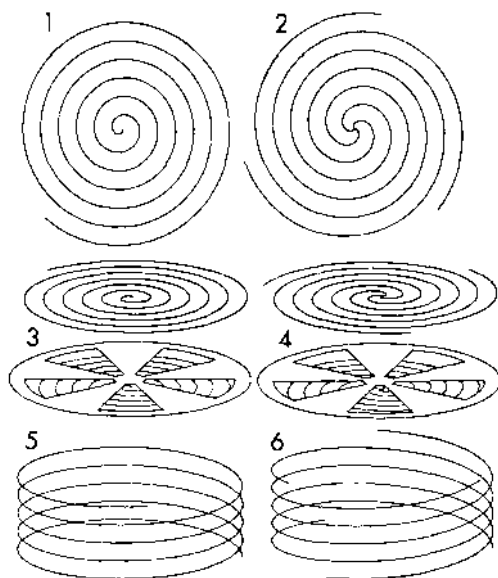


Рис. 26. Варианты индуктивных антенн 1 — Антенна в виде плоской спирали 2 — Антенна в

виде многозаход- ной спирали 3, 4 — экранированные антенны 5,6 — однозаходная и многозаходная цилиндрические антенны

В квазистатической системе показатель экспоненты близок к 0, что позволяет дополнительно упростить расчет. Альтернативный способ вычисления тока заключается в разложении поля по собственным модам камеры, в которой возбуждается полу, рассматриваемой как резонатор/

В симметричной разрядной камере возможно также определить напряженности полей с использованием разложения поля по собственным модам камеры. Необходимо заметить, что обычно при расчете электромагнитных полей в камере распределение плотности заряженных частиц в разряде считают однородным, что далеко не всегда так, поэтому полученные результаты имеют скорее качественный, а не количественный характер.

### **13. Методы анализа поверхности. Методы анализа тонких пленок.**

#### **Контроль процессов напыления и травления *insitu***

Основными методами контроля поверхности является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) и растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ, англ. SPM — Scanning Probe Microscope) — класс микроскопов для получения изображения поверхности и её локальных характеристик. Процесс построения изображения основан на сканировании поверхности зондом. В общем случае позволяет получить трёхмерное изображение поверхности (топографию) с высоким разрешением. Сканирующий зондовый микроскоп в современном виде изобретен (принципы этого класса приборов были заложены ранее другими исследователями) Гердом Карлом Биннигом и Генрихом Рорером в 1981 году. За это изобретение были удостоены Нобелевской премии по физике за 1986 год, которая была разделена между ними и изобретателем просвечивающего электронного микроскопа Э. Руска. Отличительной СЗМ особенностью является наличие:

зонда,

системы перемещения зонда относительно образца по 2-м (X-Y) или 3-м (X-Y-Z) координатам,

регистрирующей системы.

Регистрирующая система фиксирует значение функции, зависящей от расстояния зонд-образец. Обычно регистрируемое значение обрабатывается системой отрицательной обратной связи, которая управляет положением образца или зонда по одной из координат (Z). В качестве системы обратной связи чаще всего используется ПИД-регулятор.

Основные типы сканирующих зондовых микроскопов:

Сканирующий атомно-силовой микроскоп

Сканирующий туннельный микроскоп

Ближнепольный оптический микроскоп

Работа сканирующего зондового микроскопа основана на взаимодействии

поверхности образца с зондом (кантилевер, игла или оптический зонд). При малом расстоянии между поверхностью и зондом действие сил взаимодействия (отталкивания, притяжения, и других сил) и проявление различных эффектов (например, туннелирование электронов) можно зафиксировать с помощью современных средств регистрации. Для регистрации используют различные типы сенсоров, чувствительность которых позволяет зафиксировать малые по величине возмущения. Для получения полноценного растрового изображения используют различные устройства развертки по осям X и Y (например, пьезотрубки, плоскопараллельные сканеры).

Основные технические сложности при создании сканирующего зондового микроскопа:

Конец зонда должен иметь размеры сопоставимые с исследуемыми объектами.

Обеспечение механической (в том числе тепловой и вибрационной) стабильности на уровне лучше 0,1 ангстрема.

Детекторы должны надежно фиксировать малые по величине возмущения регистрируемого параметра.

Создание прецизионной системы развёртки.

Обеспечение плавного сближения зонда с поверхностью.

В настоящий момент, в большинстве исследовательских лабораторий сканирующая зондовая и электронная микроскопия используются как дополняющие друг друга методы исследования в силу ряда физических и технических особенностей.

В сравнении с растровым электронным микроскопом (РЭМ) сканирующий зондовый микроскоп обладает рядом преимуществ. Так, в отличие от РЭМ, который даёт псевдо трёхмерное изображение поверхности образца, СЗМ позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Кроме того, в общем случае сканирующий зондовый микроскоп позволяет получать изображение как проводящей, так и непроводящей поверхности,

тогда как для изучения непроводящих объектов с помощью РЭМ необходимо металлизировать поверхность. Для работы с РЭМ необходим вакуум, в то время как большая часть режимов СЗМ предназначена для исследований на воздухе, вакууме и жидкости. Благодаря этому, с помощью СЗМ возможно изучать материалы и биологические объекты в нормальных для этих объектов условиях. Например, изучение биомакромолекул и их взаимодействий, живых клеток. В принципе, СЗМ способен дать более высокое разрешение чем РЭМ. Так было показано, что СЗМ в состоянии обеспечить реальное атомное разрешение в условиях сверхвысокого вакуума при отсутствии вибраций. Сверхвысоковакуумный СЗМ по разрешению сравним с просвечивающим электронным микроскопом.

К недостатку СЗМ при его сравнении с РЭМ также следует отнести небольшой размер поля сканирования. РЭМ в состоянии просканировать область поверхности размером в несколько миллиметров в латеральной плоскости с перепадом высот в несколько миллиметров в вертикальной плоскости. У СЗМ максимальный перепад высот составляет несколько микрометров, как правило не более 25 мкм, а максимальное поле сканирования в лучшем случае порядка 150×150 микрометров. Другая проблема заключается в том, что качество изображения определяется радиусом кривизны кончика зонда, что при неправильном выборе зонда или его повреждении приводит к появлению артефактов на получаемом изображении. При этом подготовка образцов для СЗМ занимает меньше времени, чем для РЭМ.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ, англ. Scanning Electron Microscope, SEM) — прибор класса электронный микроскоп, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким (до 0,4 нанометра) пространственным разрешением, также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом.

