Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

В.А. Мухачев

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие для студентов направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»

Томск – 2016

Аннотация

Микросистемная техника (МСТ) – наиболее быстро развивающаяся область микроэлектроники. Изделия МСТ возникли и развиваются на основе научного, производственного и технологического заделов микроэлектроники. Поэтому описание работы элементов МСТ часто связано с описанием работы приборов микроэлектроники. Возможности МСТ ограничиваются технологией и в пособии изложены те технологические приемы, которые используются при производстве изделий МСТ.

Область применений изделий МСТ, а также методов и средств, которыми она оперирует, непрерывно расширяется. Кроме того, одно и то же изделие может работать как сенсор и как актюатор. Поэтому сложно построить достаточно полную классификацию объектов МСТ и средств, которыми она оперирует.

Учебное пособие не научный труд, поэтому в тексте нет ссылок на научную литературу. В разделе «Литература» приведены те источники, на основе которых было написано пособие.

Содержание

1. Введение 6

1.1 Области применения МЭМС и НЭМС 7

1.2 История развития МЭМС 10

2.1. Законы пропорциональной миниатюризации 11

2.2. Микро-и нанотрибология 14

2.3. Наномеханика и износ наномеханизмов 17

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ 19

3.1. Технология объемной микрообработки 19

3.2. LIGA-технология 24

3.3. Технология поверхностной микрообработки 27

3.4. MUMPs-технология 28

3.5. SUMMiT-технология 31

4. О ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ВЕЩЕСТВ И ЭФФЕКТАХ В НИХ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МСТ. ПОНЯТИЕ ТЕНЗОРА 32

4.1. О тензорном описании физических свойств кристаллов 32

4.2 Электрическое воздействие 34

4.3. Механические воздействия 35

4.4. Тепловое расширение 37

5. ВЗАИМНАЯ СВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЯВЛЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ 37

5.1. Пироэлектрический эффект 40

5.2. Пьезоэлектрический эффект 42

5.3. Пьезоэлектрические материалы 46

6. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ 48

6.1. Пьезорезистивный эффект и анизотропия пьезорезистивных коэффициентов 48

6.2. Конструкции тензорезисторов 51

7. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МСТ В СИЛОВОМ ПОЛЕ 52

7.1.Закон Гука 53

7.2. Момент инерции сечения 55

7.3. Жесткость микромеханических элементов при изгибе 58

7.4. Жесткость микромеханических элементов при сдвиге (кручении) 62

7.5. Демпфирование колебаний микромеханических элементов 62

8. Чувствительные механические элементы 63

8.1. Поведение при статических воздействиях 64

8.2. Динамическое воздействие

9. МИКРОСИСТЕМНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ 78

10. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ 82

11. СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ 88

11.1 Термоэлектричество 88

11.2. Резистивные сенсоры температуры 92

11.3. Полупроводниковые сенсоры температуры 96

11.4. Пьезоэлектрические датчики температуры 97

11.5. Бесконтактное измерение температуры 99

11.6 Использование сенсоров температуры в комбинации с другими преобразователями 103

11.6.1. Каталитические сенсоры концентрации газов 103

11.6.2. Тепловые расходомеры 104

11.6.3.Акселераторы с нагревом газа **96**

11.6.4. Сенсоры излучения на основе термоэлектрического и терморезистивного эффектов ..97

11.6.5. Пироэлектрические датчики ИК - излучения 109

11.6.6. Термопневматические детекторы 113

12. Актюаторные компоненты МСТ 115

12.1. Интегральные микромеханические ключи 115

12.2. Интегральные микрозеркала 121

13. Сенсоры угловых скоростей 131

13.1. Волоконный оптический гироскоп 132

13.2. Микромеханические гироскопы 134

14. Сенсоры магнитного поля 139

14.1. Элемент Холла 139

14.2. Двухколлекторный магнитотранзистор 141

14.3 Нанометровые магнитные сенсоры.Гигантское магнитное сопротивление 142

15. Актюаторные элементы микросистемной техники 153

15.1. Микронасосы 158

15.1.1. Электрический микронасос 159

15.1.2. Механические микронасосы с активными клапанами 162

15.1.3. Механические микронасосы с пассивными клапанами 163

16. Интегральные микродвигатели 164

16.1. Электростатические воздушные планарные микродвигатели 165

16.2. Электростатические диэлектрические планарные микродвигатели *168*
16.3. Пьезоэлектрический микродвигатель *175*
17. Лабораториии – на - Кристалле *180*
17.1. Газовый хроматограф *181*
17 .2. Жидкостный хроматограф *183*
17.3. Детектирующие устройства микролабораторий *186*
18.1 Молекулярные актюаторы *187*
18.2. Молекулярные моторы *189*
19. ***Литература*** *192*

1. Введение [1]

Страны, определяющие научно-технический прогресс, при выборе своих национальных интересов используют термин «критические технологии». Как правило, перечень критических технологий характеризует уровень интеллектуального потенциала нации и, безусловно, желание и способность государства обеспечить его развитие. Бытует мнение, что с точки зрения материаловедческого базиса XIX в. был веком нефти, а XX в. подарил нам кремний — основу практически всех современных информационно-управляющих, радиоэлектронных и коммуникационных систем. И все же одним из самых замечательных научно-технических достижений конца XX в. стал не очередной сверхбыстрый процессор, а так называемая микромеханическая миниатюра, процесс создания которой базируется на чрезвычайно высоко развитой культуре кремниевой технологии. В 1982 г. сотрудник фирмы IBM К. Петерсон по-новому взглянул на кремний, увидев в нем не только полупроводниковый, но и конструкционный механический материал.

Появление миниатюрных устройств, в которых гальванические (электрические) подсистемы интегрируются на микроуровне с механическими, способствовало появлению нового направления, с 1987 г. обозначающегося как MEMS (МЭМС) (микроэлектромеханические системы). В настоящее время в мировой практике для фактически одного и того же направления наиболее часто используют понятия: в США — MEMS и MOEMS (микроэлектромеханические и микрооптомеханические системы); в Японии — MIKROMACHINES (микромашины), в европейских странах — MST — MICROSYSTEM TECHNOLOGY (дословно «технология микросистем»).

В России с 1996 г. в «Перечне критических технологий федерального уровня» официально используется термин «микросистемная техника», а в утвержденном президентом России 30 марта 2002 г. «Перечне критических технологий Российской Федерации» микросистемная техника представлена как самостоятельная критическая технология, содержание которой определено следующим образом: «.. **.сверхминиатюрные механизмы, приборы, машины с ранее недостижимыми массогабаритами, энергетическими показателями и функциональными параметрами, создаваемые интегрально-групповыми экономически эффективными процессами микро- и нанотехнологии».**

Развитие изделий МСТ стало экономически обоснованным и технически оправданным с появлением нового поколения высоко интегрированных электронных и механических компонентов, способных обеспечить работу функционально завершенных систем объемом в единицы кубических сантиметров.

Изделия МСТ на текущем этапе развиваются на основе научного, производственного и технологического заделов микроэлектроники — ее

материалов, конструкций, компонентов, групповых прецизионных процессов, а также ряда других направлений электронной техники.

Принципиальное отличие изделий МСТ от изделий микроэлектроники состоит в трехмерности структур изделий микросистемной техники, исполнительные элементы которой обладают возможностью функционального механического перемещения.

1.1 Области применения МЭМС и НЭМС

Микроэлектромеханические и наноэлектромеханические системы (МЭМС и НЭМС) имеют широкие перспективы внедрения в вычислительной, телекоммуникационной, а также в бытовой, авиационной, автомобильной, медицинской и военной технике (см. рис.1.1). Самые высокие темпы развития в период с 2007 г. по 2012 г. ожидаются в области телекоммуникаций (до 40%).

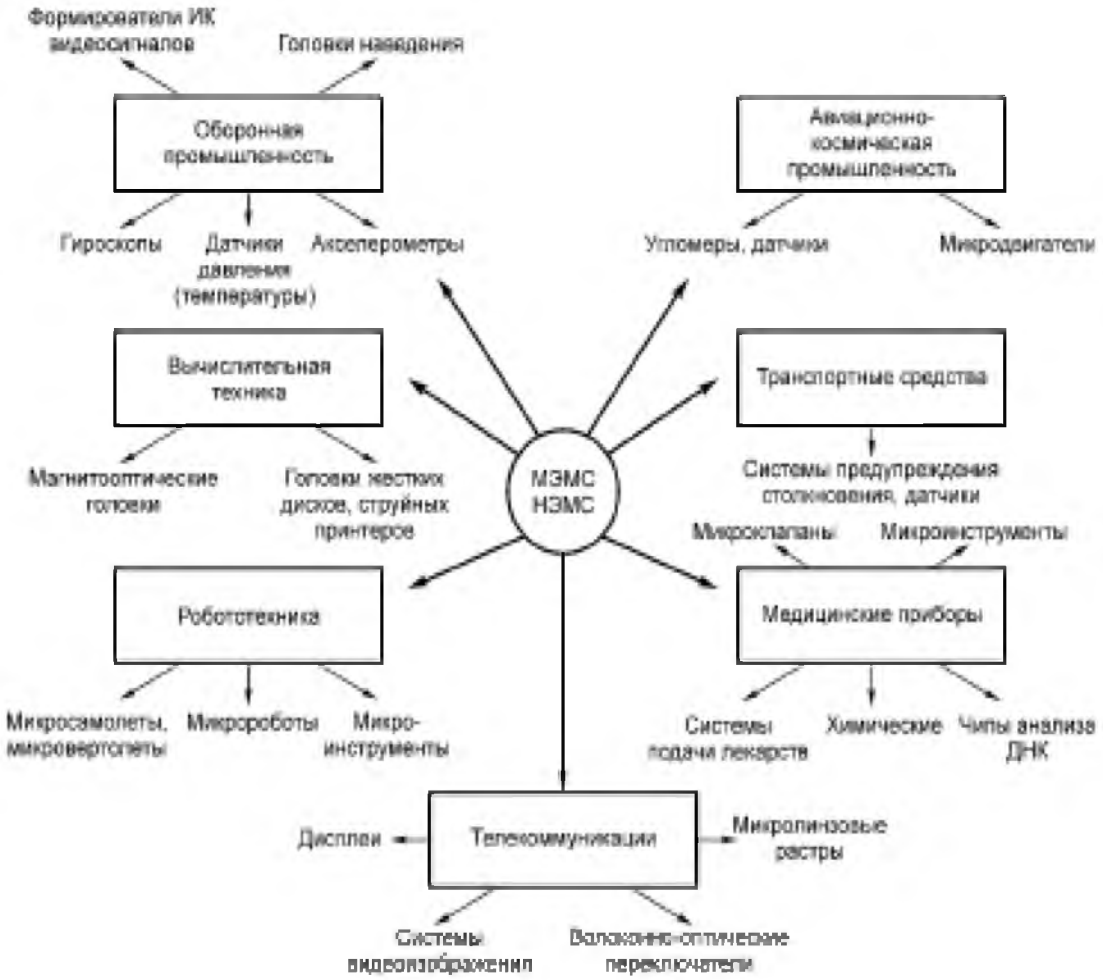


Рис.1.1. Области применения МЭМС и НЭМС

В последнее время расширение функциональных возможностей бытовой техники стало стимулом более широкого применения микроэлектромеханических систем. Примером МЭМС является сотовый телефон, который

постоянно дополняется новыми функциями: фотоаппаратом, определением координат (GPS), доступом к сетевым структурам и т. д. Нужно обеспечить не только сами новые функции, но и контроль за их выполнением, например стабилизацию изображения фотоаппарата или предотвращение повреждений от случайного удара или падения и т. п. В определенной мере это можно назвать МЭМС-системой безопасности телефона или переносного компьютера. В еще большей степени проблема обеспечения безопасности с помощью средств микросистемной техники (МСТ) касается автотранспорта. Системы активной и пассивной безопасности пассажира и автомобиля практически всегда включают МЭМС-устройства. В автомобилях высокого класса число их типов достигает 100 наименований. В качестве примера приведем последнее требование обеспечения контроля давления в автошинах. Простое умножение числа выпускаемых автомашин (50...60 млн шт. в год) на 4 дает представление о потребностях в МЭМС.

Революционное значение микросистемы (МС) могут сыграть и в обеспечении контроля за уровнем поддержания жизнедеятельности самого человека. С помощью МСТ может быть решена основная проблема — постоянный контроль психофизического состояния человека и его коррекция за счет индивидуальных носимых или имплантированных МС. Аналогичным образом контроль за состоянием среды обитания человека также может осуществляться в значительной мере за счет МСТ. В последнее время существенное значение приобретают различные МС безопасности и системы предупреждения и предотвращения террористических угроз. С помощью новых типов МСТ по-новому решаются проблемы контроля состояния индустриальных систем, зданий и сооружений. Практически эта форма инженерной деятельности стала возможной именно благодаря МСТ.

Преимущества МСТ, обеспечивающие ей все большее применение, базируются на трех основных тенденциях ее развития: дальнейшей миниатюризации, уменьшении энергопотребления на функцию и увеличении числа самих функций. Дальнейшая миниатюризация МСТ в основном связана с возможностью использования в ее конструкциях элементов, созданных на основе нанотехнологии. Хотя тенденция применения нанотехнологий в технике является общей, именно микросистемная техника наиболее подготовлена к восприятию средств нанотехнологий с учетом близости размерных факторов микро- и нанообъектов. По этой причине МСТ считают естественным мостом между нано- и макрообъектами. Примерами использования нанотехнологий могут служить датчики физических и химических величин, в которых эффективность чувствительного элемента повышается за счет использования наноэлементов (например, углеродных нанотрубок) или наноструктурированных материалов (включая нанопорошки и нанопоры). Поэтому можно считать включение нанокомпонентов в конструкции МС одной из важнейших тенденций современного развития МСТ.

МС обычно разделяют на встроенные и автономные. Пока наибольшее распространение имеют первые. Однако сами системы верхнего уровня, в которые встраиваются МС, часто являются автономными — например, тот же сотовый телефон. Это накладывает ограничения на размеры и энергопотребление компонентов МС. В целом можно говорить о тенденции роста автономных МС за счет развития сетевых беспроводных МС. В них МС является автономной структурой по задачам и энергообеспечению, но служит элементом распределенной сети с общим целевым назначением, например известная «умная» пыль. Рост доли беспроводных МС (БПС) является несомненной тенденцией современного этапа развития МСТ.

Решение проблемы автономного источника энергии послужило мощным импульсом развития биомедицинских МЭМС индивидуального использования. Рассматривая тенденции современного развития МЭМС, следует отметить быстрый прогресс, в том числе этих МЭМС. От общей идеи возможности использования МЭМС в медицинских контрольных, аналитических и терапевтических устройствах в последние годы удалось перейти к использованию систем, неоходимых для диагностики и лечения конкретных заболеваний (туберкулез, рак и т. д.), развитию методов доставки терапевтических средств к конкретному органу. При этом оказалось, что традиционные МЭМС, изготовленные методами микрообработки кремния, часто не являются оптимальными. Лучшие решения стали возможны на базе использования полимеров (политроника). Такие электронные устройства имеют ряд преимуществ. Гибкость и пластичность полимера позволяет использовать для изготовления изделий такие высокопроизводительные операции, как штамповка и прокат. Развитая номенклатура полимеров позволяет получить материалы со свойствами металла, полупроводника и диэлектрика. И хотя их электрофизические свойства уступают, например, кремнию или меди, существует достаточно широкий класс изделий, для которых диапазон этих свойств вполне приемлем.

Перечень, дополненный списком полимеров, которые могут стать источниками электрической энергии, полученной по разным принципам преобразования, может служить основой для создания широкой номенклатуры полимерных МЭМС.

Они могут иметь совершенно новые характеристики, например гибкость, но главное, могут быть существенно дешевле своих аналогов на базе кристаллических материалов. В определенной мере с полимерными материалами стыкуется так называемый умный текстиль — материал, в который могут быть включены различные гибкие компоненты электроники и МСТ. В результате одежда человека становится информационным центром, который, с одной стороны, контролирует его психофизическое состояние, а с другой — обеспечивает его потребности в коммуникационных связях. Суммируя, отметим, что развитие полимерных МЭМС тоже является тенденцией развития МЭМС.

Как и для других современных высокотехнологических изделий, для МЭМС определяющим фактором рыночного успеха является отношение «цена/качество». Если качество зависит от уровня разработки изделия, то его цена определяется технологией массового производства. Критерием эффективности производства МЭМС по технологии кремниевой микрообработки служит коэффициент выхода годных кристаллов с пластины. Рост размера кристалла вследствие роста функциональной сложности ИС или МЭМС требует увеличения диаметра пластины. В микроэлектронике это означает переход к пластинам 300 мм и в дальнейшем — к 450 мм, а для МЭМС — к пластинам 200 мм.

1.2 История развития МЭМС

Таблица 1 - История развития МЭМС

Год	События
1958	Появились кремниевые, коммерчески доступные средства измерений
1959	"В основании много места" - заявил Ричард Фейман в Калифорнийском институте технологии и предложил 1000 долл. США тому, кто создаст электрический двигатель, меньший 1/64"
1961	Демонстрировался первый кремниевый датчик давления
1967	Изобретена поверхностная микромеханическая обработка. Фирма Westinghousc (США) создала резонансный полевой вентильный транзистор. Описано использование "жертвенного" материала, чтобы освободить микромеханичсские устройства от кремниевой подложки
1970	Демонстрировался первый кремниевый акселерометр
1979	Предложено первое микромеханическое струйное сопло
1982	Создан одноразовый датчик кровяного давления. Появилась первая публикация о кремнии как о конструкционном материале). Разработана LIGA-техиология (рентгенолитография, гальваника и формовка) для изготовления исполнительных компонентов микроприборов
1983	Впервые в СССР опубликован материал о разработке интегральных тснзопреобразователсй
1988	Состоялась первая конференция по проблематике МЭМС
1992	Представлен многопользовательский процесс МЭМС (MUMPS), спонсируемый Управлением перспективных исследовательских про грамм (DARPA) (США)
	Предложен первый микромеханический шарнир
1993	Продан первый акселерометр, выполненный с использованием поверхностной микромеханической технологии (фирма США Analog Devices, ADXL50)
1994	Запатентовано глубокое реактивное ионное травление; Первая международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, ЦНИИ "Электроприбор")
1995	Началось коммерческое использование микрогиросокопов. Активно развиваются БиоМЭМС.

В России на государственном уровне только в 1996г. в Перечень критических технологий Федерального уровня включено направление «Микросистемная техника». В 1999г. была составлена Комплексная программа МСТ, вышел первый номер журнала «Микросистемная техника» (МСТ) (ISSN 1684-6419); в 2000г. состоялась международная конференция «Сенсоры и микросистемы» г. Санкт-Петербург; Минобразованием России открыта специальность «Микросистемная техника».

2. Особенности микро- и нанодиапазонов

2.1. Законы пропорциональной миниатюризации

Наиболее распространенным подходом к созданию наноэлектромеханических систем является уменьшение размера электромеханических систем, разработанных в последние десятилетия в микрометровом диапазоне. И хотя микромеханические системы формально не отвечают диапазону нанотехнологий, полезно кратко рассмотреть механические свойства микрообъектов, поскольку на сегодняшний день они достаточно полно изучены, а создание микроэлектромеханических систем является отработанным технологическим процессом. В то же время многие особенности микромеханики могут быть с успехом перенесены в нанодиапазон, обеспечивая таким образом основу для конструирования наномашин.

Для создания микроэлекгромеханических устройств сегодня широко используются технологии литографии в сочетании с процессами CVD или электронно-лучевой эпитаксии. Эти технологии ранее нашли применение при сборке логических цепей на основе кремния (современные микросхемы, процессоры и т.д.), в связи с чем была развита обширная инфраструктура производства, которая сделала возможным разработку и массовое внедрение в промышленное производство механических устройств, имеющих компоненты с микрометровыми размерами.

Микро- и наноэлектромеханические (МЭМС и НЭМС) системы предполагают механический ответ на приложенный электрический потенциал или возникновение электрического сигнала как результата механической деформации. Основными преимуществами НЭМС являются миниатюризация и возможность прямого интегрирования устройств с существующей микроэлектроникой.

Однако механическое поведение машин в макро- и микромире оказывается существенно различным. В микромире отношение площади поверхности к объему объекта заметно возрастает, что приводит к значительному увеличению вклада сил трения в механическое поведение микросистем и доминированию сил трения над силами инерции. На наноуровне эти различия выражаются еще более ярко. Так, времена, затрачиваемые на гашение инерции после придания вращательного движения мячу, лежащему на поверхности стола, и молекуле фуллерена на поверхности монокристалла

кремния различаются на несколько порядков. В связи с этим особый интерес представляет рассмотрение характеристических величин, определяющих механическое поведение системы. Обычно эти величины выражают соотношение эффективностей сил (или энергий) в конкурирующих процессах. При этом для сохранения общего механического поведения системы необходимо, чтобы такие соотношения оставались постоянными вне зависимости от ее параметров. Соотношения сил, зависящие от масштаба системы, получили названия **законов пропорциональной миниатюризации**. Рассмотрим эти соотношения подробнее:

Число Коши (инерционны силы и силы упругости).

Число Коши определяет соотношение инерционных сил и сил упругости в твёрдом теле:

$$C_a = \frac{pw^2 L^2}{E}, \qquad (2.1)$$

где L - размер объекта, ω - характеристическая частота колебаний, р - плотность материала, Е - модуль Юнга. Согласно соотношению (2.1). частота колебаний обратно пропорциональна длине, что свидетельствует о высоких частотах собственных колебаний микро- и наносистем. С одной стороны, это приводит к ограничению рабочего диапазона НЭМС собственными частотами, а с другой - к высоким динамическим характеристикам.

Число Фруда (инерционные силы и силы гравитации).

Число Фруда показывает соотношение между инерционными силами и силами гравитации:

$$F_r = \frac{v^2}{gL}, \qquad (2.2)$$

где L - размер объекта, ν - скорость, g - ускорение свободного падения. Так как число Фруда обратно пропорционально длине, то эффект гравитации уменьшается при уменьшении размеров системы. Поэтому в микромире эффектом гравитации можно пренебречь.

Число Вебера (инерционные силы и силы поверхностного натяжения).

