

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»  
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра наносистем и оптотехники

КУРС ЛЕКЦИЙ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И  
НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Новосибирск  
СГГА

*1.1 Предмет дисциплины*

Развитие современной техники во многом определяется существованием и развитием различных информационных устройств – вычислительных машин, линий передачи информации между людьми и компьютерами. Основой компьютеров являются интегральные микросхемы, в которых при помощи полупроводниковых усилительных и переключающих элементов производится обработка информации, поступающей в виде электрических сигналов и извлекаемой также в виде электрических сигналов.

Назрела потребность соединить в одном компактном приборе возможностей извлекать информацию из окружающего людей мира - превращать её в электрические сигналы - производить обработку информации, в результате чего появляется сигнал(команда о необходимых действиях) - и производить эти действия. Такими свойствами обладают устройства микросистемной техники.

Микросистемная техника – современное бурно развивающееся направление науки и техники. В разных странах это направление определяется в различных терминах [1]. В Европейских странах микросистема – это интеллектуальная миниатюризированная система, обладающая сенсорными, процессорными и (или) актиоаторными функциями (функциями осуществления действия). В ней обычно используется комбинация устройств, действующих на основе использования электрических, механических, оптических, химических, биологических, магнитных или других свойств и интегрированных на одном или нескольких чипах (под чипом понимается небольшая полупроводящая или изолирующая пластинка, на которой закреплены и электрически соединены в единую схему отдельные элементы типа транзисторных усилителей и переключателей и ячеек памяти; чувствительных к изменениям в окружающей среде сенсоров; микроприводов (актиоаторов); их может быть много миллионов на одной пластинке).

В США чаще используется термин «микроэлектромеханические системы» (МЭМС): «МЭМС – это интегрированные микроустройства или системы, комбинирующие электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией ИС и имеющие размеры от микрометров до миллиметров. Соединение в таких системах компьютерной обработки сигналов с чувствительными и актиоаторными компонентами позволяют ощущать и контролировать окружающий мир».

В Японии чаще пользуются терминами «мехатроника» и «микромашины»: «Микромашины состоят из функциональных элементов размером в несколько миллиметров и способных образовать комплексное микроскопическое устройство». Дальнейшее развитие микросистем в направлении миниатюризации – наносистемная техника

Наносистемная техника – созданные полностью или частично 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 (термин из «Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года», одобренной в основном Правительством Российской Федерации 18 ноября 2004 г.).

## *1.2. Современные направления в развитии технологии микросистем*

Развитие микросистемной техники в настоящее время базируется на достижениях в создании новых методов микро- и нанотехнологий [2]:

Технология МСТ в качестве базы использует типовые технологические процессы микроэлектроники:

– формирование структур множества микросхем одновременно на одной кремниевой пластине; обработка в технологических установках одновременно десятков пластин – т.е. групповую интегральную технологию. Такая технология позволяет производить одновременно большое количество изделий, производительность технологической линии может достигать миллионов изделий в неделю;

– применение кремния для изготовления микромеханических (подвижных) элементов на поверхности подложек; кремний благодаря своей упругости, прочности, химической стойкости оказался превосходным материалом для микромашин; кроме того методы его групповой микрообработки, разработанные для изделий микроэлектроники, оказались пригодными и для изготовления структур микросистем («поверхностная кремниевая технология») ;

– создание «объёмной кремниевой технологии», основанной на глубинном размерном жидкостном травлении, использующем анизотропию скорости травления по кристаллографическим направлениям монокристалла кремния;

– разработку в Германии технологии формирования объёмных структур с использованием синхротронного излучения, гальванического осаждения металлов и прецизионного литья полимеров (LIGA - технологии);

– появление разнообразных лазерных микротехнологий: лазерного «микрофрезерования», лазерного осаждения из газовой фазы, лазерно-стимулированной фотополимеризации («микростереолитографии»), и др.

В развивающихся сейчас направлениях технологий МСТ – решается задача разработки единообразных способов изготовления разнообразных компонентов сенсорных и актиuatorных подсистем.

В развитии МСТ имеются проблемы, одна из которых – недостаточность микроэлектронных технологий для изготовления микромеханических изделий. Причина в том, что с помощью МСТ организуется взаимодействие с физическим материальным миром во всем его многообразии, а не только с

информационной его составляющей. Наиболее характерное отличие изделий микроэлектроники от изделий МСТ в том, что первые являются двумерными и статичными, а микромеханические структуры являются трехмерными, их элементы должны иметь возможность перемещения.

## **2 МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (МЭМС И МОЭМС)**

В МСТ входными величинами являются оптические, тепловые, механические сигналы (например, давление, сила, ускорение, перемещение), электрические сигналы.

Микроэлектромеханическая система (МЭМС и МОЭМС) содержит в себе в общем случае: а)сensоры, реагирующие на параметры окружающей среды и формирующие электрические сигналы, пропорциональные воздействию окружающей среды, б) усилители и преобразователи электрических сигналов, в) исполнительные механизмы, управляемые электрическими сигналами и осуществляющие движение механических микроустройств, например, микрозеркала, микроклапана, микронасоса. Важным требованием к МЭМС является его миниатюрность. Миниатюрность является необходимой в ряде военных применений, а также позволяет уменьшить потребление энергии устройством, увеличить его быстродействие, уменьшить стоимость изготовления.

### *2.1 Области применения и направления развития микросистем*

Устройства МСТ (МЭМС и МОЭМС) являются информационно-управляющими системами, которые выполняют: а) функции сбора информации, б)анализа информации и принятия решений, в)функции исполнения решений.

Исторически первое микромеханическое изделие – датчики давления газ, создано в 1968 г. Основные потребители датчиков давления (> 500 млн. шт. в год, из них в 1996 г. было 80% микромеханических) – автомобильная и авиакосмическая промышленность, энергетика, химия, медицина.

Второе по успешности внедрения микромеханическое устройство - микромеханические акселерометры. Их потребление в 2003 г. – 135 млн. шт.

Разрабатываются и изготавливаются микромеханические гироскопы (датчики угловых скоростей).

Микрозеркальные матрицы стали основой портативных видеопроекторов.

В области создания энергетических микромашин разрабатывается газотурбинный микродвигатель мощностью 30-50 Вт, размером 10×13 мм, с расходом топлива до 10 г/час. Отношение тяги к весу более чем в 10 раз выше, чем у любых обычных двигателей.

Для химических исследований созданы микролаборатории на чипе для анализа и синтеза веществ; на одной пластине содержатся газовые и жидкостные анализаторы, микродозаторы, насосы, клапаны, смесители и др.

Созданы микросистемы для биологии и медицины:

- аналитические приборы для анализа биоматериалов в микрообъемах;
- биохимические микрореакторы;
- микроинструменты для манипулирования и препарирования микрообъектов типа биологических клеток;
- робототехнические устройства для микрохирургии и дистанционной хирургии, и др.

## *2.2. Тенденции развития нанотехнологий.*

Совершенствование электронных, микромеханических и оптоэлектромеханических устройств происходит в сторону дальнейшего уменьшения размеров элементов, в сторону развития наноэлектроники и наноэлектромеханики. В связи с этим во всём мире проводятся исследования физических эффектов, обусловленных уменьшением размеров, и разработки по созданию нанотехнологий.

Наноразмерные устройства состоят из частиц, имеющих размеры порядка нанометров. Выяснено, что объёмные свойства материалов изменяются при уменьшении их размеров до таких значений. Маленькие частицы называются наночастицами, если их размеры менее 100 нм. При радиусе наночастиц 1 нм в ней содержится примерно 25 атомов, как в большой молекуле; между наночастицами и большими молекулами невозможно провести чёткую границу.

Необходимым условием для того, чтобы частицу считать наночастицей, является возникновение в ней особых свойств, которых не было при большем размере.

Рассмотрим проекты по созданию устройств типа «умные материалы и структуры», обладающих свойствами «распределенных информационных систем». Для этих структур предлагается построение их из однотипных элементов – «триад», объединяющих в каждом сенсорную, управляющую и актиuatorную компоненты. Такие триады можно считать аналогами биологических клеток.

Клетки – триады должны объединяться в общую систему, элементы системы информационно связаны между собой как непосредственно, так и с использованием центрального управляющего звена. Такая общая система обеспечивает согласованное действие всех триад, достижение общих для системы целей.

1. Умная пыль – структура с полным отсутствием механических связей между элементами, каждый из которых обладает возможностью собственного передвижения или за счет собственного движителя, или пассивного перемещения в потоках внешней среды. Информационные связи возможны между элементами при их случайном соединении, но основное управляющее воздействие оказывает центральное управляющее звено. В основе деятельности элементов лежит асинхронная (несинхронизированная) деятельность.

Область применения: - наблюдение за погодой и радиационной обстановкой («пыль» разбрасывается с самолета); - аэро- и гидродинамические измерения в потоках; - диагностические и ремонтные работы внутри трубопроводов, горячих зон, работающих двигателей; - поиск потерянных предметов и др.

2. Умная поверхность – структура, обладающая жестким, фиксированным расположением элементов в узлах сетки. Движение элементов или деформация сетки возможны не по инициативе элементов, а по командам центрального звена, куда поступает информация от элементов. Такие поверхности могут гасить турбулентность и уменьшать аэро- и гидродинамическое сопротивление; могут быть активными гасителями шума; могут быть использованы в оптических адаптивных (приспособливающихся) системах.

3. Умная структура – структура, в которой пространственные элементы имеют собственные силовые устройства и функционируют не только по собственной инициативе, но и под влиянием соседних элементов (элементы робототехники – руки, ноги и др.; распределенная система реактивной тяги и управления летательными аппаратами и др.).

## Лекция 2 3 МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И МАСШТАБИРОВАНИЕ

### 3.1. Миниатюризация и законы подобия

Микромеханические элементы МЭМС во многих случаях являются уменьшенными подобиями элементов обычных механических устройств – в МЭМС применяются микробалки, микроконсоли, микромембранны и т.д. Характерные размеры микромеханических элементов от 0,1 до 100 мкм, что примерно в тысячу раз меньше, чем в обычной макромеханике. Однако при уменьшении характерных размеров изменяется относительная роль различных физических воздействий на элементы микросистем. Так, уменьшение размеров приводит к тому, что существенно увеличивается роль поверхностных сил и процессов.

Рассмотрим отношение поверхности к объему у единичного механического элемента, имеющего форму куба с длиной  $l$  ребра куба.

$$M = \frac{S}{V} = \frac{6l^2}{l^3} = \frac{6}{l}. \quad (6.1)$$

При уменьшении  $l$  в тысячу раз отношение  $M$  поверхности к объему вырастает также в тысячу раз, т.е. в микросистемах поверхностные силы и процессы играют в 1000 раз большую роль, чем в микросистемах. Это отражается в том, что собственным весом (т.е. проявлением гравитации) в микроустройствах можно в ряде случаев пренебречь; уменьшаются характерные времена процессов переноса тепла теплопроводностью или вещества путем диффузии (в  $M^2$  раз, т.е.  $\sim$  в  $10^6$  раз). Ставятся значимыми такие механические силы, роль которых в микромеханизмах была незаметной: - силы межмолекулярного взаимодействия при сближении поверхностей элементов; - силы внутренних механических напряжений в микротонких слоях вещества; - силы поверхностного натяжения.

### 3.2. Адгезия твердых тел друг к другу (Зимон)

При соприкосновении тел друг к другу возникает их прилипание, играющее значительную роль в случае тел микронных размеров. Прилипание тел характеризуют термином «адгезия».

Значительную роль в возникновении адгезии играют силы межмолекулярного притяжения сближающихся при соприкосновении тел. Причиной адгезии могут быть также: - возникновение электрического слоя в месте контакта; - действие капиллярных сил жидкости, конденсирующейся в зазоре между контактирующими телами во влажной атмосфере; - кулоновские силы, возникающие в случае заряженных тел. Могут быть и другие причины адгезии тел.

Молекулярные силы могут действовать и до непосредственного соприкосновения тел.

### 3.3 Молекулярное взаимодействие при небольших зазорах между контактирующими телами

Расстояние между телами, при которых проявляются молекулярные силы, составляет не более нескольких диаметров молекул.

Энергия взаимодействия двух молекул, находящихся на расстоянии  $H$ , определяется выражением:

$$E = -\frac{\lambda}{H^6}, \quad (6.2)$$

где  $\lambda$  - константа взаимодействия.

В случае контактирования тел в молекулярном взаимодействии каждой молекулы одного тела участвует несколько молекул другого тела, их взаимодействия суммируются. Молекула в целом электрически нейтральна, однако ее электрические заряды образуют диполь и индуцируют у соседних молекул переменные быстро изменяющиеся электрические диполи, которые притягиваются к исходному. Энергия притяжения между двумя телами может рассматриваться как сумма энергий притяжения между диполями соответствующих пар молекул, из которых состоят данные тела.

Рассматриваемые силы взаимодействия называются дисперсионными, а взаимодействие – Ван-дер-Ваальсовским.

При сближении двух плоскостей в вакууме энергия взаимодействия единицы площади контакта равна:

$$E = -\frac{A}{12\pi H^2}, \quad (6.3)$$

а удельная сила их взаимодействия равна

$$F = \frac{A}{6\pi H^3}. \quad (6.4)$$

Здесь  $A$  – константа молекулярного взаимодействия тел (константа Ван-дер-Ваальса), учитывает взаимную энергию всех пар элементарных объемов двух тел.

Для многих металлических и стеклянных тел величина  $A$  измерена экспериментально и равна  $A = (1 \div 8) \cdot 10^{-19}$  Дж. Для двух полированных

поверхностей с зазором между ними  $H = 15 \text{ A}^\circ = 15 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  получим величину удельной силы, равную  $F \approx 6,3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ .

### 3.4 Электрические силы, определяющиеся контактной разностью потенциалов

Из курса физики известно, что контактная разность потенциалов возникает между двумя различными металлами, если их провести в соприкосновение.

Классическое объяснение возникновения контактной разности потенциалов состоит в следующем. Электроны при контакте, совершая тепловое движение, переходят преимущественно из того металла, у которого работа выхода  $A$  электронов меньше, в тот, у которого работа выхода больше, а также из того, у которого концентрация электронов больше. Величина контактной разности потенциалов определяется выражением:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (6.5)$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов двух металлов;  $A_1 - A_2$  - разность их работ выхода;  $n_1$  и  $n_2$  - концентрации электронов в первом и втором металлах;  $e$  - заряд электрона;  $T$  - термодинамическая температура металлов;  $k$  - постоянная Больцмана.

Для различных пар металлов контактная разность потенциалов составляет от нескольких десятых до единиц вольт.

На рис. 6.1 показано распределение потенциалов в области контакта двух разнородных металлов в случаях непосредственного контакта (а) и контакта с наличием в области смыкания деталей диэлектрических прослоек или воздушных зазоров (б).

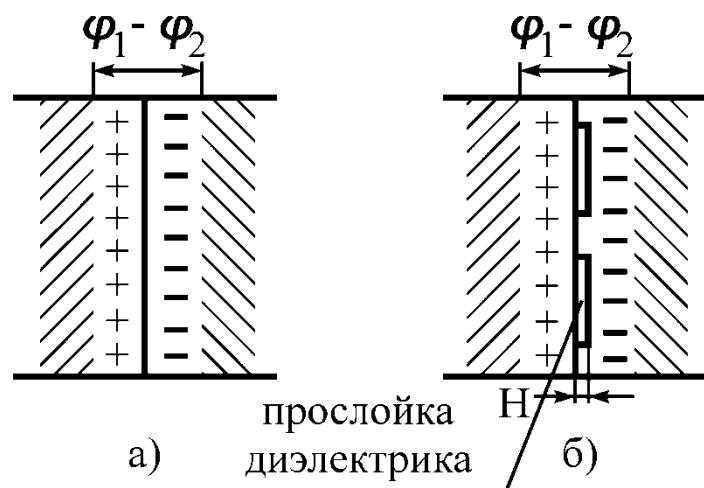


Рис. 2.1.(6.1). Образование двойного электрического слоя в области контакта двух металлов

В области смыкания деталей образуется двойной электрический слой, падение напряжения на котором равно  $\varphi_1 - \varphi_2$  (формула 6.5). На рис. 6.1, б, по обе стороны прослойки в области смыкания имеется разность потенциалов, также равная  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Возникающая при этом сила притяжения поверхностей металлов определяется выражением

$$F = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2H^2} \cdot S, \quad (6.6)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость прослойки;  $H$  – ее толщина;  $S$  - площадь участка прослойки.

Принимая  $H = 10 \text{ \AA}^\circ = 15 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $\varphi_1 - \varphi_2 = 1 \text{ В}$ ,  $\varepsilon = 1$  (воздух) получим для механического напряжения  $F / S$  в области прослоек значение  $F / S = 0,44 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ . Для сравнения: предел прочности многих металлов составляет  $10^8 \div 10^9 \text{ Н/м}^2$ . В работе [24] эффект прилипания подвижных микропластин к подложке устраняется уменьшением площади контакта деталей за счёт использования в области их соприкосновения микрорёбер.

## Лекция 3

### 3.5 Капиллярные силы

В зазоре между контактирующими телами происходит конденсация паров воды из окружающей атмосферы и образуется мениск жидкости (рис. 6.2.).

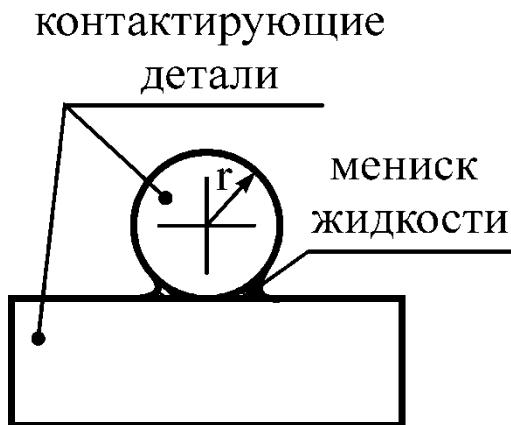


Рис. 2.2.(6.2). Образование мениска жидкости в области контакта

Поверхностный слой молекул жидкости с одной стороны граничит с газом, с другой стороны – с другими молекулами жидкости. На каждую молекулу жидкости со стороны других молекул действуют силы притяжения. На молекулы поверхностного слоя действуют молекулярные силы только изнутри жидкости, это значит, что молекулы поверхностного слоя оказывают на жидкость давление, называемое молекулярным (внутренним). На поверхности возникают силы *поверхностного натяжения*, которые стремятся сократить площадь поверхности. Поверхностное натяжение  $\sigma$  равно отношению силы поверхностного натяжения к длине отрезка, на которую действует эта сила:

$$\sigma = F / l.$$

При обычных условиях поверхностное натяжение жидкой воды  $\sigma \approx 7,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

Таким образом, мениск воды на рис. 6.2 притягивает одну деталь к другой. Сила этого притягивания равна

$$F_0 \approx 4\pi\sigma r, \quad (6.7)$$

где  $r$  - радиус кривизны шарообразной детали. Для шарика диаметром  $2r = 1$  мкм, изготовленного из алюминия, имеющего массу  $m$ , отношение силы притягивания к весу шарика порядка нескольких миллионов

$$(F_0 / (mg) \approx 7,5 \cdot 10^6).$$

### 3.6 Соотношения между различными составляющими сил захвата микророботов

- Молекулярная компонента сил начинает проявляться до непосредственного контакта поверхностей деталей, обусловлена свойствами соприкасающихся тел и зависит от площади истинного контакта;
- Влияние контактной разности потенциалов возникает только при контакте деталей, и электрические силы притяжения деталей тем больше, чем больше эта разность. Силы пропорциональны площади контакта.
- Капиллярные силы возникают при наличии мениска жидкости и проявляются при относительной влажности воздуха, превышающей 65%.

### 3.7 Внутренние механические напряжения в тонких пленках

При изготовлении микромеханических устройств из тонких пленок, нанесенных на подложки, часто наблюдаются нежелательные эффекты: пленки растрескиваются, отслаиваются от подложек; тонкопленочные детали после растворения жертвенного слоя и отделения от подложек на которых их формировали, скручиваются, теряют свою плоскую форму. Причиной этих эффектов является возникновение в осаждаемых пленках больших внутренних механических напряжений.

Установлено, что напряжение в тонких пленках состоят из двух основных компонент. Одна возникает из-за различия термических коэффициентов расширения пленки и подложки, проявляющегося вследствие того, что нанесение пленки на подложку происходит при более высокой температуре, чем при эксплуатации микромеханического устройства.

Другая компонента, называемая «собственными» напряжениями, связана с загрязнениями пленки и неполным структурным упорядочением, происходящим в пленке в процессе ее роста.

### 3.8 Термические напряжения

Обычно тонкие пленки выращивают на подложке при повышенной температуре, отличающейся от комнатной на  $\Delta T$ . После нанесения пленки полученная структура охлаждается до комнатной и остается скрепленной с подложкой. И подложка, и пленка при охлаждении сокращаются в размере. Их коэффициенты термического расширения различны, поэтому пленка сократится не так, как если бы она была свободной от сцепления с подложкой. Ее относительная деформация  $\varepsilon_{nl}$  оказывается равной

$$\varepsilon_{nl} = (\alpha_{nl} - \alpha_{подл}) \Delta T, \quad (6.8)$$

где  $\alpha_{nl}$  и  $\alpha_{подл}$  - коэффициенты термического расширения плёнки и подложки.

Механические напряжения в плёнке можно вычислить по закону Юнга для деформаций при упругих напряжениях; получим:

$$\sigma_{nl} = E_{yo} \cdot \varepsilon_{nl}, \quad (6.9)$$

где  $\sigma_{nl}$  - механические напряжения в плёнке;  $E_{yo}$  - модуль Юнга для плёнки.

При нанесении металлических плёнок ( $\alpha_{nl} \sim (10 \div 20) \cdot 10^{-6} /^\circ C$ ) на стеклянные подложки ( $\alpha \sim 8 \cdot 10^{-6} /^\circ C$ ) напряжения в полученной плёнке растягивающие, положительные.

Например, при нанесении алюминиевых плёнок ( $\alpha_{Al} = 23 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ ,  $E_{yo} = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ) на стеклянные подложки при температуре  $\Delta T = 250^\circ C$  величина термического механического напряжения равна  $\sigma = (23 - 8) \cdot 10^{-6} \cdot 250 \cdot 0,7 \cdot 10^{11} = 0,26 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

Вклад термического напряжения в полное механическое напряжение при нанесении металлических плёнок напылением в вакууме на стекло составляет  $\sim 5 \div 10\%$ .

#### 4 ЭФФЕКТЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАБОТЕ МИКРОСЕНСОРОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЗМОВ МСТ

Сенсоры и исполнительные микромеханизмы МСТ обладают свойством преобразовывать энергию одного вида движения в другой вид.

Ниже кратко рассматриваются преобразователи, имеющие пьезоэлектрическую, магнитострикционную, электростатическую, электротермическую природу.

##### 4.1. Пьезоэлектричество

Ряд твердых кристаллических диэлектрических веществ благодаря особому расположению электрических зарядов в своей структуре обладает способностью под действием механических усилий, нагревания вырабатывать электрические сигналы, при помещении в электрические поля - деформироваться или возбуждать механические напряжения.

В таких кристаллах при растяжении и сжатии по некоторым направлениям возникает электрическая поляризация. В результате этого на противоположных поверхностях кристаллов появляются электрические заряды разных знаков – прямой пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрическими свойствами могут обладать только ионные кристаллы. Кристаллические решетки положительных и отрицательных ионов, из которых построены такие кристаллы, при

механическом воздействии на кристалл деформируются по-разному, смещаются друг относительно друга, и на поверхности выступают электрические заряды разных знаков.