Современный РЭМ позволяет работать в широком диапазоне увеличений приблизительно от 10 крат (то есть эквивалентно увеличению сильной ручной линзы) до 1 000 000 крат, что приблизительно в 500 раз превышает предел увеличения лучших оптических микроскопов.

Сегодня возможности растровой электронной микроскопии используются практически во всех областях науки и промышленности, от биологии до наук о материалах. Существует огромное число выпускаемых десятками фирм разнообразных конструкций и типов РЭМ, оснащенных детекторами различных типов.

Разрешающая способность (способность различать тонкие детали) оптического микроскопа ограничена длиной волны фотонов видимого света. Наиболее мощные оптические микроскопы могут обеспечить наблюдение деталей с размером 0.1-0.2 мкм. Если мы захотим увидеть более тонкие детали, необходимо сократить длину волны, которая освещает объект исследования. Для этого можно использовать не фотоны, а, например, электроны, длина волны которых намного меньше. Электронные микроскопы — результат воплощения этой идеи.

принципиальную схему РЭМ: тонкий электронный зонд (электронный пучок) направляется на анализируемый образец. В результате взаимодействия между электронным зондом и образцом возникают низкоэнергетичные вторичные электроны, которые отбираются детектором вторичных электронов. Каждый акт столкновения сопровождается появлением электрического сигнала на выходе детектора. Интенсивность электрического сигнала зависит как от природы образца (в меньшей степени), так и от топографии (в большей степени) образца в области взаимодействия. Таким образом, сканируя электронным пучком поверхность объекта возможно получить карту рельефа проанализированной зоны.

Тонкий электронный зонд генерируется электронной пушкой, которая играет роль источника электронов, сокращенного электронными линзами, которые играют ту же роль по отношению к электронному пучку как

фотонные линзы в оптическом микроскопе к световому потоку. Катушки, расположенные согласно двум взаимоперпендикулярным направлениям ( $x$ ,  $y$ ), перпендикулярным направлению пучка ( $z$ ) и контролируемые синхронизированными токами, позволяют подвергнуть зонд сканированию подобно сканированию электронного пучка в электронно-лучевой трубке телевизора. Электронные линзы (обычно тороидальные магнитные) и отклоняющие катушки образуют систему, называемую электронной колонной.

В современных РЭМ изображение регистрируется исключительно в цифровой форме, но первые РЭМы появились в начале 1960 годов задолго до распространения цифровой техники и поэтому изображение формировалось способом синхронизации развёрток электронного пучка в кинескопе с электронным пучком в РЭМ и регулировки интенсивности трубки вторичным сигналом. Изображение образца тогда появлялось на фосфоресцирующем экране кинескопа и могло быть зарегистрировано на фотопленке

К методам контроля в процессе нанесения тонких пленок относятся эллипсометрия и оже-спектроскопия.

#### **14. Физико-химические основы процессов эпитаксии. Молекулярно-лучевая эпитаксия.**

Молекулярно-лучевая эпитаксия (molecular beam epitaxy (МВБ)) — современный метод выращивания высококачественных тонких плёнок и создания гетероструктур. Этот метод является усовершенствованием способа получения металлических плёнок путем вакуумного испарения и осаждения. Применение чистых источников напыляемых материалов, сверхвысокий вакуум, точный контроль температуры подложки, диагностика роста плёнки с помощью электронной оже-спектроскопии, масс-спектрометрии, электронно-микроскопических и дифракционных методов, компьютерная система управления параметрами процесса — все это привело к созданию качественно новой нанотехнологии.

Во второй половине XX века характерные масштабы в твердотельной электронике уменьшились от сотен микрометров в первых транзисторах до десятков нанометров в гетероструктурах с квантовыми ямами и до нескольких нанометров в гетероструктурах с квантовыми точками. Реализация таких наногетероструктур с заданными параметрами оказалась возможной с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Действительно, в лекции лауреата Нобелевской премии по физике 2000 г. академика Ж. И. Алферова особо отмечено, что прорыв в создании тонкослойных гетероструктур произошел с появлением практической технологии роста тонких слоев методами молекулярно-лучевой эпитаксии. Основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии и способы создания различных гетероструктур этим методом достаточно подробно рассмотрены в коллективной монографии.

Толчком к развитию молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) явились высказанные Л. Эсаки идеи о создании одномерных периодических структур (сверхрешёток) из чередующихся сверхтонких слоев разного состава. Рост плёнок при МЛЭ определяется в основном кинетикой взаимодействия нескольких пучков атомов или молекул с поверхностью нагретой



монокристаллической подложки в сверхвысоком вакууме  $\leq 1.3 \cdot 10^{-8}$  Па ( $10^{-10}$  мм рт. ст.) и, в отличие от жидкофазной эпитаксии и химического осаждения, происходит в неравновесных условиях. Молекулярно-лучевая эпитаксия обеспечивает:

- получение монокристаллов высокой чистоты благодаря высокой чистоте потоков вещества и росту в сверхвысоком вакууме;
- выращивание сверхтонких структур с резкими изменениями состава на границах за счет использования невысоких температур роста, препятствующих взаимной диффузии;
- получение гладких бездефектных поверхностей за счет ступенчатого механизма роста, исключающего зародышеобразование;
- получение сверхтонких слоев с контролируемой толщиной благодаря малым скоростям роста и точному управлению потоками;
- создание структур со сложными профилями состава;
- создание структур с заданными внутренними напряжениями.