Число Вебера выражает соотношение инерционных сил и сил поверхностного натяжения:

$$W_e = \frac{\rho v^2 L^2}{\sigma_s}, \qquad (2.3)$$

где L - размер объекта, ν - скорость, ρ - плотность. σ_s - поверхностное натяжение. Вклад сил поверхностного натяжения в поведение системы увеличивается с уменьшением числа Вебера и, соответственно, с

уменьшением размера системы. Иначе говоря, при малых размерах системы поверхностные силы доминируют над объемными инерционными силами. Число Вебера характеризует процессы формирования капель, потоки жидкости в капиллярах и т.д.

Число Фурье (однородность распространения тепловой энергии).

Число Фурье определяет соотношение между накопленной энергией и распространяемой тепловой энергией:

$$F_0 = \frac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot L^2}, \tag{2.4}$$

где L - размер объекта, t - время, c_p - удельная теплоемкость, λ - коэффициент теплопроводности. Число Фурье характеризует однородность распространения тепла в системе. При $F_0<1$ тело имеет однородную температуру, и градиента температур не возникает. Уменьшение размера системы приводит к значительному ускорению процесса переноса тепловой энергии для постоянного числа Фурье, а следовательно, однородное распределение температуры достигается за очень короткое время, что делает возможным использование тепловых или температурно-контролируемых процессов (например, теплового расширения) в микро- или наномеханике.

Число Рейнольдса.

Число Рейнольдса характеризует соотношение между инерционными силами и вязкостью (силами трения) в потоке жидкости:

$$R_e = \frac{vL}{\upsilon}, \tag{2.5}$$

где L - размер объекта, v - скорость, $\upsilon=\eta/\rho$ - кинематическая вязкость (η - динамическая вязкость), ρ - плотность жидкости. Число Рейнольдса определяет режим потока жидкости вокруг некоторого препятствия: в общем случае течение остается ламинарным, пока число Рейнольдса не превосходит некоторого критического значения, а при дальнейшем увеличении R_e поток становится турбулентным. Считается, что для вязкой жидкости при $R_e<1$ реализуется ламинарный поток, при $1<R_e<40$ происходит формирование попутного вихревого потока, при $50 < R_e < 300$ возникает периодический вихревой поток, при $5\cdot10^3<R_e<2\cdot10^5$ - нерегулярный попутный поток и отделение граничного слоя, а при $R_e > 2\cdot10^5$ появляется турбулентный след. Для микро- и нанообъектов их размеры оказываются определяющим фактором, что приводит к появлению турбулентности только в случае очень малой кинематической вязкости. Обычно в микро- и наномеханике инерционными силами пренебрегают, то есть нелинейная составляющая в уравнении Навье-Стокса обращается в ноль, что существенно упрощает решение.

2.2. Микро - и нанотрибология

Согласно законам пропорциональной миниатюризации, на микро- и наноуровне поверхностные силы доминируют над объемными. В связи с этим при разработке микромеханических систем большое значение следует уделять трению и износу движущихся частей. Надо отметить, что ввиду малой массы микро- и наномеханических элементов они обладают низкой инерцией, что ведет к высоким динамическим характеристикам (скорости отклика) и высокой рабочей частоте собственных колебаний. Трение приводит не только к энергетическим потерям и снижению общего коэффициента полезного действия (КПД) механических устройств, но и к износу, который негативно воздействует на их функциональное поведение и ведет к быстрому старению и поломке элементов. Иначе говоря, трение определяет не только эффективность работы устройства, но и его долговечность.

Обычно под трением понимают механическое сопротивление, возникающее при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Сила трения является совокупным эффектом, возникающим в результате упругости, адгезии, вязкости, капиллярных сил, химических особенностей, фононного и электростатического взаимодействий и т.д. На величину трения влияет тип взаимодействующих материалов и состояние их поверхности. В зависимости от условий может преобладать то или другое явление. Таким образом, трение - это взаимодействие контактных областей поверхностей, а следовательно, оно воздействует только на поверхностный слой материала, практически не затрагивая его объем.

В зависимости от масштаба, на котором изучают трение, выделяют **макро-, микро- и нанотрибологию**. Каждый из разделов трибологии исследует трение в соответствующем масштабе. Так, в макротрибологии трение исследуют на уровне больших объектов и не рассматривают особенностей строения вещества. Основным соотношением макротрибологии является закон Амонтона-Кулона:

$$F_{тр}=kN, \qquad (2.6)$$

где k - безразмерный коэффициент трения, N-сила реакции опоры. Коэффициент трения несет всю информацию о взаимодействующих поверхностях и зависит от температуры, влажности, скорости скольжения и др. В макротрибологии сила трения не зависит от площади контакта двух тел, а саму площадь контакта считают равной геометрической площади контактирующих объектов. При этом величина макроскопической силы трения является усредненной силой трения отдельных микроконтактов, которые могут варьироваться в широких пределах.

Микротрибология исследует взаимодействие элементарных микроконтактов. В отличие от макротрибологии, применяющей представления и терминологию теории сплошных сред, в данном случае используются более фундаментальные понятия, основанные на взаимодействиях отдельных

атомов. Во многих моделях процессов трения на микроуровне рассматривают взаимодействие выступа с некоторой поверхностью. В связи с этим основным экспериментальным методом микротрибологии стала сканирующая зондовая микроскопия (соответствующая методика носит название метода латеральных сил). Острие зонда позволяет "почувствовать" трение на чрезвычайно малой контактной площадке, состоящей из одного или нескольких атомов.

Выделяют жидкое и сухое трение, причем жидкое трение реализуется в большинстве реальных систем (трение является жидким даже тогда, когда на поверхности твердых тел образуется молекулярная пленка жидкости). В качестве сухого трения можно рассматривать процессы трения в вакууме или трение с большой нормальной нагрузкой, что приводит к вытеснению жидкости из-под зонда.

Сила трения является диссипативной силой, то есть при скольжении поверхностей друг по другу происходит рассеяние механической энергии, а каждый из эффектов, приводящих к трению, имеет свой механизм диссипации энергии. В качестве таких механизмов в случае сухого трения выделяют атомарные вибрации, рассеивающие энергию в виде колебаний атомов (фононное рассеяние); разрушение атомарных связей в микронеровностях; разрыв адгезионных связей, возникающих между выступами соприкасающихся поверхностей: возбуждение электрон-дырочных пар (эффективность такого процесса значительно ниже эффективности фононного рассеяния).

Жидкое трение существенно зависит от толщины слоя жидкости. Мономолекулярный слой жидкости фактически не влияет на механизмы диссипации энергии, и этот процесс можно рассматривать в приближении сухого трения. Увеличение количества жидкости на поверхности приводит к блокированию рассеяния энергии по фононному каналу, а преобладающим становится расход энергии на преодоление вязкости жидкого слоя. Для более толстых пленок основную роль играют капиллярные эффекты.

В микротрибологии зависимость силы (сухого) трения от нормальной приложенной нагрузки вычисляется по формуле Баудена-Табора:

$$F_{тр} = \tau A_c, \qquad (2.7)$$

где τ - касательное напряжение, A_c - реальная площадь элементарного контакта. Эта площадь зависит от взаимной упругой деформации контактирующих поверхностей. Площадь такого контакта может быть получена решением задачи Герца (определение деформаций при локальном соприкосновении тел):

$$F_{тр} = \tau\pi\left(\frac{RN}{K}\right)^{\frac{2}{3}}, \qquad (2,8)$$

где R - радиус кривизны выступа или зонда, N- нормальная сила. K - эффективный модуль Юнга, вычисляемый по формуле

$$\frac{1}{K}=\frac{3}{4}\left(\frac{1-\mu^2}{E}+\frac{1-\mu'^2}{E'}\right), \qquad (2.9)$$

где E, E' - модули Юнга, μ, μ' - коэффициенты Пуассона соответствующих материалов. Для учета адгезионных взаимодействий в твердых телах используют модель Маугиса.

В случае жидкого трения к нормальной силе необходимо прибавить адгезионную составляющую, связанную с наличием капиллярных взаимодействий. Эта сила дополнительно притягивает друг к другу соприкасающиеся поверхности и рассчитывается по уравнению

$$F_c=4\pi\gamma R, \qquad (2.10)$$

где γ - коэффициент поверхностного натяжения. Модель Баудена-Табора хорошо подтверждена на опыте.

Одной из основных особенностей микротрибологии является эффект прилипания-скольжения, заключающийся в неравномерности движения одной поверхности относительно другой. В некоторый момент выступы поверхностей слипаются в результате адгезии или капиллярных сил, и для их последующего отрыва необходима преобладающая сила. Затем выступ перескакивает к другой точке и т.д. Эффект прилипания-скольжения существенно зависит от скорости движения. Так, при достижении некоторой критической скорости скольжения эффект пропадает, и сила трения становится регулярной.

Задачей нанотрибологии является объяснение трения на уровне взаимодействия отдельных атомов. Модель трения на наноуровне рассматривает движение отдельного атома по поверхности в поле потенциальных сил $U(x)$, создаваемых периодическим потенциалом атомов другой поверхности (рис.2.2):

$$U(x)=-U_0\cdot\cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right), \qquad (2.11)$$

где а - период решетки.

При этом неконсервативность системы достигается введением "искусственной" потери энергии системы при движении атома из верхнего энергетического состояния в нижнее (рис. 2.2). Тогда мгновенная сила

$$F_{\text{тр}}(x)=\frac{\partial U(x)}{\partial x}, \text{ при } 0<x<\frac{\Delta x}{2},$$

$$F_{\text{тр}}(x)=0, \text{ при } \frac{\Delta x}{2}<x<\Delta x.$$

трения в каждой точке траектории атома составляет:

Ввиду упругой фиксации атома в твердом теле потерянная энергия передается в глубь тела в виде фононных колебаний и впоследствии диссипируется. Среднее значение моментальной силы трения на всей траектории движения считают равным силе трения в микротрибологии.

Экспериментальное определение нанотрения методом атомно-силовой микроскопии в режиме регистрации латеральных сил показывает интенсивный эффект прилипания-скольжения. Для качественного понимания нанотрения обычно рассматривают модель движения *упругого* зонда в поле потенциальных сил, создаваемых

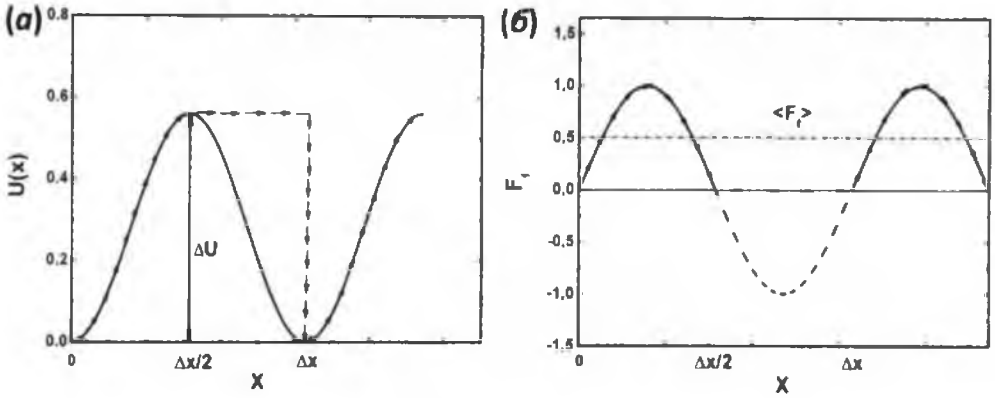


Рис. 2.2. Потенциальная энергия и траектория зонда (а), а также мгновенная и средняя сила трения (б) при движении атома в периодическом потенциале поверхности

периодическим потенциалом атомов сканируемой поверхности. При движении зонда с увеличением потенциальной энергии (в область с высоким потенциалом) зонд испытывает сопротивление образца, соответствующее силе трения. При этом зонд отклоняется и как бы "прилипает" к поверхности. Достигнув максимума потенциала, зонд срывается и начинает колебательные движения в направлении сканирования, которые постепенно затухают, а накопленная энергия диссипируется. Усреднение колебаний зонда позволяет наблюдать скачкообразный характер его движения, что соответствует эффекту прилипания-скольжения. Сила трения при этом имеет пилообразный профиль. В двумерной модели движение имеет некоторые особенности. Зонд движется не только вдоль направления сканирования, но еще и ходит из стороны в сторону, что связано с отклонением зонда от потенциальных максимумов к минимуму энергии.

2.3 Наномеханика и износ наномеханизмов

По сравнению с макромеханикой в микро- и наносистемах обычно применяется модель сухого трения. Для смазочных материалов на наноуровне сила поверхностного натяжения оказывается настолько велика, что существенно снижает эффективность работы механических элементов. Поэтому в качестве подшипников скольжения в МЭМС и НЭМС используют подшипники сухого трения, которые в некоторых случаях покрывают молекулярными смазочными пленками для уменьшения трения и износа. При этом характеристики пленки и контактной поверхности становятся основными факторами, определяющими силы трения. Однако в связи с трудностью получения идеально гладких поверхностей, технология применения молекулярных смазочных пленок находится пока в стадии разработки и редко используется при создании микро- и наномашин.

Износ материала при длительном трении обусловливается высокой локальностью нагрузок на контактирующих шероховатостях рабочих поверхностей, что приводит к пластическим деформациям, адгезии или к формированию трещин на поверхности контактирующего материала. Выделяют следующие механизмы износа: адгезия (слипание), абразивный износ, эррозия, усталость.

Характерной особенностью микромира является значительный вклад межмолекулярных и межатомных взаимодействий (микрообъекты стремятся к слипанию для уменьшения их общей поверхностной энергии). Адгезионные взаимодействия возникают как результат межмолекулярных сил или перераспределения химических связей в точке контакта. Так, при контакте двух материалов, проявляющих значительную адгезию или химическую растворимость, происходит взаимное проникновение контактирующих материалов и образование химических связей в точке контакта, что приводит к значительному износу контактирующих поверхностей. В связи с этим при проектировании наномашин следует избегать контактов химически однородных поверхностей. Обычно для предотвращения слипания отдельных элементов нано- и микромашин их покрывают специальными "неклеящими" составами.

При абразивном износе материал стирается из-за неровности поверхностей материалов или из-за присутствия твердых частиц между взаимодействующими поверхностями. При этом более твердый материал удаляет верхний слой с более мягкого материала во время их контакта. Поскольку поверхность металлических материалов покрыта оксидной плёнкой, высокие локальные нагрузки могут привести к ее разрыву и дальнейшему окислению поверхности металла. Процесс последовательного окисления с разрушением поверхностного слоя называют эррозией.

Усталость материала - это изменение его механических и физических свойств в результате действия циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций. Разрушение материала при усталости сопровождается появлением микротрещин, а затем их ростом и появлением макротрещин.

Таким образом, трение приводит к возникновению гармонических осцилляций кристаллической решетки, которые, затухая, преобразуют механическую энергию в тепловую. Трение зависит от материала и пропорционально фактической, а не кажущейся области контакта. К тому же сила трения пропорциональна степени необратимости деформаций и, в частности, зависит от адгезионного сродства материалов. Значительного уменьшения сил трения можно достичь, увеличивая химическую инертность материала. Так, сухое трение с использованием таких материалов, как тефлон, может оказаться значительно меньше жидкого трения, что объясняется высоким фактическим контактом между поверхностями в случае жидкого трения и возрастанием вклада адгезионного трения.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ [3]

Элементы микросистемной техники представляют собой сформированные на одной подложке сенсорные и актюаторные устройства, схемы управления, приема, обработки и передачи информации. В отличие от типовых элементов планарных интегральных схем (ИС) элементы МСТ имеют трехмерную структуру.

Для изготовления элементов МСТ применяют технологические операции, которые используются в микроэлектронике: окисление, фотолитография, травление, легирование, металлизация и т.д. А также специально разработанные технологические операции – анизотропное и селективное травление для формирования структур, метод анодной сварки или плавления для соединения пластин. Однако при сходстве процессов изготовления элементов ИС и МСТ между ними существуют различия, которые связаны с различными требованиями к геометрическим размерам элементов. В табл.3.1 приведены типовые размеры элементов ИС и МСТ и их технологические нормы изготовления.

Таблица 3.1 Топологические размеры и технологические нормы изготовления элементов ИС и МСТ

Параметр	Элементы ИС	Элементы МСТ
Толщина пленки, мкм	< 1	1 – 6
Аспектное отношение	2 : 1	6 : 1
Топографический шаг, мкм	< 1	2 – 10
Типовой размер элемента, мкм	1	100

К стандартным технологиям микромеханической обработки (микрообработки), применяемых при изготовлении интегральных элементов микросистемной техники, можно отнести переднестороннюю объемную микрообработку, заднестороннюю объемную микрообработку, комбинацию передне- и заднесто-ронних объемных методов изготовления, поверхностную микрообработку, LIGA-технологию, MUMPs-технологию и SUMMiT-технологию.

Рассмотрим основные достоинства и недостатки перечисленных выше технологий микрообработки, применяемых при изготовлении сенсорных и актюаторных элементов МСТ.

3.1. Технология объемной микрообработки

Переднесторонняя объемная микрообработка основана на селективном травлении передней (лицевой) поверхности подложки. Основным

достоинством объемной микрообработки является формирование интегральных элементов МСТ селективным травлением на последнем этапе процесса изготовления, непосредственно в объеме подложки.
В качестве маски при травлении могут быть использованы металлизированные или пассивирующие слои.
На рис.3.1 приведена консольная балка, изготовленная по технологии переднесторонней объемной микрообработки.

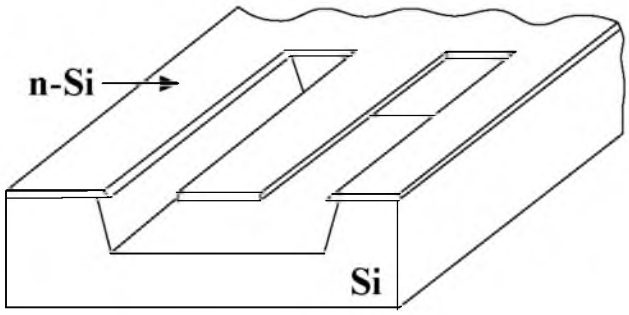


Рис.3.1. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью переднесторонней объемной микрообработки

Заднесторонняя объемная микрообработка основана на травлении подложки с задней стороны. Существуют два способа изготовления сенсорных и актюаторных элементов при заднесторонней объемной микрообработке. При первом способе создания элементов МСТ на переднюю сторону подложки наносится эпитаксиальный слой, выполняющий функцию стоп-слоя, и выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Далее, производится селективное травление задней стороны подложки до стоп-слоя.
На рис.3.2 приведена мембрана, изготовленная с помощью селективного травления заднесторонней объемной микрообработки с использованием стоп-слоя.

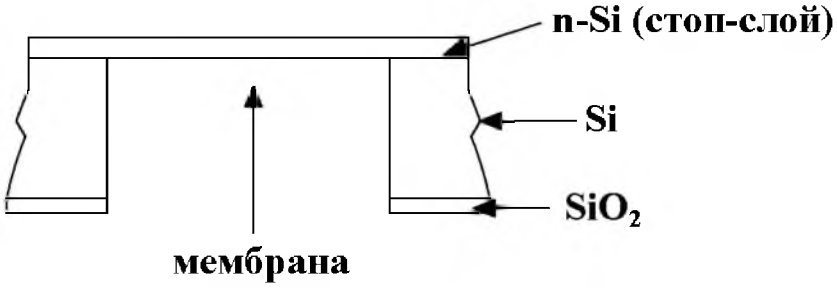


Рис.3.2. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью заднесторонней объемной микрообработки

При применении данного способа селективного травления заднесторонней микрообработки, необходимо обеспечить высокую селективность системы подложка – стоп-слой.
Данная техника изготовления позволяет стравливать до нескольких сотен

микрометров материала подложки и останавливаться на глубине, точно определенной стоп-слоем. Таким образом, данная техника изготовления позволяет создавать элементы МСТ с маленькой толщиной.

При втором способе создания сенсорных и актюаторных элементов используются специальные управляющие отверстия, которые первоначально создаются с передней стороны подложки, а также выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Глубина управляющих отверстий определяет толщину создаваемых элементов МСТ. Травление останавливается, когда переднесторонние управляющие отверстия становятся видимыми.

На рис.3.3 приведена мембрана, изготовленная по методу заднесторонней объемной микрообработки с управляющими отверстиями.

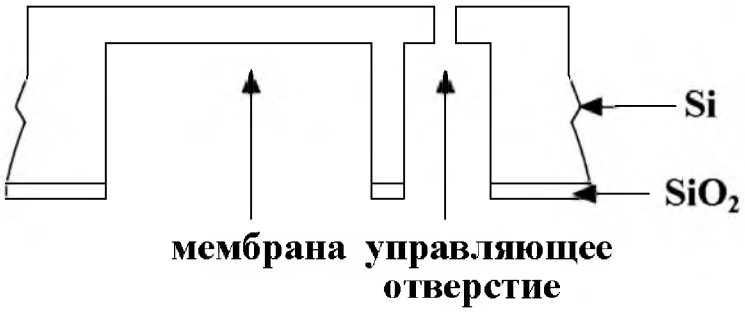


Рис.3.3. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью заднесторонней объемной микрообработки

Данная техника изготовления позволяет создавать элементы МСТ большой толщины непосредственно в подложке. Существенным недостатком данного способа изготовления является невозможность создания структур сенсорных и актюаторных элементов с маленькой толщиной.

Комбинированный метод объемной микрообработки основан на использовании переднесторонней и заднесторонней объемных технологий изготовления элементов МСТ.

На рис.3.4 приведена мембрана, изготовленная по методу комбинированной объемной микрообработки.

При применении технологии объемной микрообработки используются изотропное и анизотропное травление материала подложки.