Не всякие кристаллы обладают пьезоэффеом. Внутреннее строение кристаллов характеризуют расположением атомов в элементарной ячейке кристалла – простейшей повторяющейся совокупности атомов, из которых кристалл состоит. Существует несколько десятков видов элементарных ячеек. Для существования эффекта необходимо наличие в кристалле одной или нескольких полярных осей (направлений). Полярная ось – всякая прямая, проведенная через кристалл, оба конца которой не равнозначны, то есть невзаимозаменяемы. Возникновение пьезоэлектрического эффекта в кристалле кварца рассмотрим с помощью упрощенной схемы элементарной ячейки кристалла на рис. 10.

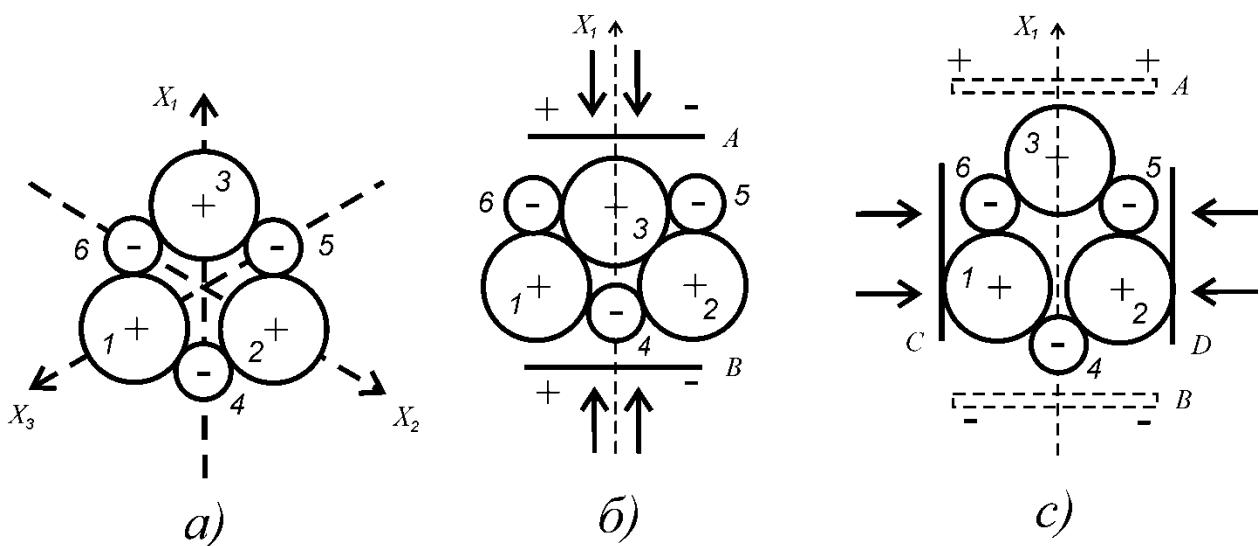


Рис. 4.1. (10.) Возникновение поляризации под действием механических деформаций

Химическая формула кварца –  $\text{SiO}_2$ . На рис. 10 положительные ионы кремния 1, 2 и 3 изображены большими кружками, а маленькие кружки 4, 5 и 6 – отрицательные ионы кислорода. Из рис. 10 а) видно, что полярные оси  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  проходят каждая сквозь пару разнополярных ионов, образующих собой электрический диполь, являются осями диполей.

Если подвергнуть ячейку сжатию вдоль полярной оси  $X_1$  (рис. 10 б)), то ион кремния 3 и ион кислорода 4 вклиняются между соседними ионами. В результате на плоскости А пластинки, состоящей из множества подобных элементарных ячеек, появится избыточный отрицательный заряд, так как отрицательные ионы стали к этой плоскости ближе, а на плоскости В – положительный заряд.

Эффект возникновения заряда в данном случае является продольным пьезоэлектрическим эффектом.

При сжатии в боковом направлении (рис 10 в) на плоскости А появляется положительный, на плоскости В – отрицательный заряды, наблюдается поперечный пьезоэлектрический эффект. Видим, что знаки зарядов в продольном и поперечном эффектах противоположны.

Если заменить сжатие растяжением, то произойдет изменение знаков электрических зарядов при пьезоэффе

Анализ рисунков показывает, что поляризация пропорциональна деформации кристалла, которая сама пропорциональна деформируемой силе. Поэтому величина образующегося при пьезоэффе избыточного электрического заряда (поляризация кристалла) пропорциональна приложенной силе.

Кварцевые пластинки из монокристалла вырезают так, чтобы пара плоскостей пластинки была перпендикулярна к одной из полярных осей (рис. 11). Такая ось называется также электрической осью или пьезоосью.

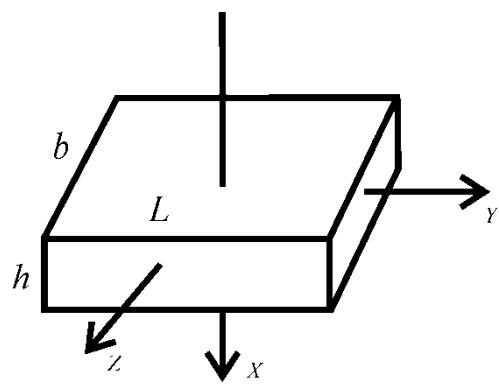


Рис. 4.2. (11.) Пластинка, вырезанная из пьезокристалла

При растяжении пластинки вдоль оси X нижняя поверхность пластинки электризуется положительно, а верхняя – отрицательно.

Такие же заряды возникают при сжатии пластинки вдоль оси Y, которая называется механической осью. При замене сжатия на растяжение знаки зарядов меняются на противоположные.

Поляризация  $P_x$  кварцевой пластинки при растяжении или сжатии определяется выражением:

$$P_x = d_{11} (\sigma_x - \sigma_y), \quad (3.19)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – механические напряжения, действующие параллельно осям X и Y, а  $d_{11}$  – постоянная, называемая пьезоэлектрическим модулем.

Для кварца  $d_{11} = -2,31 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$ . Поставим на кварцевую пластинку груз массой  $m=1$  кг. При площади пластины  $S=1 \text{ см}^2$  в ней создается механическое напряжение  $\sigma_x = \frac{mg}{S} = \frac{1 \cdot 10}{10^{-4}} = 10^5 \text{ Па}$ . Механическое напряжение  $\sigma_y = 0$ .

Поляризация пластины  $P_x = d_{11}\sigma_x = 2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5 = 2,31 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$ , чему соответствует возникшее внутри пластины электрическое поле

напряженностью  $E = \frac{P_x}{\epsilon_0 \epsilon} = 2,6 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . При толщине пластины  $h=0,5 \text{ см}$  она

заряжается до разности потенциалов  $\varphi = E \cdot h = 2,6 \cdot 10^4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 130,5 \text{ В}$ .

Для того, чтобы использовать поляризационные заряды, появляющиеся на противоположных гранях кварцевой пластины при ее деформации, эти грани снабжают металлическими обкладками. На обкладках индуцируются заряды, равные и противоположные по знаку поляризационным, а во внешних проводах, соединяющих обкладки, в момент приложения силы возникает электрический ток.

Существует также обратный пьезоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении в кристалле механических напряжений и деформаций при внесении кристалла в электрическое поле. Величину деформаций можно рассчитать, используя то же значение пьезоэлектрического модуля  $d_{11}$ , что и при прямом эффекте:

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h} = -d_{11} \cdot E_x, \quad (3.20)$$

где  $\epsilon_h$  - относительная деформация пластины по толщине,  $\Delta h$  - изменение толщины,  $E_x$  - напряженность электрического поля в пластине.

Пьезоэлектрическими свойствами обладают также многие природные вещества – *сегнетова соль, турмалин, титанат бария*; промышленность выпускает *пьезокерамику*.

## Лекция 4

### 4.2. Магнитоупругие явления и магнитострикционные преобразователи

Источником магнитных явлений в веществе является наличие магнитных свойств у атомов, их можно представлять маленькими магнитами. Существуют магнитострикция и магнитоупругий эффект.

Магнитострикция – изменение размеров и формы тела при его намагничивании. При магнитострикции вследствие намагничивания изменяется ориентация атомов в веществе, расстояние между ними, в результате деформируется образец. Магнитоупругий эффект является обратным эффектом – изменяются магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнитных тел при возникающих в них механических напряжениях. Изменение магнитной проницаемости составляет  $0,5\div3\%$  при изменении механической напряженности на 1 МПа.

Магнитоупругое взаимодействие обусловлено тем, что взаимодействие магнитных моментов атомов или ионов в веществе зависит от расстояния между ними. Изменение расстояния между частицами при деформации образца изменяет силу взаимодействия между ними, а, следовательно, и их средние магнитные моменты, т.е. намагниченность образца.

Магнитострикция и магнитоупругие свойства наиболее сильно проявляются у ферромагнетиков, что объясняется их доменной магнитной структурой. Вещество ферромагнетика внутри домена самопроизвольно намагнично до насыщения; это намагничение сопровождается спонтанной (самопроизвольной) деформацией кристаллической решетки, т.е. расстояние между соседними узлами решетки, в направлении спонтанного намагничивания, совпадающего с ребром кубической решетки, имеет иную величину, чем в поперечном направлении. Она больше при положительной магнитострикции (удлинении) и меньше при отрицательной. На рис. 19 показано, как происходит магнитострикция монокристалла, имеющего форму бруска, продольная ось которого совпадает с ребром куба элементарной ячейки. На рис. 19,а состояние при температуре выше точки Кюри (парамагнитное), когда домены отсутствуют. (точка Кюри – температура, при нагревании до которой исчезают ферромагнитные свойства).

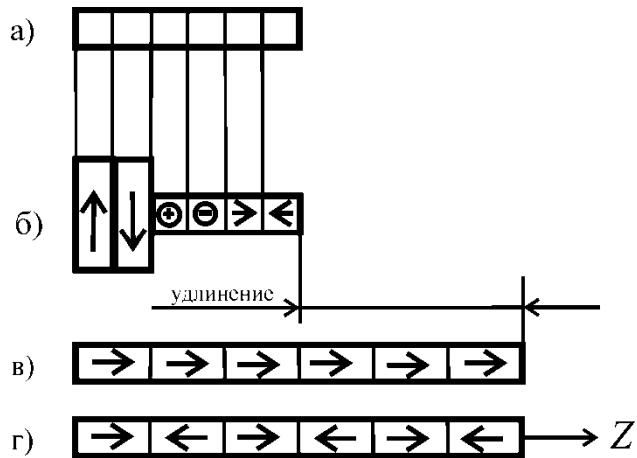


Рис. 4.3. (19). Изменение размеров и доменной структуры ферромагнетика при изменениях температуры магнитного поля и механической нагрузки на образец

При охлаждении ниже точки Кюри отдельные части бруска (условно он разделен на шесть одинаковых кубиков), превращаются в домены, причем направление намагниченности доменов и связанные с ними деформации решетки равномерно распределены по всем шести направлениям осей (рис. 19,б). Так как на рисунке магнитострикция принята положительной, кубы превращаются в прямоугольные параллелепипеды, растянутые в направлении намагниченности и укороченные в двух других перпендикулярных направлениях, так что их объем не изменяется. Длина бруска в целом не меняется. После намагничивания бруска до насыщения вдоль его продольной оси, все шесть областей повернутся в направлении поля и образец удлинится (рис. 19,в). Удлинение  $\Delta\ell$  равно:

$$\Delta\ell = \ell k_M H$$

Здесь  $k_M$  - магнитострикционный коэффициент,  $H$  - напряженность магнитного поля в бруске.

Пример. Стержень длиной  $\ell = 100$  мм из никеля, обладающего магнитострикционным эффектом, помещен в катушку с током, обеспечивающей напряженность магнитного поля  $H = 8 \cdot 10^3$  А/м. Величина магнитострикционного эффекта изменяется у никеля приблизительно линейно в диапазоне магнитных полей 0 –  $10^4$  А/м. Справочные данные магнитострикционного коэффициента никеля:  $k_M = -2,5 \cdot 10^{-9} (A/m)^{-1}$ . Получим величину изменения длины стержня:  $\Delta\ell = -\ell k_M H = 0,1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 8 \cdot 10^3 = -2 \cdot 10^{-6}$  м. Отрицательная величина означает укорочение стержня, то есть, у никеля магнитострикционный эффект отрицательный.

Рассмотрим явления, происходящие при обратной магнитострикции. При растяжении ненамагниченного тела его домены стремятся занять такую ориентацию, чтобы их векторы намагниченности были преимущественно параллельны направлению растяжения  $Z$  (рис. 19,г). Возникает удлинение, вызванное растягивающим усилием, но намагниченности образца в целом, естественно, еще нет, т.к. число доменов с намагниченностью, направленной

вправо и налево, одинаково. Однако, намагничивание такого образца, подвергнутого растяжению, происходит легче, чем без нагрузки, т.к. ориентация доменов в направлении поля частично уже совершилась за счет растяжения.

Изменение наклона кривой намагничивания свидетельствует об изменении магнитной проницаемости вещества. Если из ферромагнетика изготовлена замкнутая магнитная цепь, и в ней создан постоянный магнитный поток  $\Phi$ , например, с помощью катушки с током, то при воздействии на магнитную цепь изменяющегося во времени механического напряжения, в другой катушке с числом витков  $N$ , намотанной на магнитный сердечник цепи, возникает ЭДС электромагнитной индукции

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} = -\mu_0 N S H \frac{d\mu}{dt} \quad (4.27)$$

где  $S$  - площадь сечения сердечника,  $\mu_0$  -магнитная постоянная. Магнитный поток изменяется при действии механического напряжения, так как изменяется магнитная проницаемость ферромагнетика.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt}(\mu_0 \mu H) = \mu_0 H \frac{d\mu}{dt} \quad (4.28)$$

#### 4.3. Электростатические преобразователи

Электростатический преобразователь преобразует электрическую потенциальную энергию в механическую потенциальную энергию или в механическую работу. Простейший электростатический преобразователь является электрическим конденсатором, содержит два электрода площадью  $S$ , параллельно расположенных на расстоянии  $\delta_0$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .

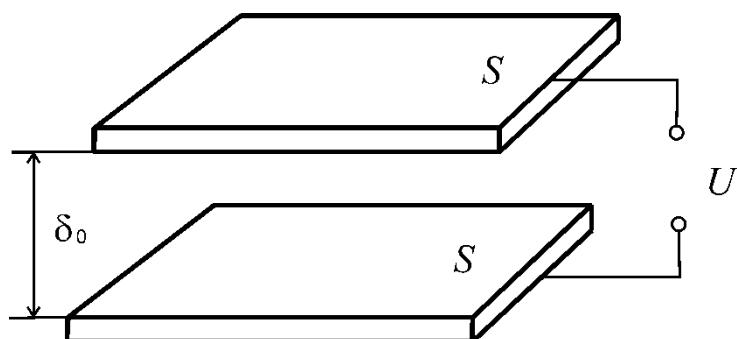


Рис. 4.4. (66.) Электростатический преобразователь

При приложении между электродами электрического напряжения возникает сила, притягивающая обкладки друг к другу, которая сжимает вещество между обкладками и создает в нём механические напряжения. Преобразователь характеризуется параметрами: напряжение  $U$  между пластинаами, заряд конденсатора  $q = CU$ , где  $C$  – емкость конденсатора, равная при плоскопараллельном расположении пластин

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / \delta_0,$$

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная, ток разряда конденсатора  $i = dq/dt$ , энергия электрического поля конденсатора  $W_c = qU/2 = CU^2/2$  (рис. 66).

Пластины электростатически притягиваются друг к другу с силой:

$$f_{ec} = \frac{dW_c}{dx} = \frac{CU^2}{2\delta_0} = \frac{CU}{2} \cdot \frac{U}{\delta_0} = \frac{CUE}{2}, f = -\frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$$

где  $E$  – напряженность электрического поля между пластинами.

Электростатические преобразователи позволяют производить преобразование механического перемещения в электрический сигнал (ток или напряжение) за счет изменения емкости преобразователя, вызванного этим перемещением, а также производить микроперемещения упруго закрепленных обкладок при подаче между обкладками электрического напряжения.

Электростатические преобразователи замечательны своей простотой, что позволяет создавать прочные и надежные конструкции.

В случае использования в качестве преобразователя плоского конденсатора, перемещение обкладки необходимо производить либо в собственной плоскости ( $S$  – переменная,  $\delta_0$  – постоянная), либо перпендикулярно своей плоскости ( $S$  – постоянная,  $\delta_0$  – переменная).

## Лекция 5

### 4.4. Электрострикционные преобразователи

Электрострикция - это механическая деформация материала и изменение его показателя преломления под действием электрического поля. Эффект происходит вследствие непосредственного взаимодействия атомов и молекул вещества с электрическим полем, без учёта сил, действующих на вещество со стороны обкладок. Свойством в разной степени обладают все диэлектрические материалы. Под влиянием электрического поля заряды разных знаков в диэлектрике смещаются в противоположные стороны, изменяется поляризация вещества, что приводит к изменению длин и углов внутримолекулярных связей, деформации диэлектрика. Та часть деформации, которая пропорциональна квадрату напряженности поля и не зависит от изменения его направления на обратное, и называется электрострикцией. Рассмотрим систему в виде конденсатора, пространство между обкладками которого заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Сила притяжения единицы поверхности пластин друг к другу равна

$$f = -\frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} \quad (6.10)$$

Эта сила складывается из упругой силы  $f_{up}$  (противодействующей электростатической силе притяжения обкладок) и электрической силы  $f_{el}$ . Разделение сил приводит к выражению:

$$f = f_{up} - (\epsilon + \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}) \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \quad (6.11)$$

Второй член в скобке отражает изменение диэлектрической проницаемости с изменением плотности  $\rho$  диэлектрика. Таким образом, член  $-\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$  обозначает дополнительную электрическую силу, называемую электрострикционной.

Самая большая деформация достигается в электрострикционных преобразователях, самая большая максимальная сила генерируется в магнитострикционных приводах. В пьезоэлектрических материалах зависимость между силой и напряженностью приложенного поля линейная, тогда как в электрострикционных – зависимость квадратичная.

## 5 ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МИКРОСИСТЕМ

В этом разделе рассматриваются принципы действия некоторых наиболее распространенных датчиков различных физических величин – температуры, механических величин, химического состава.

Наиболее удобной формой выходного сигнала датчика является электрический сигнал, поэтому датчик должен преобразовывать физическую

природу сигнала от исследуемого объекта. Датчик по своему принципу действия должен быть измерительным преобразователем.

Для измерения температуры, влажности, многих механических величин, химического состава существуют измерительные преобразователи, непосредственно преобразующие входную физическую величину в электрический сигнал. При измерениях некоторых механических величин – ускорения, силы, перемещений – измерительное преобразование выполняют в два или большее число этапов: вначале измеряемая механическая величина преобразуется в другую механическую величину, например, при измерении силы она преобразуется в перемещение, затем, на втором этапе преобразуется новая механическая величина в электрическую (перемещение преобразуется в электрический ток или электрический заряд).

### *5.1. Упругие измерительные преобразователи*

Входной величиной измерительных упругих преобразователей механических величин может быть сосредоточенная сила, крутящий момент (пара сил), давление.

Указанная величина воздействует на упругий элемент и вызывает его деформацию. Эта деформация воспринимается или непосредственно наблюдателем, или дополнительным измерительным преобразователем, который реагирует на перемещения или скорость перемещения области упругого преобразователя.

Деформация может быть упругой, если после прекращения действия силы она исчезает. Деформация может быть пластической, если она сохраняется после прекращения воздействия.

При действии на тело внешней деформирующей силы расстояние между атомами вещества изменяется.

При упругой деформации тело оказывает “противодействие” стремлению изменить форму или размер тела. Причиной противодействия является наличие между атомами вещества сил притяжения и отталкивания, баланс между которыми изменяется, когда изменяются расстояния между атомами. На рис.1 показана зависимость потенциальной энергии  $U$  взаимодействия между атомами вещества от расстояния  $r$  между ними.

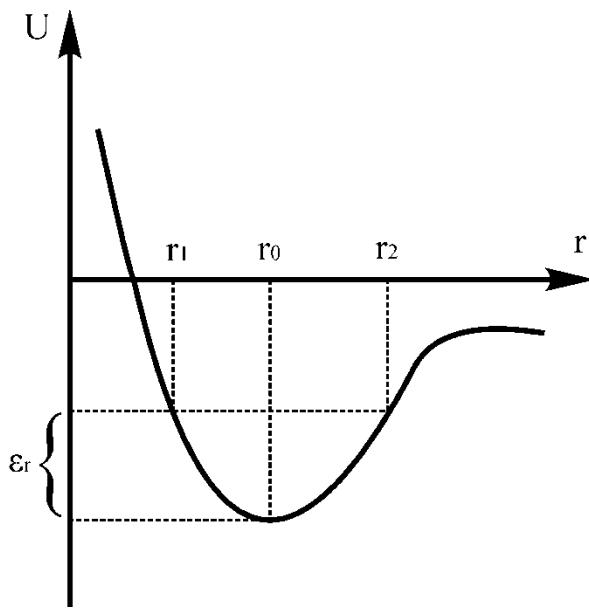


Рис.4.16. (1.) Изменение потенциальной энергии взаимодействия атомов с расстоянием между ними

При некотором расстоянии  $r = r_0$  потенциальная энергия имеет минимальное значение  $U_{\min}$ , при этом расстоянии силы притяжения и отталкивания атомов уравновешивают друг друга. Сила отталкивания превалирует при сближении атомов, когда  $r < r_0$ , сила притяжения – когда атомы удаляются. Вследствие теплового движения атомы колеблются, и расстояние между ними изменяется между значениями  $r_1$  и  $r_2$ . Средняя энергия колебательного движения и есть энергия теплового движения и обозначена на рис.1. как  $\bar{\varepsilon}$ .

Мысленно рассечем некоторое тело плоскостью. По обе стороны этой плоскости окажутся атомы, и если начнем разделять тело, стремясь удалить “половинки” друг от друга, увеличение расстояний между атомами приведет к увеличению сил притяжения между ними. Сила притяжения “половинок” и есть упругая сила, препятствующая деформации тел. Ее величина:

$$F_{\text{упр}} = f \cdot n_0 \cdot S, \quad (1)$$

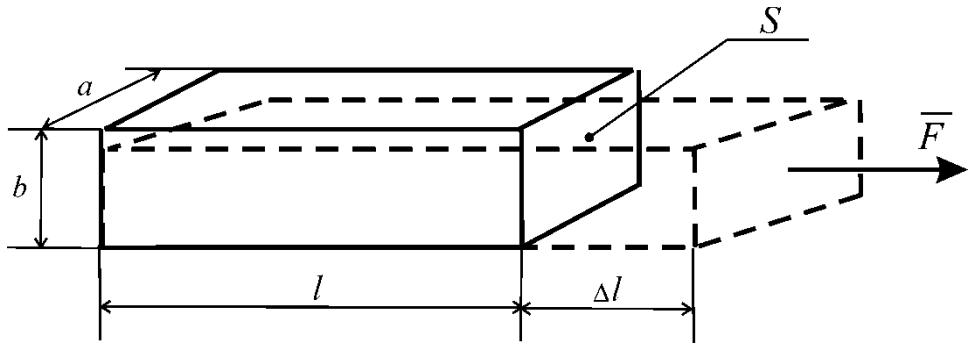
где  $n_0$  – число атомов в единице поверхности сечения тела,

$S$  – площадь сечения тела,  $f$  – сила притяжения двух атомов. Величина этой силы при малых изменениях расстояния между атомами линейно зависит от изменения расстояния  $\Delta r$ :

$$f = -k\Delta r, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

## Растяжение и сжатие стержней



Если взять тело в виде длинного прямоугольного бруска (рис.2), то величина упругой деформации тела под действием приложенных сил определяется законом Гука:

$$\sigma = E_{\text{ю}} \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

где  $\sigma = \frac{F}{S}$  - величина силы на единицу площади сечения цилиндра,

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  - относительное удлинение (укорочение) тела длиной  $l$  по направлению силы.  $E_{\text{ю}}$  - модуль Юнга, коэффициент, отражающий своеобразие атомного состава и структуры вещества и целиком определяющийся межатомными силами. Деформация упругая, если она исчезает после устранения силы, ее вызывающей.