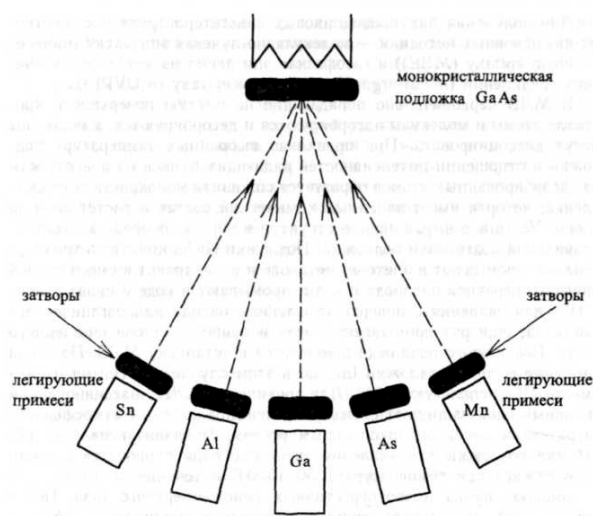
Успехи в создании твердотельной электроники во второй половине XX века утвердили соединения  $A_{III}B_V$  как основной класс полупроводников для оптоэлектроники и быстродействующих СВЧ-приборов. В этих соединениях элементами третьей группы обычно являются Ga, Al или In, а элементами пятой группы — As, P или Sb. Процесс роста соединений типа  $A_{III}B_V$  с помощью МЛЭ в наибольшей степени исследован на примере арсенида галлия GaAs, InP, некоторых других соединений и твердых растворов  $Al_xGa_yAs_z$ . Именно эти соединения являются основой полупроводниковых приборов типа интегральных схем и лазеров на гетероструктурах, которые доминируют в современных информационных технологиях. Действительно, полупроводниковые лазеры на подложках InP с длинами волн вблизи 1300 и 1500 нм, которые соответствует диапазонам прозрачности оптоволокна, обеспечивают 70% всех телекоммуникаций Интернета. Другое применение полупроводниковых лазеров с более короткими длинами волн — оптическая запись.

Для получения полупроводниковых наногетероструктур существуют две основных методики — молекулярно-лучевая эпитаксия (molecular beam epitaxy (MBE)) и газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE)).

В МЛЭ первоначально попадающие на чистую поверхность кристалла атомы и молекулы адсорбируются и десорбируются, а молекулы могут диссоциировать. При правильно выбранных температуре подложки и отношении интенсивностей падающих пучков на поверхности из адсорбированных атомов образуется сплошная монокристаллическая плёнка, которая имеет заданный химический состав и растёт слой за слоем. Успешное выращивание структур в первую очередь зависит от правильной подготовки подложки. Подложки GaAs кипят в трихлорэтилене, промывают в ацетоне, метаноле и воде, травят в смеси серной кислоты, перекиси водорода и воды, промывают в воде и снова травят в HCl для удаления с поверхности любого оксида или органического вещества, еще раз промывают в воде и сушат в потоке очищенного азота. После этого подложка помещается в установку МЛЭ. По такой же схеме готовят подложки InP, но в этом случае для снятия оксида вместо HCl используют KOH. Для соединений  $A_{III}B_V$  пассивирующий оксидный слой защищает свежетравленную подложку от атмосферного загрязнения перед эпитаксиальным ростом. Предэпитаксиальная обработка подложки для удаления оксидного слоя проводится с помощью отжига при температуре 1250-1500 К в течение 10 минут или с помощью пучка низкоэнергетичных ионов инертного газа. После ионной очистки для устранения наведенных радиационных дефектов проводится кратковременный отжиг при температуре 1000-1200 К. Оксид на подложке GaAs десорбируется в вакуумированной установке МЛЭ при температуре 850-870 К, а в случае InP — при 790 К. После десорбции подложка становится почти атомно чистой и пригодной для эпитаксиального роста.

МЛЭ заключается в осаждении испаренных элементарных компонентов

на подогретую десорбированную монокристаллическую подложку. Схематически этот процесс показан на рис. 27, иллюстрирующем выращивание плёнки твёрдого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  на подложке GaAs. Каждый нагреватель содержит тигель, являющийся источником одного из составных элементов плёнки. Температура нагревателей подбирается так, чтобы давление паров испаряемых материалов было достаточным для формирования соответствующих молекулярных пучков. Испаряемое вещество с относительно высокой скоростью переносится на подложку в условиях высокого вакуума. Нагреватели располагаются так, чтобы максимумы распределений интенсивности пучков пересекались на подложке. Подбором температуры нагревателей и подложки получают плёнки со сложным химическим составом. Дополнительное управление процессом наращивания осуществляется с помощью заслонок, расположенных между нагревателем и подложкой. Использование заслонок позволяет резко прерывать или возобновлять поступление любого из молекулярных пучков на подложку. Аналогичным образом осуществляется МЛЭ кремния. Установки МЛЭ снабжены вакуумными шлюзами для смены образцов, содержат оборудование для анализа дифракции отраженных электронов, масс-спектрометр и оже- спектрометр с возможностью исследования оже-спектров распыленных ионов.



источники - нагреватели

**Рис. 27.** Схема установки для молекулярно-лучевой эпитаксии:

выращивание плёнки твёрдого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на подложке GaAs

## 15. Физико-химические основы процессов «сухого» травления слоев

Электрическое поле, создаваемое индуктивной антенной (ICP и TSP-разряды), в случае идеальной антенны содержит только компоненту электрического поля параллельную к границе плазмы, поэтому не создает дополнительного напряжения на слое. Поэтому автосмещение плазмы в индуктивном разряде оказывается существенно меньше, чем в емкостном, что является его главным преимуществом. Кроме того, при увеличении площади обрабатываемой поверхности емкость разряда оказывается слишком большой, что затрудняет согласование емкостного разряда с генератором.

Главным этапом создания TSP-устройств является изучение физических явлений, лежащих в основе работы данной системы генерации плазмы и определяющих и рабочих параметров. Исследования показали, что эти явления различны в момент возбуждения разряда и в стационарном рабочем режиме.

Рассмотрим стационарный режим разряда. После формирования разряда, когда глубина проникновения ВЧ-поля в плазму становится много меньше поперечного размера области плазмы, разряд переходит в TSP-режим. В этом режиме плазма поддерживается током, индуцированным в ней внешней антенной.