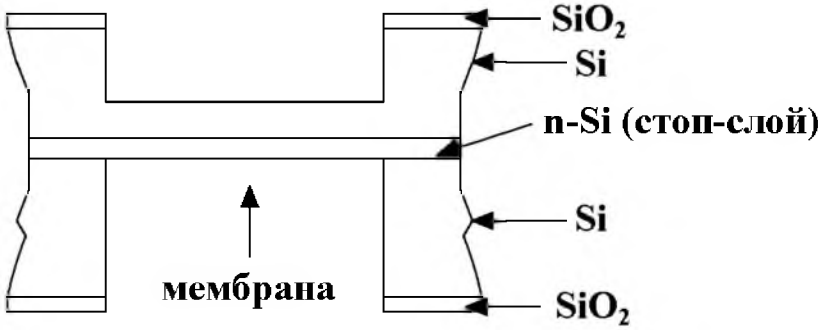


Рис.3.4. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью комбинированной объемной микрообработки

Изотропное травление является одним из самых известных и распространенных способов локальной микрообработки. Характерной особенностью изотропного травления является тот факт, что кристаллографическая ориентация подложки не влияет на профиль травления.

На рис.3.5 приведен пример объемной микрообработки подложки из монокристаллического кремния с помощью изотропного травления.

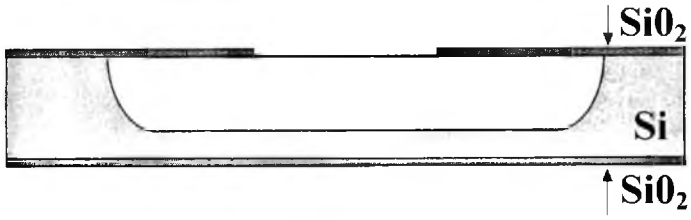


Рис.3.5. Пример объемной микрообработки при изотропном травлении

В качестве изотропных травителей используются травители на основе плавиковой и азотной кислот. Медный травитель содержит HNO_3:HF:CH_3COOH (7 : 1 : 3) и используется для получения мелких рельефов при скорости травления около 0,1 мкм/мин. Быстрый травитель имеет такой же состав, но в соотношении (3 : 1 : 1) и используется для получения глубоких рельефов при скорости около 4-8 мкм/мин.

Скорость травления подложки зависит от большого числа факторов: тип травителя, его температура; скорость отвода продуктов травления, наличие или отсутствие дефектов в материале подложки и т.д. Большинство этих факторов плохо поддаются контролю. Таким образом, невоспроизводимость скорости травления вносит основной вклад в невоспроизводимость геометрии микромеханических элементов МСТ.

Специфическая форма объемной микрообработки, а также сложность обеспечения локальной защиты от длительного воздействия травителя не позволяет рассматривать изотропное травление как перспективный способ микрообработки.

В процессе анизотропного травления удаление материала подложки происходит с разной скоростью в зависимости от кристаллографической ориентации подложки. Это объясняется различной плотностью упаковки атомов в разных плоскостях, а также различным характером связи поверхностных атомов между собой и с атомами, расположенными в объеме подложки. Скорость травления в зависимости от кристаллографического направления соответствует следующему ряду:

$$V_{<100>} > V_{<110>} > V_{<210>} > V_{<211>} > V_{<221>} > V_{<111>}. \qquad (3.1)$$

Для получения микромеханических структур элементов МСТ подложки

чаще всего ориентируют в плоскостях <100>, <110>, <111>.
Типичное значение отношения скорости травления в направлении <100> к скорости травления в направлении <111> составляет:

$$V_{<100>} : V_{<111>} = 400 : 1 . \qquad (3.2)$$

Анизотропные травители представляют собой многокомпонентные растворы, состоящие из окислителя кремния до гидратированной двуокиси, растворителя ее и замедлителя или ускорителя процесса травления. Процесс анизотропного травления представляет собой поэтапное удаление атомных слоев с поверхности подложки, т.е. в процессе травления на поверхности подложки образуются микроскопические ступеньки. Таким образом, анизотропное травление не дает зеркальных поверхностей и микромеханическая структура обрабатывается в течение 30 секунд в полирующем растворе изотропного травителя, состоящего из смеси плавиковой, уксусной и азотной кислот в пропорции 1 : 1,2 : 6,2. Полирующий раствор устраняет микрошероховатость поверхности, что повышает предел прочности микромеханических структур элементов МТС в 3-4 раза.
На рис.3.6 приведены примеры объемной микрообработки монокристаллического кремния с помощью анизотропного травления.

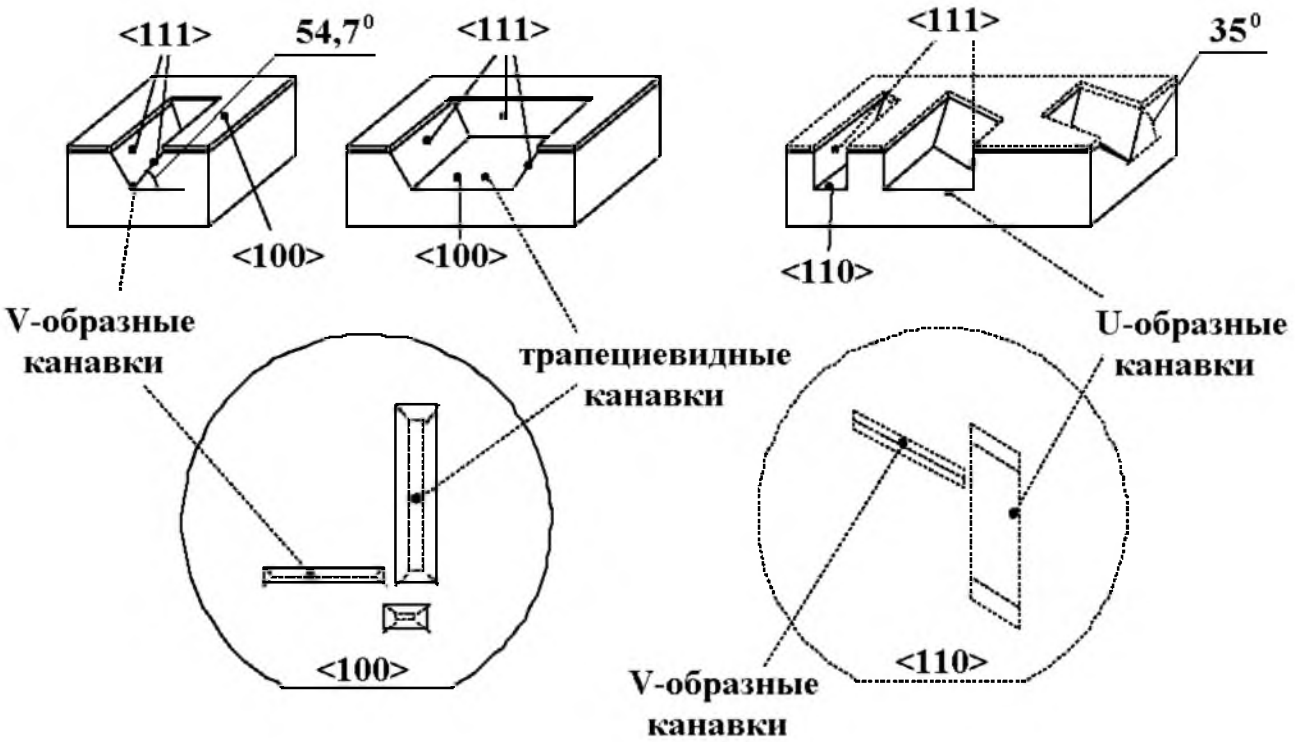


Рис.3.6. Анизотропное травление подложки в плоскостях <100> и <110>

Возможность получения практически перпендикулярных боковых стенок позволяет экономить площадь подложки более чем на 30% .
По сравнению с изотропным травлением монокристаллического кремния травление поликристаллического кремния приводит к несколько худшей

воспроизводимости формы микромеханических структур элементов МСТ из-за существенно большей неоднородности поликристалла. Однако, по сравнению с изотропным травлением, этот процесс характеризуется определенной направленностью. Боковое подтравливание под край маски происходит медленнее, чем травление в глубину. Форма получаемого при травлении поликремния профиля приведена на рис.3.7.

Рис.3.7. Форма профиля при травлении поликремния

Технология объемной микрообработки имеет ограничения в возможности создания поверхностных топологических фигур сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники, поскольку их конфигурация определяет и объемный результат травления (наклон стенок и глубину травления).

3.2. LIGA-технология

Основными технологическими операциями в процессе изготовления элементов микросистемной техники, как и в ИС, являются литография и травление. Но при изготовлении элементов ИС основной задачей является смещение процесса литографии в субмикронную область, тогда как при изготовлении элементов МСТ – достижение большей глубины трехмерного рельефа топологического рисунка.

Для получения высоких аспектных отношений микромеханических структур элементов МСТ (от 50 : 1 до 100 : 1 при существующем современном уровне 6 : 1 (см. табл. 3.1)) используется LIGA-технология.

LIGA-технология (аббревиатура немецких слов: **Li**thographie (литография), **G**alvanoformung (гальваноосаждение) и **A**bformung (микроформирование)), основанная на последовательности процессов литографии, гальваноосаждения и микроформирования, предлагает широкий спектр материалов для создания ультраточных трехмерных элементов МСТ с вертикальными боковыми сторонами, толщиной до 100-1000 мкм и поперечными размерами в пределах нескольких микрон.

Для достижения большей толщины (высоты) элементов микросистемной техники используется толстый слой резиста, наносимый на подложку. В качестве абсорбента используется золото, наносимое на тонкую пластину. Создание фотоэлектронного рисунка в резисте производится с использованием рентгеновских лучей от синхротрона, которые проходят через толстый слой резиста с очень маленькой боковой экспозицией.

Синхротронное излучение имеет сверхмалый угол расходимости пучка ($0{,}006^0$), т.е. формируется пучок параллельных лучей.

Существуют некоторые вариации LIGA-технологии, когда дорогостоящая рентгенолитография заменяется электронно-лучевой или лазерной литографией.

На рис.3.8 приведены основные этапы изготовления микромеханической структуры элемента МСТ на основе LIGA-технологии.

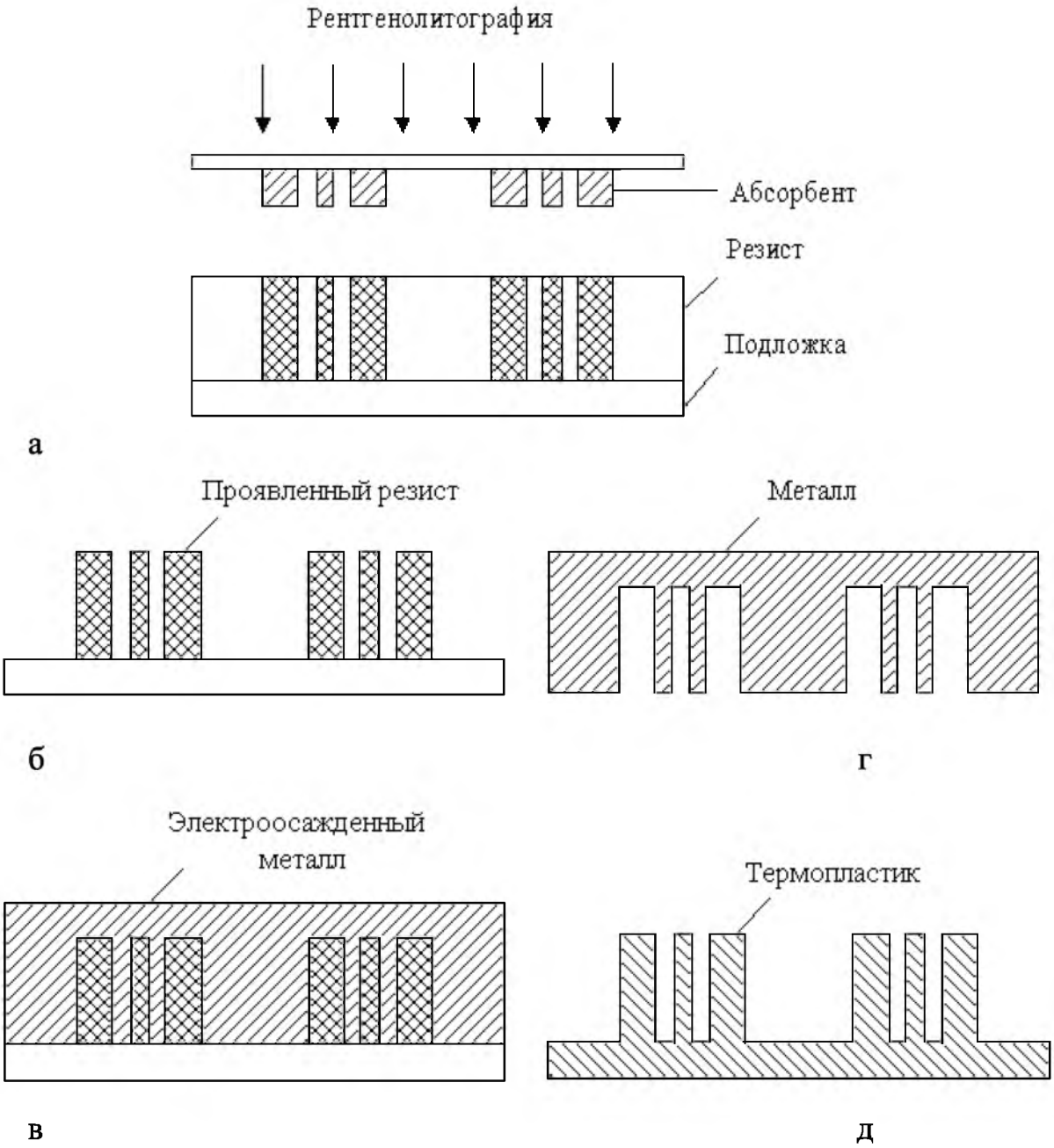


Рис.3.8. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием LIGA-технологии:

а – создание фотоэлектронного рисунка элемента МСТ в резисте; б – проявление резиста; в – гальваноосаждение металла; г – формирование шаблона; д – формирование микромеханической структуры элементов МСТ

Процесс изготовления микромеханических структур элементов МСТ начинается с создания фотоэлектронного рисунка в резисте (см. рис.3.8,а). Последующее проявление резиста (см. рис.3.8,б) и гальваноосаждение металла позволяют получить металлическую микроструктуру (см. рис.3.8,в.). После удаления резиста металлическая микроструктура может быть использована либо непосредственно в качестве микромеханической структуры элементов МСТ (см. рис.3.8,г), либо применена в качестве формы (шаблона) для изготовления микромеханических структур сенсорных и актюаторных элементов из термопластика, смол или керамики (см. рис.3.8,д).

В процессе гальваноосаждения применяются как стандартные материалы и сплавы, используемые в полупроводниковой промышленности, так и новые разработанные материалы и сплавы.

В табл.3.2 приведены материалы, используемые в процессе гальванооса-ждения в LIGA-технологии.

Таблица 3.2 - Материалы, используемые для формирования элементов МСТ в LIGA-технологии

Применения	Материалы		Сплавы	
	Стандартные	Новые	Стандартные	Новые
Формовка	Ni, Cu	-	Ni-Co	Ni-W, Co-W
Абсорбенты для рентгенолитогра-фии	Au	-	-	-
Микромеханизмы	Ni		Ni-Co, Ni-P	Ni-B
Актюаторные элементы	Fe	-	Ni-Fe	-
Сенсорные элементы	-	Pd	-	Ni-W
Жертвенные слои	Cu, Zn	-	-	-
Функциональное покрытие	Ag, Au, Cu, Zn	Cr, Pd	-	Cu-Zn
Электрические контакты	Au, Cu	Pd	-	-
Другие	Ag, Cu	-	-	Sm-Co

Достоинством LIGA-технологии является возможность создания элементов МСТ большой толщины с вертикальными сторонами. А также возможность создания сенсорных и актюаторных элементов из различных материалов – металла, пластика и керамики.

Основными недостатками данной технологии является необходимость ис-пользования уникальных источников синхротронного излучения и нетрадиционность технологии, связанная с гальванопластикой на микроуровне. Кроме того, наличие в процессе изготовления элементов МСТ

операции микросборки не позволяет использовать LIGA-технологию для их группового изготовления.

3.3. Технология поверхностной микрообработки

Поверхностная микрообработка позволяет изготавливать сенсорные и актюаторные элементы МСТ меньшей толщины, чем аналогичные структуры изготовленные с использованием объемной микрообработки.
Поверхностная микрообработка основана на осаждении тонких слоев на поверхности подложки и травлении одного или нескольких слоев для освобождения структуры. Удаляемые слои называются жертвенными. Освобождение подвижных частей (структурных слоев) сенсорных и актюаторных элементов (удаление жертвенных слоев) производится на последнем этапе процесса изготовления.
В качестве жертвенных слоев могут быть использованы следующие материалы: SiO_2, Si_3N_4, GaAs, AlGaAs, Al, фосфоросиликатное стекло (ФСС, PSG), боросиликатное стекло (БСС, BSG), AlN и т.д.
На рис.3.9 приведен интегральный сенсор давления емкостного типа, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки.

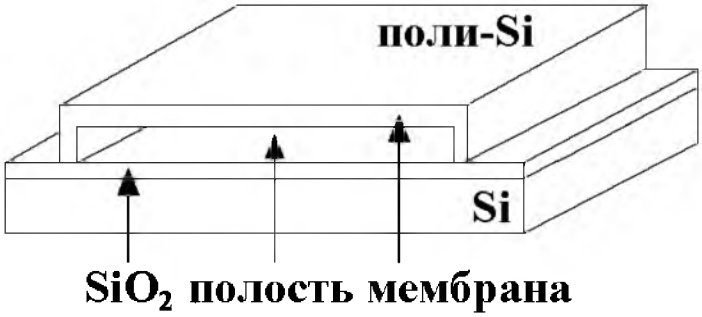


Рис.3.9. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью технологии поверхностной микрообработки

Механические свойства материалов, используемых в качестве структурных слоев элементов МСТ, приведены в табл.3.3.

Таблица 3.3 Механические свойства структурных материалов

Структурный материал	Модуль Юнга (E), ГПа	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэфф. Пуассона,	Плотность, кг/м^3
Кремний (Si)	130	50	0,28	2320
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC)	270	103	0,31	3200

Оксид кремния (SiO_2)	75	32	0,17	2190
Нитрид кремния (Si_3N_4)	270	106	0,27	3440

К достоинствам технологии поверхностной микрообработки можно отнести возможность создания большого количества различных сенсорных и актюаторных элементов МСТ в одном и том же процессе изготовления при незначительных изменениях и совместимость с технологией ИС.

К недостаткам технологии поверхностной микрообработки следует отнести прилипание тонких подвешенных частей элементов МСТ к подложке, возникающее в процессе промывания продуктов травления жертвенных слоев и при работе элемента.

3.4. MUMPs-технология

MUMPs-технология (**M**ulti **U**ser **M**EMS **P**rocess) представляет собой трехслойный поликремниевый процесс стандартной технологии поверхностной микрообработки, разработанный в начале 1990-х годов в Berkeley Sensor & Actuator Center, University of California (USA).

MUMPs-технология является коммерческой программой, поддерживаемой большинством предприятий полупроводниковой промышленности, университетов и лабораторий, специализирующихся на разработке и производстве микросистемной техники.

Процесс MUMPs-технологии состоит из создания слоя изоляции Si_3N_4, осажденного слоя поликремния (poly0), двух структурных слоев поликремния (poly1 и poly2), двух жертвенных слоев (ox1 и ox2) и одного слоя металла (metal). В качестве жертвенных слоев могут быть использованы те же материалы, что и в технологии поверхностной микрообработки. Первый слой (poly0) поликремния представляет собой жесткую плату, на которой располагаются подвижные части элементов МСТ, построенные на основе остальных двух поликремниевых слоях (poly1 и poly2).

Проблема прилипания подвешенных частей элементов МСТ, изготовленных по MUMPs-технологии, была решена с помощью предохранителей (dimple), которые размещаются под первым структурным слоем поликремния.

На рис.3.10 показаны основные этапы изготовления актюаторного элемента МСТ на основе MUMPs-технологии.

Процесс начинается с создания диффузионного слоя нитрида кремния (nitride) и осаждения слоя поликремния (poly0) (рис.3.10,а). Далее производится осаждение первого жертвенного слоя (ox1) и формирования в нем предохранителей (dimple) и контактов (якорей) первого структурного слоя (anchor1) к подложке и/или poly0 (рис.3.10,б). После нанесения первого структурного слоя (poly2) производится формирование

микромеханических структур элементов МСТ и нанесение второго жертвенного слоя (ox2). С помощью травления во втором жертвенном слое формируются контакт второго структурного слоя (anchor2) к подложке и/или poly0 и контакты второго структурного слоя к пер-вому (P1_P2_Via) (рис.3.10,в.). Далее производится осаждение второго структурного слоя и формирования в нем различных частей элементов МСТ (рис.3.10,г). На последнем этапе процесса производится металлизация и освобождение структуры элементов МСТ с помощью удаления первого и второго жертвенных слоев (рис.3.10,д).