Величина  $\sigma$  носит название напряжения (механического напряжения).

При растяжении цилиндр должен сжиматься в поперечнике. Уменьшение  $\Delta a$  его поперечного размера  $a$  пропорционально относительному удлинению:

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta a}{a} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона, положительное число, по величине меньше  $\frac{1}{2}$ .

Если на тело одновременно действует несколько сил, то результирующая деформация находится векторным суммированием деформаций, получающихся при независимом действии сил, то есть действие деформирующих тело сил подчиняется принципу суперпозиции.

## Лекция 6

### Изгиб однородной пластины

Рассмотрим изгиб однородной пластины, которая до изгиба имела прямолинейную форму.

Мысленно вырежем из пластины двумя сечениями, перпендикулярными оси пластины, бесконечно малый элемент длиной  $l_0$  (рис. 7, а) и изогнем его (рис. 7, б).

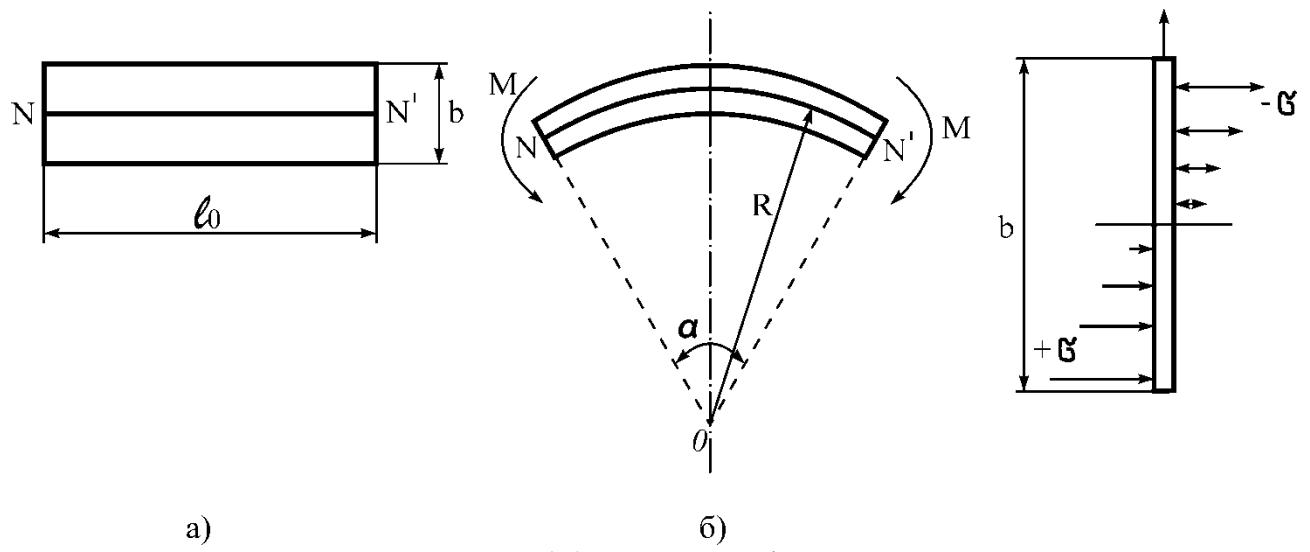


Рис. 4.18. (7.) Изгибная деформация

В результате изгиба все прямые -  $NN'$  и им параллельные – перейдут в дуги окружностей с центрами на оси  $O$ , перпендикулярной плоскости рисунка. Эта ось называется осью изгиба. Наружные волокна пластины, лежащие выше линии  $NN'$ , при изгибе удлиняются, внутренние волокна (ниже линии  $NN'$ ) – укорачиваются. Длина линии  $NN'$  остается неизменной – это нейтральная линия. Таким образом, все наружные волокна растянуты, все внутренние – сжаты. Длина  $l_0$  нейтральной линии равна (рис. 7 б):

$$l_0 = R\alpha, \quad (17)$$

где  $R$  – радиус кривизны нейтральной линии,  $\alpha$  – центральный угол, опирающийся на дугу  $NN'$ .

Волокно пластины, находящееся на расстоянии  $\xi$  от нейтральной линии, имеет длину:

$$l = (R + \xi) \cdot \alpha,$$

а его удлинение  $\Delta l = l - l_0 = \xi \alpha$ . Найдем напряжение растяжения волокна:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0} = E \xi \frac{\alpha}{l_0},$$

или:

$$\sigma = E \xi / R. \quad (18)$$

Напряжение меняется линейно с расстоянием  $\xi$ , ниже нейтральной линии оно отрицательное, т.е. является сжатием. Вследствие симметричности напряжений растяжения и сжатия в сечении пластины сумма всех напряжений, действующих в каждом сечении пластины, равна нулю.

Момент сил напряжений, действующих в сечении относительно оси, проходящей через точку  $N$  плоскости рисунка, равен:

$$M_\sigma = \frac{E}{R} \int_S \xi^2 dS = \frac{E}{R} I_x, \quad (21)$$

где  $I_x = \int_S \xi^2 dS$  - момент инерции поперечного сечения пластины.

В этом выражении вместо массы тела  $m$  (как в случае момента инерции тела) содержится площадь поперечного сечения  $S$ .

Для сечения в виде прямоугольника с шириной  $a$  и высотой  $b$ :

$$I_x = \frac{ab^3}{12}. \quad (22)$$

В соответствии с (21), деформация пластины под действием изгибающего момента  $M_\sigma$  характеризуется радиусом  $R$  кривизны пластины. Это уравнение позволяет также рассчитать изгибную деформацию в более сложных конструкциях.

## 5.2. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи

Основные соотношения для пьезоэфекта были рассмотрены выше. Преобразователи с прямым пьезоэфектом используются в приборах для измерения силы, давления, ускорения, малых масс.

Преобразователи, где используется обратный пьезоэффект, применяются в качестве излучателей ультразвуковых колебаний, преобразователей напряжения в деформацию, например, дефлекторах с колеблющимися зеркалами и др.

Преобразователи, в которых используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты, - пьезорезонаторы, узкополосные фильтры электрических колебаний.

Пьезоэлектрический конденсатором, между обкладками которого располагается слой пьезодиэлектрика.

На рис.74 приведены схемы устройства некоторых пьезоэлектрических преобразователей

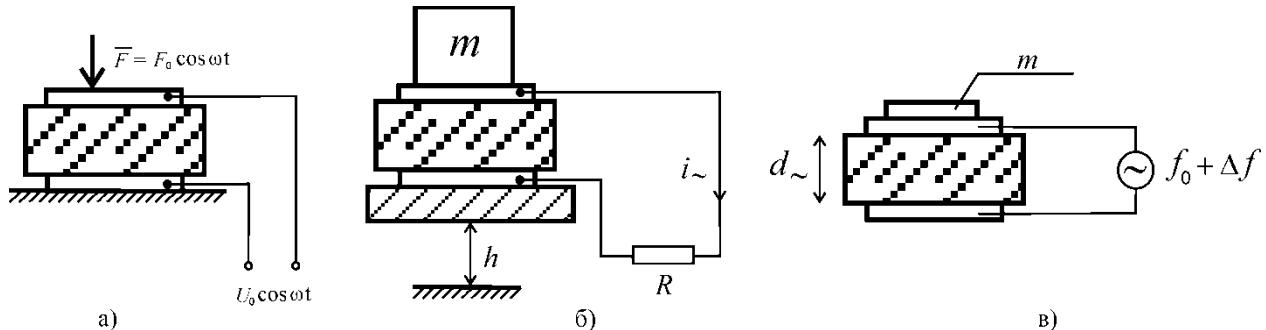


Рис. 4.19. (74.) Пьезоэлектрические преобразователи

Особенностью использования пьезопреобразователей является необходимость учета того, что заряды, возникшие на обкладках, очень быстро нейтрализуются ионами воздуха или стекают по проводникам в виде короткого импульса тока, поэтому измеряемые величины должны быть

На рис.74, а, показан преобразователь переменной силы  $F_{\square} = F_0 \cos \omega t$  в переменное напряжение между обкладками  $U_{\square} = U_0 \cos \omega t$ .

На изменяющемся во времени (рис.74, б), показан преобразователь ускорения, испытываемого пьезодатчиком, совершающим колебательное движение  $h_{\square} = h_0 \cos \omega t$ . Нижней стороной пьезопреобразователь жестко закреплен на вибрирующей платформе, на верхней стороне также жестко крепится груз массой  $m$ , являющийся инерционной массой. Груз вместе с преобразователем колеблется, испытывает ускорение  $a$ , которое обеспечивает действие груза на преобразователь силой, амплитуда которой равна  $F_0 = ma_0$ , которая и вызывает образование переменного заряда на обкладках и переменного тока  $i_{\square}$  в нагрузочном резисторе. Ток является выходным сигналом.

На рис. 74, в, показан масс-чувствительный резонансный пьезопреобразователь. На его обкладки подается переменное напряжение, имеющее частоту  $f$ , совпадающую с собственной частотой механических колебаний пьезоэлектрической пластины, то есть, обеспечивающее резонансные колебания. Если преобразователь нанести слой вещества с массой  $m$ , резонансная частота изменится на величину  $\Delta f$ :

$$\frac{m}{M} = -\frac{\Delta f}{f}, \quad (6.58)$$

где  $M$  - собственная масса пьезопреобразователя вместе с обкладками. Измеряя изменение частоты, можно вычислить затем массу нанесенного дополнительного слоя, Достижима чувствительность к приращению массы  $m = 10^{-7} - 10^{-9} \text{ г/см}^2$ .

## Лекция 7

### 5.3 Тензорезистивные измерительные преобразователи

Тензорезистивный эффект

Тензорезистивный эффект – изменение сопротивления (проводимости) твердых тел (проводников и полупроводников) под действием упругого сжатия или растяжения.

Качественно объяснить изменение величины удельного сопротивления металлов при упругой деформации можно следующим образом. Амплитуда тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки при упругом сжатии металла и уменьшении его объема уменьшится вследствие уменьшения расстояния между атомами, поэтому уменьшится и удельное сопротивление. В соответствии с формулой Бриджмена:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V}, \quad (6.34)$$

где  $C$  – константа Бриджмена,  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  и  $\frac{\Delta V}{V}$  – относительные изменения удельного сопротивления и объема металла.

Значение константы Бриджмена близко к единице:

$$C \approx 1.$$

В случае полупроводников их упругая деформация также приводит к изменению электропроводности, но причины здесь другие. При сжатии полупроводника увеличивается концентрация носителей заряда вследствие изменения (уменьшения) энергии ионизации атомов полупроводника, более легким отрывом электронов от атомов и превращением их в носители тока. Эффект влияния упругой деформации на проводимость в случае полупроводников на два порядка величины больше, чем у металлов.

Тензорезисторы – это датчики, использующие тензорезистивный эффект для измерения механических напряжений в телах и деформаций тел.

Тензорезисторы могут быть как металлическими, так и полупроводниковыми.

Относительное изменение  $\varepsilon_R$  сопротивления  $R = (\rho l)/S$  при деформации резистора определяется формулой:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}, \quad (6.37)$$

т.е. зависит от изменения  $\Delta\rho$  - удельного сопротивления, а также изменений геометрических размеров  $\Delta l$  и  $\Delta S$  - длины  $l$  и площади поперечного сечения  $S$  резистора (рис. 55)

В твердом теле продольная деформация приводит к изменению его поперечных размеров - сторон  $a$  и  $b$  в случае прямоугольного сечения; поперечная деформация пропорциональна продольной, взятой с обратным знаком; учитывая (10), запишем:

$$\Delta a/a = \Delta b/b = \varepsilon_{\perp} = -\mu \varepsilon_l, \quad (6.38)$$

где  $\Delta a$  и  $\Delta b$  - изменения сторон сечения  $S$  резистора.

Учитывая, что  $\Delta S/S = \Delta a/a + \Delta b/b$ , выражение для  $\varepsilon_R$  представим в виде:

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \varepsilon_l. \quad (6.39)$$

Рассмотрим вклад, который вносит в изменение сопротивления резистора относительное изменение  $\Delta\rho/\rho$  его удельного сопротивления.

Относительное изменение удельного сопротивления металла  $\Delta\rho/\rho$  пропорционально величине приложенного к образцу механического напряжения  $\sigma$ :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_M \sigma = E_{\text{io}} \varepsilon_l, \quad (6.40)$$

где  $\pi_M$  - коэффициент пропорциональности, тензорезистивный коэффициент металла.

Подставим выражения (14), (9) в (13):

$$\varepsilon_R = (\pi_M E_{\text{io}} + 1 + 2\mu) \varepsilon_l = k_T \varepsilon_l. \quad (6.41)$$

Величина

$$k_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \pi_M E_{\text{io}} + 1 + 2\mu \quad (6.42)$$

- коэффициент чувствительности. Здесь первый член суммы определяется изменением удельного сопротивления, два последующих – изменением геометрии тела, его удлинением и уменьшением поперечного сечения.

Для многих металлов (константан, нихром, медноникелевые сплавы)  $k_t \approx 2$ . Это означает, что для них основной причиной тензоэффекта является изменение геометрии образца.

Найденное выражение справедливо также для полупроводниковых датчиков. Для изготовления тензорезистивных датчиков из полупроводниковых материалов часто используют кремний. Кремний - анизотропный материал, и его тензорезистивный коэффициент  $\pi_m$  зависит как от ориентации вырезанных из него тензорезистивных полосок относительно кристаллографических осей, так и от типа проводимости ( $p$  или  $n$ ) и концентрации примесей.

В случае использования кремния значение коэффициента тензочувствительности  $k_t$  резистора почти целиком определяется зависимостью удельного сопротивления тензорезистора от механических напряжений. Для кремния  $n$ -типа при указанных условиях  $k_t \approx 100$ .

Часто используют фольговые преобразователи, где "змейка" выполнена вытравливанием металлической фольги, имеющей толщину 4-12 мкм; изготавливают также пленочные тензорезисторы, проводящий рисунок которых изготовлен напылением металла в виде тонкой пленки толщиной менее 1 мкм на диэлектрической подложке.

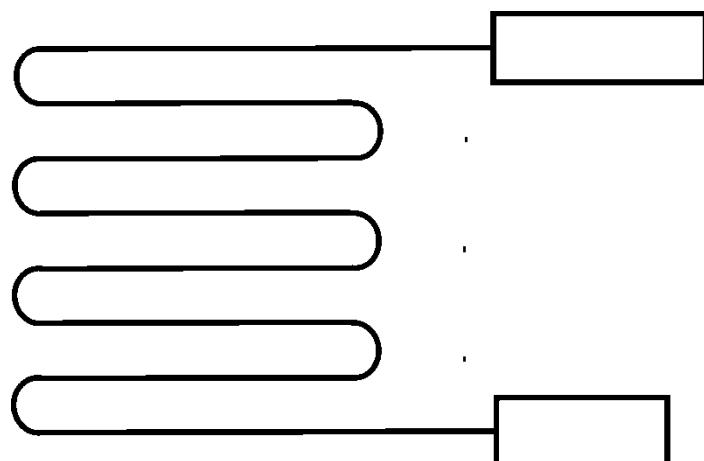
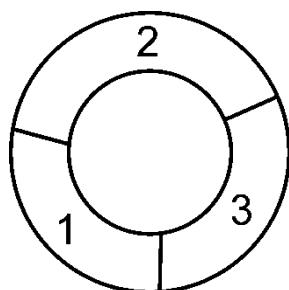


Рис. 4.21. (56.) Схема конструкция тензорезистора

#### 5.4. Термоэлектрические измерительные преобразователи. Природа термоэлектричества

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, называемая контактной разностью потенциалов (КРП). Явление открыто Вольтой в 1797 г. Вольта расположил металлы в ряд по степени увеличения потенциала от одного члена ряда к другому: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. Вольта установил также, что если несколько разных металлов привести в контакт друг с другом, образовав последовательность, то разность потенциалов  $\varphi_n - \varphi_1$  между крайними

металлами ряда не зависит от того, какими промежуточными металлами они разделены, если температуры всех контактов одинаковы.



Если из нескольких металлов образовать кольцо (рис. 58), то из закона сохранения энергии следует, что тока в кольце быть не может, т. е. результирующая ЭДС в кольце равна нулю. Это закон последовательных контактов Вольта.

Рис. 58. Цепь из трех разных металлов

Контактная разность потенциалов для различных пар металлов меняется от нескольких десятых вольта до нескольких вольт и зависит только от химического состава и температуры соприкасающихся металлов.

В соответствии с классической электронной теорией металлов, возникновение КРП и его закономерности определяются двумя основными причинами: существованием работы выхода электронов из металла и разницей в концентрациях свободных электронов в металлах.

**Работа выхода** – работа, которую нужно затратить для удаления электрона из твердого тела в вакуум. Тот факт, что свободные электроны не покидают металл, является подтверждением существования работы выхода.

Причины возникновения работы выхода:

1. Если электрон удаляется на некоторое расстояние от поверхности металла, участвуя в тепловом движении, то в том месте, которое электрон покинул, возникает индуцированный избыточный положительный заряд, и кулоновские силы притяжения между этим зарядом и электроном возвращают электрон в металл (если скорость теплового движения электрона мала).

2. Совокупность временно удалившихся от поверхности электронов образует вблизи металла постоянно существующее облако электронов, а под ним на поверхности возникает слой положительных ионов металла. Облако электронов (отрицательное) и слой ионов (положительный) образуют двойной электрический слой, его толщина порядка нескольких межатомных расстояний. Электрическое поле внутри слоя направлено так, что препятствует выходу свободных электронов из металла в окружающее пространство. Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  в двойном электрическом слое называется поверхностным скачком потенциала и зависит от работы выхода  $A$ :

$$\Delta\varphi = A/e.$$

Если считать, что потенциал среды, окружающей металл, равен нулю, то металл заряжен положительно, потенциальная энергия электрона внутри металла равна  $-Q_e \cdot \Delta\varphi$  и является относительно среды отрицательной (так как заряд электрона отрицательный). Весь объем металла для электронов

проводимости представляет потенциальную яму, глубина которой равна работе выхода  $A$ .

При соприкосновении двух металлов с работами выхода  $A_1$  и  $A_2$ , причем  $A_2 > A_1$ , их электроны вследствие теплового движения пересекают границу между металлами в обе стороны, но преимущественно в металл, для которого работа выхода больше, т.е. в металл 2, он будет заряжаться отрицательно, а металл 1 положительно. По мере перехода электронов в металл 2 разность потенциалов между ними увеличивается и увеличивается обратный переход электронов. Потоки электронов из металла 1 в металл 2 и обратно уравняются, когда работа по перемещению электрона за счет контактной разности потенциалов не станет равной разности работ выхода:

$$e \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = A_2 - A_1,$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = - \frac{A_1 - A_2}{e}.$$

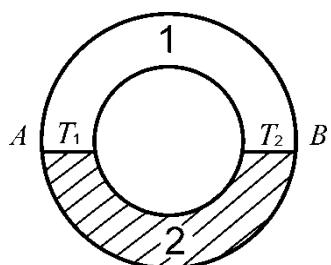
На величину КРП влияет также разность концентраций электронов  $n_1$  и  $n_2$  в металлах. Если  $n_1 > n_2$ , то начнется диффузионный перенос электронов из металла 1 в металл 2, в результате металл 1 зарядится положительно относительно металла 2. Между металлами возникнет дополнительная разность потенциалов:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Обе причины возникновения КРП действуют одновременно, и контактная разность потенциалов, обусловленная ими, равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = - \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Если в замкнутом кольце из разнородных металлов увеличить температуру одного из контактов, то в цепи появится электрический ток. Этот ток называется **термоэлектрическим**. Само явление возбуждения термоэлектрического тока было открыто Зеебеком.



На рис. 59 – кольцо из двух металлов 1 и 2, А и В – контакты между ними,  $T_1$  и  $T_2$  – температуры контактов. Если температуры не равны,  $T_1 > T_2$ , то разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  в контактах также не равны, и в цепи кольца возникает электродвижущая сила  $\xi$ :

Рис. 59. Возникновение термоЭДС (1 и 2 – разные металлы)

$$\xi = (\varphi_1 - \varphi_2)_A + (\varphi_2 - \varphi_1)_B = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Здесь составляющие КРП, обусловленные работами выхода на контактах А

и В, друг друга гасят и потому не учитываются.

Эта ЭДС возникает в замкнутой цепи, она пропорциональна разности температур контактов и называется **термоэлектродвижущей силой**.

Изменение знака у разности температур приведет к изменению направления тока в цепи. Для металлов термоЭДС очень мала, например, для пары медь – константан она составляет 4,25 мВ для разности температур 100°.

## Лекция 8

### 5.5 Термоэлектрические преобразователи

Такие преобразователи еще называют термопарами. На рис. 60 а и б показаны возможные схемы включения термопар в измерительную цепь. Здесь А и В –термоэлектроды, изготовленные из разных металлов. Их место контакта Д находится при температуре  $T_1$ . Цепь замыкается через измерительный прибор  $mV$  с помощью проводников С.

В обоих случаях термоЭДС  $\xi$ , измеряемая прибором, будет одна и та же:

$$\xi = \xi_{T_1} - \xi_{T_2}$$

где  $\xi_{T_1}$  и  $\xi_{T_2}$  – КРП в точках с температурами  $T_1$  и  $T_2$ .

Влияние проводника С не сказывается, т. к. термоЭДС его контактов с термоэлектродами А и В друг друга взаимно нейтрализуют.

Термопары широко используются для измерения температур. Для этого один их спай приводят в соприкосновение с обследуемым объектом, другой оставляют при температуре окружающей среды. Генерируемая термоЭДС будет пропорциональна разности температур спаев:

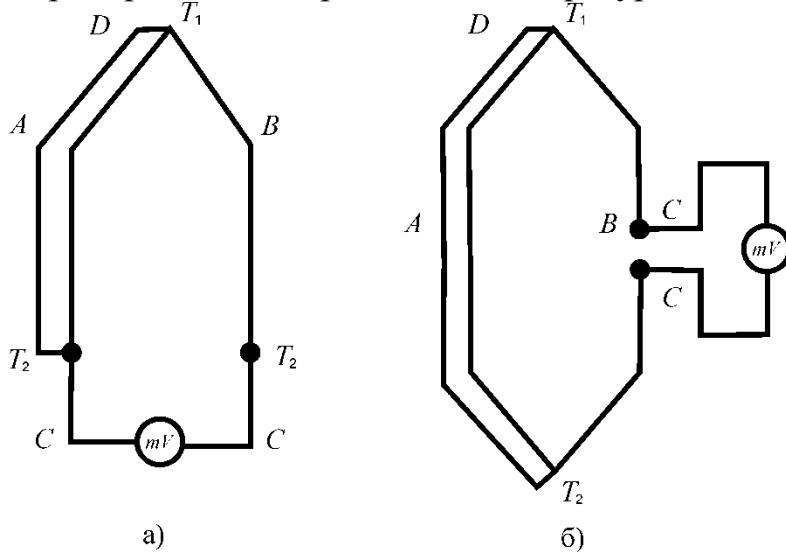


Рис. 60. Схема включения термопар

$$\xi = S(T_2 - T_1)$$

где  $S$  – термоэлектрическая способность термопары.