Качественная оценка характеристик подобной системы может быть сделана на основе рассмотрения плазмы как идеального проводника. В этом случае магнитное поле, создаваемое индуцированным в плазме током, можно описать как поле тока, расположенного симметрично току антенны относительно границы плазмы и направленного в противоположную сторону. Обозначив ток в антенне  $I_1$  а индуцированный в плазме ток  $I_2$ , можно составить эквивалентную схему TSP-устройства в виде индуктивно связанных токов. Для этого случая уравнения токов  $I_1$ , и  $I_2$ , имеют вид:

$$j\omega L_1 I_1 + j\omega L_2 I_2 = U,$$

где  $L_1$  — индуктивность ненагруженной антенны;  $L_2$  — индуктивность

вторичной обмотки (тока индуцированного в плазме);  $Z_N$  — импеданс нагрузки (учитывающий потери в плазме);  $L_{12}$  и  $L_{21}$  — коэффициенты, отражающие взаимную связь тока в антенне и индуцированного тока в плазме;  $U$  — напряжение на антенне.

Решение системы уравнений (1)—(2) позволяет найти импеданс антенны в виде

$$Z = j\omega \cdot \left( L_{11} - \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22} + Z_N / j\omega} \right)$$

$$I_2 = -\frac{U}{Z} \cdot \frac{L_{21}}{L_{22} + Z_N / j\omega}.$$

и индуцируемый в плазме ток

$$Z = j\omega \cdot \left( L_{11} - \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22}} \right) + \frac{Z_N L_{12}L_{21}}{L_{22}^2}.$$

В отсутствии нагрузки (плазмы)  $Z_N = 0$  и  $Z = L_1$ . Характеристики нагруженной системы зависят от соотношения  $L_1$  и  $L_2$ , а также коэффициентов взаимной индукции  $L_{12}$  и  $L_{21}$ . Как известно, выполняется соотношение  $L_1L_{12} > L_{21}L_2$ , причем равенство может иметь место, если магнитные потоки через первичную и вторичную обмотки совпадают. Это возможно при применении магнитного сердечника (трансформатор), либо при совпадении пространственного распределения тока первичной и вторичной обмоток, то есть тока антенны и индуцированного тока в плазме для нашего случая. Если плотность плазмы велика то из (3) следует

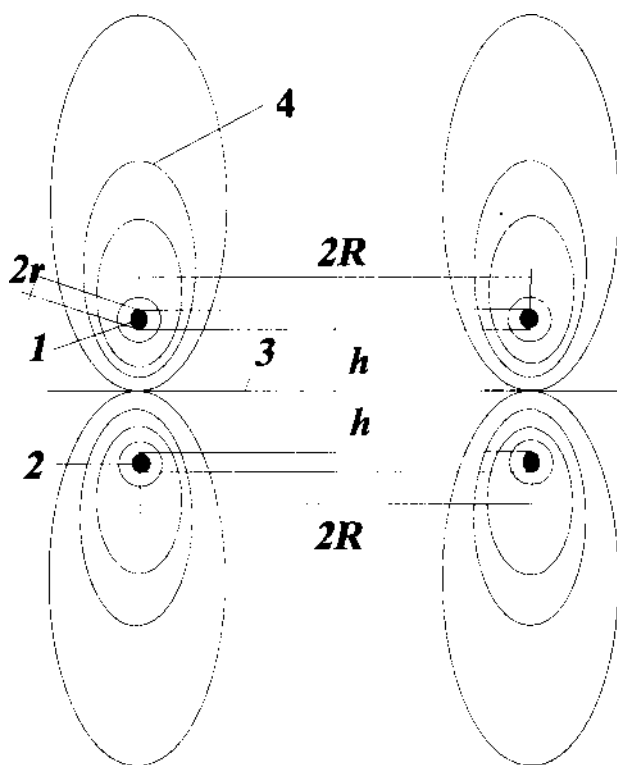
$$Z = j\omega \cdot \left( L_{11} - \frac{L_{12}L_{21}}{L_{22}} \right) + \frac{Z_N L_{12}L_{21}}{L_{22}^2}.$$

Таким образом, если  $L_1L_{12} > L_{21}L_2$ , то антенна имеет не скомпенсированный индуктивный импеданс. Именно наличие этого импеданса приводит к необходимости в стандартных ТСР-источниках увеличивать напряжение на антенне в рабочем режиме до нескольких киловольт, что ведет к дополнительным потерям энергии в антенне. В соответствии этот импеданс ограничивает ток, индуцируемый во вторичной

обмотке (плазме).

Для уменьшения импеданса необходимо увеличивать степень индуктивной связи токов, текущих по антенне и по плазме. Пути увеличения этой связи можно понять, рассмотрев плазму как идеальный проводник, а антенну — как кольцо радиуса  $R$  из проводника с сечением радиуса  $r$ , находящегося на расстоянии  $h$  над этим идеальным проводником (рис. 30). В этом случае распределение токов по поверхности проводника таково, что создаваемое им поле может быть рассмотрено как поле тока, текущего внутри проводника симметрично току антенны относительно границы проводника. Индуктивности кольцевых токов:

$$L_{22} = L_{11} = \mu_0 \cdot \mu \cdot R \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot R}{r} \right) - 2 \right) \text{ (Гн)}.$$



**Рис. 30.** Геренация поля в плазме индуктивной антенной. 1 - возбуждающая поле кольцевая антенна, по которой протекает электрический ток.

2 - индуцируемый в плазме переменный ток.

3 - граница плазмы. 4 - силовые линии магнитного поля, создаваемого током антенны и индуцированным током.  $R$  - радиус кольцевой антенны,  $r$  -

радиус проводника, из которого она выполнена.

Из формул (10) — (11) следует, что для увеличения коэффициента связи и, тем самым, компенсации индуктивного импеданса необходимо уменьшать расстояние между индуцирующим витком и плазмой.

Реальным физическим ограничением этого размера, при достижении которого наблюдается существенное увеличение коэффициента связи между током антенны и индуцированным током в плазме, следует считать глубину проникновения поля в плазму  $L$  в рабочем режиме, так как в плазме, в отличие от идеального проводника, индуцируемый ток распределен по ее поверхностному слою толщиной порядка  $L$ .

Тем не менее, дальнейшее уменьшение расстояния между антенной и границей плазмы также ведет к росту коэффициента связи, хотя и не такому значительному, как при движении с расстояний, больших  $L$ .