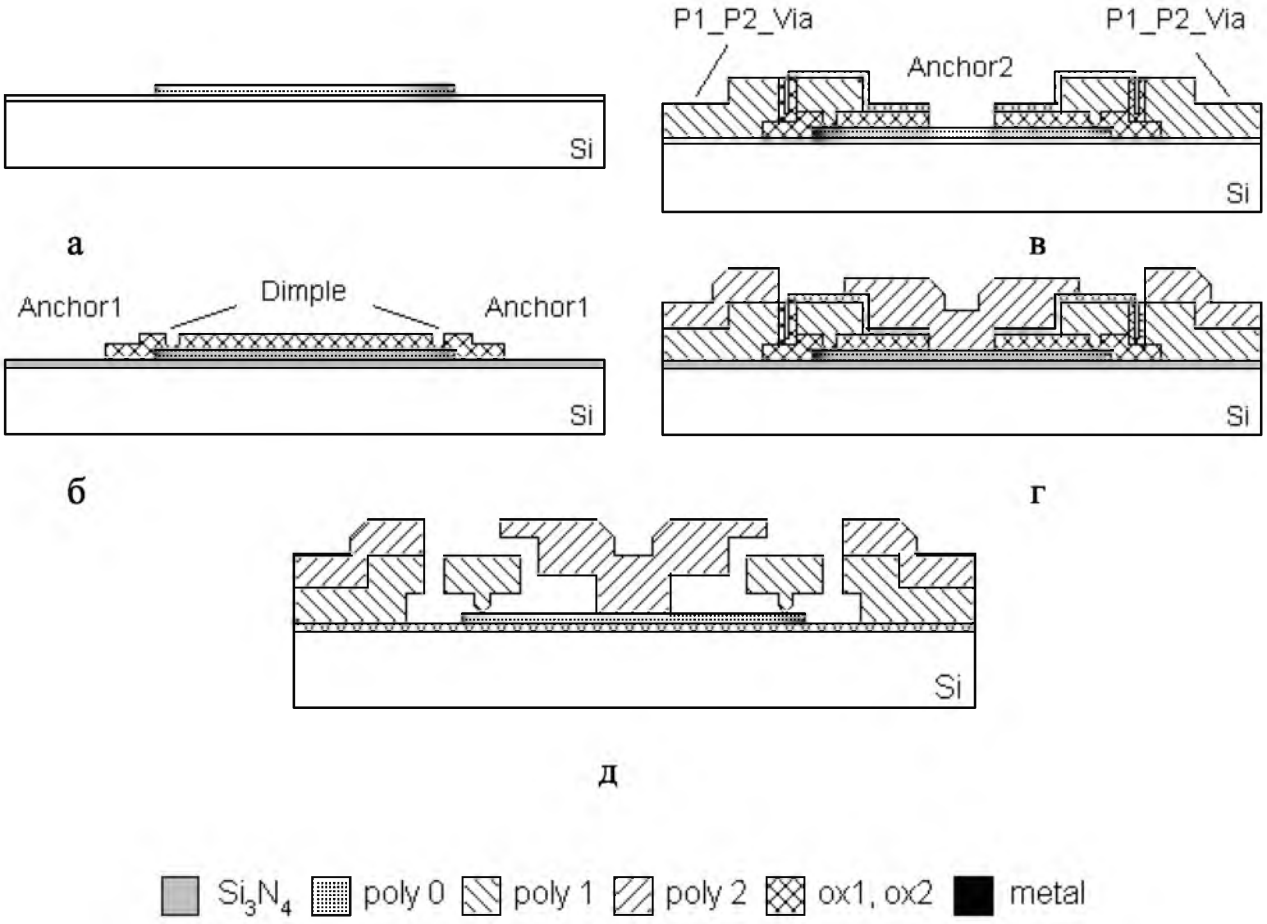


Рис.3.10. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием MUMPs-технологии:

а – создание слоя изоляции и осаждение poly0;
б – осаждение ox1, формирование предохранителей и контактов;
в – осаждение poly1 и ox2, формирование структуры элемента;
г – осаждение poly2 и формирование структуры элемента МСТ;
д – осаждение metal и удаление ox1 и ox2

По данной технологии изготавливается большинство планарных элементов МСТ. Использование поликремния в качестве структурного материала сен-

сорных и актюаторных элементов микросистемной техники в MUMPs-технологии обосновывается тем, что данный материал обладает хорошими механическими свойствами. Отлаженные технология и методы фотолитографии позволяют создавать сенсорные и актюаторные элементы МСТ в одном технологическом процессе с микроэлектронными устройствами ИС.

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством MUMPs-технологии (как и поверхностной микрообработки) является возможность создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с незначительными изменениями, а также возможность интегрального создания

сенсорных и актюаторных элементов на одной подложке с элементами обработки, передачи и хранения информации. Кроме того, планарные многоуровневые актюаторные элементы имеют большую функциональность по сравнению с конструкциями тех же размеров, созданных с использованием объемной микрообработки.

В табл.3.4 приведены физико-топологические параметры слоев, используемых в MUMPs-технологии.

Таблица 3.4 Физико-топологические параметры слоев, используемых в MUMPs-технологии

Слои	Толщина, мкм	Остаточное напряжение, МПа			Удельное сопротивление, Ом/кв		
		min	типичное	max	min	типичное	max
nitride	0,6	0	90	180	-		
poly0	0,5	0	-25	-150	15	30	45
ox1	2,0	-			-		
poly1	2,0	0	-10	-20	1	10	20
ox2	0,75	-			-		
poly2	1,5	0	-10	-20	10	20	30
metal	0,5	0	50	100	0,05	0,06	0,07

В настоящее время ведется разработка пятислойного процесса MUMPs-технологии. Отличием пятислойного процесса MUMPs-технологии от трехслойного является использование четырех структурных слоев и наличие операции механической полировки. Операция микромеханической полировки призвана снизить текстурирование поверхностей верхних структурных слоев поликремния.

3.5. SUMMiT-технология

SUMMiT-технология (**S**andia **U**ltra-planar, **M**ulti-level **M**EMS **T**echnology) представляет собой четырехслойный поликремниевый процесс стандартной технологии поверхностной микрообработки, разработанный в Sandia National Laboratories (USA).

Как отмечалось выше, использование большого числа структурных слоев приводит к появлению текстуирования поверхностей верхних слоев. Чтобы снизить погрешность изготовления интегральных элементов МСТ, связанную с текстуированием, компания Sandia разработала метод планаризации, основанный на химико-механической полировке. Данная операция осуществляется над верхними слоями поликремния и позволяет сохранить планарность процесса изготовления элементов МСТ.

В табл.3.5 приведены топологические параметры слоев в порядке нанесения на подложку, используемых в SUMMiT-технологии.

Таблица 3.5 Топологические параметры слоев, используемых в SUMMiT-технологии

Слои	Толщина, мкм
Оксид кремния (SiO_2)	0,63
Нитрид кремния (Si_3N_4)	0,8
Слой поликремния (poly0)	0,3
Первый жертвенный слой (ox1)	2,0
Первый структурный слой (poly1)	1,0
Второй жертвенный слой (ox2)	0,5
Второй структурный слой (poly2)	1,5
Третий жертвенный слой (ox3)	2,0
Третий структурный слой (poly3)	2,25

Остаточное напряжение структурных слоев используемых в SUMMiT-технологии, составляет менее 5 МПа.

В настоящее время разработана SUMMiT V-технология, представляющая собой пятислойный поликремниевый процесс. Отличие данной технологии от SUMMiT-технологии заключается в дополнительных жертвенном (ox4) и структурном (poly4) слоях, толщиной 2,0 и 2,25 мкм соответственно, что позволяет создавать элементы МСТ на перемещаемых платформах. Кроме того, могут быть изготовлены более «высокие» элементы МСТ (порядка 12 мкм толщиной).

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством SUMMiT-технологии (как и MUMPs-технологии) является возможность интегрального создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с элементами ИС, что позволить снизить стоимость устройств.

4. О ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ВЕЩЕСТВ И ЭФФЕКТАХ В НИХ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ИЗДЕЛИЯХ МСТ. ПОНЯТИЕ ТЕНЗОРА[4]

Вы изучили курс материалов, где в основном рассматриваются их свойства. Останавливались также на структуре кристаллической решетки, в частности рассматривали свойства кристаллов кремния в связи с его структурой. Уже ясно, что это важно в технологии (например: при анизотропном травлении), но это – одна сторона вопроса. В МСТ широко используются разнообразные физические эффекты в материалах, в том числе кристаллах. В частности, физические эффекты широко используются в сенсорике, при создании датчиков, где решающую роль играют эффекты, связанные с преобразованием одной физической величины в другую, которая легче измеряется. Широко (и не только для создания сенсоров) используются оптические эффекты в кристаллах в их связи с деформацией кристаллов, например, за счет ультразвуковых колебаний. Таких эффектов – многие десятки и далеко не все из них используются. Мы ограничимся кратким изложением подходов к описанию таких эффектов и нескольких примеров. Полнее они изучаются, например, в кристаллофизике, хотя некоторые из них имеют место и в аморфных материалах.

4.1. О тензорном описании физических свойств кристаллов

Вследствие анизотропии свойств кристаллов явление, вызванное в кристалле каким либо воздействием (т.е. реакция кристалла на это воздействие) не совпадает по направлению с этим воздействием. Вообще связь между воздействием, направленным на какое-то свойство кристалла и явлением (реакцией кристалла) представляется соотношением

$$\text{Явление} = \text{свойство} \cdot \text{воздействие}.$$

Если воздействие и реакции на него скалярны, то и соответствующее свойство изотропно (скалярно). Простейший пример: связь плотности и температуры. Здесь бессмысленно говорить о направлении. Значение скаляра полностью определяется заданием одного числа. Скаляры можно назвать тензорами нулевого ранга. Такие величины не меняются при переходе от одной системы координат к другой.

Векторы – (тензоры 1-го ранга) представляют собой физические величины, которые могут быть определены только по отношению к направлению. Пример: механическая сила, приложенная в некоторой точке, будет определена как величиной, так и направлением. Векторами является напряженность электрического и магнитного поля, момент электрического и магнитного диполя, градиент температуры и пр.

В прямоугольной системе координат вектор задается компонентами вектора вдоль координатных осей, т.е.

$$E = (E_1, E_2, E_3).$$

Вектор называется тензором первого ранга. Операции с векторами являются предметом векторного анализа (правила скалярного и векторного произведения, понятия градиента, дивергенции, ротора и пр.).

Тензоры второго ранга. Понятие вектора можно расширить. Рассмотрим пример с плотностью электрического тока сначала в изотропной среде. Если к проводнику приложено электрическое поле E, то плотность j (тоже вектор) пропорциональна E и совпадает по направлению с вектором E, т.е.

$$j = \tau E,$$

где τ - электропроводность. (Предполагается, что закон Ома справедлив).

В координатах x_1, x_2, x_3

$$j = [j_1, j_2, j_3] \text{ и } E = [E_1, E_2, E_3],$$

причем

$$j_1 = \tau E_1,\ j_2 = \tau E_2,\ j_3 = \tau E_3.$$

Каждая компонента j пропорциональна соответствующей компоненте E.

Теперь поговорим о кристалле, анизотропном по электропроводности, это значит, что электропроводность зависит от направления и векторы E и j не будут совпадать по направлению, т.е.

$$j_1 = \tau_{11} E_1 + \tau_{12} E_2 + \tau_{13} E_3,\ j_2 = \tau_{21} E_1 + \tau_{22} E_2 + \tau_{23} E_3,\ j_3 = \tau_{31} E_1 + \tau_{32} E_2 + \tau_{33} E_3.$$

Здесь τ_{11}, τ_{12} ..... константы (их 9). Каждая компонента j линейно зависит от всех трех компонент E.

В частности, если поле приложено вдоль одной из осей, например, x_1, то $E = (E_1, 0, 0)$, причем $j_1 = \tau_{11} E_1,\ j_2 = \tau_{21} E_1,\ j_3 = \tau_{31} E_1.$

Т.е. вектор j все равно имеет составляющие по всем трем осям.

Т.о., чтобы определить электропроводность анизотропного кристалла необходимо задать девять коэффициентов вида τ_{11}, τ_{12}, … .

Для удобства их можно записать в виде квадратной таблицы:

$$\begin{matrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33}. \end{matrix}$$

Такая таблица называется тензором второго ранга; τ_{11}, τ_{12}, τ_{13} составляют компоненты тензора.

В результате получим три типа величин:

а) Тензор нулевого ранга (скаляр), определяется единственным числом, не зависящим от системы координат.

б) Тензор первого ранга (вектор), определяется тремя числами (компонентами), связанными с осями координат.

в) Тензор второго ранга определяется девятью числами (компонентами) каждое из которых связано с парой осей координат, взятых в определенном порядке.

При этом число индексов равно рангу тензора. Существуют также тензоры третьего и четвертого рангов. Все сказанное справедливо не только для электропроводности (см. табл.4.1).

Таблица 4.1 – Примеры свойств, описываемых тензорами второго ранга

Тензорное свойство	Воздействие	Явление, эффект
Удельная электропроводность	Напряженность электрического поля	Плотность электрического тока
Коэффициенты теплопроводности	Температурный градиент	Плотность теплового потока
Диэлектрическая проницаемость	Напряженность электрического поля	Электрическая индукция
Диэлектрическая восприимчивость	То же	Диэлектрическая поляризация
Магнитная проницаемость	Напряженность магнитного поля	Магнитная индукция
Магнитная восприимчивость	То же	Намагниченность

Тензорное описание воздействий на кристалл (электрические, механические и тепловые воздействия).

4.2 Электрическое воздействие

Для описания воздействия электрического поля на кристалл и реакции на это воздействие используются три векторные величины:

E – интенсивность или напряженность электрического поля;

p – вектор поляризации или электрический момент единицы объема, направленный вдоль оси диполя, образовавшегося при поляризации диэлектрика, от отрицательного заряда к положительному, и равный произведению величины наведенных зарядов на расстояние между ними;

D – вектор электрического смещения или индукции.

В общем случае связь между ними задается выражением $\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{p}$,

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

При этом $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}$, где χ – диэлектрическая восприимчивость. Индукция **D** является векторной суммой воздействия **E** и реакции на это воздействие **p**.

Очевидно, что

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \varepsilon_0 \chi \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \boldsymbol{E},$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi)$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

тогда

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \boldsymbol{E}.$$

В изотропном диэлектрике векторы **D**, **E** и **p** коллинеарны, а параметры χ и ε скалярны.

Для анизотропного диэлектрика картина усложняется. Заряды при поляризации смещаются не по направлению электрического поля и векторы **D**, **E** и **p** не совпадают по направлению (рис. 4.1).

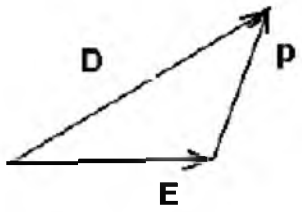


Рис. 4.1. Направление векторов E, p и D в анизотропном кристалле.

Т. о. поле **E**, направленное, например, вдоль одной оси координат, создает в кристалле индукцию **D**, имеющую компоненты по всем трем координатам:

$$\boldsymbol{D}_i = f(E_1, E_2, E_3).$$

В общем случае можно записать

$$D_1 = \varepsilon_{11} E_1 + \varepsilon_{12} E_2 + \varepsilon_{13} E_3,$$
$$D_2 = \varepsilon_{21} E_1 + \varepsilon_{22} E_2 + \varepsilon_{23} E_3,$$
$$D_3 = \varepsilon_{31} E_1 + \varepsilon_{32} E_2 + \varepsilon_{33} E_3.$$

Девять величин ε_{11}, ε_{12},.... ε_{33} образуют тензор второго ранга, характеризующий диэлектрическую проницаемость кристалла: ε_{ij}. Он характеризует кристалл и не зависит от выбора системы координат. К каким эффектам это может привести, рассмотрим ниже. Пока же отметим очевидный факт: под действием внешнего электрического поля в кристалле могут возникать как продольные, так и поперечные эффекты.

Таким образом, для анизотропной среды справедливо:

$$D_i = \varepsilon_{ij} E_j,$$

где ε_{ij} – тензор диэлектрической проницательности, являющийся параметром анизотропной среды, т. е. тензором материальным.

4.3. Механические воздействия

Если тело находится под действием внешних сил или даже если любая часть тела находится под механическим воздействием соседних частей, то говорят, что тело находится в напряженном состоянии.

Выделим в теле некоторый элемент, находящийся в напряженном состоянии. Силы, на него действующие, можно разделить на два типа. Во-первых, объемные силы, действующие на все элементы тела, (например, сила тяжести). Они пропорциональны объему элемента. Во-вторых, силы, действующие на поверхность элемента со стороны окружающих его частей тела. Они пропорциональны площади поверхности элемента. Эти силы , отнесенные к поверхности элемента называются напряжением. Обозначим напряжение буквой T. Это – вектор упругих напряжений.

Если разложить напряжение по координатным осям (рис. 13) , можно выделить нормальные и сдвиговые компоненты напряжений.

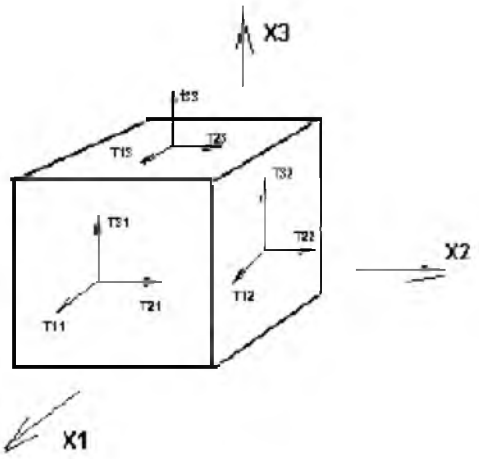


Рис. 4.2. Векторы напряжений на поверхности элементарного куба

Напряжение в кристалле описывается тензором второго ранга T_{ij}. Он имеет принципиальные отличия от введенных раньше тензоров электрической проводимости и диэлектрической проницаемости, которые описывали физические свойства собственно кристалла и являлись его неотъемлемой характеристикой, жестко связанной со структурой (симметрией) кристалла. Это были так называемые материальные тензоры.

Тензор напряжения не описывает каких либо физических свойств кристалла, может иметь любую ориентацию и имеет смысл как для анизотропных, так и изотропных тел. По смыслу он близок к силе, действующей на кристалл. В этом рассмотрении он подобен электрическому полю, которое также может быть приложено к телу в произвольном направлении. Такие тензоры называют полевыми тензорами или тензорами воздействия.

Под действием напряжений в теле возникают деформации. Деформации, если они невелики, подчиняются закону Гука – основному закону теории упругости – а именно деформация, возникающая в теле под действием силы, пропорциональна этой силе. Деформация является упругой, если после прекращения действия силы форма тела полностью восстанавливается.

Для изотропных тел закон Гука выражается формулой

$$T = \delta c,$$

или

$$\delta = sT,$$

здесь T – напряжение,

δ – деформация,

c – жесткость (константа упругости, постоянная жесткости),

s – податливость.

Смысл коэффициентов c и s ясен из названия. В анизотропных телах жесткость и податливость являются тензорными величинами, т. е. зависят от направления. Естественно, и деформация будет характеризоваться тензором. Тензором же описывается напряжение.

Таким образом, каждая компонента тензора деформации δ_{ij} связана с каждой компонентой тензора T_{ki} соотношением

$$\delta_{11} = s_{1111} T_{11} + s_{1112} T_{12} + s_{1113} T_{13} + s_{1121} T_{21} + s_{1122} T_{22} + s_{1123} T_{23} + s_{1131} T_{31} + \\ + s_{1132} T_{32} + s_{1133} T_{33}$$

и еще восемью аналогичными выражениями для δ_{ij} , в каждое из которых входит девять коэффициентов s_{ijkl} , образующих

Коэффициент c_{ijkl} также образует тензор четвертого ранга.

В тензорной форме для анизотропной среды закон Гука принимает форму:

$$T_{ij} = \delta_{kl} c_{ijkl},$$

или

$$\delta_{ij} = s_{ijkl} T_{kl}.$$

Смысл последних выражений заключается в том, что деформация кристалла зависит не только от направлений и типа приложенного напряжения. Если одноосное растягивающее напряжение в изотропном материале вызвало бы только растяжение вдоль той же оси и некоторое сокращение поперечного сечения, то в анизотропном кристалле оно может вызвать растяжения, сжатия и сдвиги в любых направлениях в зависимости от симметрии кристалла.

4.4. Тепловое расширение

Отмечено, что деформация – полевой тензор, но если внешнее воздействие изотропно, а тело анизотропно, то деформация будет согласовываться со структурой кристалла. Пусть происходит однорядное изменение температуры (скалярное воздействие), тогда все компоненты тензора деформаций будут (в первом приближении) пропорциональны малому изменению температуры Δt

$$\delta_{ij} = \alpha_{ij} \Delta t,$$

где коэффициенты теплового расширения α_{ij} – постоянные, образующие материальный тензор второго ранга, $\alpha_{11}\ \alpha_{12}\ \alpha_{13},\ \alpha_{21}\ \alpha_{22}\ \alpha_{23},\ \alpha_{31}\ \alpha_{32}\ \alpha_{33}.$

Здесь α_{11}, α_{22}, α_{33} - главные коэффициенты теплового расширения вдоль осей x_1, x_2, x_3.

Т. о. деформация по осям составит: $\delta_{11} = \alpha_{11} \Delta t$, $\delta_{22} = \alpha_{22} \Delta t$, $\delta_{33} = \alpha_{33} \Delta t$.

Важно отметить, что кристалл расширяется неодинаково вдоль трех главных осей. Если из кристалла вырезать шар, то в результате теплового расширения он превратится в трехосный эллипсоид.

5. ВЗАИМНАЯ СВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЯВЛЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ [4]

При описании свойств кристаллов обычно отдельные свойства и явления в них выделяются искусственно и рассматриваются независимо друг от друга. В действительности свойства кристаллов взаимосвязаны и при внешних воздействиях возникают несколько явлений переплетающихся друг с другом. Так, при нагреве кристалла естественно происходит изменение его энтропии и теплового расширения, но при этом возникают термоупругие напряжения,

а они, в свою очередь, вызывают электрическое поле вследствие пироэлектрического эффекта.

Воздействие электрического поля создает электрическую поляризацию, электростатический эффект, приводит к изменению размеров и механическим напряжением (обратный пьезоэлектрический эффект).

Одно и то же явление может быть вызвано разными воздействиями за счет разных свойств кристалла. Например, механическая деформация может быть связана с:

- упругостью при механическом воздействии,
- пьезоэлектрическим эффектом под действием тока,
- тепловым расширением.

Таким образом от условий опыта зависит, что считать воздействием, а что – эффектом, так как свойства проявляются и могут быть использованы в сложном взаимодействии.

В некоторых случаях удается обобщить представления о взаимной связи физических свойств кристаллов. Обобщение сделано, например, для тепловых, механических и диэлектрических свойств диэлектрического кристалла. При этом необходимо соблюдать два условия: линейность процессов и их термодинамическая обратимость.

Выберем в качестве основных воздействий (независимых переменных) механическое напряжение T, напряженность электрического поля E, температуру t и поместим их во внешние вершины треугольной диаграммы (рис.5.1). Обусловленные этими воздействиями основные эффекты расположены в вершинах внутреннего треугольника.