ЭДС термопары в широком диапазоне температур нелинейно зависит от температуры (рис. 61), однако при измерениях в узком диапазоне температур эту зависимость приближенно можно считать линейной.

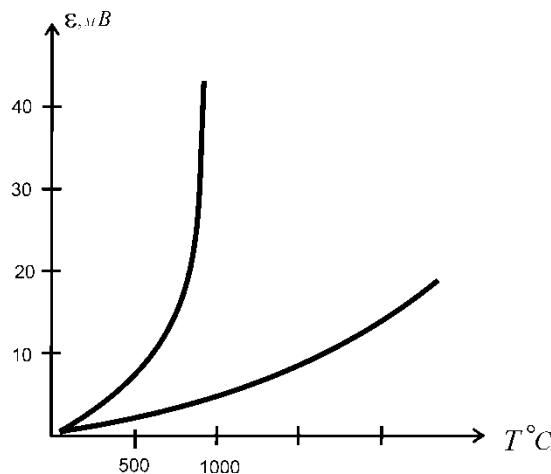


Рис. 61. Зависимость термо-ЭДС от температуры

Для измерений в разных диапазонах температур применяют различные пары металлов. Для измерений при  $T = 1000 - 3000$  К применяют тугоплавкие пары (например, вольфрам / рений 55% - вольфрам / рений 26 %).

Чувствительность термопар к температуре (термоэлектрическая способность  $S$ ) зависит от температуры, выражается в мкВ/°C. Для термопары железо – константан  $S = 52,9$  мкВ/°C при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $S = 63,8$  мкВ/°C при  $T = 700^\circ\text{C}$ ;

Для термопары платина – платинородий  $S = 6,4$  мкВ/°C при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $S = 11,93$  мкВ/°C при  $T = 1400^\circ\text{C}$ . Чувствительность термопар существенно ниже чувствительности терморезисторов.

#### *Конструкции и использование термопар*

Обычно термопары изготавливают из проволок, концы которых для получения контакта соединяют пайкой или сваркой (рис.62).

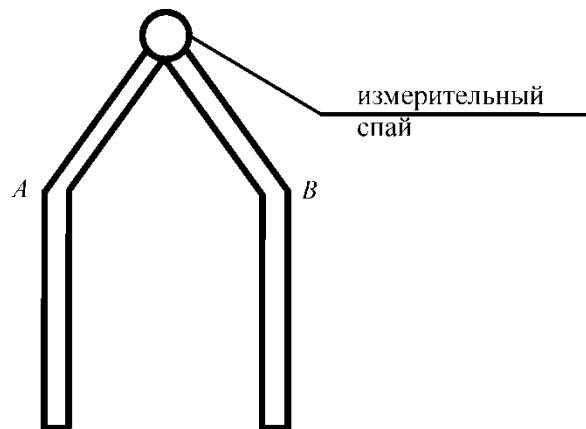


Рис. 62. Конструкция термопары

За пределами измерительного спая проволоки изолируют друг от друга во избежание замыканий. Часто используют изоляторы в виде керамических трубочек.

ЭДС термопары зависит одновременно от температуры измерительного спая, и от температуры ее контактов с внешней измерительной схемой, которая часто находится при температуре окружающей среды. Это приводит к ошибкам в измерениях температуры. Для уменьшения ошибок необходимо вводить принудительное охлаждение мест контактов до фиксированной температуры (рис. 63, а).

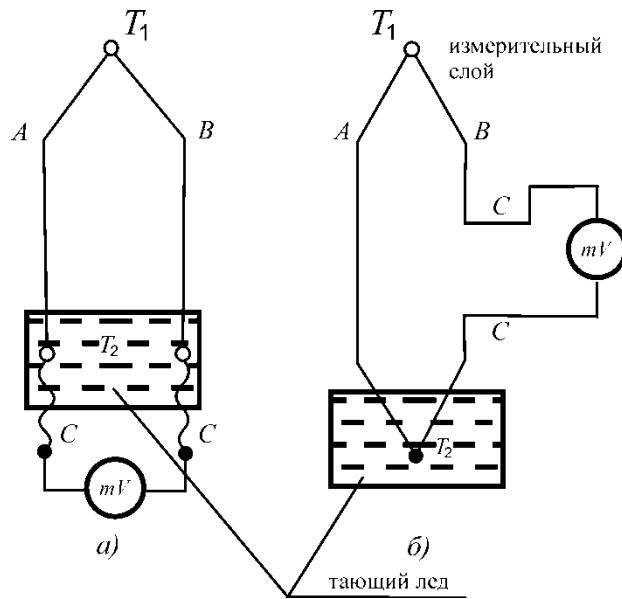


Рис. 63. Стабилизация температуры  $T_2$  опорного спая термопары

Опорный спай, например, погружают в тающий лед, температура спая  $T_2$  при этом всегда равна нулю (рис. 63, б). Обычно температура измерительного спая термопары и температура измеряемого объекта не совпадают из-за теплоотвода от спая по проволокам. Для уменьшения погрешностей проволочки термопары выбирают как можно тоньше, и спай вводят внутрь объекта, например, высверливают в нем отверстие.

### 5.5 Терморезистивные измерительные преобразователи

Измерительные преобразователи этого типа используют для измерения температуры зависимость проводимости проводников и полупроводников от температуры.

#### Металлические терморезисторы

В качестве материалов металлических терморезисторов выбирают такие, которые имеют линейную зависимость сопротивления от температуры и отличаются инертностью к воздействиям окружающей среды. Часто используют платину, медь, вольфрам, никель.

Сопротивление металлических терморезисторов подчиняется следующей формуле:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha T^0 C)$$

где  $R_0$  - сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $R_T$  – сопротивление при температуре  $T^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Для меди  $\alpha = 4,26 * 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

График температурной зависимости медного терморезистора – практически прямая линия (рис. 7). При изменении температуры от  $-20$  до  $+120$   $^\circ\text{C}$  сопротивление меди изменяется на  $40\%$ .

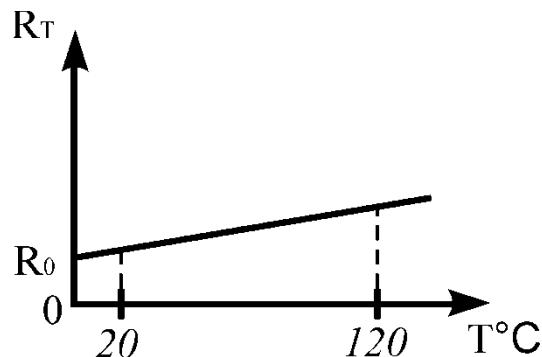


Рис. 4.33. (7) Температурная зависимость сопротивления металлов

## Лекция 9 6 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МИКРОСИСТЕМ

Назначение исполнительных механизмов микросистем – приводить в движение элементы устройств, предназначенных для передачи информации от микросистем к внешней информационной сети; или для выполнения механической работы внутри микросистемы – приводить в движение жидкости (микронасосы), управлять потоком (микроклапаны), переключать световые пучки (в МОЭМС), и др.

Функционирование исполнительных механизмов может быть основано на использовании электростатических сил, магнитных сил, термоиндукционных изменений параметров вещества (в частности, теплового расширения тел и жидкостей).

### 6.1 Электростатические исполнительные механизмы

Рассмотрим в качестве примера работу плёночного электрического переключателя (реле) с электростатическим управлением (рис. ).

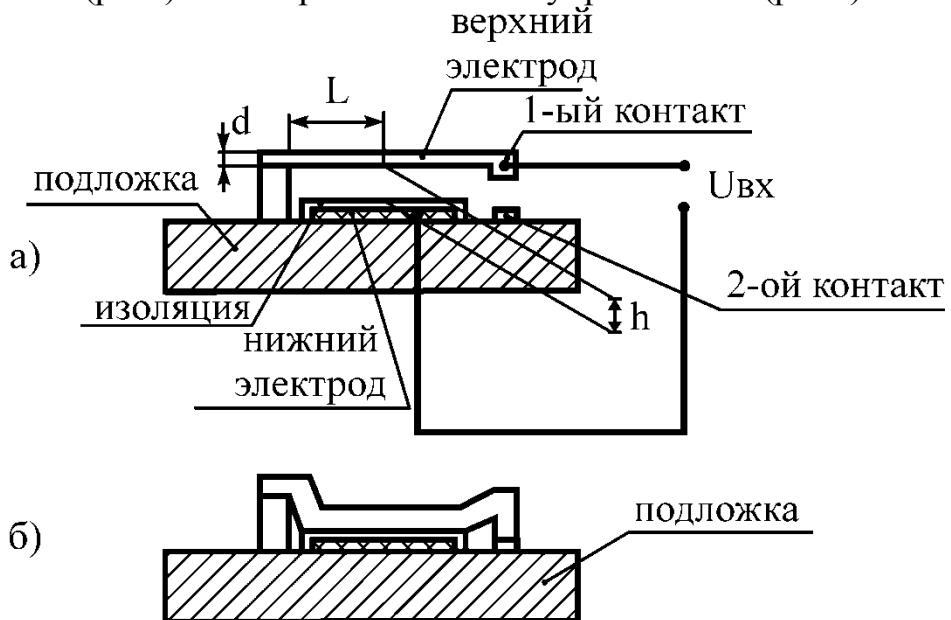


Рис. 4.3 а 6. Схема устройства и работы электростатического реле

Перемещающимся элементом в переключателе является тонкая металлическая пластина, нависающая над подложкой и закрепленная одним концом (консольно). При прогибе пластины вниз происходит электрическое замыкание контакта на ее конце с площадкой на подложке, являющейся вторым контактом. Расстояние между пластиной и подложкой несколько мкм. Под пластиной на подложке располагается электрод; металлическая пластина и электрод на подложке образуют обкладки электрического конденсатора. При подаче между этими обкладками электрического напряжения они под действием возникшего электрического поля электростатически притягиваются друг к другу с силой  $F$ :

$$F = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \cdot S = \frac{\epsilon_0 U^2 \cdot S}{2 \cdot h^2}, \quad (6.12)$$

где  $E = \frac{U}{h}$  - напряженность электрического поля между обкладками;  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная;  $S$  - площадь одной обкладки;  $h$  - воздушный зазор между обкладками.

Под действием силы  $F$  пластина начнет прогибаться. Отклонение конца пластины описывается уравнением, справедливым для консольной балки постоянного сечения, нагруженной на конце сосредоточенной силой:

$$\delta = -\frac{FL^3}{3E_{\text{io}} \cdot I}, \quad (6.13)$$

здесь  $E_{\text{io}}$  - модуль упругости (модуль Юнга) материала балки;  $I$  - момент инерции сечения балки.

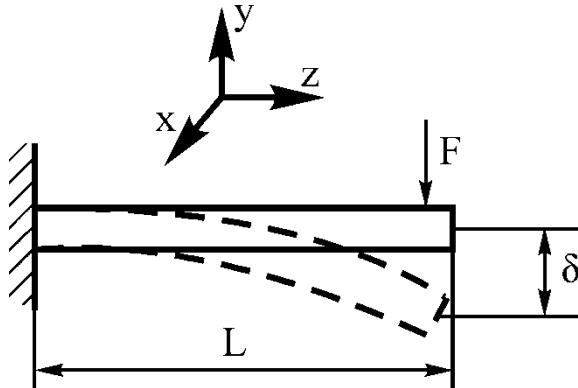


Рис. 4.37. Консольная балка

При изгибе балки ее средние слои не изменяют своей длины, нижние слои укорачиваются, верхние – удлиняются. Сечение балки поворачивается (наклоняется), не изменяя своей плоскостности, поэтому момент инерции берется относительно средней оси симметрии сечения, расположенной горизонтально оси  $x$  на рис.

$$I_x = \frac{bd^3}{12}, \quad (6.14)$$

где  $b$  - ширина балки;  $d$  - толщина балки.

Подставим (5.3) в (5.2), получим

$$\delta = -\frac{FL^3 \cdot 12}{3E_{\text{io}} \cdot bd^3} = -\frac{4EL^3}{E_{\text{io}} \cdot b \cdot d^3}. \quad (6.15)$$

По мере прогиба пластины уменьшается расстояние между обкладками и растет напряженность электрического поля, растет сила притяжения между обкладками; этой силе противодействует сила упругости пластины.

По мере увеличения напряжения  $U$  сила притяжения может стать больше силы упругости, и балка резко прогибается и падает на подложку, замыкая контакты переключателя. Чтобы вернуть пластины в прежнее положение,

необходимо уменьшить напряжение  $U$  до величины, много меньшей напряжения срабатывания; имеет место гистерезис рабочего напряжения.

Для упругой деформации любого механического элемента справедливо выражение:

$$F = K \cdot \delta, \quad (6.16)$$

Где  $K$  – константа упругости элемента;  $\delta$  - деформация элемента под действием силы  $F$ . Учитывая (5.4), можно найти константу упругости консольной балки:

$$K = \frac{E_{\text{io}} \cdot b \cdot d^3}{4L^3}. \quad (6.17)$$

Приравнивая силу упругости балки из (5.5) к силе электростатического притяжения обкладок (5.1), при уменьшении зазора в конденсаторе до значения  $(h - \delta)$  можно найти напряжение  $U_{kp}$ , при котором система становится нестабильной, и мембрана падает на нижнюю пластину:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_0 U_{kp}^2 \cdot S}{2(h - \delta)^2} &= K \cdot \delta, \\ U_{kp} &= \left( \frac{2(h - \delta)^2 \cdot K \delta}{\varepsilon_0 S} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (6.18)$$

Установлено, что критическая величина зазора равна

$$h_{kp} = h - \delta = \frac{2}{3}h. \quad (6.19)$$

Подставим это значение в (5.7), получим:

$$U_{kp} = \left( \frac{8Kh^3}{27\varepsilon_0 S} \right)^{1/2}. \quad (6.20)$$

Используются также микромеханические конструкции, в которых подвижная пластина закреплена двумя концами (рис.).

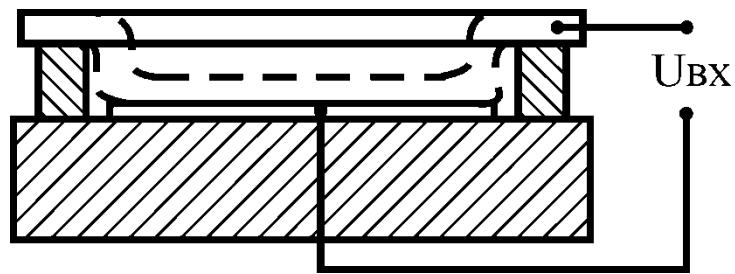


Рис.4.38. ? Схема мостовой конструкции (пластина закреплена по концам)

При подаче электрического напряжения  $U$  между электродом на подложке и пластиной, между ними как между обкладками конденсатора, будет действовать сила электростатического напряжения, и пластина прогнется.

### 7.1 *Общие сведения*

Оптомеханические микросистемы выполняют функции управления световыми потоками, их переключения и измерения.

Оптические макросистемы предназначены для выполнения таких же функций. Отличием микросистем является их миниатюрность, все ее элементы размещаются на одном чипе, характерные размеры элементов порядка единиц и сотен микрометров.

В настоящее время созданы оптические микросистемы различного назначения. Микросистемы с подвижными механическими элементами относят к классу МОЭМС – микрооптоэлектромеханических систем. Известны следующие виды МОЭМС: микрозеркальные оптические проекторы, устройства адаптивной оптики, оптические микрокоммутаторы оптико-волоконных линий связи, микросканеры оптических лучей.

Созданы микросистемы – микроэлементные приемники излучения, в которых используются технологический приемы поверхностной микромеханики на кремнии. Принцип действия приемников основан на возникновении деформаций механических элементов под воздействием внешних тепловых потоков.

С использованием принципов объемной микромеханики созданы оптические устройства, используемые в макрооптических системах, например, фотонные кристаллы, где нет подвижных механических элементов.

### 7.2. *Основные законы оптики*

Очень кратко рассмотрим здесь основные законы оптики. Более подробно эти вопросы изучаются в курсах физики.

Оптическое излучение имеет двойственную природу: может проявлять себя как переменное электромагнитное поле, распространяющееся в среде в виде волны со скоростью  $v = c/n$ , где  $n$  - показатель преломления среды,  $c$  - скорость света в вакууме, а также в виде потока квантов, каждый из которых имеет энергию  $E = h\nu$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  - частота излучения.

В соответствии с волновой теорией, проходящий в среде свет раскачивает своим электрическим полем электроны внешних электронных оболочек атомов среды. Отдавая им свою энергию, свет поглощается, однако колеблющиеся электроны атомов сами становятся источниками вторичных световых волн, которые по направлению совпадают с первоначальным световым потоком.

Для наглядности световой поток в геометрической оптике рассматривают в виде пучка лучей.

Распространение света в оптически однородной среде подчиняется следующим законам.

**Закон прямолинейного распространения света:** свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно. Доказательством является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов. Однако закон не имеет всеобщего характера, так как при прохождении света через маленькие отверстия наблюдается отклонение от прямолинейности, свет огибает препятствие; это явление носит название дифракции света на препятствиях.

**Закон независимости световых пучков:** световые потоки проходят сквозь другие световые потоки, не взаимодействуя с ними и действуют на среду независимо друг от друга.

**Закон отражения:** отражённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведённым к границе раздела в точке падения; угол падения равен углу отражения:

$$i'_1 = i_1$$

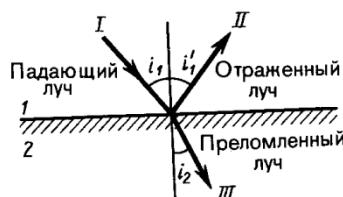


Рисунок . Законы отражения и преломления света

**Закон преломления:** луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела сред в точке падения, лежат в одной плоскости; произведение показателя преломления  $n_1$  среды падения на синус угла падения равно произведению показателя преломления  $n_2$  среды преломления на синус угла преломления:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

#### Полное внутреннее отражение.

Если луч распространяется из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем, то преломлённый луч удалён от нормали в большей степени, чем падающий (рисунок ). С увеличением угла падения до *пределного угла* угол преломления стремится к положению вдоль границы раздела поверхности; при дальнейшем увеличении угла падения весь падающий свет полностью отражается от границы раздела, как от идеального зеркала, хотя среды прозрачны каждая в отдельности. Это явление называется полным внутренним отражением.

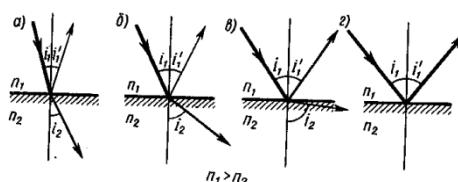


Рисунок . Полное внутреннее отражение света при падении луча на границу раздела под предельным углом

Предельный угол  $i_{pp}$  определим из формулы закона преломления, если подставим в неё значение угла преломления  $i_2 = \pi / 2$ :

$$\sin i_{pp} = n_2 / n_1$$

Явление полного внутреннего отражения широко используется в технике (в призмах полного отражения, в световодах для линий оптической связи, и др.).

### 7.3 Микрозеркальные матрицы

Примером использования законов отражения, преломления и полного внутреннего отражения являются микрозеркальные проекторы изображений на экран, основанные на использовании микрозеркальных матриц.

Микрозеркальные матрицы позволяют формировать световые изображения на экране путем управления световым потоком мощного источника света. Каждое микрозеркало под действием электрического сигнала может поворачиваться, изменяя тем самым направление светового луча; совокупность отраженных от всех микрозеркал лучей дает световую картину на экране. Поворот микрозеркал осуществляется в ту или другую сторону до упора, на  $\pm 10^\circ$ . Время поворота  $\sim$  микросекунда. Чип микрозеркального устройства содержит до миллиона микрозеркал размером  $16 \times 16$  мкм каждый, расположенных вплотную и занимающих поверхность чипа.

На рис.1 показана схема конструкции одной ячейки матрицы микрозеркал.

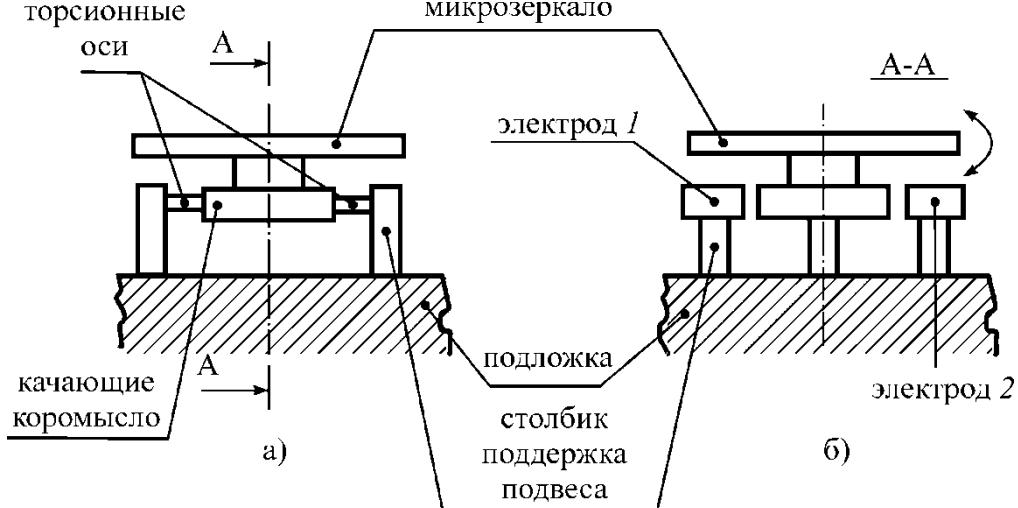


Рис. 5.1. (1.) Схема конструкции ячейки микрозеркал

а) вид спереди; б) сечение АА

На кремниевой подложке, содержащей электронную схему управления микрозеркалами, закреплена микромеханическая конструкция, способная совершать колебания наклона. Она содержит микрозеркало и скрепленное с ней качающееся коромысло; коромысло подвешено с помощью торсионных валов, выполненных из узких полосок поликремния, на столбиках поддержки. Зеркало имеет в плане форму квадрата, и под диагонально расположенными углами

квадрата размещены на своих столбиках поддержки электроды управления положением зеркал. При подаче на электроды потенциалов зеркало наклоняется в сторону соответствующего электрода за счет возникновения электростатических сил притяжения.

Готовый чип с матрицей микрозеркал помещают в металло-керамический корпус с кварцевым окном.

Матрица с микрозеркалами получила название – цифровое микрозеркальное устройство – ДМД.

Матрица ДМД является основой проектора DLP (DigitalLightProcessing) – устройства цифровой обработки света. На рис.2 показана оптическая схема проектора с матрицей ДМД.