Реальным конструктивным ограничением размера, до которого можно уменьшать расстояние между антенной и плазмой, следует считать толщину диэлектрика, разделяющего антенну и плазму. Эта толщина определяется термомеханической, химической и электрической прочностью экранирующего диэлектрического материала. Поэтому прочностные характеристики окон из диэлектрика выходят на первый план в конструкциях ТСП-источников, где окно разделяет антенну, находящуюся на атмосфере, и вакуумный объем.

Кроме создания тока в плазме, помещенная внутрь рабочей камеры антенна способна наводить паразитные токи на металлических стенках рабочей камеры. Для объяснения условий, при которых эти токи не существенны, рассмотрим магнитное поле, создаваемое совместно токами, текущими по антенне и по плазме. При больших плотностях электронов и расположении антенны вблизи поверхности плазмы магнитные поля этих токов взаимно компенсируют друг друга. Результирующее магнитное поле, создаваемое этими токами на расстоянии  $H$ , превышающем расстояние между током в антенне и током в плазме, резко спадает при удалении от



антенны. В реальной системе такой спад магнитного поля начинается при удалении от антенны на расстояние, равное сумме расстояния от антенны до границы плазмы и глубины проникновения поля в плазму. Эксперименты показали, что наведённые в камере токи практически не сказываются на характеристиках антенны в рабочем режиме, если она удалена от металлической поверхности рабочей камеры на расстояние, большее утроенной глубины скинслоя.

Одной из проблем при разработке газоразрядных систем, в которых потенциальный электрод размещается внутри рабочей камеры, является предотвращение процессов плазмообразования между электродом и близлежащими стенками камеры (или фланцем, на котором размещается электрод). В ТСП-устройстве пробой промежутка между антенной и стенкой камеры приводит к уменьшению эффективности процесса плазмообразования в рабочей области между антенной и подложкодержателем, поскольку на пробой в нерабочей области тратится дополнительная энергия, что в целом снижает эффективность работы ТСП-источника.

Вероятность пробоя зависит от величины зазора, электрического поля, давления газа, формы поверхностей. Поскольку расстояние между антенной и поверхностью рабочей камеры обычно существенно меньше, чем расстояние от антенны до подложкодержателя, то при низких давлениях, когда длина свободного пробега ионизирующих электронов достаточно велика, генерация плазмы происходит преимущественно в области между антенной и подложкодержателем. Вероятность процессов ионизации существенно снижается также из-за высокого значения электрического поля в сравнительно малом зазоре между антенной и стенкой камеры (при очень сильных полях уменьшается сечение ионизации газа электронами). Тем не менее, при сравнительно высоких давлениях газа пробой в нерабочих областях вакуумного объема возможен.

Для исключения этого эффекта достаточно заполнить пространство между

антенной и поверхностью рабочей камеры твердым диэлектриком (полностью или частично). Влияние частичного заполнения пространства диэлектриком связано с увеличением вероятности рекомбинации электронов и ионов на диэлектрике. Это уменьшает время жизни электрона в зазоре и увеличивает поле, необходимое для поддержания плазмы.

При обработке микроструктур, чувствительных к зарядовому и энергетическому воздействию, важной проблемой является снижение электрического поля вблизи обрабатываемой подложки. В этом случае необходимо минимизировать ВЧ-поле в окрестности подложки, что обеспечит малую энергию бомбардирующих ионов, а также предотвратит пробой тонких диэлектрических слоев на подложке. С этой целью подложка должна быть удалена от антенны на расстояние, не меньшее утроенной глубины проникновения поля в плазму. Поскольку обычно расстояние между антенной и подложкой превышает 10 см (при меньших расстояниях затрудняется поджигание разряда и растет минимальное давление, при котором может существовать стационарный разряд), то в плазменных установках для травления и нанесения пленок указанное условие выполняется практически всегда.

## **16. Микро-и наноэлектро- механические системы. МЭМС.**

Понятие «микросистемная техника» давно и прочно укоренилось в научно-технической литературе и в научно-инженерном лексиконе. Появление этого термина связано с очередной стадией развития техники и технологии, благодаря которым стало возможным создание малогабаритных интегрированных многофункциональных систем, решающих задачи получения и хранения информации, вычисления и управления и т.д. «Информационно-управляющая система, по определению Винера, состоит из объекта управления, сенсорной подсистемы, подсистемы анализа и принятия решений, исполнительной (воздействующей) подсистем». Подобные многообразия подсистем, интегрированные на микроуровне, которые могут быть большими (значительно укрупнены и состоят из множества функциональных блоков и узлов) или, наоборот, малыми (т.е. присутствовать не в самом полном комплекте, например, в виде устройства получения информации от сенсора и электронной схемы передачи информации), являются микросистемами. Следует вспомнить, что объединение индивидуальных приборов (активных и пассивных элементов — транзисторов, сопротивлений и т.д.) в интегральную схему, изготавливаемую в одном технологическом цикле, позволило достичь новый качественный уровень в массогабаритных показателях, быстродействии, функциональных возможностях, производительности, снижении стоимости и т.п. Объединение в интегрированную систему различных подсистем также свидетельствует о качественно новом, прогрессивном шаге. В настоящее время существует множество толкований термина «микросистемная техника». Определение «микросистемной техники» как информационно-управляющей исполнительной системы наиболее сжато и информативно характеризует ее суть. Таким образом, разнообразные приборы, схемы, устройства, подсистемы, интегрированные на микроуровне, могут быть частью или законченным изделием микросистемной техники.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) это совокупность

электронных и механических элементов (компонентов), выполненных в микроисполнении на основе групповых методов. Соответственно в микрооптоэлектромеханических системах (МОЭМС) дополнительно содержатся микроэлектронно-оптические элементы. Более общая совокупность по-

добных изделий может быть отнесена к микросистемной технике (МСТ) или к технологии микросистем, как традиционно называют ее в некоторых европейских странах.

Основой микросистемной техники является технология микроэлектроники. Сложные функциональные механические системы могут строиться на основе микротехнологий, нанотехнологий и наноматериалов. В случае использования нанотехнологий и наноматериалов следует использовать термин «наносистемная техника». Нанотехнология — это совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба. Наноматериалы — материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном направлении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками. Соответственно наносистемная техника (НСТ) — это полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Таким образом, достоинства и преимущества наносистемной техники (и соответственно наноэлектромеханических систем — НЭМС, а также нанооптоэлектромеханических систем — НОЭМС) заключены во вновь открывающихся возможностях и преимуществах функционирования наноразмерных элементов, составляющих совокупность разрабатываемых и изготавливаемых

систем.