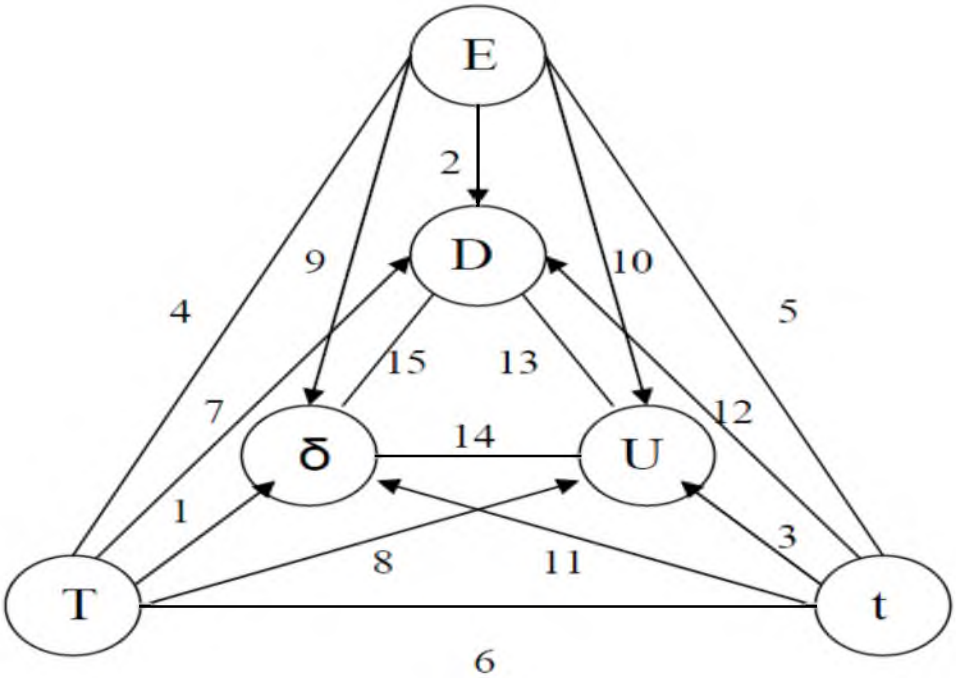


Рис. 5.1. Схема взаимной связи равновесных физических свойств кристалла

1) Механическое напряжение T создает деформацию δ, подчиняющуюся при малых значениях T и δ закону Гука. Эффекту деформации соответствует отрезок 1 на диаграмме.
2) Воздействие электрического поля E приводит к поляризации диэлектрика и создает электрическое смещение D (отрезок 2 на диаграмме).
3) Изменение температуры dt, вызывает изменение энтропии dU: $dU=C/t \cdot dt$, где C - теплоемкость. Эта связь представлена отрезком 3.
В диаграмме все линии связей между вершинами треугольников имеют определенный смысл. Так прямые связи внешних вершин характеризуют:
Отрезок 4 – электромеханические эффекты;
Отрезок 5 – электротермические;
Отрезок 6 – термоупругие.
Связи между вершинами внутреннего треугольника соответствуют следующим эффектам:
Электрическая поляризация может привести к деформации кристалла путем электрострикции (связь 15) или изменить его температуру из-за выделения теплоты поляризации(связь 13); Линия 14 характеризует теплоту, выделяющуюся при механической деформации.
T - механическое напряжение, δ – механическая деформация, t – температура, U – энтропия; 1 – упругость, 2 – диэлектрическая проницаемость, 3 – теплоемкость, 4 – электромеханические эффекты, 5 – электротермические эффекты, 6 – термоупругие эффекты, 7 – прямой пьезоэлектрический эффект, 8 – пьезокалорический эффект, 9 – обратный пьезоэлектрический эффект, 10 – электрокалорический эффект, 11 - тепловое расширение, 12 – пироэлектрический эффект, 13 – теплота поляризации, 14 – теплота деформации, 15 - электрострикция.
Из диаграммы следует, что связи между воздействиями и эффектами могут быть и не прямыми. Так, деформация δ возникает не только непосредственно за счет внешнего механического напряжения, но и за счет вторичных эффектов: напряжение T создает электрическую поляризацию за счет пьезоэлектрического эффекта (связь 7), а возникшее электрическое поле вызовет деформацию из-за электрострикции (связь 15).
Другим примером служит вторичный (или ”ложный”) пироэлектрический эффект в пьезоэлектрических кристаллах. Его рассмотрим подробнее позднее.
Приведенный пример взаимосвязей свойств кристалла, естественно, не является исчерпывающим. Вообще не все свойства присущи кристаллам одного типа. Они связаны также с составом кристаллического вещества, типом симметрии его решетки и другими факторами. Например, оптические свойства, магнитные свойства формально присущи любому кристаллу, но практически для технических применений используются далеко не все. Не у всех кристаллов выражен пьезоэлектрический эффект. Например, кристаллы с решеткой алмазного типа (т.е. например Ge и Si) им не обладают, но он есть у арсенида галлия (решетка типа цинковой обманки). Но лучше всего

это свойство изучено и шире всего используется у кристаллического кварца. Диаграмму, подобную рассмотренной, можно построить, например, для представления взаимосвязи оптических, механических и электрических свойств кристаллов, используемых для электро-акусто-оптической обработки информации.
Рассмотрим более подробно некоторые физические явления в кристаллах.

5.1. Пироэлектрический эффект

Из рассмотренного ранее соотношения явление (эффект) = свойство * воздействие следует, что если воздействие скалярно, а эффект – векторный, то и свойство должно быть векторным (тензорным), т.е.

Вектор = вектор * скаляр.

Классическим свойством кристаллов, подчиняющихся этому правилу, является пироэлектрический эффект (на рис. 5.1 эта связь под №12).
Пироэлектричество проявляется в свойстве кристалла диэлектрика изменять величину электрической поляризации при изменении температуры. В результате нагревания или охлаждения пироэлектрического кристалла на его гранях появляются электрические заряды.
Кристаллы пироэлектрических веществ это диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) электрической поляризацией.
Например, это турмалин, пентаэритрит. К пироэлектрикам относятся также сегнетоэлектрики, это так называемые – “мягкие пироэлектрики“ у которых направление спонтанной поляризации можно изменить внешним полем.
В таких кристаллах можно выделить элементарные ячейки, имеющие некомпенсированный электрический дипольный момент:

$$p = q \cdot l,$$

где q – заряд, l – расстояние между равными и противоположными по знаку зарядами.
Если диполи ориентированы одинаково, то кристалл оказывается электрически поляризованным. Спонтанная поляризация определяется как сумма дипольных моментов в единице объема:

$$P = \frac{p}{V}.$$

Численно она равна поверхностной плотности зарядов σ на противоположных гранях кристалла, нормальных к направлению P.
Если кристалл достаточно долго находится при постоянной температуре, то избыточные заряды на его поверхности компенсируются за счет утечек, взаимодействия с ионами воздуха и кристалл практически не обнаруживает внешне электрической поляризации. Если температуру кристалла однородно изменить на Δt, то анизотропно меняются расстояния и углы между элементарными ячейками, меняется спонтанная поляризация, смещаются заряды диполей и в кристалле появляется постоянная поляризация вдоль направления, называемого электрической осью. То есть в результате

изотропного действия температуры (Δt) в кристалле появляется дополнительно электрическая поляризация Δp, то есть векторное свойство.
Впервые пироэлектрический эффект был обнаружен на кристаллах турмалина. На белой бумаге, на которой лежали кристаллы, пыль собиралась около концов кристалла (поляризация появлялась при колебаниях комнатной температуры). Особенно наглядно это проявляется, если нагретый кристалл турмалина посыпать порошком из смеси серы и сурика, которые при трении поляризуются. Пылинки серы и сурика притягиваются к разным по знаку заряда концам кристалла. Другая известная демонстрация эффекта – если охладить кристалл турмалина в жидком азоте, а затем вынуть на воздух, то на концах кристалла начинает расти "борода" из ледяных кристаллов, образующихся при замерзании частиц влаги, конденсирующихся из воздуха.
Уравнение пироэлектрического эффекта в общем нелинейно

$$\Delta P=\gamma_1\Delta t+ \gamma_2\Delta t_2,$$

где γ_1,γ_2- коэффициенты пироэлектрического эффекта ($\gamma_1<<\gamma_2$). Часто ограничиваются линейным уравнением

$$\Delta P=\gamma\Delta t,$$

где Δt- скаляр, $\Delta P,\gamma$- векторы.
Пироэлектрические кристаллы используются достаточно давно, но недостаточно широко. Они очень перспективны для изделий микросистемной техники. Что на них можно делать?
Датчики температуры с чувствительностью вплоть до 10^{-9} ^{0}C.
Приемники инфракрасного излучения, датчики ударных волн, измерители напряжения, ячейки памяти. Используют их и в преобразователях тепловой (не обязательно солнечной) энергии в электрическую.
Некоторые цифры. Пластинка турмалина, толщиной 1 мм, имеет $\gamma= 1{,}3\cdot10^{-5}$ Кл/м^2·К. Регистрирует изменение температуры 10^{-5} ^{0}C. При нагреве на 10 ^{0}C на ней образуется заряд с поверхностно плотностью $5\cdot10^{-5}$ Кл / м^2, что соответствует разности потенциала между гранями ~1,2кВ. У сегнетоэлектриков пироэлектрический коэффициент на 1-2 порядка больше, чем у турмалина.
Некоторые значения γ при 20 ^{0}C: турмалин $1{,}3\cdot10^{-5}$,сульфат лития $3\cdot10^{-4}$, ниобат лития $2\cdot10^{-3}$, танталат лития $1\cdot10^{-4}$, титанат бария $(0{,}5\text{-}1)\cdot10^{-3}$, сегнетокерамика $5\cdot10^{-5}$ (цирконат-титанат свинца).
Наблюдение и использование пироэлектрического эффекта осложняется и ограничивается эффектами проводимости (утечками).
Кроме того, каждый пироэлектрический кристалл является пьезоэлектриком. Изменение температуры кристалла, особенно неоднородное, вызывает деформацию, а следом идет пьезоэлектрическая поляризация, накладывающаяся на поляризацию, вызванную пироэффектом. То есть имеет место "первичный" ("истинный") пироэффект и "вторичный" или "ложный" пьезоэффект.

Если поместить пироэлектрический кристалл в электрическое поле и менять его напряженность, то должен наблюдаться обратный пироэлектрическому электрокалорический эффект(10), то есть изменение температуры пироэлектрика, вызванное изменением приложенного к нему электрического поля. Его предсказали ещё в 19 веке Липман (1880) и Кельвин (1889), а вскоре обнаружили и экспериментально. Но он очень мал: для той же пластинки турмалина в 1 мм толщиной, изменение на 1/300 В дает изменение температуры порядка 10^{-5} ^{0}C . В сегнетодиэлектриках чувствительность значительно выше: так, в кристаллах KH_2PO_4 температура фазового перехода за счет сильных полей (вблизи точки Кюри) может изменяться примерно на 2 ^{0}C.

5.2. Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект состоит в том, что под действием механического напряжения или деформации в кристалле возникает электрическая поляризация (величина и знак которой зависит от приложенного напряжения (7)). Обратный пьезоэлектрический эффект – это механическая деформация кристалла, вызванная приложенным электрическим полем, величина и тип деформации зависит от величины и знака поля (9). При этом электрическое поле может характеризоваться вектором электрической поляризации P, электрической индукции D или вектором E, а действующее на кристалл механическое усилие – тензором механического напряжения $T_{i,j}$ или тензором деформации $\delta_{i,j}$. Таким образом тензорное воздействие вызывает векторное явление (или обратно $P_i \sim T_{j,k}$) в соответствии со схемой:

Реакция = свойство* воздействие.

Каждая компонента вектора P связана с каждой компонентой вектора $T_{i,j}$ соотношением

$$P_i = d_{i11}T_{11} + d_{i12}T_{12} + d_{i13}T_{13} + d_{i21}T_{22} + d_{i22}T_{22} + d_{i23}T_{23} + d_{i31}T_{31} + d_{i32}T_{32} + d_{i33}T_{33},$$

или, компактно

$$P_i = d_{ijk}T_{jk}.$$

Входящие сюда 27 компонентов d_{ijk} образуют тензор пьезоэлектрических модулей – тензор третьего ранга. В силу симметрии $d_{ijk}=d_{ikj}$ число независимых компонентов модуля сокращаются до 18.

Всего выделяют четыре типа пьезомодулей:

- коэффициенты, характеризующие поляризацию, вызванную напряжением сжатия или растяжения;
- коэффициенты, характеризующие поляризацию, вызванную напряжениями сдвига. При этом каждая из этих видов поляризации возникает как в продольном (по направлению напряжения), так и в поперечном направлении.

Пьезоэффект возникает не во всех кристаллах, он наблюдается в 11 классах симметрии из 32 известных. Естественно, что количественные показатели пьезоэффекта различны при различных ориентациях пластинки, вырезанной из кристалла.

В случае прямоугольной кристаллографической системы координат, пластинки, перпендикулярные осям X,Y,Z, именуются x,y,z – срезами. Множество других, находящих применение ориентаций пластин для кристалла кварца, представлены на рис. 5.2.

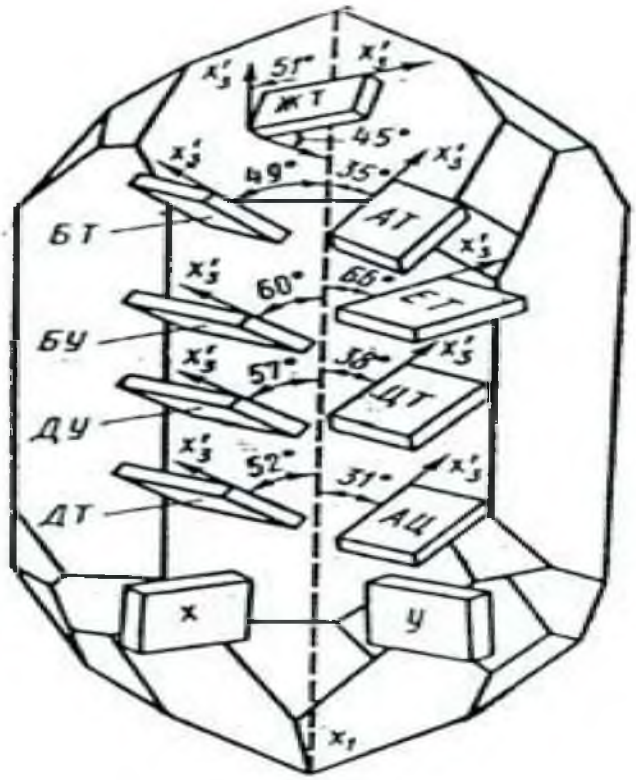


Рис. 5.2. Некоторые технические срезы кварца

Каждый срез характеризуется своей величиной пьезоэффекта, частотой колебаний и её температурным коэффициентом.

Деформации кристаллов, вызванные пьезоэлектрическим эффектом, очень малы. Например, если к пластинке x – среза кварца приложить напряжение порядка 1 кВ, продольная и поперечная деформации составят порядка 20 Å, а угол между осями x и y изменяется на 0,012", причем это практически не зависит от толщины пластинки.

Однако при резонансе собственной частоты механических колебаний пластинки с частотой возбуждающего электрического поля деформация (то есть амплитуда механических колебаний пластинки) резко увеличивается и составляет мкм.

Собственная частота колебаний пьезоэлектрической пластинки зависит от вещества кристалла, кристаллографической ориентации среза, размеров и формы пластины, и также температуры.

Это свойство используется очень широко для преобразования электрических колебаний в механические и обратно, а также для стабилизации частоты в генераторах.

Важный параметр – температурный коэффициент частоты (ТКЧ):

$$ТКЧ=\Delta f/f\Delta t.$$

Некоторые срезы кварца имеют практически нулевой ТКЧ и используются для стабилизации частоты.

Пьезоэлектрические кристаллы – эффективные электромеханические преобразователи. Они используются не только в генераторах, но и в двигателях, где электрическая энергия преобразуется в механическую вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта.

Важным для таких преобразователей является связь между механической и электрической энергией, соотношение между которыми характеризуется коэффициентом электромеханической связи К:

$$K = \sqrt{\frac{W_{мех}}{W_{эл}}},$$

где $W_{мех}$ – энергия упругих деформаций колеблющегося пьезоэлектрического кристалла, $W_{эл.}$ – электрическая энергия.

Коэффициент К не является тензорной величиной, но зависит от таковых и не одинаков для разных материалов.

Историческая справка

В 1980г. исполнилось 100 лет с тех пор, как братья Кюри обнаружили в кристалле турмалина поверхностный заряд, появляющийся при приложенной к кристаллу механической силы в определенном направлении. Это явление позднее было названо пьезоэлектрическим эффектом. Через год они продемонстрировали обратное явление – наличие механической деформации кристалла под действием электрического поля.

Первое практическое применение этого явления нашло только в 1917г., когда Ланжевен при создании гидролокатора использовал пьезоэлектрические свойства кварца для возбуждения ультразвуковых волн в морской воде. В 1921г. Кэди опубликовал работу о пьезоэлектрических резонаторах, которые позднее стали применятся для стабилизации частоты высокочастотных генераторов. Это – время использования исключительно объемных колебаний в кристаллах.

В 60-х годах XX века возникла и быстро разрослась новая область применения пьезоэлектрических кристаллов, основанная на использовании поверхностно акустических волн (ПАВ). Это, в основном, разнообразные фильтры (частотные, полосовые), линии задержки, позднее – устройства обработки оптических сигналов (модуляторы, дефлекторы).

В последние годы на основе пьезоэффекта созданы устройства МСТ – двигатели, насосы и прочие.

Все пьезоэлектрические устройства основаны на возбуждении упругих механических колебаний и их распространении в твердом теле. Простейшие устройства используют объемные волны, например, кварцевый резонатор (рис.5.3).

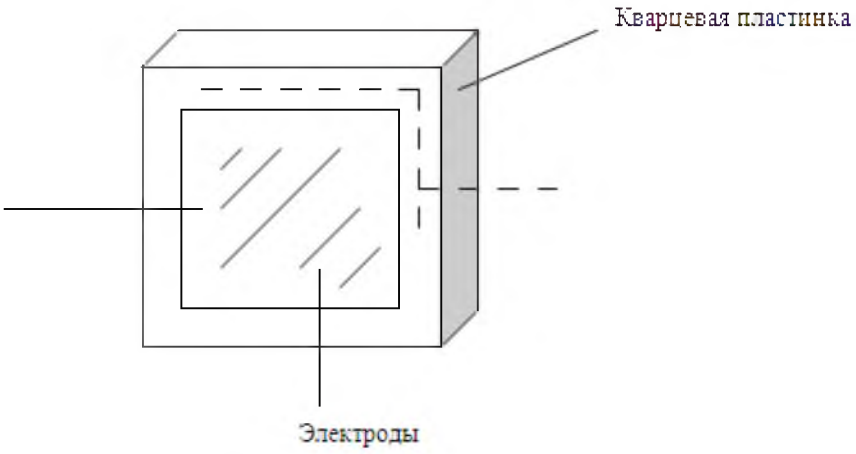


Рис. 5.3. Простейший кварцевый резонатор

Используются специфические свойства твердого тела:

1) Скорость распространения акустических волн значительно меньше (1 – 10 км/с), чем электромагнитных (и меньше размеры устройств).

2) Затухание невелико.

3) Стабильность частоты механических колебаний очень высока (зависит от направления среза у кварца).

В итоге стабильность кварцевых генераторов ~ 10^{-6}/°С, при добротности контура порядка 10^6 . Время задержки до 1 мс (в локации – для индикации движущихся целей, в телевидении задержка на 1 строку ~ 60 мкс).

Возможно также создание ультразвуковых линий задержки как с использованием объемных волн (рис. 5.4), так и на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Использование ПАВ предоставляет больше конструкторских и технологических возможностей.

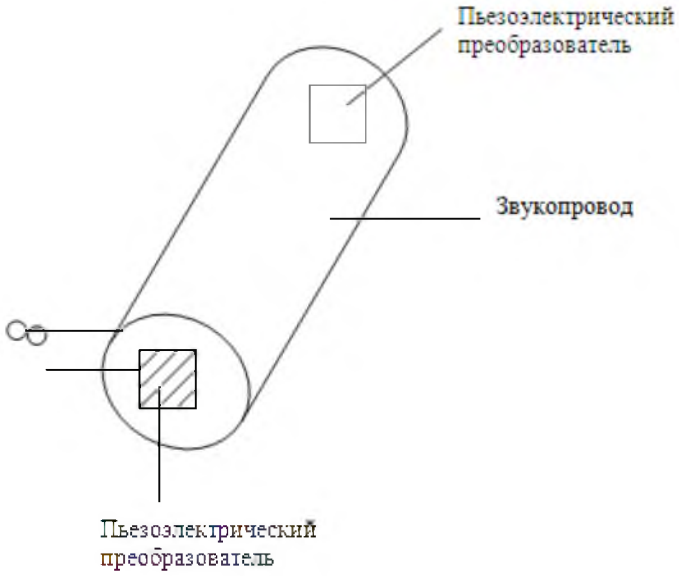


Рис. 5.4. Пьезоэлектрическая линия задержки на объемных волнах

Устройства на ПАВ широко используют технологические возможности МЭ. Главным элементом для использование ПАВ является встречно-штыревой преобразователь (ВШП). Он применяется как для возбуждения и приема ПАВ, но и для формирования частотной характеристики (рис.5.5).

ВШП состоит из группы идентичных электродов, которые подключены к полюсу генератора. В пьезоэлектрике возникает пространственно периодическое поле. Период преобразователя L должен быть близок (равен) длине поверхностной акустической волны. Это обуславливает и частоту возбуждающих колебаний.

Например: На частоте 100 МГц длина волны в воздухе 3м, в кварце длина акустической волны ~ 32 мкм, отсюда шаг металлизации и зазора в ВШП составляет ~ 8 мкм.

Такой симметричный ВШП возбуждает ПАВ в обоих направлениях. Если нужно однонаправленное излучение, с одной стороны ВШП формируют поглотитель.

Величина апертуры W определяет направленность излучения. Типичная толщина подложки ~ 1 мм. При этом ПАВ отличается тем, что практически 90% энергии распространяется в приповерхностном слое, толщиной порядка длины волны.