Световой поток лампы фокусируется на входной торец световода, при прохождении света в световоде достигается равномерность излучения по сечению светового пучка. Проходя затем через систему линз и призму полного внутреннего отражения, световой поток формируется по размеру матрицы микрозеркал и попадает на нее. В зависимости от положения каждого микрозеркала, отраженная им часть светового потока направляется либо в объектив, проецирующий изображение на экран, либо в сторону от него, в специальный поглотитель.

Как видно из приведенной оптической схемы, эффект полного внутреннего отражения оказывается на падающем на матрицу свете. Отраженный от микрозеркал в сторону объектива свет приходит на грань призмы под меньшим, чем падающий свет, углом, и не испытывает полного внутреннего отражения, проходит через грань практически без ослабления.

В настоящее время производятся также проекторы, дающие цветные изображения в которых используется три микрозеркальных матрицы, каждая для своего цвета. Световые потоки натрия сводятся на экране, давая цветное изображение.

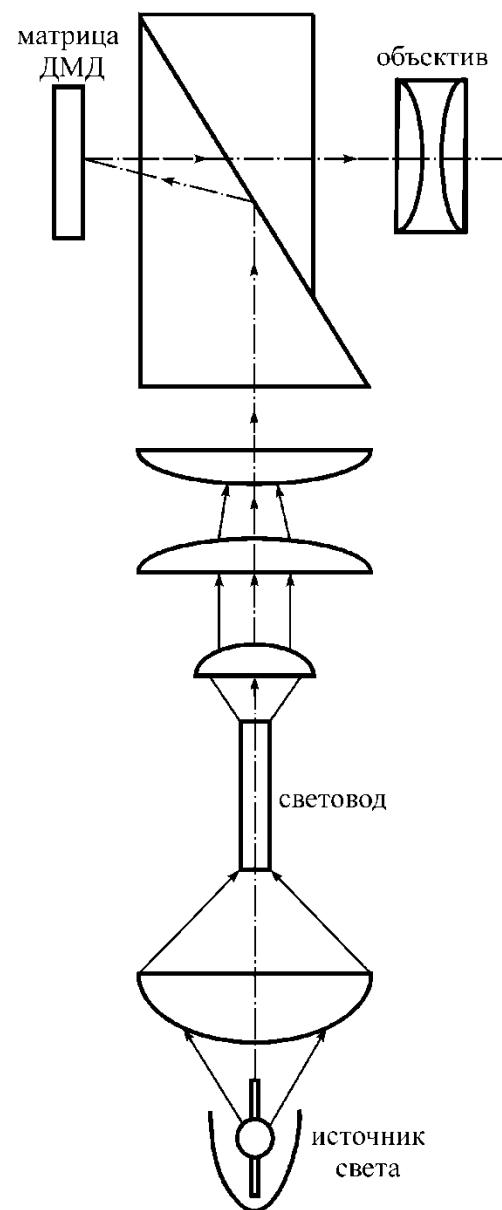


Рис. 5.2. (2.) Оптическая схема проектора с микромеханической микрозеркальной матрицей

## 8.1 Типовые структуры

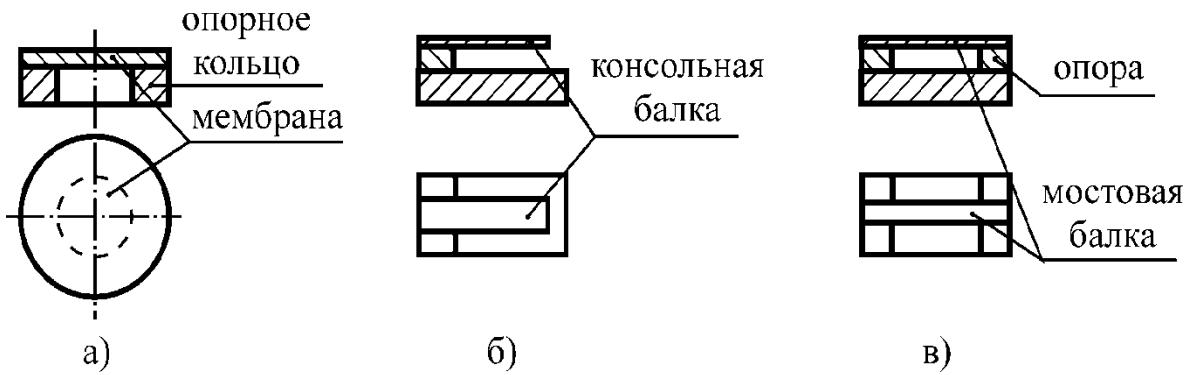


Рис.3.1.( 1.)

Наиболее распространеными структурными элементами микросистем являются диафрагмы (мембранны), консольные балочные элементы, мостовые элементы.

Размеры этих элементов могут быть: толщина  $\sim 0,1 \div 10$  мкм; длина – от десятков до тысяч мкм; ширина – единицы  $\div$  сотни мкм.

Характерной особенностью структур является закрепление балок и мембранны на опорах только концами; в остальной части элементы подвешены, являются свободными. При работе микросистемы свободные части балок и мембранны перемещаются, колеблются с некоторой частотой относительно равновесного состояния.

Одним из основных этапов получения таких микроструктур является получение заготовок в виде тонких плёнок металлов и диэлектриков на поверхности подложек.

## 8.2 Тонкие плёнки и методы их осаждения

### Термическое испарение в вакууме

При нанесении тонких плёнок на подложки методом термического испарения напыляемое вещество нагревают в высоком вакууме до температуры испарения. Пары вещества распространяются в вакууме, достигают подложки и на ней конденсируются. Схема установки нанесения плёнок методом термического испарения показана на рис. 6.2.

Для обеспечения отсутствия столкновений атомов пара с молекулами остаточного газа давление в камере испарения должно быть не более  $10^{-2} \div 10^{-3}$  Па при расстоянии от испарителя до подложки  $\sim 20$  см. В таких условиях поток пара представляет собой молекулярный пучок – пучок атомов испаренного вещества.

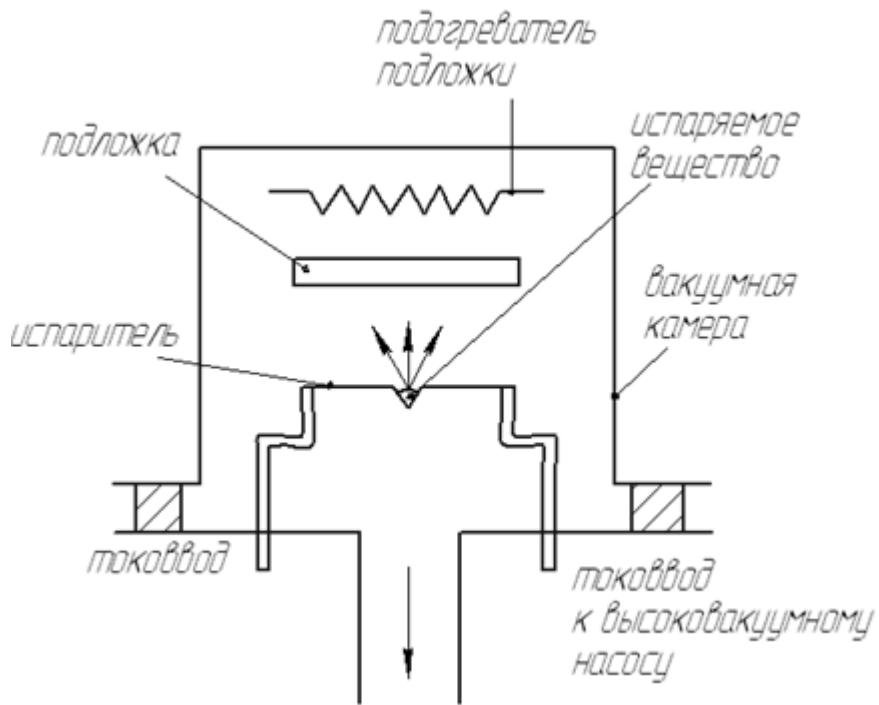


Рис. 6.2. Схема установки нанесения плёнок методом термического испарения.

Для определения зависимости скорости испарения вещества от температуры рассмотрим следующую модель. Будем нагревать вещество в замкнутом сосуде, имеющем такую же температуру, как вещество. По мере подъема температуры количество испаряемых молекул в сосуде увеличивается; молекулы в объеме сосуда движутся хаотично, и часть из них возвращается к испаряющемуся веществу. Если подъем температуры прекратить, в сосуде установится равновесие, количества испаренных и вернувшихся молекул будут одинаковы. Давление пара в сосуде, установившееся при равновесии, называется давлением насыщенного пара  $P_s$ . Количество вернувшихся в вещество молекул в единицу времени равно числу бомбардирующих его вследствие хаотического движения и определяется законами молекулярно-кинетической теории. Концентрация  $n$  молекул пара равна

$$n = \frac{P_s}{kT}, \quad (6.21)$$

где  $T$  – термодинамическая температура пара.

Плотность потока молекул пара, ударяющихся о стенку сосуда или любого другого места в сосуде, равна

$$\nu = \frac{1}{4} n \cdot v_a, \quad (6.22)$$

где  $v_a$  - среднее арифметическое значение скорости молекул при температуре  $T$ :

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (6.23)$$

Если давление пара в сосуде уменьшить до нуля, количество атомов, испаряющихся из вещества, не изменится, поэтому для плотности потока атомов  $\mu$  испаренного вещества можно записать

$$\mu = v. \quad (6.24)$$

Каждый атом уносит с собой массу  $m_0$ , поэтому масса вещества, испаряющегося с единицы поверхности за единицу времени (скорость испарения), равна

$$v_m = \mu \cdot m_0 = \frac{m_0}{4} \cdot \frac{P_s}{kT} \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = P_s \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} = P_s \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \quad (6.25)$$

где  $M$  – молярная масса испаряющегося вещества;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  – термодинамическая температура испарения.

Давление насыщенного пара определяется уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$P_s = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[ \frac{LM}{RT_0} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right]. \quad (6.26)$$

Здесь  $T_0$  - температура кипения испаряющегося вещества при давлении  $P_0 = 10^5$  Па;  $L$  - теплота испарения материала.

Из уравнений видно, что чем больше давление насыщенного пара, тем больше скорость испарения. Температуру вещества, при которой давление насыщенного пара  $P_s = 1,33$  Па, называют условной температурой испарения. Для некоторых веществ температура испарения ниже температуры плавления, т.е. вещества сублимируют.

На каждые 10÷15% превышения температуры вещества сверх его температуры испарения давление паров и скорость испарения возрастают примерно на порядок, форсирование режима перегревом на 30% приводит к стократному возрастанию скорости испарения.

Количество вещества, достигающее поверхности подложки, зависит от конфигурации испарителя и подложки и их взаимного расположения.

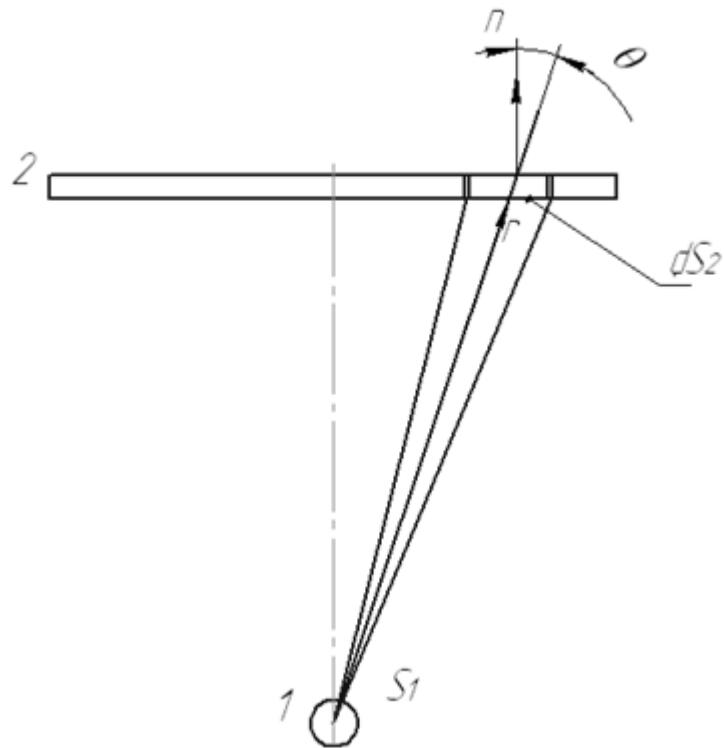


Рис. 6.3. Испарение из точечного источника

На рисунке 6.3 1 – точечный испаритель, 2 – подложка,  $r$  - радиус-вектор площадки  $dS_2$  на подложке,  $\bar{n}$  - нормаль к подложке,  $d\omega$  - телесный угол, под которым из испарителя видна площадка  $dS_2$ ,  $S_1$  - поверхность испарителя.

Вещество из точечного испарителя испаряется во все стороны, т.е. в пределах телесного угла  $4\pi$ . Поток массы вещества в единице телесного угла при неизменной скорости испарения определяется выражением:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{Q}{4\pi t}, \quad (6.27)$$

где  $Q$  - масса испаренного за время  $t$  вещества.

На площадку  $dS_2$  пар поступает в пределах телесного угла  $d\omega$ ; масса вещества, поступившего за время  $t$  на площадку  $dS_2$ , равна:

$$\Delta m_2 = dq \cdot d\omega = \frac{Q}{4\pi} d\omega. \quad (6.28)$$

Величина телесного угла  $d\omega$  связана с размером  $dS_2$  и положением площадки формулой

$$d\omega = \frac{dS_2}{r^2} \cos \theta. \quad (6.29)$$

Найдем результирующее выражение для массы количества вещества, поступавшего на площадку  $dS_2$  за все время  $t$  испарения:

$$dm_2 = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{dS_2 \cos \theta}{r^2}. \quad (6.30)$$

На подложке на участке  $dS_2$  образуется плёнка толщиной  $d$ . Масса этого участка плёнки равна

$$dm_2 = \rho \cdot dS_2 \cdot d, \quad (6.31)$$

где  $\rho$  - плотность плёнки.

Приравниваем правые части двух последних уравнений и получаем толщину образовавшейся в области  $dS_2$  плёнки

$$d = \frac{Q \cos \theta}{4\pi \rho r^2}. \quad (6.32)$$

При испарении металлов основным видом частиц в газовой фазе являются одиночные атомы металла. При испарении соединений в составе пара кроме молекул присутствуют их отдельные части, т.к. возможна диссоциация молекул. Если скорости испарения продуктов диссоциации различны, состав плёнки отличается от состава испаряемого соединения, стехиометрический состав плёнок нарушается.

Без диссоциации испаряются окислы  $SiO$ ,  $SiO_2$ , фторид  $MgF_2$ . Окислы  $Ti$ ,  $Zr$ ,  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Be$ ,  $Mg$  испаряются с диссоциацией  $\alpha = \frac{\lambda}{D}$  из ленточных испарителей, нагреваемых электрическим током. Если испарение электронно-лучевое, температура вещества может быть повышенной и степень диссоциации увеличивается. Тем не менее, стехиометрия плёнок при электронно-лучевом испарении нарушается в меньшей степени, чем при термическом испарении, вследствие меньшей разницы между скоростями испарения продуктов диссоциации. При испарении сплавов их пары представляют собой потоки индивидуальных атомов, однако отношение парциальных давлений составляющих пары не совпадает с составом сплава.

При испарении сплава материал в тигле изменяет свой состав, обедняется одним из компонентов.

## Лекция 12

### Способы испарения

Выбор испарителя зависит от агрегатного состояния вещества во время испарения. При сублимационном испарении допустимо испаряемый материал нагревать пропусканием через него тока, для этого материала изготавливают в виде проволоки или ленты.

При испарении из жидкого состояния используют подогревные испарители из тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, а также графита и проводящей керамики. Такие испарители делают в виде лодочек. Используют также испарители в виде тиглей из графита или керамики, нагреваемых наружными электронагревателями.

Важной проблемой является взаимодействие испаряемого материала и испарителя при высокой температуре испарения. Опасность представляет взаимное растворение материалов из-за диффузионных процессов: так, например, алюминий в расплаве растворяет вольфрам испарителя, и испаритель перегорает. Во многих случаях имеет место химическое взаимодействие испаряемого вещества с испарителем, например, алюминий, испаряемый из графитового тигля, образует легколетучий карбид алюминия.

Разработаны взрывные испарители, в которых с помощью вибродозатора сбрасывают очень малые дозы (10-50 мг) порошка испаряемого материала на перегретый (до 2000°C) лабиринтный испаритель (рис. 6.5).

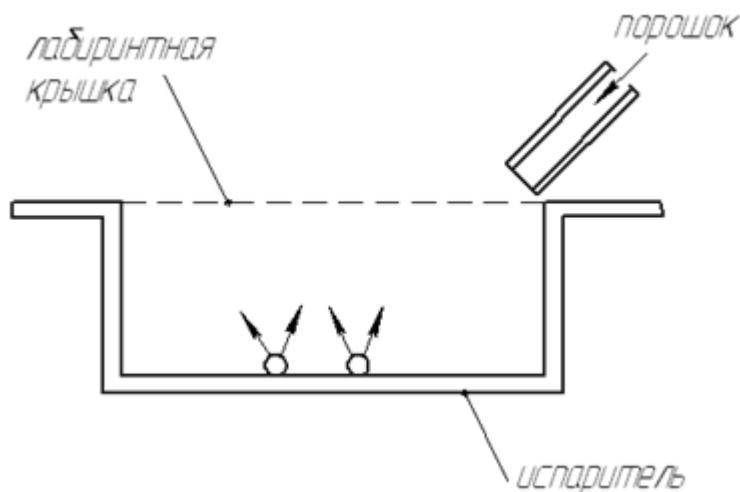


Рис. 6.5. Взрывной испаритель

Кратковременность (до 0,1 с) взаимодействия с материалом испарителя создает условия испарения, благоприятствующие сохранению стехиометрии образующейся плёнки.

## Импульсные лазерные испарители

Сфокусированный мощный лазерный пучок может нагревать испаряемое вещество до нескольких тысяч градусов, что позволяет любой материал испарять сублимацией, без его плавления. Режим работы лазерных испарителей импульсно-периодический, с длительностью импульсов от сотен наносекунд до микросекунд и частотой импульсов десятки кГц при энергии в импульсе порядка 10 Дж/см<sup>2</sup>. При лазерном испарении сохраняется стехиометрия напыляемых материалов, меньше сказывается загрязнение остаточными газами, т.к. процесс испарения имеет место только во время импульса и потому кратковременный, материал испаряется послойно.

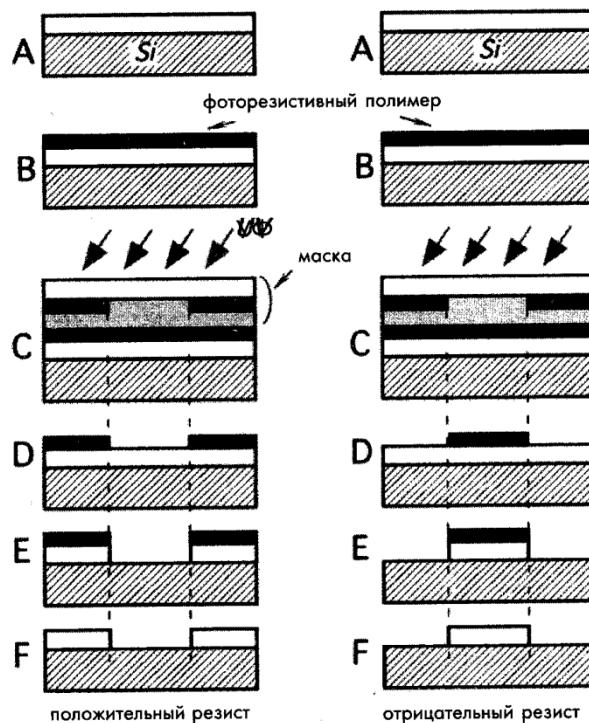
### *8.3 Обзор методов фотолитографии*

Важной задачей технологии микросистем является получение на поверхности подложек рельефного рисунка, содержащего плоские или объёмные элементы топологии микросистемы. Материалом элементов являются или предварительно нанесённые на подложку тонкие плёнки, или материал самой подложки. Процесс получения рельефной поверхности называется литографией. В микроэлектронике и в микросистемной технике наиболее распространенным методом литографии является фотолитография.

Суть метода заключается в нанесении на поверхность подложки тонкого слоя защитной маски из особого фоточувствительного полимера, содержащего рисунок из сквозных щелей, повторяющий рисунок топологии микросистемы, и удалении сквозь щели методом травления материала ниже лежащих слоёв. Фоточувствительный полимер имеет название фоторезист, рисунок щелей в нём формируется фотографическим путём – экспонированием по заданному рисунку с последующим проявлением скрытого фотоизображения и получением в слое фоторезиста сквозных щелей.

#### *Получение фоторезистивной маски*

На рис. 1 показано получение фоторезистивной маски из слоёв фоторезистов двух типов – позитивного и негативного.



Вначале изготавливается фотошаблон – стеклянная плоская пластина с рисунком топологии в виде прозрачных и непрозрачных участков. Фотошаблон устанавливают над экспонируемой подложкой, покрытой слоем фоторезиста, и освещают подложку сквозь фотошаблон параллельным пучком актиничного света, то есть света, соответствующего по спектру диапазону чувствительности фоторезиста.

В случае использования негативного фоторезиста на засвеченных его участках происходит полимеризация, поперечная сшивка молекул полимера, в результате молекулы укрупняются, и химическая стойкость полимера возрастает. При проявлении экспонированную пластину погружают в проявитель, и неэкспонированные участки фоторезиста удаляются. Остаются участки, соответствующие прозрачным элементам рисунка фотошаблона.

В случае использования позитивного фоторезиста на засвеченных участках под действием света образуются растворимые соединения полимера (фоторазложение), при проявлении полимер на этих участках удаляется, остаются участки, соответствующие непрозрачным элементам рисунка фотошаблона.

### *Получение рельефа на подложке.*

На рис.2 показано схематически получение рельефа на подложке с использованием защитной при травлении фоторезистивной маски. Подложка с плёнкой, защищенной маской по необходимому рисунку, погружается в раствор для химического травления, где происходит химическое взаимодействие вещества плёнки с раствором с образованием растворимых или летучих продуктов химической реакции № плёнка травится только в промежутках

между островками фоторезиста, степень заглубления в подложку зависит от времени травления.

Важными параметрами фоторезиста являются разрешающая способность, светочувствительность, химическая стойкость к травителям.

Критерием чувствительности негативного фоторезиста является образование после экспонирования и проявления на поверхности подложки полимеризованных участков, в совокупности являющимися травильной маской рисунка топологии. Критерием чувствительности позитивного резиста является полнота разрушения и удаления с поверхности экспонированных участков слоя фоторезиста.

Светочувствительность фоторезиста  $S$  – это величина, обратная экспозиции, то есть, количеству световой энергии, необходимой для преобразования фоторезиста:

$$S = \frac{1}{H},$$

где  $H$  - экспозиция (доза облучения).

Разрешающая способность характеризует способность ФР к созданию рельефа рисунка с минимальными размерами элементов. Для негативных ФР разрешающая способность составляет 300 пар линий/мм, для позитивных она выше и в новейших производствах микросхем может доходить до  $5 \cdot 10^4$  пар линий/мм (воспроизводятся элементы размером до 20 нм).

Главным фактором, влияющим на разрешающую способность ФР, являются дифракционные эффекты при формировании оптического изображения на слое ФР на подложке.