Микромеханика и наномеханика это не только элементы механики (или механические устройства), выполненные величиной в единицы микрон или, соответственно нанометров, это также элементы, компоненты или устройства значительно больших размеров (например, единицы миллиметров), но у которых, например, точность изготовления элементов конструкции составляет микроны и нанометры и этот размерный фактор прецизионности обработки позволяет достигать новых качественных показателей, т.е. получать параметры ранее недостижимые. Подобные устройства следует относить к наномеханике или наносистемной технике. Например, прецизионные измерения наноперемещений подвижных механических частей позволяют создавать датчики с высокой чувствительностью.

Механические элементы (компоненты) могут преобразовывать сигнал какого-либо воздействия на систему или отдельную ее часть в механическое перемещение или, наоборот, механическое воздействие в информационный (управляющий) сигнал, а также каким-либо образом способствовать или препятствовать подобным процессам. Встречающееся понятие «микромашин» подразумевает не только устройства, у которых имеются механические детали, выполненные в микроисполнении, но и включает системы, преобразующие энергию потока газа, жидкости и т.п. в электроэнергию, в оптический сигнал, в микроперемещение с использованием механических элементов или, наоборот, системы, под определенным видом воздействия с использованием механики изменяющие информационные потоки, механические свойства, газодинамику, гидродинамику, оптические свойства, свойства поверхности и т.д.

В последнее время возникло много идей и проектов, революционным образом переворачивающих наши представления о возможностях микро- и наносистем. Благодаря популярности этой темы и активному конструированию приборов и систем вполне возможно, что сколько-нибудь значимый интеллектуальный прибор в ближайшее время обязательно будет изготовлен

с использованием технологий и элементов микро- или наносистемной техники и в, частности, микро- и наномеханики.

Среди существующих механических конструкций очень сложно выделить типовой элемент, поскольку их достаточно много, и в приборах такими элементами могут выступать самостоятельно балки, спицы, мембраны, струны, трубки, кольца и более сложные конструкции, а также кристаллическая решетка монокристалла, атомарно-чистая поверхность аморфного материала или группы молекул и даже отдельные ионы и т.д. и т.д. Появляются сообщения об успешных работах в области создания механических приборов, в которых часть механических функций выполняют живые организмы (бактерии). Конечно же продолжают работы по созданию систем, способных управлять движением и поведением живых биологических объектов — мышей, крыс, тараканов, пчел, мух и т.п., при этом системы могут быть как встраиваемые в биологический объект, так и находящиеся вне биообъекта. Очень интересным направлением является разработка и создание систем идентификации различных объектов (в том числе с использованием интеллектуальных функций записи-перезаписи, хранения информации, анализа ситуации т.д.), в том числе живых организмов.

Назначения приборов микросистемной техники настолько широко, что, наверное, невозможно определить, в какой области подобные приборы не могут быть использованы. Однако, наряду с общеизвестными и популярными направлениями развития микросистемной техники в виде МЭМС для определения параметров движения различных объектов (микроакселерометров, микрогироскопов), систем сбора и анализа информации на базе различных сенсоров (датчиков давления, датчиков расхода, состава газов и жидкостей, ударов, вибраций и т.д.) и получения различного рода актюаторов (микродвигателей, поворотных зеркал, насосов и т.д.), особое место занимает направление разработки и изготовления микроаналитических систем (микроаналитических лабораторий, микрофлюидных чипов и т.п.). Это направление очень важно, востребовано в настоящее время и может быть

перспективно в будущем.

## 17. Фотолитография. Наноимпринтинг

Литографией в микроэлектронике называют различные методы микрогравировки диэлектрических, металлических и полупроводниковых слоев, используемых при изготовлении ИМС. Основным методом литографии в технологии ИМС в настоящее время остается фотолитография — фотохимический метод микрогравировки. Кроме оптической литографии достаточно широко используются также рентгено-, электроно- и ионолитография. Это так называемые традиционные, лучевые методы литографии. Эти методы позволили перейти к наномасштабам в серийном производстве ИМС. Одновременно выявились реальные пределы возможности использовать отлаженные методы фотолитографии в нанoeлектронике, что привело к широкому поиску новых решений, которые могли бы обеспечить дальнейший прогресс в микро- и нанолитографии. С 1990-х гг. стали развиваться нелучевые методы литографии, основанные на иных подходах. Согласно прогнозам, новые методы позволят освоить всю нанообласть в массовом производстве интегральных электронных устройств с наноразмерными элементами. Однако в настоящее время еще не ясно, какие из разрабатываемых методов литографии выдержат конкурентную борьбу и станут основными в полномасштабном производстве.

Оптическая литография разделяется на контактную и проекционную. В первом случае фотошаблон плотно прилегает к слою фоторезиста, а во втором — изображение фотошаблона (маски) проектируется на поверхность фоторезиста с помощью специальной оптической системы. Простота контактного способа обеспечила методу фотолитографии широкое применение в микроэлектронной области. Для нанoeлектроники предпочтителен проекционный вариант, так как позволяет получить более высокое разрешение. Именно этот вариант описывается далее.

Разрешающая способность. Разрешающей способностью метода фотолитографии называется число линий  $N$  одинаковой ширины  $a_{\min}$ , разделенных промежутками той же ширины, которое можно получить на 1 мм поверхности резиста:

$$N=1000/2 a_{\min}$$



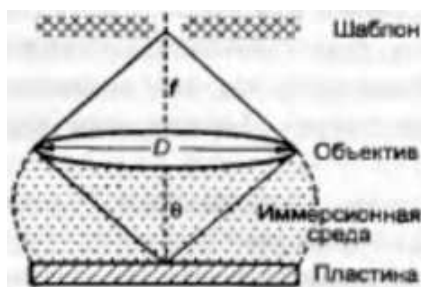
где  $a_{\min}$  выражено в мкм. На практике разрешающую способность характеризуют также значением  $a_{\min}$ . В дальнейшем под разрешающей способностью будет подразумеваться величина  $a_{\min}$ . Эта величина определяет минимальные топологические размеры элементов ИМС размеры униполярных транзисторов.