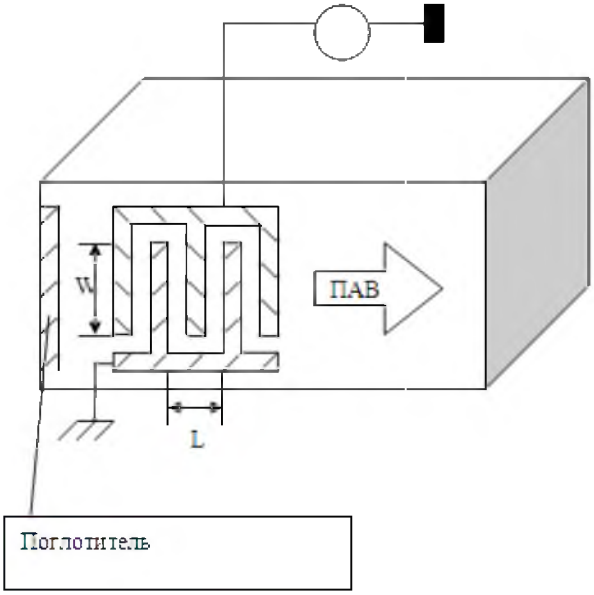


Рис.5.5. Структура встречно-штыревого преобразователя (ВШП)

5.3. Пьезоэлектрические материалы

Используемые в промышленности пьезоэлектрические материалы можно разделить на три группы:

1) Пьезоэлектрические кристаллы, обычно монокристаллы с совершенной структурой.

2) Материалы с поликристаллической структурой перовскитов, в которых пьезоэлектрические свойства появляются в результате поляризации (в сильном поле происходит упорядочивание сегнетоэлектрических доменов). Могут быть получены в виде пленок.
3) Пьезоэлектрические полярные полимеры, в которых необходимая анизотропия и формирование пьезоэлектрических свойств происходит при механическом вытягивании материала в присутствии сильного электрического поля.
Кварцевый кристалл – это диоксид кремния SiO_2, который может существовать в разных формах, в том числе монокристаллической (исторически - горный хрусталь). На практике используют так называемую α – модификацию кварца (при 573 ^{0}C она переходит в β – модификацию, затем при 870 ^{0}C образуется α – тридолит, а свыше 1470 ^{0}C – α - кристобалит). При 1710 ^{0}C кварц плавится.
Материал стоек к воде и многим кислотам, твердость порядка 7 (по Моосу), коэффициент теплового расширения $(8\text{-}13{,}4)\cdot 10^{-6}$ 1/К в зависимости от среза. Хорошо работает как при низких, так и высоких температурах (до 573 ^{0}C).
В технике используется как природный, так и синтетический кварц. В природе встречаются кристаллы массой от долей грамма до нескольких тонн (используют в технике обычно кристаллы массой 200-300г). Идеальные кристаллы встречаются редко.
Синтетические кристаллы кварца выращивают гидротермальным методом из водного раствора при высоких давлениях и температурах. Это делается в стальных автоклавах, частично заполненных щелочными растворами ($NaCO_3$ или NaOH). В нижней части автоклава находится сырье кварца, которое растворяется в процессе роста кристаллов, а в верхнюю, более холодную часть, помещают затравки, на которую и высаживается избыточный диоксид кремния из пересыщенного раствора. Температура внутри автоклава обычно 340-350 ^{0}C, давление 100-130 МПа, температурный градиент 5-30 $К\cdot см^{-1}$.
Скорость роста очень мала – обычно несколько десятых мм/сутки, поэтому весь процесс длится от нескольких недель до года и более.
Затравка – пластины, толщиной 2-3 мм, иногда используют стержень.
Ниобат и танталат лития ($LiNbO_3$ и $LiTaO_3$). Это сегнетоэлектрики, а танталат лития проявляет также пироэлектрические свойства, оба кристалла используются в качестве электрооптических преобразователей на основе ПАВ. Точка плавления ниобата – 1260 ^{0}C, танталата - 1560 ^{0}C.
Монокристаллы этих материалов выращиваются из расплавов методом Чохральского. Выращивание идет в присутствии электрического поля. Берлинит – ($AlPO_4$ – фосфат Al). Имеет такую же структуру, как и кварц, похож на кварц. В природе не встречается; выращивается гидротермальным способом. Кристаллическая структура аналогична кварцу. Работает до 581^{0}C.
Отличия от кварца – сильнее выражены пьезоэлектрические свойства и большее значение коэффициента электромеханической связи (что важно).

Материалы (в основном, поликристаллические) типа A_2B_6, A_3B_5 (ZnS, CdS, ZnO, GaAs) удачно сочетают ультразвуковые и полупроводниковые свойства. Наиболее интересный оксид цинка. Их главная особенность – используются не столько объемные, сколько пленочные структуры, пригодные для возбуждения как объемных, так и поверхностных волн.
Монокристаллические слои ZnO можно вырастить эпитаксиальным способом на ориентирующей подложке из сапфира.

6. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ [4]

6.1. Пьезорезистивный эффект и анизотропия пьезорезистивных коэффициентов

Для измерения деформации кристалла под действием каких либо сил (давления, инерции) необходимо установить связь межу изменением электрического сопротивления полупроводника и механическими напряжениями в нем или его деформациями. Рассмотрим феноменологическую картину этой связи на примере тензорезисторов, расположенных на круглой мембране (рис 6.1).

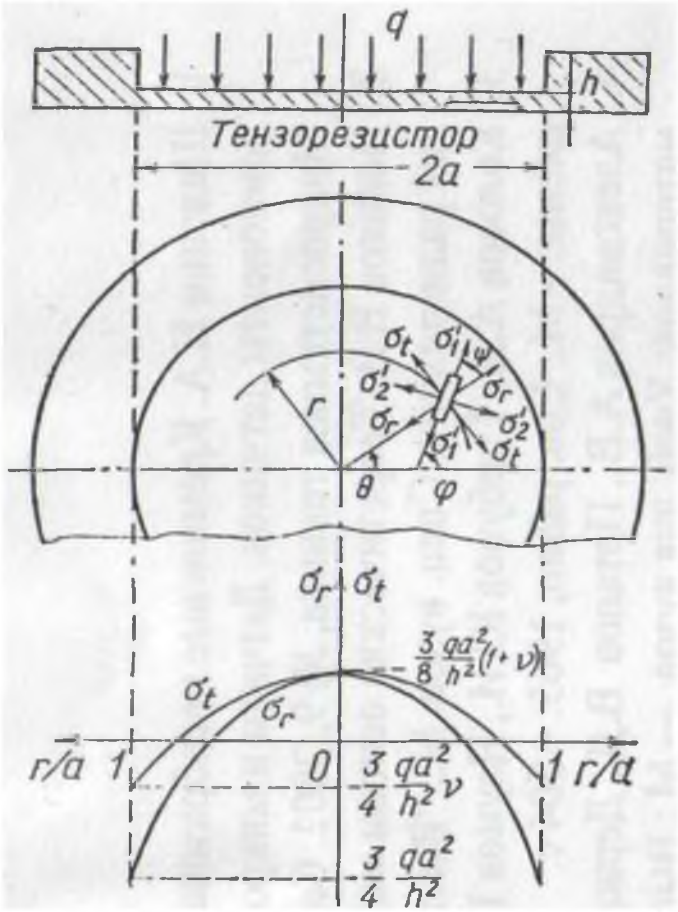


Рис. 6.1. Распределение механических напряжений в тензорезисторе, расположенном на круглой мембране.

Мембрана радиусом a и толщиной h жестко закреплена по контуру. На нее действует давление q. Тензорезистор расположен на расстоянии r от центра мембраны на обратной стороне по отношению к приложенному избыточному давлению. Для этого случая радиальные напряжение Tr и тангенциальное напряжение Tt в любой точке мембраны можно рассчитать по формулам:

$$Tr := \frac{3q}{8h^2} \cdot a^2 \cdot 1 + \nu - r^2 \cdot (3 + \nu)$$

$$Tt := \frac{3q}{8h^2} \cdot a^2 \cdot 1 + \nu - r^2 \cdot (1 + 3\nu) \qquad (6.1)$$

где ν - коэффициент Пуассона.

Напомним, что коэффициент Пуассона представляет собой относительное изменение поперечного размера тела под нагрузкой, деленное на относительное изменение его длины, т.е.

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \qquad (6.2)$$

Для кремния *<001> – ν = 0,28 ; <011> – ν = 0,06; < 010> – ν = 0,28;* поликремния – *ν = 0,22.*

Если материал мембраны изотропен, то напряжение зависит только от расстояния от центра мембраны r и не зависит от угла θ. Линейная зависимость T(q) наблюдается только при прогибах мембран меньших ее толщины h.

Если мембрана имеет анизотропные упругие свойства, то в общем виде её упругие свойства описываются тензором второго ранга, содержащим 9 компонент. Для инженерной практики использование такого сложного описания малопригодно. Его упрощение возможно за счет использования связей между отдельными компонентами тензора и учета симметрии кристалла. В результате механические напряжения в кремниевой мембране удается выразить через три компоненты тензора механических напряжений, соответствующие продольной, поперечной и сдвиговой составляющей напряжения следующим образом:

$$T_1' = T_r \cdot cos^2\ \psi + T_t \cdot sin^2\ \psi\ ,$$
$$T_2' = T_r \cdot sin^2\ \psi + T_t \cdot cos^2\ \psi\ ,$$
$$T_6' = (T_t - T_r) \cdot sin\ \psi \cdot cos\ \psi\ ,$$

где $\psi = \varphi - \theta$.

Механические напряжения в кристалле приводят к изменениям электропроводности. Эту связь можно представить, например, в такой форме:

$$\frac{E_s}{\rho_0} = j_i + \pi_{ijkm} \cdot T_{km} \cdot j_i$$

где i,j,k,m,s = 1,2,3; ρ_0 – удельное сопротивление материала при механическом напряжении равном нулю; E_s - компонента вектора напряженности электрического поля;

ji – компоненты вектора плотности тока, $\pi_{i,j,k,m}$ - тензор четвертого ранга, характеризующий пьезорезистивные коэффициенты. Таким образом, число независимых переменных чрезвычайно велико. Для кубических кристаллов симметрии, к которому принадлежит кремний, удается получить формулу, характеризующую относительное изменение сопротивления тензорезистора под нагрузкой в следующем виде

$$\Delta R/R=\pi'_{11}T'_1+\pi'_{12}T'_2+\pi'_{16}T'_6,$$

где и π, и T зависят от положения резистора .

Т.о. для расчета необходимо знать значение π'_{11}, π'_{12}, π'_{16} соответственно продольного, поперечного и сдвигового пьезорезисторных коэффициентов. Их величины могут зависеть от ориентации резистора на кристалле и могут быть выражены в приемлемой для расчетов форме в частности:

В плоскости (001):

$\pi'_{11}=\pi_{11}-(\pi_A/4)(1-\cos 4\varphi)$, $\pi'_{12}=\pi_{12}+(\pi_A/4)(1-\cos 4\varphi)$, $\pi'_{16}= - (\pi_A/2)\sin 4\varphi$.

В плоскости (011):

$\pi'_{11}= \pi_{11}-(\pi_A/16)(4-4\cos 2\varphi-3\cos4\varphi)$, $\pi'_{12}=\pi_{12}-(3\pi_A/16)(1-\cos4\varphi)$,

$\pi'_{16}= -(\pi_A/8)(2\sin 2\varphi+3\sin4\varphi)$.

В плоскости (111):

$\pi'_{11}= \pi_{11}-\pi_A/2$, $\pi'_{12}= \pi_{12}-\pi_A/6$, $\pi'_{16}= 0$.

Где $\pi_A=\pi_{11}-\pi_{12}-\pi_{44}$; π_{12} – не главный, а π_{11} и π_{44} - главные пьезорезистивные коэффициенты. Их значения зависят также от легирования кристалла и температуры. В частности для равномерно легированного сравнительно высокоомного кремния значения главных пьезорезистивных коэффициентов приведены в таблице:

Тип проводимости	Уд. сопротив-ление,Ом см	Конц. прим., $м^{-3}$	π_{11} , 10^{-11} $м^2/н$	π_{12} , 10^{-11} $м^2/н$	π_{44} , 10^{-11} $м^2/н$
n	11,7	$4\cdot10^{20}$	-102,2	53,4	-13,6
p	7,8	$1,7\cdot10^{21}$	6,6	-1,1	138,1

Таким образом, все необходимые исходные данные для расчета зависимости сопротивлений тензорезисторов от давления на мембрану могут быть установлены.

Кроме того, в практике проектирования тензорезисторов могут учитывать ряд других факторов, например, нелинейность сопротивления при больших деформациях мембраны. В частности, известно, что резисторы на основе p-кремния линейны в более широком интервале давлений, чем резисторы на кремнии n-типа, в то же время резисторы, сформированные из донорного полупроводника, имеют более высокую температурную стабильность по сравнению с резисторами на основе акцепторных материалов. Для всестороннего учета множества факторов для полного расчета тензорезистивных датчиков справочных данных, как правило, недостаточно, их проектирование связано с проведением значительного объема

исследовательских работ и обычно опирается на экспериментальные результаты. Результаты этой работы обобщаются в виде зависимости

$$\Delta R/R=\varepsilon K \text{ или } \Delta R/R=Mq,$$

где K- коэффициент тензочувствительности (K=(ΔR/R)/(Δl/l)), относительная деформация $\varepsilon=\Delta l/l$.

Для полупроводников значение K обычно составляет 50–200.

6.2. Конструкции тензорезисторов

В тензодатчиках используются все известные конструкции интегральных полупроводниковых резисторов, чаще имеющих простую полосковую структуру, но иногда и в виде меандра. На рис.6.2 приведены однополосковые структуры интегральных тензорезисторов .

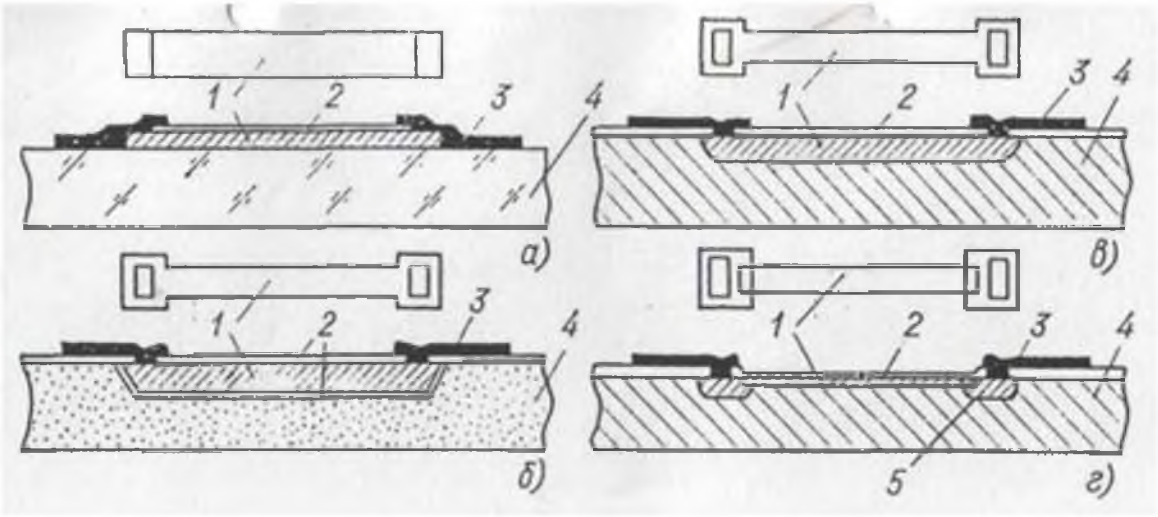


Рис.6.2. Однополосковые структуры интегральных тензорезисторов.
а — равномерно легированный эпитаксиальный тензорезистор с мезаструктурой; б—равномерно легированный тензорезистор с окисной изоляцией; в—диффузионный тензорезистор; *г* — ионно-имплантированный тензорезистор; 1 — тензорезистор; *2* — защитное покрытие; *3* — металлизированные токоведущие дорожки; *4* — подложка — упругий элемент преобразователя; 5 — сильнолегированная подконтактная область.

Их расположение на диафрагме или балке, находящейся под механической нагрузкой, может быть весьма разнообразным, что связано с разными задачами, которые они решают. Во-первых, ориентация резисторов существенно влияет на чувствительность – изменчивость сопротивления от нагрузки сильно зависит от его углового положения. Во- вторых, тензорезисторы обычно используются не поодиночке, а группами, чаще всего в составе мостовых схем. Чувствительность схем уравновешивания, и мостов в частности, можно существенно повысить, если знаки изменения сопротивления в смежных плечах моста противоположны.

Для примера на рис. 6.3–6.4 приведены возможные варианты расположения тензорезисторов на диафрагмах, выполненных на кремнии с разной кристаллической ориентацией.

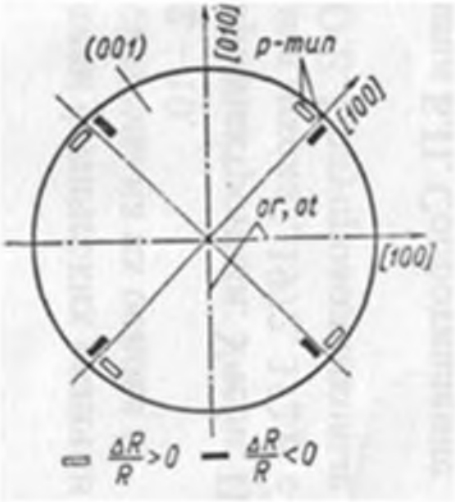


Рис. 6.3. **Расположение** однополосковых тензорезисторов p-**типа с положительной и отрицательной** чувствительностью на мембране (001).

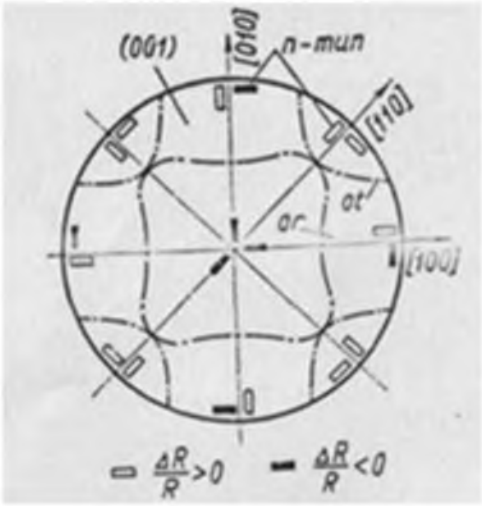


Рис. 6.4. **Расположение однополосковых тензорезисторов** n-типа **с положительной и отрицательной чувствительностью на мембране** (001)

7. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МСТ В СИЛОВОМ ПОЛЕ[3,5]

7.1. Закон Гука

В 1676 году английский ученый Роберт Гук открыл фундаментальную закономерность между силами и вызванными ими перемещениями: сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела (рис. 7.1).

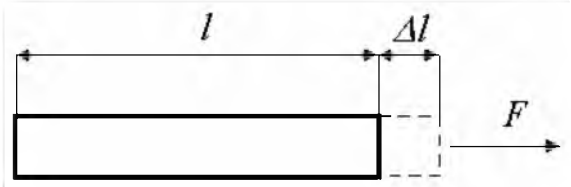


Рис. 7.1. К понятию закона Гука

Величина изменения длины тела зависит от размеров тела, материала и величины силы:

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \tag{7.1}$$

где F – внешняя сила; S – площадь поперечного сечения тела; E – модуль Юнга (упругости); Δl – изменение длины тела; l – длина тела.

Так как

$$\frac{F}{S} = \sigma, \quad \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon \qquad 7.2$$

то выражение (7.1) примет вид

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \tag{7.3}$$

где σ – механическое напряжение; ε – относительная деформация.

Необходимо отметить, что модуль Юнга является физической постоянной материала и определяется экспериментально.

На основании закона Гука (7.3) можно сказать, что модуль Юнга равен отношению приложенного напряжения к вызванному им относительному удлинению:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \tag{7.4}$$

Величина, обратная модулю Юнга, называется коэффициентом упругости:

$$\alpha = \frac{1}{E} = \frac{\varepsilon}{\sigma}. \tag{7.5}$$

Необходимо помнить, что закон Гука выполняется только в области упругих деформаций.

Абсолютное значение отношения относительной поперечной деформации $\sigma_{\text{попер}}$ к относительной продольной деформации $\sigma_{\text{прод}}$ при растяжении или сжатии в области действия закона Гука, называется коэффициентом Пуассона:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{прод}}}. \tag{7.6}$$

Если на тело вдоль его оси действует некоторая внешняя сила (см. рис.2.1), то согласно закону Гука относительная продольная деформация будет определяться следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\sigma_{\text{прод}}}{E} \tag{7.7}$$

Относительная поперечная деформация определяется выражением:

$$\varepsilon_g = -\frac{\sigma_{\text{попер}}}{E}. \tag{7.8}$$

Если на тело действуют внешние силы вдоль трех осей X, Y, Z (рис.7.2), то относительная деформация тела по этим осям будет уже зависеть от всех действующих на тело сил.

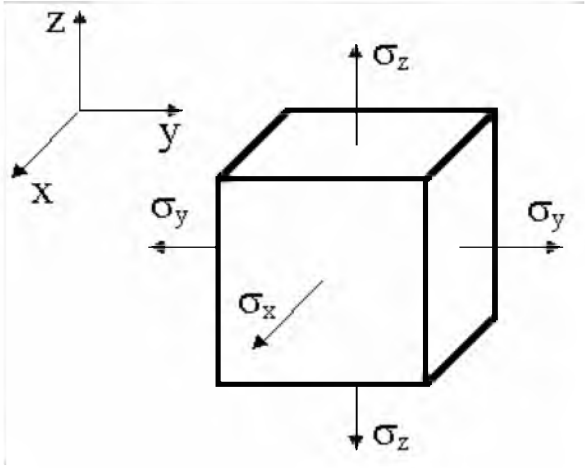


Рис. 7.2. К понятию обобщенного закона Гука

Рассмотрим действие сил вдоль оси X (см. рис. 7.2). От действия напряжения σ_x, направленного вдоль оси X, относительная линейная деформация по данной оси составит:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \tag{7.9}$$

От действия напряжения σ_y, направленного вдоль оси Y, относительная линейная деформация по оси X составит:

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_y}{E}\ . \tag{7.10}$$

От действия напряжения σ_z, направленного вдоль оси Z, относительная линейная деформация по оси X составит:

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \tag{7.11}$$

Сложив выражения (7.9)–(7.11), получим:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot \ \sigma_x - \mu \cdot \ \sigma_y + \sigma_z \ . \tag{7.12}$$

Аналогично получаем выражения для относительной линейной деформации по осям Y, Z:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot \ \sigma_y - \mu \cdot \ \sigma_x + \sigma_z \ ; \tag{7.13}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot \ \sigma_z - \mu \cdot \ \sigma_x + \sigma_y \ . \tag{7.14}$$

Выражения (7.12)–(7.14) представляют собой аналитические выражения обобщенного закона Гука. Закон Гука при сдвиге будет иметь следующий вид (рис.7.3):

$$\tau = \frac{F}{S} = G \cdot \gamma, \tag{7.15}$$

где τ – касательное напряжение; F – сила, параллельная площади S; S – площадь поверхности; G – модуль сдвига (упругости); γ – угловая деформация.