Угол дифракции при больших расстояниях от экрана со щелью определяется формулой

$$\alpha = \frac{\lambda}{D}$$

где  $D$  - ширина щели,

$\lambda$  - длина волны света

В результате дифракции света на краях маски при экспонировании фотоизображение на слое фоторезиста отличается от оригинала, возникают полутени. Дифракционное размытие световой картины тем больше, чем больше длина световой волны, поэтому стремятся использовать источники света со всей меньшей длиной волны, переходят от ртутных осветительных ламп к лазерным и плазменным источникам света, длина волны излучения которых может быть меньше в 3 и более раз.

Другим эффектом, ухудшающим точный перенос рисунка маски на пленку является недостаточная устойчивость слоя фоторезиста к травителям.

Химическая устойчивость – это способность слоя ФР защищать поверхность подложки от воздействия травителей. Стойкость определяют величиной боковогоподтравливания под край маски (как на рис.)

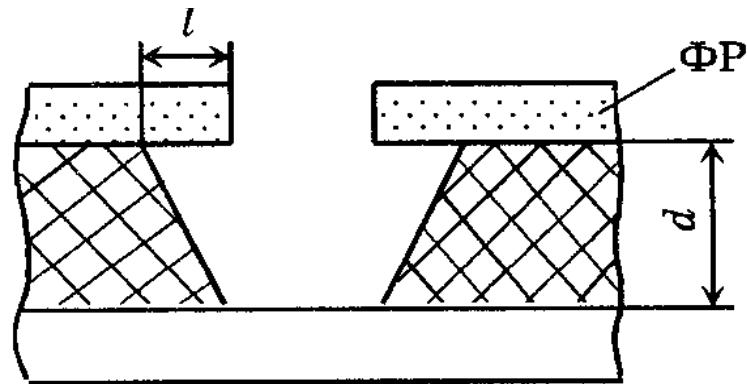


Рис. 3

#### Способы экспонирования

В оптической литографии используются три способа экспонирования:

- контактная литография,
- бесконтактная, или фотолитография с зазором;
- проекционная фотолитография

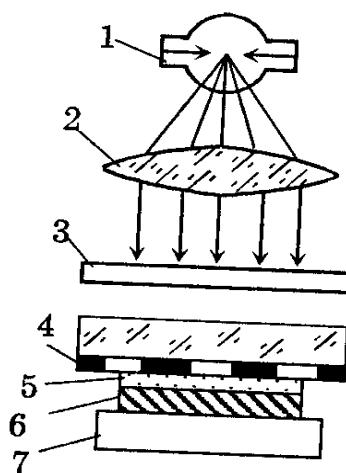


Рис.

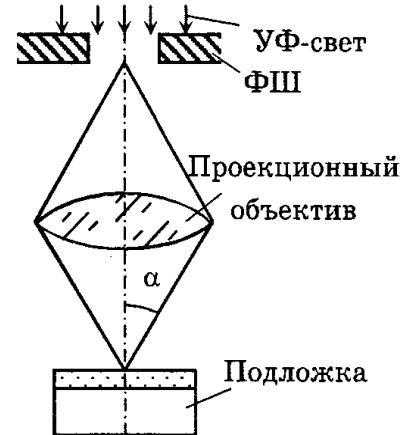


Рис.

*Контактная фотолитография.* При контактной фотолитографии фотошаблон находится в непосредственном контакте со слоем ФР на подложке. (рис. ).

В качестве источника света используются мощные ртутные (дуговые) или плазменные лампы с необходимой длиной волны излучения. Необходимым условием является точечность светящейся области лампы, это способствует

получению с помощью конденсорной линзы светового потока с высокой степенью параллельности.

Подложка находится на некотором расстоянии от линзы, фотошаблон плотно прижат к слою фоторезиста; за счёт плотного контакта достигаются высокие разрешения. Зазор между фотошаблоном и подложкой не может полностью отсутствовать, его величина определяется толщиной фоторезиста, неровностями поверхности фотошаблона и подложки, случайными соринками, попавшими в зазор. Основной недостаток контактной литографии состоит в изнашивании фотошаблона при многократной фотолитографии за счёт истирания при плотных контактах и прилипания посторонних частиц.

*Бесконтактная литография* отличается наличием между фотошаблоном и подложкой принудительно задаваемого воздушного промежутка величиной 10 – 40 мкм. Зазор уменьшает возможность повреждения фотошаблона, но наличие расстояния между маской и подложкой ухудшает разрешающую способность метода. При переносе изображения с маски на слой фоторезиста получаемая минимальная ширина линии рисунка на фотошаблоне определяется выражением:

$$b_{\min} = \sqrt{\lambda h} ,$$

где  $h$  - расстояние между поверхностями фотошаблона и подложки.

*Проекционная фотолитография* заключается в оптическом формировании изображения рисунка маски на слое фоторезиста с помощью проекционного объектива (рис. ).

Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и углом  $\alpha$  расходимости лучей, приходящих в точку изображения:

$$b_{\min} = \frac{K\lambda}{n \sin \alpha} ,$$

где  $n \sin \alpha$  - числовая апертура объектива

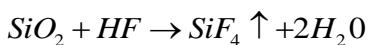
## Лекция 13

### 8.4 Процессы травления при формообразовании микроструктур на подложках

При жидкостном травлении через защитную маску из фоторезиста часть материала плёнок или подложки удаляется под воздействием жидкого химического травителя. Существует два вида жидкостного травления: изотропный и анизотропный. При изотропном травлении травильные реагенты равномерно удаляют материал во всех направлениях; при анизотропном скорость удаления материала в разных направлениях неодинакова. Для травления разных материалов используются собственные травильные реагенты.

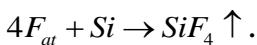
Химические травители должны обладать селективностью, то есть способностью растворять основной технологический слой, не взаимодействуя с фоторезистивной маской и другими нижележащими слоями.

В технологии изготовления кремниевых микросхем часто используется травление тонкой защитной плёнки двуокиси кремния на кремниевой подложке:



Входящая в состав травителя плавиковая кислота не действует на кремний, обнажающийся после удаления окисла. Образующийся продукт реакции – фтористый кремний – является летучим.

По мере уменьшения размеров микросхем возникает необходимость в использовании всё более тонких фоторезистивных масок, так как при этом улучшается точность формирования топологии; однако при этом ухудшается химическая стойкость фоторезистивных слоёв. Разработано плазмо-химическое травление, которое является «сухим», не требует использования жидких травителей. Подложки при этом способе загружаются в вакуумные установки, в которые напускается под небольшим давлением газовая смесь инертного и активного газа. В газе вблизи поверхности подложки зажигается тлеющий электрический разряд. В плазме разряда газы ионизуются, и положительные ионы движутся к подложке под действием направленного к подложке электрического поля (ионы имеют положительный заряд, а подложка соединена с отрицательным полюсом источника напряжения). В качестве активного газа часто используют галогеносодержащие газы типа фреонов; в плазме молекулы фреонов разлагаются с образованием химически активных радикалов и атомарных газов. Так, при использовании четырёхфтористого углерода  $CF_4$  под действием плазмы образуется атомарный фтор, реагирующий с кремнием, окислом кремния и др.:



В связи с направленностью движения атомов и радикалов к подложке обеспечивается некоторая анизотропия травления – скорость травления в

глубину подложки больше, чем в боковые стороны образующейся ямки травления.

### *8.5. Технология поверхностной микромеханики*

Значительная доля разработок в области микромеханических устройств основана на базовых кремниевых микротехнологиях и на использовании поверхностной микротехнологии с жертвенным слоем.

Поверхностная технология заключается в построении микроструктур на поверхности кремния путем осаждения тонких плёнок структурных слоев и вспомогательных, временно поддерживающих слоев, которые называются жертвенными и впоследствии удаляются.

Основные процессы этой технологии: нанесение на подложку сначала жертвенного, затем рабочего слоя; удаление через отверстие в рабочем слое жертвенного слоя, при этом формируется объемная полость между рабочим слоем и подложкой.

Последовательности технологических операций сводятся к известным последовательностям, используемым в планарной технологии кремниевых микросхем. В эту последовательность входят нанесение слоев, нанесение фотолитографических масок, избирательное травление через отверстия в масках рабочего и жертвенного слоев с образованием объемных полостей, промывка образовавшихся полостей.

Часто в качестве рабочего используют слой поликремния, в качестве жертвенного – двуокись кремния.

Выяснилось, что для обеспечения механической устойчивости образующихся нависающих над подложкой структур важна термомеханическая совместимость используемых материалов и их механическая прочность. Двуокись кремния и поликремний имеют значительно отличающиеся коэффициенты теплового расширения, что приводит к механическим напряжениям в полученных консольных, балочных и мембранных структурах.

Ведется поиск других перспективных для микромеханических структур материалов. Предложено в качестве жертвенного слоя вместо двуокиси кремния применять пористый кремний. Слой пористого кремния на поверхности монокристаллической подложки получают электрохимическим травлением поверхности в особом режиме, при этом приповерхностный слой на заданную глубину оказывается пронизанным множеством наноразмерных каналов. Этот слой впоследствии при использовании его в качестве жертвенного легко удаляется избирательным жидкостным травителем.

Применяют сочетание слоев карбида кремния (рабочего) и нитрида алюминия (жертвенного). Нитрид алюминия может также и быть элементом несущей конструкции, т.к. обладает изолирующими и пьезоэлектрическими свойствами.

Геометрические размеры микроструктур, изготовленных по этой технологии, могут быть в десятки-сотни раз меньше, чем в случае объемной

технологии. Большим преимуществом технологии является простота интеграции их с электронными интегральными схемами, поскольку они могут быть выполнены на одной подложке. На рис.4 показана последовательность этапов типовой поверхностной технологии получения структур на кремнии.

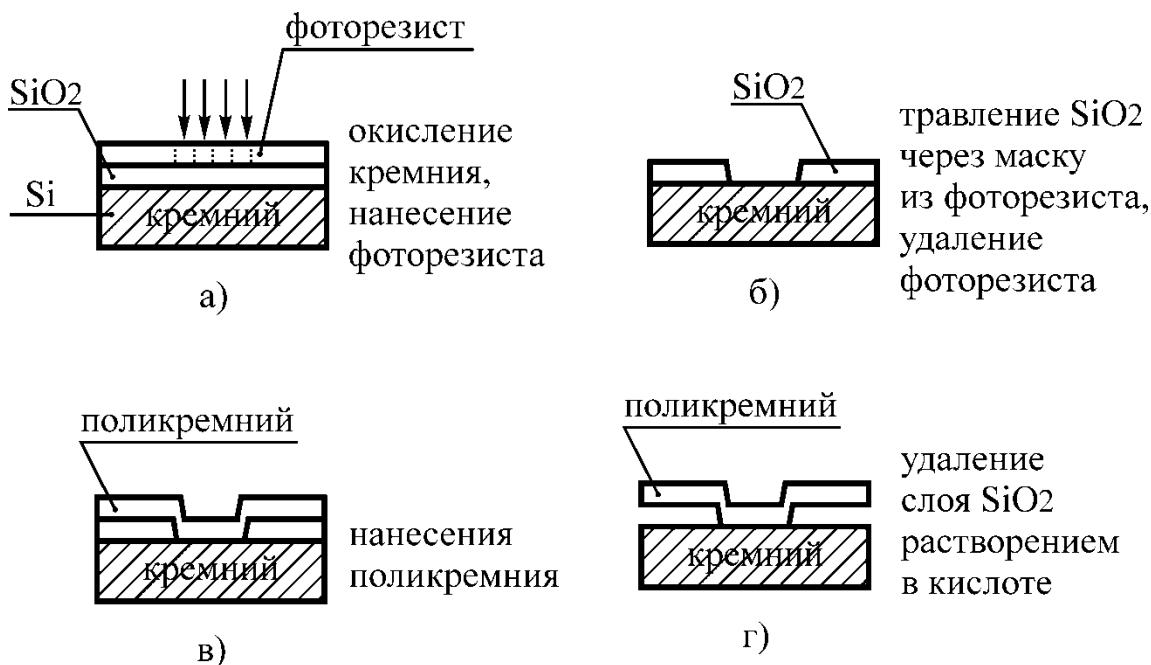


Рис. 3.4(4.)

Вначале кремниевую полированную пластину окисляют нагреванием до высоких температур в течение часов в атмосфере кислорода. Получающийся слой  $SiO_2$  может иметь толщину  $0,1 \div 1,0$  мкм. Проводят фотолитографию по слою и получают в нем сквозные отверстия. После удаления слоя фоторезиста на полученную структуру наносят в специальной установке тонкую плёнку поликристаллического кремния (поликремния), которая осаждается равномерным слоем, закрывая собой в том числе и отверстие в окисной плёнке.

Если теперь удалить слой  $SiO_2$  (рис.4, г), то поликремний образует структуру, которая соединяется с подложкой только участком, а края слоя поликремния расположены в пространстве с зазором от подложки. Удаленный слой двуокиси играл здесь роль жертвенного слоя.

Как видно из приведенного примера важным является сохранение после удаления жертвенного слоя формы механической структуры. Это возможно, если остаточные механические напряжения в слое поликремния малы.

Сформируем основные положения технологии.

Важным является подбор таких травителей, которые производят удаление слоя избирательно, не действуя на другие слои. Так, травитель  $SiO_2$  на рис.4, б) не должен воздействовать на фоторезист и кремний, а на рис.4, г) травитель  $SiO_2$  не должен реагировать с поликремнием.

1) После травления жертвенного слоя пластина со структурами оказывается в промывочной жидкости. Удаленная из промывочной ванны пластина все еще влажная, покрыта слоем воды; воду требуется удалить, а пластину высушить. Сушка микромеханических структур является проблемой. Остатки жидкости в зазоре между поверхностью кремниевой пластины и свободными краевыми участками поликремниевой консоли (рис.5, а) силами поверхностного натяжения жидкости могут прижать консоль к поверхности, деформировать микромеханическую структуру. Эта проблема решается различными путями: применением сухих травителей; использованием сверхкритической сушки.

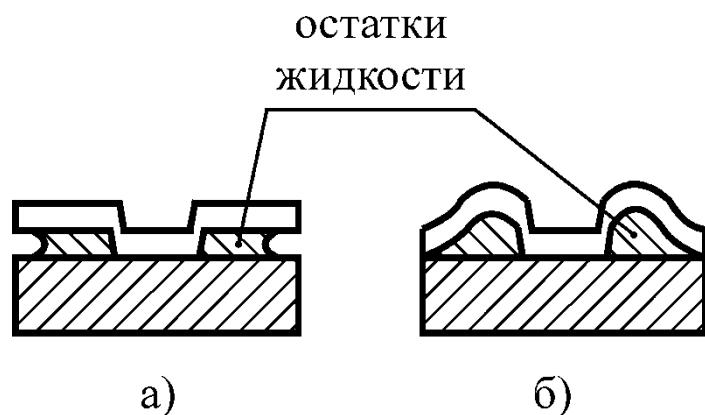


Рис. 3.5.(5.)

2) При разработке поверхностной технологии получения микроструктур важным является подбор сочетания конструкционных материалов и травильных смесей.

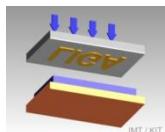
Часто используются сочетания материалов.

### 8.6. Принципы *LIGA*-технологии

*LIGA*-процесс - специализированный тип микромеханической обработки поверхности, объединяющий рентгеновскую литографию, гальванопластику и микроштамповку для создания высокоаспектных (имеющих высоту во много раз большую, чем ширину) микроструктур. Технология была разработана в начале восьмидесятых годов 20 века в IMT (Институт микроструктур, Карлсруэ, Германия) как способ производства очень маленьких сопел для разделения изотопов урана. Акроним *LIGA* происходит от немецких определений для основных стадий процесса: рентгеновская *литография* глубокого травления с синхротронным излучением (*LI*), *гальванопластика* (*G*, Galvanoformung), и *формовка* (*A*, Abformung). В качестве рентгеновского излучения используется синхротронное излучение ускорителей заряженных частиц, отличающееся высокой степенью коллимированности (угол расходимости  $0,006^\circ$ ) и малой длиной волны излучения.

Использование рентгеновской литографии с использованием синхротронного излучения в LIGA-технологии позволило добиться высокой точности в изготовлении высокоаспектных микроструктур.

Технологические этапы LIGA-процесса схематически представлены на рисунках. [7]



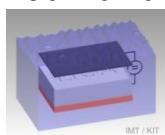
А) Рентгенолитография.



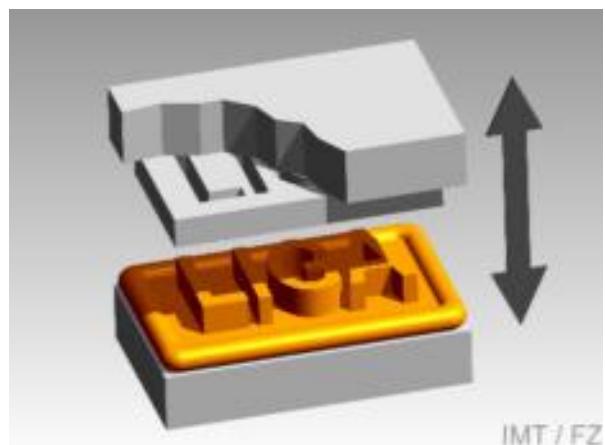
Глубокая

Б) Проявление резиста

Рисунок микроструктуры  
переносится с РШ в толстый резист



В) Электрогальваническое  
изготовление никелевых пuhanсонов



Г) Горячая формовка для  
тиражирования микроструктур

Рис. 1. Некоторые основные стадии LIGA – процесса [7].

По этой технологии конфигурация объемных структур задается путем рентгенолитографии слоя полимерного материала (рентгенорезиста), чувствительного к облучению рентгеновским излучением. Излучение экспонирует полимерный материал через не пропускающую излучение маску (рентгеношаблон), в которой выполнены прозрачные для излучения окна, рисунок которых повторяет заданную конфигурацию структур. Далее слой полимера подвергается воздействию растворителя; в случае негативного резиста проэкспонированные области теряют способность растворяться, удаляются области, защищенные при экспонировании от излучения маской; в случае позитивного рентгенорезиста в растворителе удаляются экспонированные области. Глубина проникновения излучения в полимер может достигать единиц миллиметров, из полимера можно получать объемные

структуры с отношением высоты к размеру основания до 100, размер минимальных элементов до долей мкм.

После получения в толще полимера растворением сквозных областей они заполняются металлом электрохимическим осаждением в гальванической ванне. Полимер удаляется, и на подложке остается рельеф из металла. Этот рельеф затем используется как матрица для получения конечного изделия методом прессования слоя другого полимера или отливки из расплавленного полимера рельефов, являющихся копией этой матрицы. Полученные рельефные структуры, в свою очередь, могут использоваться для заполнения металлом гальваническим способом. Этот метод, как и метод глубинного травления кремния, может быть групповым; полученная матрица может многократно использоваться для формирования в подложках микромасштабных рельефов высокопроизводительным методом штамповки.

Необходимым элементом технологии является необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения.

## Лекция 14

### 8.7 Технология корпускулярно-лучевого формообразования

Широко применяемые в микросистемной технике методы поверхностной обработки кремния не позволяют изготавливать трехмерные структуры с высоким аспектным отношением (отношением высоты выступа рельефа к его толщине).

Эти методы имеют также ряд недостатков:

- для реализации методов необходимо специфическое и дорогое оборудование и сверхчистые условия в зоне производства, это значительно удорожает производство;
- ограниченный круг используемых материалов (кремний и металлы);
- число возможных слоев ограничено.

Развиваются два направления корпускулярно-лучевого формообразования: локально-стимулированный рост плёнок под воздействием потока излучения (осаждение и полимеризация) и локально-стимулированное прецизионное травление плёнок под воздействием потока. В основе формообразования лежит взаимодействие с веществом плёнок лазерных, электронных, ионных пучков.

#### 8.7.1 Методы микростереолитографии (МСЛ)

##### *Фотостимулированная полимеризация*

Этот метод называют также микростереолитографией, используется при получении трёхмерных микроструктур из полимерных материалов. Осаждение и полимеризация жидкого мономера светом осуществляются слой за слоем и позволяют реализовать разнообразные трехмерные объекты размером до нескольких миллиметров с микронным разрешением. Разработанные методы микростереолитографии лишены части недостатков кремниевой технологии, но имеют свои: низкая производительность в связи с поточечным формообразованием объемных структур и невозможностью групповой обработки изделий, а также сложность технологического оборудования, которое содержит оптические системы высокого разрешения, системы пространственного позиционирования пучка и объекта. Кроме того, в образующемся полимерном материале возникают остаточные явления, вызванные «паразитным» воздействием лазерного излучения в зоне обработки, обусловленные невозможностью быстрого рассеяния тепловой энергии, возникающей в зоне обработки.

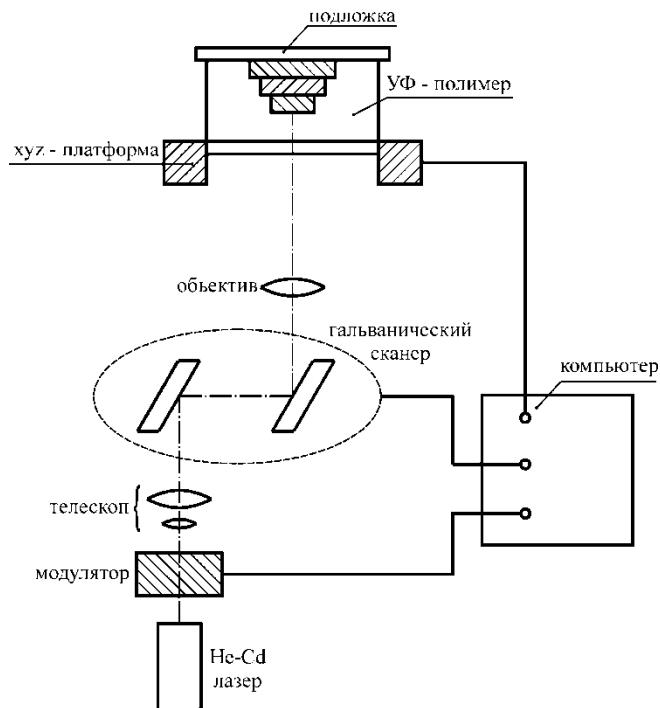
Рассмотрим один из основных методов МСЛ – метод сканирования.

##### *Сканирующий метод микростереолитографии*

Принцип метода сканирования заключается в том, что хорошо сфокусированный лазерный луч с поперечными размерами порядка 1 мкм направляется на поверхность жидкого полимера, инициируя в поверхностном

слое процесс полимеризации. Для формирования поверхностной структуры необходимо либо перемещать по заданной программе лазерный луч, либо обрабатываемое изделие, и такое сканирование осуществлять слой за слоем.

На рис. 7.14 показана схема установки сканирования.



Здесь ультрафиолетовое излучение гелий –кадмииевого лазера через телескоп и модулятор направляется к двух координатному сканирующему устройству, которое с помощью системы двух подвижных зеркал управляет движением луча лазера по поверхности наращиваемой структуры в кювете с жидким мономером. Траектория движения луча задаётся компьютерной программой

### 8.7.2 Лазерное микрофрезерование

В этом методе формирования микроструктур вначале на подложку наносится в виде тонкой плёнки материал будущей микроструктуры, затем производится мощным лазерным лучом его локальное испарение (сублимация) по заданному рисунку микроструктуры. Оставшийся не удалённым с подложки материал образует необходимое изделие.