Фотолитография имеет физический предел разрешающей способности, определяемый для проекционной системы дифракционным критерием Рэлея, при выполнении которого изображения двух близкорасположенных точек видны раздельно:

$$a_{\min} = k \lambda / n \sin \theta \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $n$  — показатель преломления среды,  $\theta$  — половина апертурного угла выхода/Величина  $n \sin \theta$  называется числовой апертурой. Значения  $k$  различны для различных  $\lambda$  и резистов ( $k = 0,3-0,6$  для УФ-излучения). Проекционная система обычно работает с уменьшением рисунка шаблона (обычно 4:1).

Из (2) видно, что  $a_{\min}$  уменьшается при использовании более коротковолнового излучения и объектива с большей числовой апертурой (увеличение числовой апертуры достигается за счет уменьшения размера экспонируемого поля). Кроме того, на величину  $a_{\min}$  влияет еще ряд факторов: качество резистов и шаблонов, плоскостность пластин и другие.



**Рис. 8.7** Взаимное расположение элементов проекционной оптической системы

Чем короче  $\lambda$ , тем более мелкие детали могут быть перенесены на пластину. Согласно эмпирическому правилу, при данной длине волны  $\lambda$  можно отобразить детали размером до  $\lambda / 2$ . Следует отметить, что если не применяются меры по улучшению качества изображения (например, фазосдвигающие маски и высококонтрастные резисты), то возможно

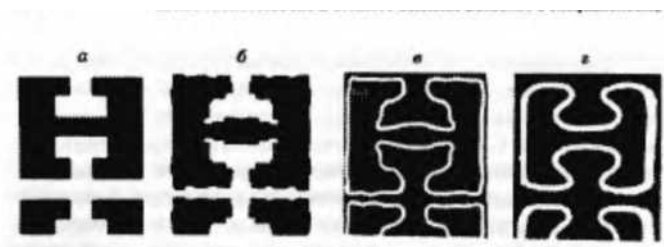
воспроизведение лишь деталей размером и два-три раза больше величины определяемой соотношением (2).

До 2003 г. в фотолитографии наиболее широко использовалась длина волны  $\lambda = 248$  нм излучения KrF-экимерного лазера, чему соответствует  $a_{\min} \sim 120$  нм. Сейчас производители чипов переходят на использование излучения ArF-экимерного лазера с  $\lambda = 193$  нм. Крупнейшая компания, производящая чипы (чипмейкер), Intel, сообщила в конце 2003 г. о начале производства ИМС с элементами размером 90 нм при использовании  $\lambda = 193$  нм.

Экимерными называются газоразрядные лазеры, активной средой в которых являются молекулы галогенов инертных газов, например, KrF, ArF и др., существующие только в возбужденных состояниях.

В дальнейшем возможен переход к излучению экимерного лазера на основе молекул фтора ( $\lambda = 157$  нм,  $a_{\min} = 70$  нм). Однако кварцевые линзы уже не прозрачны для этой длины волны. Необходимы линзы из  $\text{CaF}_2$  -менее прочного, не устойчивого к внешним взаимодействиям и более дорогого материала. Для  $\lambda = 160$  нм уже нет прозрачных материалов, и при дальнейшем уменьшении  $\lambda$  неизбежен переход на зеркальную оптику с полной заменой литографического оборудования, что требует значительных затрат.

Так как метод фотолитографии имеет высокую технико экономическую эффективность и степень обработанности, полупроводниковая промышленность стремится использовать этот метод до тех пор, пока не будут исчерпаны все его возможности. Ведущие корпорации — IBM, Intel, Lucent Technologies, Nippon Telephone and Telegraph и другие — вкладывают большие средства в разработку новых вариантов фотолитографии для продвижения в область  $a_{\min} < 90$  нм. В последнее время наметилось два пути:



**Рис. 21** Применение маски с оптической коррекцией: а — обычная маска,

б — полученный (искаженный) отпечаток на пластине. в — маска с оптической коррекцией, г — соответствующий (скорректированный) отпечаток на пластине.

использование иммерсии (см. ниже) при работе на обычных степпер-сканерах и нанолитография в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (ЭУФ). Разработаны и применяются специальные фазосдвигающие маски и маски с оптической коррекцией.

Степпер-сканером называется литограф, работающий по принципу пошагового экспонирования с последующим сканированием

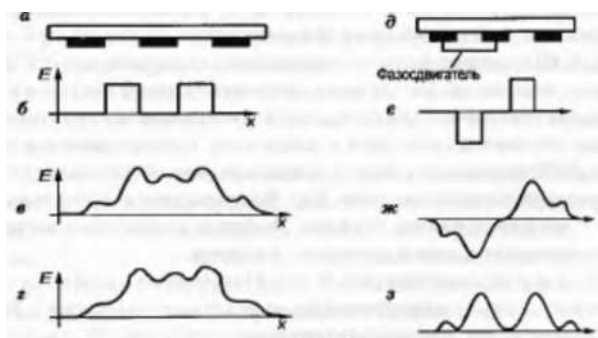
Маски с оптической коррекцией и фазосдвигающие маски. Такие маски применяются при работе в режиме, близком к дифракционному пределу, и позволяют повысить разрешающую способность. Действие маски с оптической коррекцией поясняется на рис. 21. Для исправления последствий дифракции на углах и краях (рис. 21 б) используется сложная форма рисунка маски (рис. 21 в).

С помощью фазосдвигающих масок можно получать изображение с размерами, значительно меньшими длины волны излучения. Принцип действия фазосдвигающей маски показан схематически на рис. 22. На рис. 22 а приведена схема обычной маски и график распределения напряженности светового поля  $E$  в плоскости МАСКИ (рис. 22 б). На рис. 22 в,г даны графики распределения напряжённости светового поля и интенсивности светового поля в плоскости пластины соответственно. На рис. 22 г видно, что изображения двух отверстий в маске слились из-за дифракции в одно общее световое пятно. На рис. 22 д,е изображены фазосдвигающая маска и график распределения напряженности светового поля в плоскости маски. Под одним из двух соседних отверстий маски находится дополнительный слой прозрачного вещества (фазосдвигающего покрытия) с оптической длиной пути  $\lambda/2$ . В результате световые колебания, выходящие из левого отверстия, отстают по фазе на  $\pi$  от колебаний, выходящих из правого отверстия.