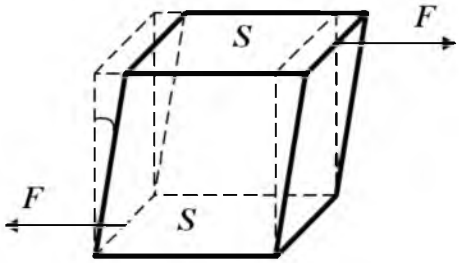


Рис. 7.3. К понятию закона Гука при сдвиге

Необходимо отметить, что модуль сдвига, как и модуль Юнга, является физической постоянной материала и определяется экспериментально.

Модуль сдвига связан с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона следующим выражением:

$$G = \frac{E}{2\cdot(1+\mu)}. \qquad (7.16)$$

Величина, обратная модулю сдвига, называется коэффициентом сдвига:

$$\beta = \frac{1}{G} = \frac{2\cdot(1+\mu)}{E}. \qquad (7.17)$$

Физические постоянные материалов, используемых в качестве структурных материалов микромеханических элементов МСТ, приведены в табл.7.1.

Таблица 7.1 Физические постоянные материалов

П/п материал	Модуль Юнга (E), ГПа	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэффициент Пуассона (μ)	Плотность (ρ), кг/м^3
Кремний (Si) <001> <011> <010>	 130 150 130	 50 70 50	 0,28 0,06 0,28	2320
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC) <001> <011> <010>	 270 350 270	 103 162 103	 0,31 0,08 0,31	3200

7.2. Момент инерции сечения

Осевым моментом инерции сечения относительно данной оси называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадрат их расстояний до данной оси (например, x или y), которая распространяется на всю площадь сечения A. Так, осевые моменты инерции (рис. 7.4) относительно осей x и y равны:

$$J_x = {}_A\ y^2 \cdot dA, \qquad (7.18)$$

$$J_y = {}_A\ x^2 \cdot dA. \qquad (7.19)$$

Полярным моментом инерции сечения относительно данной точки (полюс О) называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадраты их расстояний до этой точки, которая распространяется на всю площадь сечения A. Следовательно,

$$J_\rho = {}_A\ \rho^2 \cdot dA. \qquad (7.20)$$

Осевые и полярный моменты инерции всегда положительны и выражаются в см^4 или в м^4. Отметим интересное свойство: полярный момент инерции J_ρ равен сумме осевых моментов инерции J_x и J_y относительно любой пары взаимно перпендикулярных осей x и y, проходящих через полюс О.

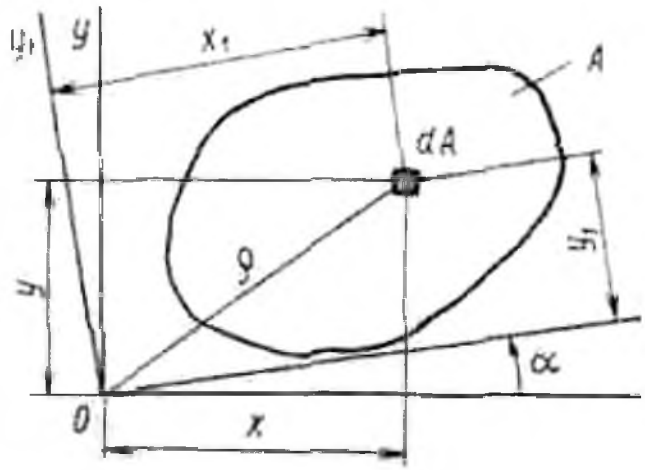


Рис.7.4. Осевой момент инерции

Действительно, как видно из рис.7.4, $\rho^2 = x^2 + y^2$, и $J_\rho = {}_A\ \rho^2 \cdot dA =$

$${}_A\ x^2 + y^2\ \cdot dA = {}_A\ x^2 \cdot dA + {}_A\ y^2 \cdot dA = J_x + J_y. \qquad (7.21)$$

Если оси x и y повернуть относительно полюса О на некоторый угол α (см. рис.7.4), то $\rho^2 = x_1^2 + y_1^2$ и, следовательно, $J_\rho = J_{x1} + J_{y1}$, т. е. при любом повороте осей относительно начала координат (полюса О) сумма осевых моментов инерции остается постоянной:

$$J_x + J_y = J_{x1} + J_{y1} = J_\rho = const\ . \qquad (7.22)$$

Центробежным моментом инерции сечения относительно осей координат (например, осей x и y) называется сумма произведений элементарных площадей dA на их расстояния до этих осей, которая распространяется на всю площадь сечения А. Таким образом,

$$J_{xy} = {}_A\ x \cdot y \cdot dA. \qquad (7.23)$$

Центробежный момент инерции J_{xy} выражается в см^4 или в м^4 и может быть положительным, отрицательным и равным нулю в зависимости от положения сечения относительно осей координат. Если сечение занимает положение относительно осей x в y, как показано на рис.7.5, а, то в этом случае $J_{xy} > 0$, так как координаты x и y положительны. Повернем оси координат на 90° против хода часовой стрелки (рис. 7.5, б). Теперь $J_{xy} < 0$, так как $x > 0$, а $y < 0$. Отсюда следует, что при повороте осей на некоторый угол $\alpha < 90°$центробежный момент может быть равен нулю: $J_{xy} = 0$.

Для некоторых сечений можно сразу указать оси, относительно которых $J_{xy} = 0$. Рассмотрим сечение, имеющее ось симметрии (рис.7.6). Центробежные моменты инерции полусечений, расположенные по разные стороны от оси y, равны между собой, но отличаются знаками. Следовательно, $J_{xy} = 0$.

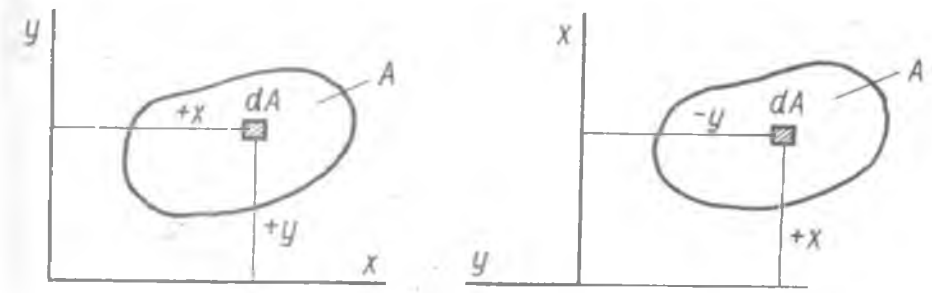
Момент инерции зависит от вида сечения консольной балки (рис. 7.7):

- с трапециевидным сечением:

$$J_x = \frac{(w_1+w_2)}{24} \cdot h^3; \quad (7.24)$$

$$J_y = \frac{w_1+w_2 \cdot w_1^2+w_2^2}{48} \cdot h. \quad (7.25)$$

где w_1 – ширина поверхности балки; w_2 – ширина основания балки; h – толщина балки.



а б

Рис. 7.5. Центробежный момент инерции

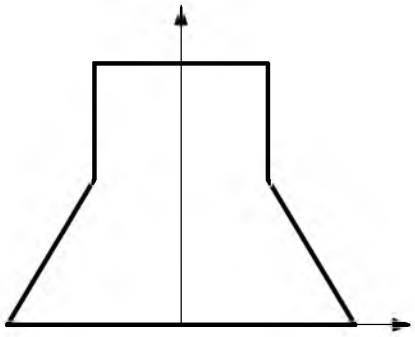


Рис. 7.6. Центробежный момент инерции для симметричных сечений

Ширина поверхности и ширина основания консольной балки с трапециевидным сечением связаны следующим выражением:

$$w_1 = w_2 - 2 \cdot h \cdot \tan\varphi, \quad (7.26)$$

где φ – угол травления консольной балки.

- с прямоугольным:

$$J_x = \frac{w \cdot h^3}{12}; \quad (7.26)$$

$$J_y = \frac{w^3 \cdot h}{12}, \quad (7.27)$$

где w – ширина балки.

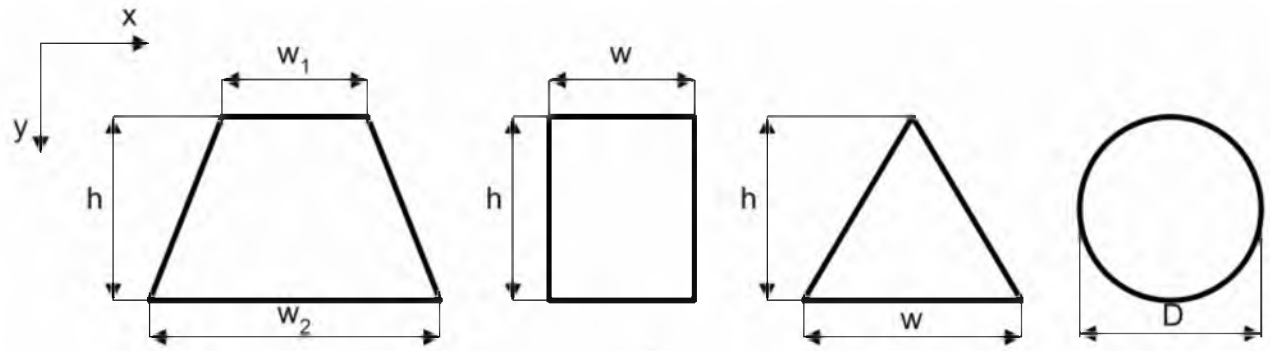


Рис. 7.7. Виды сечения балки

Центробежный момент инерции $J_{xy}=0$, т.к. оси x и y являются осями симметрии.

- с треугольным:

$$J_x = \frac{w \cdot h^3}{36}; \quad (7.29)$$

$$J_y = \frac{w^3 \cdot h}{48}, \quad (7.30)$$

Центробежный момент инерции $J_{xy}=0$, т.к. оси x и y являются осями симметрии.

- с круглым:

$$J_x = J_y \approx 0{,}05 \cdot D^4; \quad (7.31)$$

$$J_\rho \approx 0{,}1 \cdot D^4, \quad (7.32)$$

где D – диаметр балки.

7.3. Жесткость микромеханических элементов при изгибе

На рис.7.8 приведена структура консольной балки. Под действием внешней силы $F_{внеш}$ консольная балка отклоняется от первоначального положения. По закону Гука, силе $F_{внеш}$, действующей на балку, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F_{внеш} = -F_{упр} = kx, \quad (7.33)$$

где k – жесткость консольной балки; y – перемещение, совершаемое балкой под действие силы $F_{внеш}$.

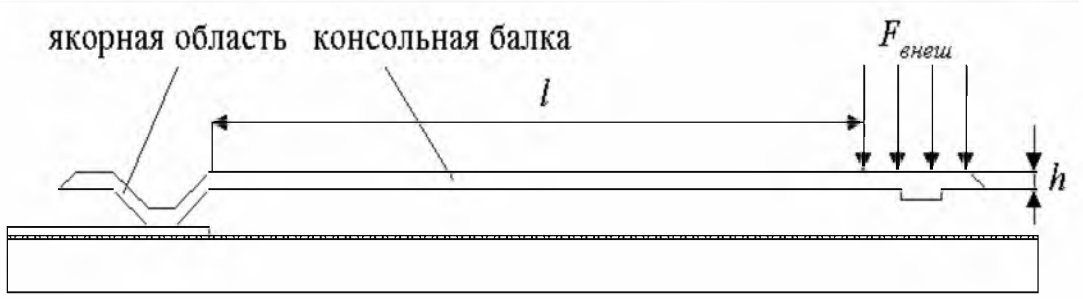


Рис. 7.8. Структура консольной балки

Перемещение y определяется выражением:

$$y = l \sin\gamma, \tag{7.34}$$

где l – расстояние от якорной области консольной балки до точки приложения внешней силы; γ – угол поворота балки.

При малых углах отклонения (менее 10°): $\sin\alpha = \alpha$; $\cos\alpha = 1$.

Таким образом, выражения (7.34) примет следующий вид:

$$y = l\ \gamma. \tag{7.35}$$

Определим жесткость консольной балки.

Под действием внешней силы $F_{внеш}$ балка будет изгибаться по окружности с центром в точке 0, радиусом изгиба ρ и углом изгиба γ (рис.7.9).

Угол изгиба γ определяется следующим выражением

$$\gamma = \frac{l}{\rho}, \tag{7.36}$$

где ρ – радиус изгиба, определяемый выражением:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot J}, \tag{7.37}$$

где M – изгибающий момент, действующий на балку; E – модуль Юнга [Н/м^2]; J – момент инерции сечения консольной балки.

Изгибающий момент, действующий на балку, определяется следующим выражением:

$$M = k \cdot \gamma \cdot l^2. \tag{7.38}$$

Подставив (7.36) и (7.38) в (7.37), получим выражение для определения жесткости консольной балки, приведенной на рис. 7.8:

$$k = \frac{E \cdot J}{l^3} \tag{7.39}$$

Рассмотрим структуру гребенчатого электростатического актюатора (рис.7.10.).

Под действием силы $F_{эл}$ ротор отклоняется от первоначального положения. По закону Гука, силе $F_{эл}$, действующей на ротор, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$ упругого подвеса, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

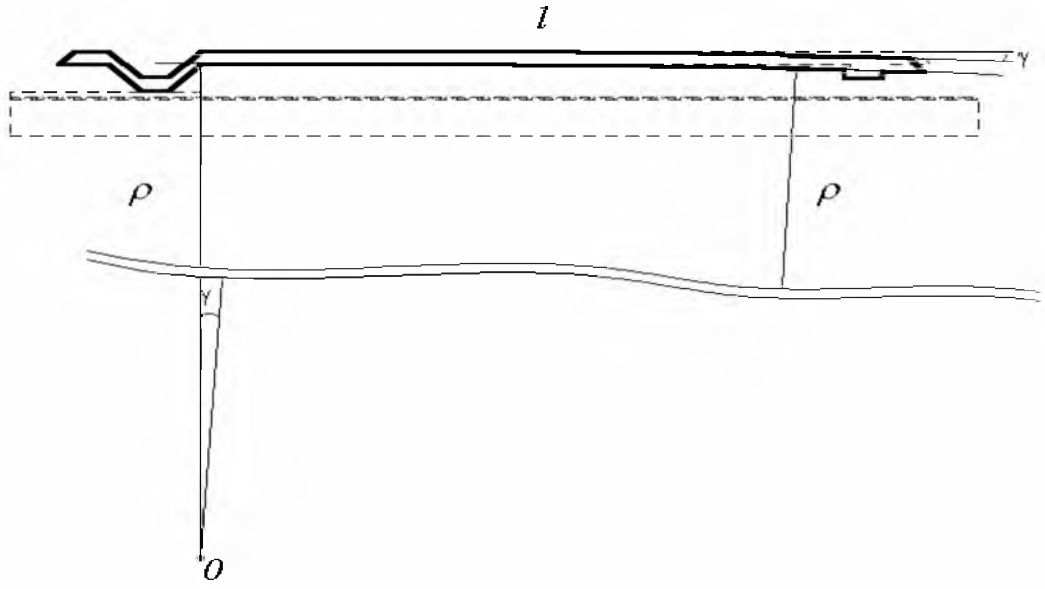
$$F_{эл} = -F_{упр} = k_S \cdot y, \tag{7.40}$$

где k_S – жесткость упругого подвеса; y – перемещение, совершаемое упругим подвесом под действие силы $F_{эл}$.

Непосредственно жесткости балок 1-8 (см. рис.7.10) определяются с помощью выражения (7.39).

Как видно на рис. 7.10, упругий подвес образован четырьмя последовательно соединенными парами балок: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, причем консольные балки в парах соединены параллельно.

Рис.7.9.Модель движения консольной балки



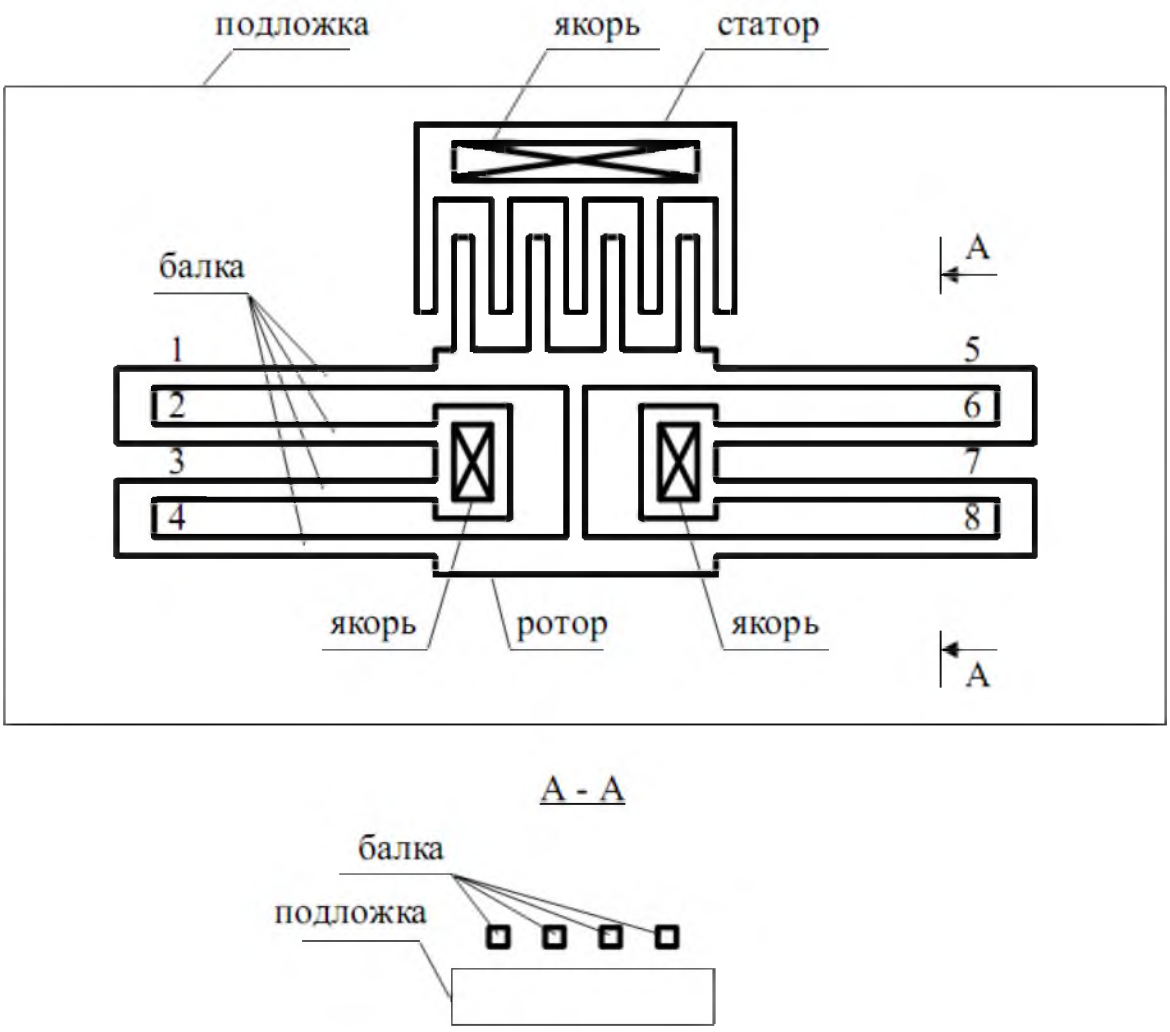


Рис. 7.10. Структура гребенчатого электростатического актюатора

Таким образом, жесткости пар параллельно соединенных консольных балок определяется следующими выражениями:

$$k_{\text{пар1}} = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2};$$
$$k_{\text{пар2}} = \frac{k_3 \cdot k_4}{k_3 + k_4};$$
$$k_{\text{пар3}} = \frac{k_5 \cdot k_6}{k_5 + k_6};$$
$$k_{\text{пар4}} = \frac{k_7 \cdot k_8}{k_7 + k_8}. \qquad (7.41)$$

где $k_1 \div k_8$ – жесткости балок упругого подвеса.

Жесткости последовательно соединенных пар консольных балок определяются выражениями:

$$k_{\text{посл1}} = k_{\text{пар1}} + k_{\text{пар2}}$$
$$k_{\text{посл2}} = k_{\text{пар3}} + k_{\text{пар4}}. \quad (7.42)$$

Жесткость упругого подвеса гребенчатого электростатического актюатора определяется с помощью следующего выражения:

$$k_s = k_{\text{посл1}} + k_{\text{посл2}}. \quad (7.43)$$

7.4. Жесткость микромеханических элементов при сдвиге (кручении)

Электростатический крутящий момент силы, действующий на торсионную балку, определяется следующим выражением:

$$M_{\text{эл}} = F_{\text{эл}} \cdot l, \quad (7.44)$$

где l – расстояние от торсионной балки до точки приложения внешней силы.

Под действием электростатического крутящего момента силы $M_{\text{эл}}$ зеркальный элемент отклоняется от первоначального положения за счет кручения торсионной балки. Согласно закону Гука:

$$M_{\text{эл}} = k_\gamma \cdot l, \quad (7.45)$$

где k_γ – угловая жесткость торсионной балки; γ – угол поворота торсионной балки под действием крутящего момента силы $M_{\text{эл}}$.

Угловая жесткость торсионной балки определяется следующим выражением:

$$k_\gamma = 2 \cdot \frac{G \cdot J_\rho}{l_b} \quad (7.46)$$

где l_b – длина торсионной балки.