*Теплофизические основы лазерной обработки материала*

При поглощении лазерного излучения телом на его поверхности выделяется тепловая энергия, поверхностная плотность которой равна

$$Q = P_0(1-R)t, \quad (6.33)$$

где  $P_0$  - удельная мощность падающего излучения;  $R$  - коэффициент отражения излучения;  $t$  - время.

Это тепло переносится сквозь слой материала и выделяется на другой стороне слоя. По мере распространения тепла вещество нагревается, запасает тепловую энергию; вещество обладает теплоемкостью. Энергия, запасенная в материале, определяется выражением:

$$\Delta E = c_{y\partial} \cdot m \Delta T, \quad (6.34)$$

где  $c_{y\partial}$  - удельная теплоемкость;  $m$  - масса нагревого вещества;  $\Delta T$  - температура нагревания.

Если процесс переноса тепла установился, т.е. наступило равновесие между процессами поступления тепла в слой и его оттоком, то через образец проходит за время  $t$  следующее количество тепла

$$Q = \frac{K \cdot (T_0 - T_1) \cdot t}{L}. \quad (6.35)$$

Здесь  $T_0$  и  $T_1$  - температуры поверхностного слоя;  $L$  - толщина слоя;  $K$  - коэффициент теплопроводности.

Если источник тепла возник мгновенно, то в веществе тепло распространяется в виде тепловой волны. Расстояние, которое тепловая волна проходит в веществе за время  $t$ , определяется формулой:

$$x = \sqrt{\chi t}. \quad (6.36)$$

Здесь  $\chi = \frac{K}{\rho \cdot c_{y\partial}}$  - температуропроводность вещества;  $\rho$  - его плотность.

Когда тепловая волна достигнет противоположной стороны слоя, начинает увеличиваться температура этой стороны.

При лазерном фрезеровании материалов используется лазерный сфокусированный пучок, распределение плотности мощности в пятне фокуса неравномерное, гауссовское:

$$P_r = P_0 \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right). \quad (6.37)$$

Здесь  $P_r$  - плотность мощности в пятне на расстоянии  $r$  от центра пятна;  $P_0$  - плотность мощности в центре пятна;  $d$  - радиус фокального пятна.

Температура в пятне с течением времени нарастает и изменяется по закону:

$$T_0 = \frac{(1-R) \cdot P_0 \cdot d}{K \pi^{1/2}} \operatorname{arctg} \left( \frac{4\chi t}{d^2} \right)^{1/2}. \quad (6.38)$$

Если излучение непрерывное, то с течением времени на поверхности тела установится температура

$$T_\infty = \frac{(1-R) P_0 \cdot d \pi^{1/2}}{2K}. \quad (6.39)$$

Формулы для температуры лазерного нагревания выведены в предположении, что фазовое состояние тела неизменно (тело не плавится и не испаряется).

### *Лазерное микрофрезерование*

Излучение мощных лазеров на стекле с неодимом или алюмо-иттриевом гранате с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм или после удвоения частоты с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм фокусируется в пятно диаметром порядка микрометра и сканирует по обрабатываемой поверхности. При плотности мощности в фокусе  $10^8 \div 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> может быть достигнута температура до десятков тысяч градусов, при которой любые материалы испаряются. Лазерное микрофрезерование позволяет получать в тугоплавких металлах, тугоплавких соединениях, керамике, алмазе микроструктуры с разрешением до 1÷5 мкм.

При лазерном фрезеровании материалов часто используют лазеры непрерывного действия. Если резке подвергается неметалл, например, полимер, стекло, керамика, то есть, материалы, обладающие малой теплопроводностью, то потери тепла за счет теплоотвода в соседние с фрезеруемой зоной части тела малы, можно считать, что вся поглощенная телом энергия излучения расходуется на парообразовании, и для фрезерования необходим лазер с мощностью:

$$P = E \cdot W \cdot L \cdot v, \quad (6.40)$$

где  $P$  – мощность лазерного излучения, поглощенная телом;  $W$  - ширина реза;  $L$  - толщина разрезаемого материала;  $v$  - скорость резки;  $E$  – энергия испарения. Значения энергии испарения некоторых материалов в случае использования непрерывного лазера на  $CO_2$  ( $\lambda \approx 10$  мкм) даны ниже:

материал	$Q$ , кДж/м <sup>3</sup>
фанера	$7,9 \cdot 10^6$
оргстекло	$7,9 \cdot 10^6$
стекло	$7,8 \cdot 10^7$
бетон	$4,2 \cdot 10^7$
стеклопластик	$3,6 \cdot 10^7$

Часто встречающейся задачей лазерной обработки является локальное удаление тонкой металлической пленки на изолирующей подложке. Приведем данные, полученные расчетом для двух систем пленка-подложка.

структура	толщина пленки, мкм	$\alpha$ , %	длительность импульса $t$ , нс	критическая мощность, $\text{Вт}/\text{см}^2$
<i>Bi</i> - майлар	0,1 0,1	50 3	50 50	$1,2 \cdot 10^6$ $8,6 \cdot 10^7$
<i>Au</i> - стекло				

[Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. Пер с англ. под ред Ю. И. Головина. М.: Техносфера, 2007. – 376 с.].

### 9.1. Магические числа

Нанокластер металла – это наночастица из небольшого количества атомов. Часто кластеры металла получают путём конденсации атомов испарённого металла, когда поток пара охлаждают в вакууме. При измерении размеров получившихся кластеров оказалось, что распределение кластеров по размерам неравномерное, зависит от числа атомов металла в кластере. Это означает, что кластеры, концентрация которых в общем числе получившихся частиц больше, обладают большей стабильностью, чем другие. Количество атомов в более стабильных нанокластерах названы электронными магическими числами. Например, для свинца магическими числами являются 7 и 10, для натрия – 2 и 8. Такие свойства нанокластеров делают их похожими на атомы элементов (но гигантских размеров).

При теоретическом изучении электронных свойств нанокластеров предполагается, что положительный заряд каждого атома, входящего в кластер, равномерно распределён по объёму шара, равного кластеру (модель «желе»). Электроны кластера распределены группами по дискретным значениям уровней их энергий, как по полочкам, подобно распределению электронов в обычном атоме. Магические числа соответствуют кластерам с такими размерами, при которых все уровни энергий заполнены электронами полностью. При попадании света на нанокластер энергия фотонов может быть израсходована на увеличение энергии электронов и их перемещение на более высокий энергетический уровень (возбуждение нанокластера). Электроны могут самопроизвольно (спонтанно) вернуться на прежний уровень энергии, избыток энергии, равный разнице энергии электрона на уровнях, излучается в виде фотона с энергией, которая также равна разнице энергий электрона на уровнях. Перевести электроны на более высокие уровни энергий могут только фотоны, имеющие энергию, равную разнице энергий уровней, остальные фотоны проходят кластер, не поглощаясь и не взаимодействуя с ним.

Цвет материала определяется энергией поглощаемых фотонов. Так как разница уровней энергии электронов в кластере зависит от его размера, то и цвет материала, содержащего нанокластеры, определяется их размерами.

### 9.2. Кристаллическая структура наночастиц

В кристаллическом твёрдом теле атомы друг относительно друга располагаются в строгом геометрическом порядке и образуют трёхмерную периодическую структуру, так называемую кристаллическую решётку, разную у разных веществ. Имеется определённое количество типов кристаллических

решеток. Тип решетки определяется характером межатомных взаимодействий вещества.

Обычно тип кристаллической структуры наночастицы повторяет структуру объёмного материала, то есть, является кубической, гексагональной, и т.д. Однако, параметр решётки частицы (расстояние между атомами) может отличаться от параметра массивного материала.

Уменьшение нанокластеров до малых размеров (менее 5 нм) часто приводит к изменению типа кристаллической решётки. На структуру влияет также присоединение к поверхностным атомам кластера других химических соединений, например, в результате образования окисла.

#### *Переход свойств частиц металла от объёмных к нанокластерным*

При увеличении количества атомов кластер начинает вести себя как объёмное вещество. Для разных физических свойств этот переход имеет место при разных размерах кластера.

Для кластера менее 100 атомов для удаления одного электрона требуется меньшая энергия (энергия ионизации кластера), чем для удаления электрона из объёмного вещества (работа выхода электронов).

Нанокластер золота размером 3 нм плавится при  $530^{\circ}\text{C}$ , тогда как температура плавления массивного золота равна  $1063,4^{\circ}\text{C}$ . Температура

плавления кластеров золота уравнивается с температурой плавления массивного золота при размерах кластера более 1000 атомов.

Среднее расстояние между атомами в кластере меди приближается к значениям в объёмном материале при размере кластера 100 атомов.

Таким образом, размеры кластера, при которых его свойства приближаются к объёмным, зависят от вида измеряемой характеристики.

#### *Полупроводниковые наночастицы*

Полупроводники отличаются от металлов тем, что значения энергии электронов в них распределены по дискретным уровням; уровни образуют энергетические зоны, между которыми имеются промежутки. Электроны не могут иметь значения энергий, соответствующих промежуткам, и промежутки называют «запрещёнными зонами». Часть энергетических зон заполнены электронами, часть – не заполнены, так как в веществе количества электронов на внешних оболочках атомов недостаточно для заполнения всех возможных уровней.

При падении света на полупроводник фотон с энергией больше ширины запрещённой зоны возбуждает электрон из заполненной зоны в ближайшую незаполненную. В заполненной зоне образуется дефицит отрицательного заряда, то есть, положительный заряд, который имеет свойства положительной частицы, почти во всём, кроме знака заряда, подобной электрону. Частица имеет название «дырка» и перемещается по веществу. Электрон и дырка могут находиться друг от друга на расстоянии в несколько параметров решётки, но притягиваются друг к другу, образуя под действием кулоновского притяжения

связанную пару, которая называется экситоном. Экситон перемещается по веществу подобно атому, состоящему из двух частиц – положительной (дырки) и отрицательно заряженной – электрона. Структура уровней энергий экситона, подобно атому, складывается из дискретных уровней; под действием падающего на вещество света возможны переходы значения энергии экситона между уровнями, что приводит к особенностям в поглощении света.

При уменьшении радиуса частицы до величины радиуса электронно-дырочной пары область перемещения экситона ограничивается (случай слабой локализации экситона) спектр поглощения излучения веществом смещается в более коротковолновую – голубую – область спектра.

Когда радиус частицы меньше радиуса орбиты электронно-дырочной пары (случай сильной локализации), экситон перестаёт существовать, движения электрона и дырки становятся независимыми, у них появляются собственные наборы энергетических уровней.

Отсюда следует, что наночастицы полупроводников не являются полупроводниками. Поглощение света наночастицами полупроводника также характеризуется смещением по спектру в коротковолновую область с уменьшением размера частицы.

#### *Фотофрагментация полупроводниковых нанокластеров*

При облучении наночастиц полупроводников высокointенсивным лазерным излучением наблюдается фрагментация частиц на более мелкие. Вероятность фрагментации нелинейно зависит от размера исходной частицы, частицы одинаковых размеров распадаются с большей вероятностью, чем других.

#### *Кулоновский взрыв.*

При многократной ионизации кластера светом большой интенсивности в нём скапливается большое число не скомпенсированных положительных зарядов. Каждый атом оказывается положительно заряженным, их взаимное кулоновское отталкивание может превысить силы связи атомов в веществе, атомы быстро разлетаются с большими скоростями. Явление происходит взрывоподобно и называется кулоновским взрывом.

### *9.3. Методы синтеза наночастиц*

Наночастицы могут получаться двумя основными методами:

- сборкой или самосборкой из отдельных атомов;
- обработкой массивного материала различными методами и получение из него частиц необходимого размера.

На рис. 4.2 показана установка для получения металлических кластеров из пара, то есть, сборкой из атомов.. Лазерный луч высокой интенсивности испаряет металлический стержень, испарённые атомы уносятся потоком гелия через сопло.

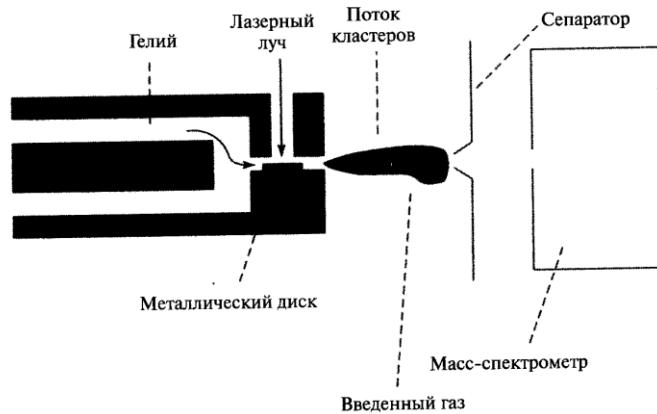


Рис. 4.2 Получение наночастиц металлов лазерным испарением атомов с поверхности

Расширение этого потока в вакуум приводит к его охлаждению и конденсации атомов в кластеры. Для определения распределения кластеров по размерам кластеры ионизуют УФ – излучением и направляют в масс-спектрометр для определения отношения массы кластера к его заряду.

На рис. 4.3 иллюстрируется метод синтеза наночастиц с помощью плазмы, создаваемой радиочастотными нагревательными катушками.

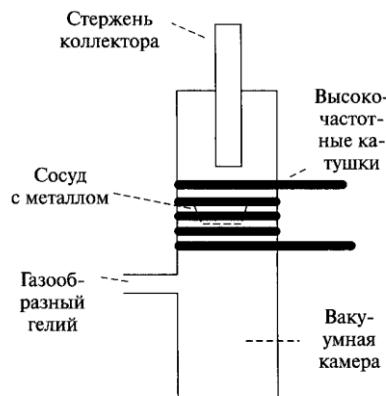


Рис. 4.3. Установка для синтеза наночастиц с помощью плазмы, получаемой в высокочастотном поле

Металл размещают в вакууме и разогревают ВЧ-полем выше температуры испарения; катушки индуктора расположены вне вакуумной камеры. Затем в камеру впускают гелий, что приводит к образованию в области внутри катушек высокотемпературной плазмы. Атомы гелия являются зародышами для конденсации атомов металла, образовавшиеся комплексы диффундируют к холодному коллектору, на котором и образуются наночастицы.

Наночастицы могут образовываться в результате термолиза (разложения при высокой температуре) твёрдых химических соединений, содержащих атомы металлов. На рис. 4.4 показана установка для такого получения наночастиц.

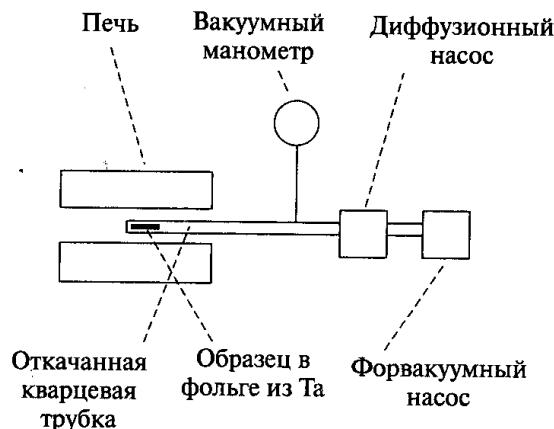


Рис. 4.4. Получение кластеров металлов термическим разложением химических соединений

Соединение помещают в кварцевую откаченную трубку и нагревают в высокотемпературной печи. В результате термолиза молекула распадается, выделяется газообразная составляющая и откачивается. Оставшиеся атомы металла объединяются в кластеры. Можно получить наночастицы размером менее 5 нм.

Для получения наночастиц металла используют также импульсное лазерное излучение. На рис. 4.5 приведена схема установки получения наночастиц серебра воздействием импульсного излучения на поверхность диска, вращающегося в растворе нитрата серебра.

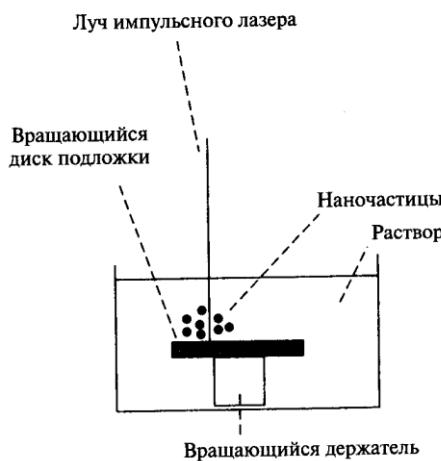


Рис. 4.5. Получение наночастиц серебра с помощью импульсного лазерного излучения

Раствор нитрата серебра и восстановителя протекал через смеситель, роль которого выполнял вращающийся диск. В нагретых излучением областях нитрат реагировал с восстановителем с образованием наночастиц серебра. Впоследствии наночастицы отфильтровывались из раствора.

10.1 *Фуллерены*

Распространённый в природе твёрдый углерод имеет две кристаллические формы – алмаз и графит. Кристаллическая структура алмаза кубическая, каждый атом связан с четырьмя соседями.

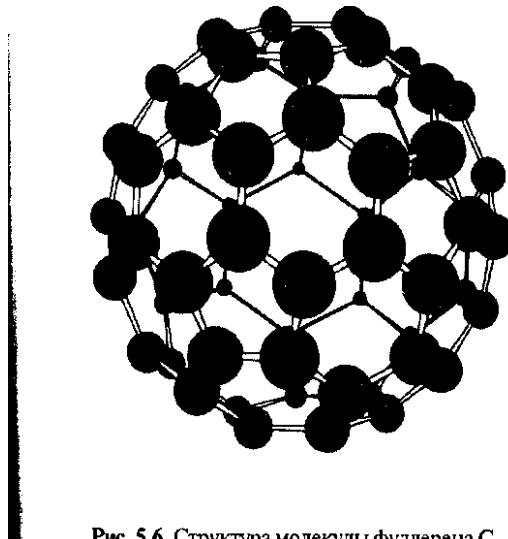


Рис. 5.6. Структура молекулы фуллерена  $C_{60}$ .

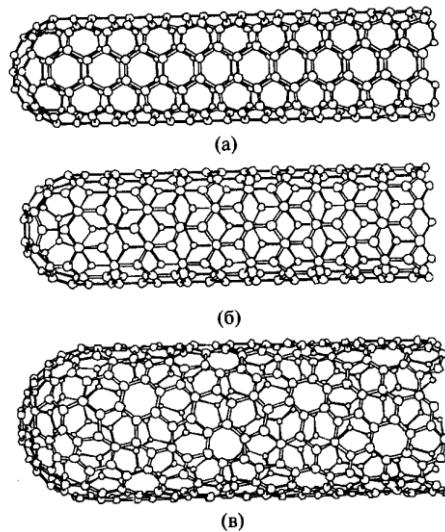
Графит имеет слоистую структуру, каждый слой образован шестиугольниками из атомов углерода; у каждого атома три соседа в плоскости слоя. Слои связаны друг с другом относительно слабыми связями, поэтому графит легко расслаивается.

Однако, при исследованиях поглощения света межзвездной средой была обнаружена новая форма углерода. Молекула такого углерода  $C_{60}$  содержит 60 атомов, расположенных в один слой на сферической поверхности, и имеет шаровидную форму, похожую на футбольный мяч. Новая форма углерода была названа фуллереном; молекула составлена из 12 пятиугольных и 20 гексагональных (шестиугольных) симметрично расположенных граней. Молекулы могут соединяться в гранецентрированную кристаллическую решетку. Фуллерены получают искусственно методами, похожими на получение металлических наночастиц. При лазерном получении фуллеренов поверхность графитового вращающегося диска облучают в атмосфере инертного газа.

## 10.2 Углеродные нанотрубки

Более интересными с точки зрения практического применения являются углеродные нанотрубки. Такую трубку можно представить как лист графита, свёрнутый в цилиндр. Углеродные нанотрубки получают лазерным

испарением, с помощью электрической дуги, химическим осаждением из пара. Механизм роста нанотрубок пока не выяснен. Однослойные трубы имеют диаметр 1-5 нм, длину порядка мкм.



Наиболее интересное свойство нанотрубок заключается в том, что они могут быть металлическими или полупроводящими в зависимости от их диаметра и структуры. При синтезе обычно получается смесь трубок – две трети полупроводящие, треть – имеющие металлическую проводимость..

В металлическом состоянии проводимость нанотрубок очень высока, они могут пропускать миллиард ампер на квадратный сантиметр (в тысячу раз больше, чем медный проводник). Теплопроводность нанотрубок почти вдвое превышает теплопроводность алмаза – наиболее теплопроводящего из всех веществ.

Углеродные нанотрубки очень упругие при изгибе и очень прочны при растяжении. Жесткость на растяжение углеродной нанотрубки (модуль Юнга) в 10 раз больше, чем у стали, прочность на разрыв больше в 20 раз.

Необычные свойства нанотрубок из углерода допускают множество применений. В настоящее время ведутся работы по использованию нанотрубок как эмиттеров электронов, для создания аналогов полевых транзисторов и переключающих элементов для применения в качестве базы создания сверхбыстро действующих компьютеров, в топливных элементах., для создания химических сенсоров.

Прочность нанотрубок позволяет на их основе изготавливать сверхпрочные пластиковые композиционные материалы (состоящие из нанотрубок и пластмасс, при этом прочность на разрыв может увеличиваться в несколько раз. Использование композиционных материалов из стали и нанотрубок позволяет увеличивать прочность стали в 7 раз.

## 11. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НАИОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

### 11.1. Выделяют следующие направления развития нанотехнологий

*Дальнейшее развитие оптической литографии на основе перехода к экстремально короткой длиной волны 13 нм, что обеспечит разрешение на уровне 10 – 30 нм.*

*Наноимпринтинг* (нанопечать с помощью штампа с нанорельефом). Новая групповая технология получения рисунка с разрешением  $\leq 10$  нм, может заменить оптическую литографию; используется как для получения защитных масок, так и для функциональных структур.

*Интеллектуальные нанотехнологические комплексы на базе сканирующей зондовой техники.* Нанорельеф на поверхности подложки создаётся при механическом перемещении нанозонда (иглы с вершиной из нескольких атомов) вдоль поверхности на расстоянии от нескольких атомов до касания подложки; поверхность подложки локально модифицируется за счёт электрополевых, механических или тепловых воздействий, при этом на поверхности может изменяться фазовый состав, потенциальный и пространственный рельеф; достижимо разрешение  $\leq 10$  нм. Для увеличения производительности необходимы многозондовые сборки и обеспечение многократного совмещения наносимых последовательно слоёв с нанорисунками.

*Технологии самоорганизации и самосборки.* При полученииnanoструктур путём их сборки из атомов на поверхности подложки в настоящее время развиваются методы получения упорядоченных nanoструктур при гетероэпитаксиальном получении плёнок, методы выращивания самоорганизующихся нанообразований типа фуллеренов и нанотрубок, однако при этом необходимо решать задачу их самосборки в пространственно-упорядоченном виде. Последнее достигается использованием выращивания нанотрубок в расположенных упорядоченно полостях пористых мембран.

*Технология получения рисунка на базе сканирующей зондовой микроскопии с разрешением 0,5 – 1 нм за счёт использования в качестве зондов углеродных нанотрубок*

Необходимым для развития технологий является также создание соответствующего измерительного оборудования с разрешением до атома. Для этой цели созданы *туннельные зондовые и атомно-силовые микроскопы*. Эти микроскопы могут применяться также в качестве технологического инструмента в зондовых технологиях получения nanoструктур.