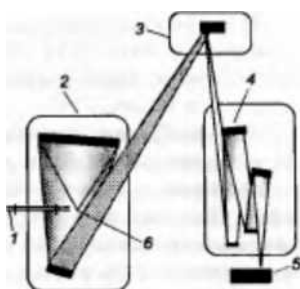
На рис. 22 ж,з приведены распределения напряжённости  $E$  и интенсивности светового поля в плоскости пластины соответственно. На рис. 22 з видно, что в этом случае изображения отверстий в маске разделены. Так

в методе фазосдвигающих масок достигается разрешение линий, ширина которых существенно меньше длины волны используемого излучения. Этим методом, например, было получено разрешение  $a_{\min} = 90$  нм на длине волны 193 нм.

**Иммерсионный метод.** Возможности традиционной фотолитографии расширяет интенсивно разрабатываемая идея использования иммерсии. Эффект иммерсии заключается в уменьшении длины волны  $\lambda$  и увеличении числовой апертуры  $nsin\theta$  с увеличением показателя преломления среды, заполняющей пространство между объективом и пластиной (см. рис. 20). Если, например, в это пространство ввести воду ( $n = 1,43$  при  $\lambda = 193$  нм), что не ухудшает качества воспроизводимого рисунка, то  $\lambda$  уменьшится в 1,43 раза, а числовая апертура увеличится в 1,43 раза. В итоге разрешающая способность ( $a_{\min}$ ) увеличится в два раза (см. формулу 2).



**Рис. 22** Принцип действия фазосдвигающей маски в иммерсионной среде.



**Рис. 23** Принципиальная схема ЭУФ нанолитографа

Над усовершенствованием иммерсионной литографии работают ведущие компании. Так, фабрики Intel на основе иммерсионного метода предполагают выход на технологический стандарт 65 нм. Компания IBM в 2006 г. Объявила о получении матрицы линий шириной 29,9 нм. Использовалось излучение с длиной волны 193 нм и иммерсионная жидкость с  $n = 1,6$ .

Нанолитография в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (ЭУФ). Излучение ЭУФ лежит в диапазоне 10-50 нм., что граничит с мягким

рентгеновским излучением (0,5- 10 нм). ЭУФ-наноитография представляет собой развитие традиционной проекционной фотоитографии и предназначена для изготовления микропроцессорных ИМС сверхвысокого уровня интеграции — до  $10^8$ - $10^{10}$  элементов на кристалле, что на 1—2 порядка выше современного уровня.

Принцип действия ЭУФ наноитографа. Наноитограф работает по принципу степпер-сканера. Производится пошаговое экспонирование чипов при помощи проекционной отражательной оптической системы. Схема наноитографа приведена на рис. 23.

Наноитограф состоит из четырех главных блоков.

1. Источник ЭУФ излучения — 50-100-микронное облачко вещества мишени (квазитоочный источник 6 на рис. 23) в плазменном состоянии при температуре  $\sim 10^6$  К, ионизованное до 10-20 крат (квазитоочный источник). Плазма создается импульсным лазерным излучением при его взаимодействии с мишенью. В экспериментальных ЭУФ-наноитографах применяют сверхзвуковые струи тяжелого инертного газа Хе. Используется излучение  $\text{Xe}^{10+}$  на длине волны 13,4 нм. Ведутся разработки по использованию олова в качестве мишени.

2. Узел маски (3 на рис. 23). Поверхность шаблона — плоское зеркало с брэгговским покрытием (см. ниже). На его поверхность наносится поглощающий слой (W, Та, Cr), в котором гравировается увеличенный рисунок ИМС.

3. Оптическая система.

Состоит из конденсора 2 и объектива 4. Конденсор 2 (зеркальный, верхнее зеркало — коллекторное) направляет излучение на шаблон 3. Объектив переносит уменьшенное изображение рисунка маски шаблона на поверхность пластины 5, покрытой резистом.

Зеркала конденсора и объектива имеют расчетную кривизну и брэгговские покрытия, состоящие из нескольких десятков чередующихся слоев молибдена и кремния толщиной  $\lambda/4$ . Покрытия обеспечивают высокий коэффициент отражения, максимум которого достигается на длине волны 13,4 нм. Все разработки используют эту длину волны.

Зеркальная оптическая система не может иметь высокую числовую апертуру. Увеличение апертуры достигается за счет уменьшения поля изображения. Поэтому ЭУФ- нанолитограф должен работать по принципу степпер-сканера. Числовую апертуру можно увеличить также за счет увеличения количества зеркал объектива. Перспективный 8-зеркальный промышленный ЭУФ-литограф по оценкам сможет обеспечить апертуру -0,4 и разрешение -20 нм.

4. Образец с нанесенным резистом (5 на рис. 23). ВЭ УФ-литографии необходимы специальные резисты с высоким контрастом и чувствительностью, например, кремний-водородные (силановые) полимеры, неорганический резист AsSe.

Метод ЭУФ рассчитан на промышленное применение и в настоящее время успешно разминается. Презентация первой ЭУФ-установки проведена в 2001 г. консорциумом по нанесению рисунков на чипы. Установка позволяла получить  $a_{\min} \sim 80$  нм. Компании Intel, Advanced Micro Devices и другие вложили 250 млн долларов в создание прототипа ЭУФ- установки. Чтобы довести ЭУФ-установку до промышленного производства, потребовалось еще 2,5 млрд долларов.

В настоящее время достигнуто разрешение -30 нм. Ожидается, что к 2014-2016 гг. промышленные ЭУФ-нанолитографы дадут разрешение -20 нм, а в последующие годы — до 10 нм.

Таким образом, фотолитография еще не исчерпала своих возможностей. Объем рынка электроники, основанной на кремнии, составляет несколько триллионов долларов в год. Поэтому, по крайней мере в ближайшее десятилетие, полупроводниковая промышленность будет продолжать идти по пути усовершенствования высокоэффективной фотолитографии.