### 11.2 Самосборка упорядоченных структур

Самосборка – самопроизвольная организация малых молекул в большие строго определённые стабильные молекулярные комплексы или агрегаты и

осаждение атомов и молекул на подложку с последующим самоупорядочением в полезные наноструктуры.

Примером технологии самосборки является выращивание на поверхности подложки в процессе получения полупроводниковой плёнки упорядоченно расположенных нановыступов.

В технологии микроэлектронных приборов используется нанесение тонких плёнок на монокристаллические подложки таким образом, что бы кристаллическая структура плёнок повторяла структуру подложек, то есть, расположение атомов плёнки являлось бы продолжением их расположения в подложке. Если химический состав плёнки совпадает с составом подложки, процесс называется эпитаксиальным, если составы разные - процесс гетероэпитаксиальный. При гетероэпитаксии расстояния между атомами плёнки устанавливаются под действием межатомных сил подложки не соответствующими расстояниям такого же массивного материала, то есть, плёнка находится в механически напряжённом состоянии, в плёнке существуют упругие напряжения, которым соответствует определённая избыточная механическая потенциальная энергия плёнки. При продолжении процесса осаждения материала плёнки может так получиться, что случайно возник выступ на плёнке. Границы выступа также имеют запас поверхностной энергии, обусловленный силами поверхностного натяжения плёнки; таким образом, выступ обладает суммой энергии упругих напряжений на поверхности, граничащей с подложкой, и энергии поверхностного натяжения граней выступа. Сумма этих энергий при продолжении процесса осаждения вещества должна стремиться к минимуму. Если энергия поверхностного натяжения граней выступа меньше энергии упругих напряжений на границе выступа с подложкой, то для выступа энергетически выгодно расти в высоту без увеличения площади границы с подложкой, в противном случае – расти в высоту невыгодно, и случайно возникший выступ расти не может.

Кроме того, при малых расстояниях между растущими выступами имеет место взаимное влияние упругих напряжений соседних выступов через подложку, это влияние сводится к взаимному отталкиванию выступов.

Общим результатом указанных упругих воздействий может быть самопроизвольное упорядочение расположения вырастающих выступов. Высота выступов и периодичность их расположения регулируются выбором материалов, скоростью нанесения вещества и температурой подложки. Получены полупроводниковые структуры в виде матриц периодически расположенных пирамидальных выступов с квадратными основаниями размерами 5 – 20 нм. Подобные структуры используются для получения излучающих оптоэлектронных устройств – полупроводниковых нанокластерных лазеров и светодиодов.

## Лекция 17                    12. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

### 12.1 Принцип действия электронных микроскопов

В настоящее время различают просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) и растровую электронную микроскопию (РЭМ). Данные для сравнения РЭМ, ПЭМ и световой микроскопии (СМ) приведены в таблице 1.

**Табл. 1.** Сравнительные характеристики световых и электронных микроскопов

Методы микроскопии	$\delta$ , нм	$D$ , нм	$M$
СМ	200	$10^3$	$10^3$
РЭМ	3	$10^5$	$10^5$
ПЭМ	0.2	2	$10^6$

**Просвечивающий электронный микроскоп** представляет собой вакуумную камеру, изготовленную в виде вертикально расположенной колонны (рис. 1). Вдоль центральной оси этой колонны сверху вниз внутри колонны расположены электронный прожектор, определенный набор электрических катушек с проводом - электрических магнитов, выполняющих роль электромагнитных линз для пучка электронов, проходящего вдоль центральной оси колонны до ее основания, и флуоресцирующего экрана, поверхность которого бомбардируют электроны пучка.



Рис.1. Просвечивающий электронный микроскоп JEM-200CX

ПЭМ является фактическим аналогом светового микроскопа. Его схема показана на рис.2. Исследуемый образец располагается в области объективной линзы 5. Проекционная и промежуточная линзы выполняют функцию окуляра. Изображение формируется на флуоресцирующем экране.

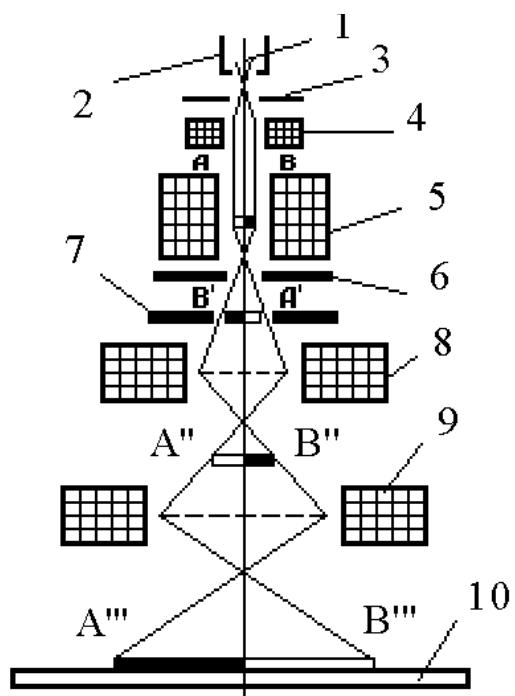


Рис. 2. Схема просвечивающего электронного микроскопа:

1 - катод, 2 - управляющий электрод, 3 - анод, 4 - конденсорная линза, 5 - объективная линза, 6 - апертурная диафрагма, 7 - селекторная диафрагма, 8 - промежуточная линза, 9 - проекционная линза, 10 – экран

Объект АВ располагают обычно на микросетке. Проходя через объект, электроны рассеиваются в некоторый телесный угол, который ограничивается апертурой диафрагмой объективной линзы. Изображение объекта, формируемое объективной линзой ( $A'B'$ ) увеличивается промежуточной ( $A''B''$ ) и проекционной ( $A'''B'''$ ) линзами. Контраст изображения обуславливается поглощением (амплитудный контраст) и рассеянием (фазовый контраст) электронов в объекте (рис. 3).

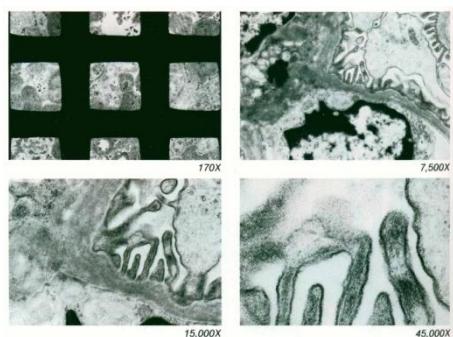


Рис. 3. Электронные изображения биологической ткани, полученные при различной степени увеличения. На первом изображении с увеличением в 170 раз видна графитовая микросетка, на которой располагают исследуемый объект

В ПЭМ объект исследования должен пропускать пучок электронов. Первостепенная задача исследователя - обеспечение двух условий: малой толщины образца и избирательного взаимодействия электронов с разными деталями образца. Микроскоп снабжается камерой, в объёме которой создаётся необходимый вакуум ( $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  Па). Ускоряющее напряжение, прикладываемое между катодом и анодом, находится в пределах от 20 до 200 кВ, что обеспечивает режим работы «на просвет». В РЭМ это напряжение значительно меньше (до 20 кВ). Весьма эффективно применение ПЭМ для анализа микроструктуры материалов, установление в ней нарушений, контроля правильности заполнения узлов кристаллической решётки, наличия пустот, дислокаций и т.д. (рис. 4).



Рис. 4. Двумерное электронное изображение кристалла Nb, полученное при 200 кэВ ускоряющего напряжения и увеличении в 6.000.000 раз. Чёрные точки соответствуют позициям атомов Nb, белые – каналам межатомного пространства

В отличие от ПЭМ **растровая электронная микроскопия** позволяет дефектоскопировать образцы практически любых размеров по толщине. В её основе лежат физические явления, наблюдающиеся при бомбардировке поверхности твёрдого тела пучком электронов с энергией до нескольких десятков килоэлектронвольт, разворачиваемым в двумерный растр на поверхности исследуемого образца. К таким явлениям относятся: эмиссия вторичных электронов (рис. 5); рентгеновское излучение; оптическое излучение (катодолюминесценция); образование отражённых электронов (рис. 6); наведение токов в объекте дефектоскопирования (рис. 7 а); поглощение электронов (рис. 7 б); электроны, прошедшие сквозь образец (рис. 7 в); образование объёмного заряда; образование термоволны при модуляции электронного пучка по амплитуде. Регистрация и последующее преобразование сигналов, вызванных вторичными эффектами, позволяет получить разнообразные по информативному содержанию "электронные" изображения объекта.

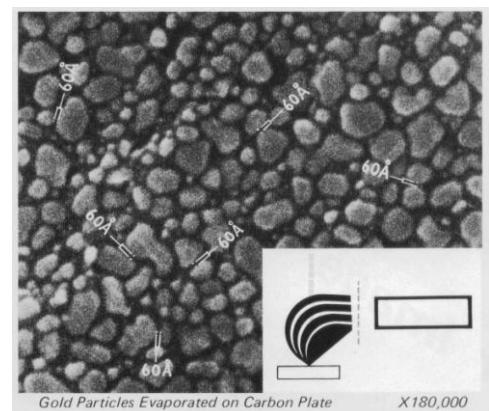


Рис. 5. Изображение структуры золотой пленки, полученное во вторичных электронах с

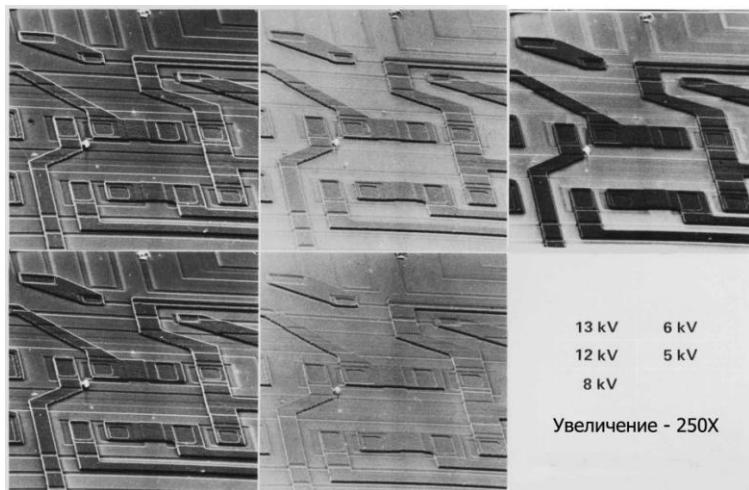


Рис. 6. Контроль дефектов изготовления интегральных схем по электронным изображениям, полученным в режиме контроля отраженных электронов при различных ускоряющих напряжениях и увеличении в 250 раз

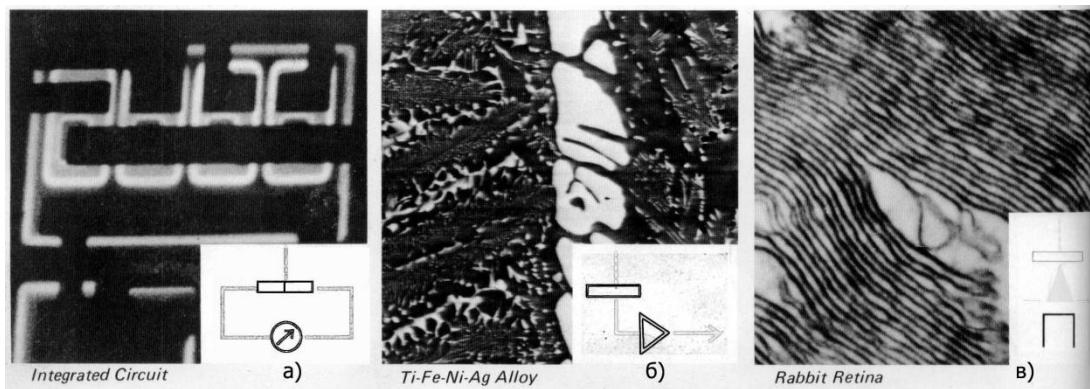


Рис. 7. Электронные изображения, полученное в режимах контроля наведенных токов в кристалле интегральной схемы (а), поглощенных электронов (сквозного сопротивления) в пленке сплава четырех металлов Ti-Fe-Ni-Ag (б), электронов, прошедших сквозь тонкий слой каучука (в)

Конструктивно РЭМ от ПЭМ отличается наличием отклоняющей системы для электронного луча, датчиков отражённых и вторичных электронов, датчиков других вторичных сигналов с блоком формирования видеосигнала и электронным видеоблоком для наблюдения и фотографирования изображения (рис. 9, 10).

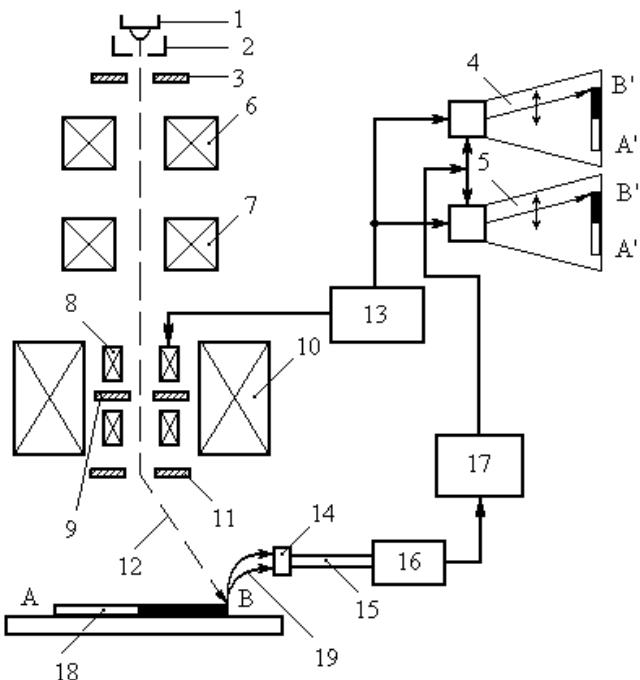


Рис. 10. Схема растрового электронного микроскопа:

1 - термоэмиссионный катод; 2 - управляющий электрод; 3 - анод, 4 - ЭЛТ для наблюдения; 5 - ЭЛТ для фотографирования; 6,7 - первая и вторая конденсорная линзы; 8 - отклоняющие катушки; 9 – стигматор; 10 - объективная линза; 11 - объективная диафрагма; 12 - электронный пучок; 13 - генератор развёртки электронного луча микроскопа и ЭЛТ видеоблока; 14 - сцинтиллятор; 15 – светопровод; 16 – ФЭУ; 17 – видеоусилитель; 18 – исследуемый образец; 19 – регистрируемый сигнал (оптический, рентгеновский или электронный)

В РЭМ необходимо применять излучающую систему, формирующую на образце пятно очень малого размера и позволяющую перемещать его по всей поверхности образца. Вследствие того, что диаметр пучка электронов поддерживается в пределах нескольких микрометров на достаточно большом расстоянии от поверхности образца, глубина резкости велика, что очень важно при исследовании рельефных поверхностей микрообъектов (рис. 6). Эта особенность РЭМ, которой полностью лишены световые и просвечивающие электронные микроскопы, обеспечивает РЭМ большое практическое значение и при небольших увеличениях.

## 12.2 Принцип действия ионных микроскопов

Методы зондирования поверхности излучениями всё же не дают возможности своими глазами увидеть её самые малые участки. Для того, чтобы понять, что же происходит на поверхности, исследователям необходима карта точного расположения атомов и их электронных оболочек. Наблюдать отдельные атомы на поверхности позволяют ионные микроскопы. Это связано с тем, что длина волны движущегося в электрическом поле иона должна быть гораздо меньше, чем длина волны электрона, что подтверждается формулой Луи де Броиля -

$$\lambda = h/mv,$$

ведь масса иона несоизмеримо больше массы покоя электрона.

В настоящее время (начало бурного развития наноэлектронных технологий) практически опробованы и постоянно модернизируются несколько типов ионных микроскопов, среди которых можно выделить *полевой ионизационный микроскоп*, *растровый туннельный микроскоп* и *атомный силовой микроскоп*. Ниже кратко рассмотрим первых два вида ионных микроскопов.

### 12.3 Полевой ионизационный микроскоп (ПИМ)

Основой прибора служит очень тонкая и острая металлическая игла, являющаяся исследуемым образцом, а также люминесцентный экран, расположенный напротив (рис. 12).

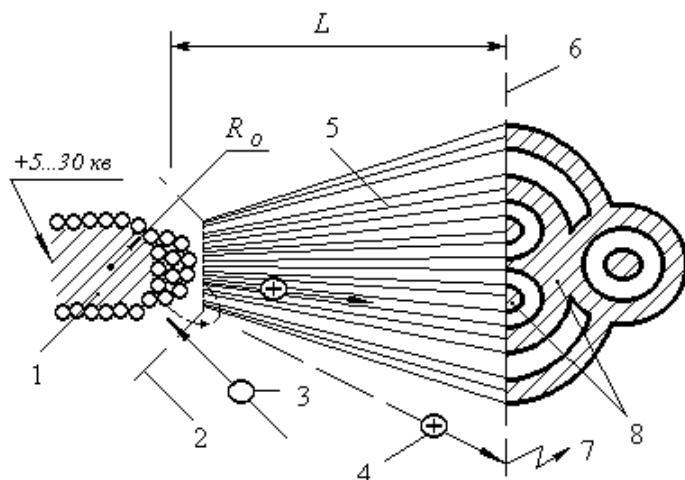


Рис. 12. Схема формирования изображения в полевом ионизационном микроскопе

- 1 - образец исследуемого материала (наконечник иглы); 2 - зона ионизации;
- 3 - атом "изображающего" газа; 4 - ион; 5 - расходящийся поток ионов;
- 6 - заземлённый флуоресцирующий экран; 7 - вспышка на экране;
- 8 - изображение (совокупность вспышек)

Пространство между иглой и экраном заполняется инертным газом (гелием, аргоном) при давлении  $10^{-1}$  Па. Если между кончиком иглы и экраном приложить напряжение, причём игла должна служить анодом, то вокруг неё можно создать чрезвычайно сильное электрическое поле - около  $500 \text{ МВ/см}^2$ . Когда электрически нейтральный атом вследствие диффузии подходит к атомам острия, электрическое поле ионизирует его. Этот ион под действием электрического поля направляется к той точке экрана, которая однозначно соответствует позиции атома исследуемого образца, вблизи которого произошла ионизация. Изображение иглы на флуоресцирующем экране

характеризуется очень большим увеличением - отчётливо видны атомы кристаллической решётки. Поскольку ионы - это тяжёлые частицы, то длина их волны очень мала, вследствие чего исключаются дифракционные эффекты, снижающие разрешающую способность получаемых изображений.

При этом максимальное разрешение микроскопа определяется величиной менее 0,2 нм.

Однако не все образцы можно изучать с помощью ионного микроскопа. Образец должен быть наложен на тонкий кончик иглы шириной несколько ангстрем и быть стойким к огромным электрическим полям, которые могут привести к разрыву химических связей, удерживающих атомы на поверхности. Самые важные с технологической точки зрения полупроводниковые материалы можно изучать лишь при полях с плотностью около 350 МВ/см.

#### 12.4 Растровый туннельный микроскоп (РТМ)

Принцип работы РТМ сравнительно прост. Сканирующая металлическая игла, закрепленная в трехкоординатном приводе  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , расположена перпендикулярно исследуемой поверхности (рис. 13).

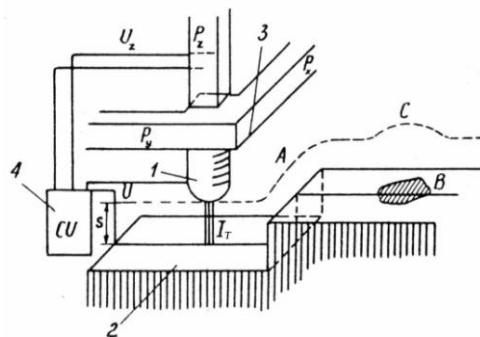


Рис. 13. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа:  
1 – игла; 2 – исследуемая поверхность; 3 – трехкоординатный пьезопривод; 4 – система обратной связи

С помощью пьезопривода игла подводится к поверхности образца до возникновения туннельного тока  $I_T$ , который определяется величиной зазора  $s$  между иглой и поверхностью:

$$I_T \approx U e^{-s \sqrt{\Phi}},$$

где  $\Phi$  – величина потенциального барьера в зазоре, измеряемая в электронвольтах;  $U$  – напряжение, приложенное между иглой и образцом в вольтах;  $s$  – зазор между поверхностью и иглой в ангстремах.

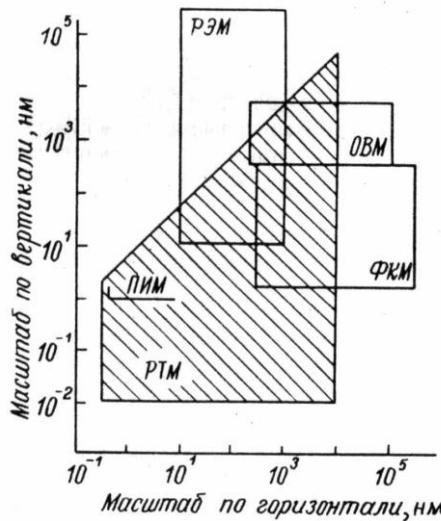


Рис. 14. Пределы разрешения различных типов микроскопов: РТМ-растровый туннельный микроскоп; ОВМ-оптический микроскоп с высоким разрешением; РЭМ-растровый электронный микроскоп; ПИМ-полевой ионизационный микроскоп; ФКМ-фазо-контрастный микроскоп

При постоянном напряжении  $U$  на зазоре игла перемещается вдоль поверхности, причем с помощью системы обратной связи, воздействующей на пьезоэлемент  $P_z$ , туннельный ток  $I_T$  поддерживает постоянным. Если величина барьера  $\Phi$  постоянна вдоль исследуемой поверхности (материал поверхности однороден), то величина туннельного тока будет изменяться пропорционально величине зазора между иглой и поверхностью и график изменения этого тока будет описывать профиль рельефа поверхности. Набор таких профилей даст непосредственную информацию о топографии поверхности.

На рис. 14 представлены сравнительные характеристики различных сканирующих растровых микроскопов, а на рис. 15 и 16 – примеры изображений отдельных групп атомов, построенных с помощью РТМ.

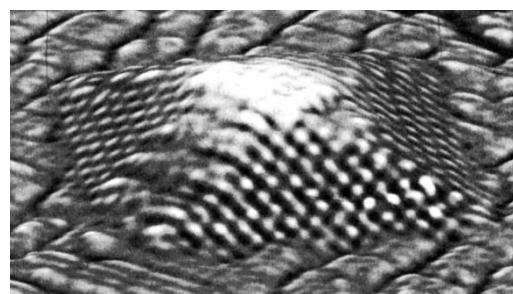


Рис. 15. РТМ-изображение германиевой самосборки атомов (германиевая «пирамида» на кремнии) шириной 10 нм

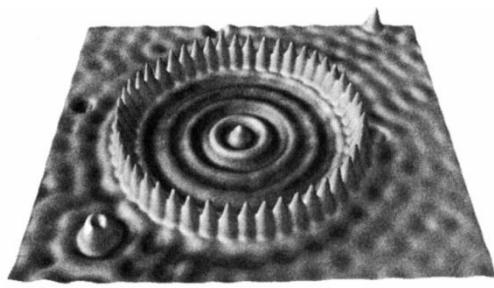


Рис. 16. РТМ-изображение «квантового загона» - 48 атомов Fe по окружности диаметром 14,6 нм с движущимися внутри электронами (волновой рельеф) на медной пластине