7.5. Демпфирование колебаний микромеханических элементов

Демпфирование колебаний мембраны осуществляется за счет перетекания вязкой среды (газа или жидкости) из подмембранной полости через калибровочные отверстия. На рис.7.11 показано одно из таких отверстий.

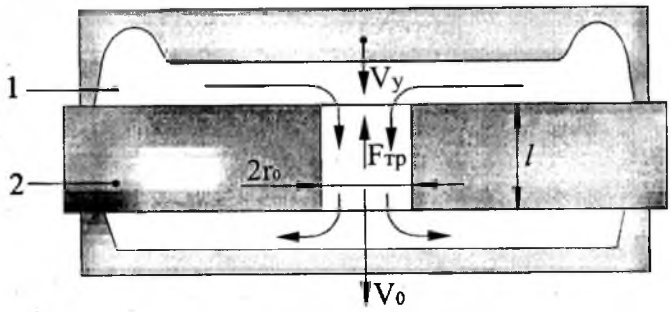


Рис. 7.11. К определению абсолютного коэффициента демпфирования

Имея в виду ламинарный режим течения жидкости, полагаем, что скорость в продольном сечении отверстия изменяется по известному параболическому закону:

$$V = V_0 \cdot \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^2, \tag{7.47}$$

где V_0 – скорость по оси отверстия; r_0 – радиус калибровочного отверстия. Демпфирующая сила $F_д$ равна силе трения $F_{тр}$ вязкой среды о стенки отверстия:

$$F_д = F_{тр} = -k_д \cdot V_y, \tag{7.48}$$

где V_y – скорость перемещения жесткого центра мембраны; $k_д$ – абсолютный коэффициент демпфирования, определяемый с помощью следующего выражения:

$$k_д = -\frac{F_{тр}}{V_y}. \tag{7.49}$$

Сила трения вязкой среды определяется следующим выражением:

$$F_{тр} = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \tau_{тр}, \tag{7.50}$$

где $\tau_{тр}$ – касательное напряжение трения вязкой среды на стенках отверстия, определяемое следующим выражением:

$$\tau_{тр} = \eta \cdot \left.\frac{dV}{dr}\right|_{r=r_0}, \tag{7.51}$$

Где η – коэффициент динамической вязкости среды.

С учетом выражения (7.47), получим

$$\left.\frac{dV}{dr}\right|_{r=r_0} = -2\frac{V_0}{r_0}, \tag{7.52}$$

и, следовательно

$$F_{тр} = -4 \cdot \pi \cdot V_0 \cdot \eta \cdot l, \tag{7.53}$$

где l – толщина мембраны.

Скорость V_0 можно определить из условия равенства объемных расходов вязкой среды:

$$V_0 \cdot S_2 = V_y \cdot S_1, \tag{7.54}$$

где S_2, S_1 – площади поперечных сечений калибровочного отверстия и подмембранной полости, соответственно.

С учетом выражения (2.54) получим выражение для абсолютного коэффициента демпфирования мембраны с калибровочными отверстиями:

$$k_д = \frac{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot l \cdot S_1}{n_0 \cdot S_2}, \tag{7.55}$$

где n_0 – число калибровочных отверстий.

8. Чувствительные механические элементы [7]

Чувствительные механические элементы, используемые в сенсорных микро- и наносистемах, обычно представляют собой упругие балочные элементы —

консольные балки (кантилеверы) или закрепленные по обоим концам балки (мостиковые структуры), а также, хотя и значительно реже, закрепленные по периметру упругие мембраны. Все эти элементы изготавливаются из жестких материалов различной природы, которые часто должны обладать требуемыми электрическими и магнитными свойствами. Поскольку производство МЭМС и НЭМС базируется преимущественно на кремниевой технологии микро- и наноэлектроники, на практике чаще всего используются моно- и поликристаллический нелегированный и легированный кремний, его оксиды и нитриды различного состава, другие соединения и модификации, а также различные металлы, керамики, полимеры и их комбинации (биморфные, композиционные или гибридные структуры). Выбор материалов для таких элементов, их геометрическая форма и размеры диктуются как требованиями к конструкции и свойствам сенсорных устройств, так и в значительной степени к технологии их изготовления. Чувствительные механические элементы могут работать как в квазистатических, так и в динамических режимах. Аналитическому описанию поведения квазистатических систем посвящен данный подраздел.

8.1. Поведение при статических воздействиях

Физической основой действия чувствительных механических элементов в квазистатическом режиме является возникновение упругих (обратимых) изменений геометрических размеров — относительной деформации $\Delta l/l$, силы F_y при заданной площади А: $F = EA\frac{\Delta l}{l}$,

где Е — коэффициент пропорциональности (модуль упругости материала). Из самого общего масштабного (скейлингового) анализа этого соотношения следует, что линейный масштабный коэффициент упругой силы равен 2, т. е. изменение силы при заданном Е пропорционально квадрату произвольно выбранного линейного масштабного параметра L^2. Ниже рассмотрены конкретные взаимосвязи между силой и деформацией в упругих элементах различного типа, в первую очередь закрепленных с одного (консольных) и с обоих концов (мостиковых) балок (рис.8.1,а и б соответственно) в зависимости от их размеров и свойств материалов .В упругой постановке, без учета временных эффектов, квазистатический изгиб тонких пластин и балок

описывается в общем виде уравнением Эйлера—Бернулли:

$$\frac{d^2z}{dx^2}=\frac{M(x)}{EI},$$

где x, z — соответственно направления вдоль нейтральной оси в плоскости пластины (x, y) и перпендикулярно ей; M(x) — изгибающий момент как функция координаты x; E — модуль Юнга материала балки; I — момент инерции поперечного сечения балки (при прямоугольном сечении балки высотой *a* и шириной *b*: $I = a^3b/12$; при круглом сечении радиусом r :

$I = \pi r^4/4$).

При приложении силы F к свободному концу закрепленной с одного края (консольной) балки длиной l, т. е. в точке с координатой x = 0, смещение нейтральной плоскости балки вдоль оси z относительно исходного ее положения при отсутствии силы определяется выражением

$$z(x)=-\frac{F}{EI}\iint M(x)dxdx+Cx+D,$$

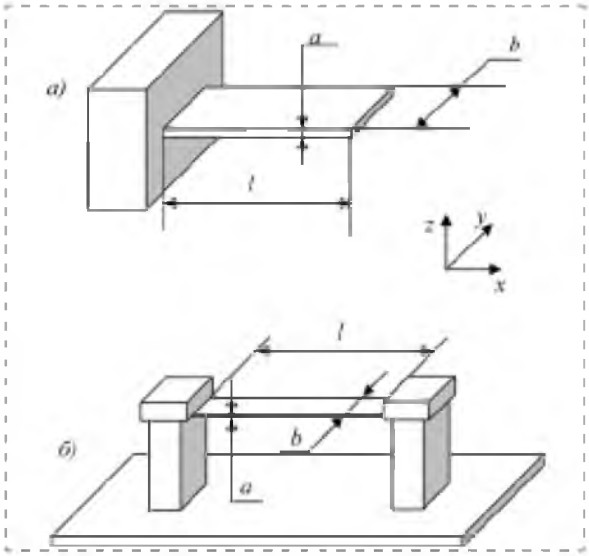


Рис.8.1. Схематическое изображение консольной балки (а) и мостиковой структуры (б) длиной l, шириной b и толщиной a в координатах x—y—z,

где C и D — константы интегрирования. При граничных условиях z(x=0)=0:

$$z(x)=\frac{F}{EI}\left(\frac{x^3}{6}-\frac{l^2x}{2}+\frac{l^3}{3}\right). \qquad (8.1)$$

Максимальное смещение (прогиб) свободного конца балки (x = 0)

$$\Delta z=\frac{F_y l^3}{3EI}. \qquad (8.2)$$

Соответственно для консольных балок прямоугольного и круглого сечения

$$\Delta z=\frac{4F_y l^3}{Ea^3b} \quad \text{и} \quad \Delta z=\frac{4F_y l^3}{3E\pi r^4}. \qquad (8.3)$$

При приложении к консольной балке длиной *l* распределенной силы F = Wl, где W — удельная сила, равная *F/l*, и при граничных условиях z(x = l)=0:

$$z(x)=-\frac{W}{24EI}\left(x^4-4l^3\cdot x+3l^4\right) \qquad (8.4)$$

Максимальное смещение свободного конца балки (x =0):

$$\Delta z=\frac{Wl^4}{8EI}. \qquad (8.5)$$

Соответственно для балок прямоугольного и круглого сечения:

$$\Delta z=\frac{3Wl^4}{2Ea^3b}=\frac{3Fl^3}{2Ea^3b} \quad \text{и} \quad \Delta z=\frac{4Wl^4}{8E\pi r^4}=\frac{4Fl^3}{8E\pi r^4}. \qquad (8.6)$$

Примером распределенной силы может служить инерционная сила, действующая на балку при ускорении g. Для балки прямоугольного сечения

F= Vρg = ablρg,

где V — объем балки; ρ — плотность материала; ρV — масса балки. Тогда максимальное смещение конца такой балки, при отсутствии прикрепленной массы :

$$\Delta z=\frac{3l^4\rho g}{2Ea^2}. \qquad (8.7)$$

Следует обратить внимание, что при этом ширина балки не играет никакой роли. Другим важным примером распределенной силы применительно к микро- и наносенсорным устройствам может служить сила тяжести массы M,

равномерно распределенной по поверхности балки, например, массы молекул, адсорбированных на внешней поверхности балки: $F = Mg_0$, где g_0 — ускорение силы тяжести. Максимальный прогиб такой балки на ее конце $\Delta z = \frac{3l^3 Mg_0}{2Ea^3 b}$. При просвете между балкой и нижележащей плоскостью h_0 максимальное смещение конца балки не может превышать эту величину.

Связь прогиба балок Δz с действующей силой F может быть также описана через коэффициент упругости пружины, или поперечную жесткость балки k_z ($F = k_z \Delta z$). Величина k_z определяется, в первую очередь, геометрией (длиной *l* и моментом инерции сечения I) балки, а также модулем упругости материала:

$$k_z = \frac{F}{\Delta z} = \frac{3EI}{(l - \Delta l)^3}, \qquad (8.8)$$

где Δl — удаление точки приложения силы от свободного конца балки. При приложении силы к свободному концу балки Δl = 0. Соответственно для балок прямоугольного и круглого сечения:

$$k_z = \frac{Ea^3 b}{4(l - \Delta l)^3} \quad и \quad k_z = \frac{3E\pi r^4}{4(l - \Delta l)^3}. \qquad (8.9)$$

Если распределенная сила приложена к консольной балке на часть ее длины от свободного конца l_p, то ее жесткость может быть рассчитана по соотношению :

$$k_z = \frac{E^* ba^3}{3l^3}\left(\frac{3}{8 - 6\lambda + \lambda^3}\right), \qquad (8.10)$$

где $\lambda = l_p/l$; E* — эффективный модуль упругости, равный E материала балки при $a \approx b$ и $E/(1 - \nu^2)$ при $b > 5a$, ν — коэффициент Пуассона.

При продольном кручении балки под действием крутящего момента M(x) упругость консольной балки характеризуется двумя упругими константами:

$$k_{z\theta} = \frac{M(x)}{\Delta z} = \frac{Ea^3 b}{6(l - \Delta l)^3} \quad и \quad k_\theta = \frac{M}{\Delta\theta} = \frac{Ea^3 b}{12(l - \Delta l)^3}, \qquad (8.11)$$

где Δz — прогиб балки по оси z; Δθ — поворот балки относительно малой оси.

При кручении консольной балки крутящим моментом T вдоль главной оси x максимальный угол закрутки свободного конца балки Δф определяется выражением : $\Delta\varphi = \frac{Tl}{CGa^3b}$, где C — константа, зависящая от отношения a/b и изменяющаяся от 0,1406 до 0,333 при изменении этого отношения от 1 до ∞. Упругая константа при этом равна

$$k_\varphi = \frac{T}{\Delta\varphi} = \frac{Ea^3b}{6(1+v)(l-\Delta l)^3}, \qquad (8.12)$$

где v — коэффициент Пуассона материала балки.

Для жестко закрепленной по обоим концам балки (мостиковой структуры) прямоугольного сечения при аналогичных размерах и силе, действующей на середину балки между опорами,

$$\Delta z = \frac{Fl^3}{32Ea^3b} \quad и \quad k_z = \frac{32Ea^3b}{l^3}. \qquad (8.13)$$

Для <u>тонких мембран</u> применение классических методов анализа с использованием уравнений движения, как в случае балок, требует определения координат пластины по осям x и y с учетом всех сдвиговых и изгибающих сил, что приводит к системе шести уравнений с шестью неизвестными. Кроме того, эмпирически установлено, что расчетные данные при этом плохо согласуются с экспериментально определенными. Поэтому на практике используется упрощенный подход, в котором сначала определяется соотношение между прогибом мембраны в центре w_0 и приложенным давлением p. Для квадратной мембраны толщиной a и шириной b, закрепленной по периметру, это соотношение имеет вид

$$p(w_0) = C_1 \frac{a\sigma}{b^2} w_0 + C_2 \frac{aE}{d^4} w_0^3,$$

где C_1 =3,4, а C_2 — константа, зависящая от коэффициента Пуассона материала мембраны (изменяется от 2 до 3,4 при изменении коэффициента Пуассона от 0 до 0,5); σ — напряжение в мембране; E — модуль упругости материала. При известном w_0 прогиб мембраны в любой точке с координатами x и y может быть рассчитан по уравнению

$$w(x,y)=\left(w_0+w_1\frac{x^2+y^2}{b^2}+w_2\frac{x^2y^2}{b^4}\right)\cdot\cos\left(\frac{\pi x}{2b}\right)\cos\left(\frac{\pi y}{2b}\right),$$

причем w_1/w_0 =0,4; $w_2/w_0 \approx$ 1,1. Для точных расчетов поведения мембран при статических воздействиях обычно используют численное моделирование, в частности, метод конечных разностей. На поведение чувствительных механических элементов, особенно в наномасштабе, большое влияние может оказывать действие статических объемных и поверхностных сил, возникающих при формировании таких элементов, а также при адсорбции и/или сорбции веществ окружающей среды и проявлении других эффектов (рис. 8.2, а и б соответственно) .

Объемные (внутренние, или остаточные) напряжения в наноразмерных упругих элементах, возникающие при их формировании в виде градиента напряжения $\Delta\sigma$ по толщине и достигающие значений порядка нескольких МПа/мкм, вызывают самопроизвольный прогиб таких элементов — отклонение их нейтральной оси от ее равновесного положения в ненапряженном состоянии. Максимальное значение такого отклонения для консольной балки оценивается по формуле:

$$\Delta z_m=\frac{l^3}{2E}\Delta\sigma. \qquad (8.14)$$

К поверхностным силам относится разность растягивающего и сжимающего поверхностного натяжения на верхней и нижней поверхностях упругих элементов $\Delta\sigma_s$, имеющей размерность Н/м. В случае свободной тонкой пластины произвольной формы действие $\Delta\sigma_s$ вызывает ее равномерный изгиб, радиус кривизны которого с вогнутостью со стороны действия сжимающей силы определяется формулой

$$R=\frac{Ea^2}{6(1-\nu)\Delta\sigma_s}, \qquad (8.15)$$

что эквивалентно действию на свободные края пластины изгибающего момента на единицу длины $M = \Delta\sigma_s a/2$. При этом прогиб напряженной пластины от исходного ненапряженного состояния как функция координат в плоскости (x, y) $w(x, y)=\Omega(x^2 + y^2)$,

где $\Omega = \dfrac{3\Delta\sigma_s(1-\nu)}{Ed^2}$ — однородная постоянная кривизна пластины, равная $\frac{1}{2}R^{-1}$. Для консольной балки прямоугольного сечения эти соотношения применимы при l/b >> 1 и координате y, удаленной от боковых краев балки y = b/2, т. е. близкой к 0. В этом случае при x = l и y =0 отклонение конца балки при воздействии разности поверхностного натяжения $\Delta\sigma_s$:

$$\Delta z = \frac{3l^2(1-\nu)}{Ed^2}\Delta\sigma. \qquad (8.16)$$

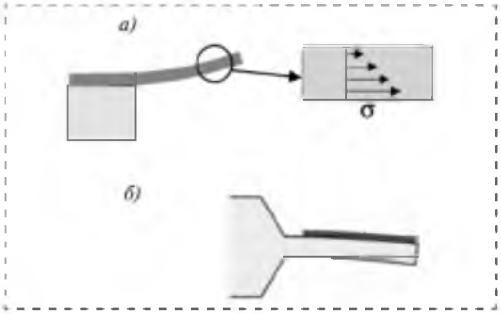


Рис. 8.2. Схематическое изображение изгиба консольной балки с неравномерным распределением механического напряжения по толщине (а) и сжимающим слоем на верхней поверхности (б) .

Как указывалось выше, при описании поведения чувствительных механических элементов в квазистатических условиях в упругой постановке коэффициенты жесткости, или модули упругости материала, а соответственно, и прогиб или смещение элементов рассматриваются независимыми от временных условий нагружения, хотя очевидно, что в реальных условиях при длительных воздействиях и проявлении вязкоупругости материала необходимо учитывать временные эффекты ползучести и релаксации напряжения

8.2. Динамическое *поведение*

Большинство разрабатываемых электромеханических преобразователей современных сенсорных МЭМС и НЭМС работают как резонаторы, в чувствительных механических (балочных) элементах которых возбуждаются колебания основной изгибной моды. Физической основой действия таких элементов в динамических условиях является смещение (сдвиг по фазе или амплитуде) фундаментальной, собственной, характерной

или резонансной частоты при каком-либо воздействии на них или изменении массы. Как показано ниже, резонансная частота механических чувствительных элементов масштабируется как 1/L, и при переходе на наномасштаб ее значение и чувствительность к различным воздействиям должны резко возрастать.

Для описания динамического поведения механических резонаторов используются различные подходы. В наиболее простом из них механический резонатор рассматривается как одномерный линейный гармонический, слабо демпфирующий, т. е. проявляющий слабые вязкоупругие свойства, осциллятор. Он представляет собой некоторую эффективную массу $m_{эфф}$, связанную с упругой пружиной с эффективной жесткостью $k_{эфф}$, способную совершать свободные затухающие или вынужденные гармонические колебания с частичным рассеиванием (диссипацией) упругой энергии за счет внешнего или внутреннего трения с эффективным коэффициентом $\varsigma_{эфф}$. Кинетика свободных колебаний, приводящих к возврату одномерного линейного гармонического демпфирующего осциллятора в равновесное состояние после вывода его из равновесия (задания некоторого начального смещения z(0)), описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m_{эфф}\frac{d^2z}{dt^2}+\varsigma_{эфф}\frac{dz}{dt}+k_{эфф}z=0.$$

Решение этого уравнения в терминах комплексных чисел при малом $\varsigma_{эфф}$ описывает затухающие гармонические колебания осциллятора с собственной (фундаментальной) круговой частотой $\omega_0=2\pi f_0$ (рад./с), где f_0 — периодическая частота (Гц):

$$z(t)=z(0)\exp\left[\frac{-\varsigma_{эфф}\,t}{2m_{эфф}}\right]\cos\omega t. \quad (8.17)$$

Уменьшение амплитуды этих колебаний подчиняется экспоненциальному закону, причем коэффициент $\frac{\varsigma_{эфф}}{2m_{эфф}}=\alpha$ называется коэффициентом затухания, а собственная частота связана с $m_{эфф}$ и $k_{эфф}$ соотношением

$$\omega_0=\left[\frac{k_{эфф}}{m_{эфф}}-\left(\frac{\varsigma_{эфф}}{2m_{эфф}}\right)^2\right]^{1/2}. \quad (8.18)$$

При $\varsigma_{эфф} \to 0$ $\quad \omega_0 = \left[\frac{k_{эфф}}{m_{эфф}}\right]^{1/2}$ или $\quad \omega_0^2 = \frac{k_{эфф}}{m_{эфф}}$.

При этом $\quad \alpha = \frac{\varsigma_{эфф}\omega_0^2}{2k_{эфф}} = \frac{\varsigma_{эфф}}{2m_{эфф}}$. (8.19)

Натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд соответствует логарифмическому декременту затухания Δ, который связан с α соотношением $\Delta = \frac{2\pi\alpha}{\omega_0}$.

При приложении к гармоническому осциллятору внешней силы, изменяющейся по периодическому закону с круговой частотой ω: $F_0\cos\omega t$, его гармонические колебания описываются уравнением

$$z(t) = \frac{F_0\cos(\omega t - \varphi)}{\left[\left(k_{эфф} - m_{эфф}\omega\right)^2 + \omega^2\varsigma_{эфф}^2\right]^{1/2}}, \qquad (8.20)$$

где ф — угол сдвига фаз между силой и смещением:

$$tg\varphi = \frac{\omega\varsigma_{эфф}}{k_{эфф} - m_{эфф}\omega^2}.$$

Показателем демпфирующей способности осциллятора при этом является тангенс угла потерь tgδ, где $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$, связанный с показателями затухания свободных колебаний известными соотношениями $tg\delta = \Delta/\pi = 2\alpha/\omega_0$. При равенстве частоты приложения внешней силы частоте собственных (свободных) колебаний

$$\left(\omega = \omega_0 = \left[\frac{k_{эфф}}{m_{эфф}}\right]^{1/2}\right) \qquad (8.21)$$

наблюдается резкое возрастание амплитуды (резонанс) до значения

$$z(0) = \frac{F_0}{\omega_0 \varsigma_{эфф}}. \qquad (8.22)$$

Для колеблющихся консольных балок и мостиковых структур соотношения, полученные для одномерного линейного гармонического демпфирующего осциллятора, применимы вблизи резонансной частоты при правильной оценке их эффективной массы и жесткости с учетом соответствующей моды колебаний. Такие балки при приложении в трансверсальном направлении гармонической нагрузки ведут себя аналогично натянутой струне, и формы, которые они могут принимать при колебаниях в условиях резонанса, т. е. моды их колебаний, аналитически описываются волновым уравнением:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{m_{эфф}}{l} \frac{\partial^2 z}{\partial_t^2}.$$

Это уравнение описывает кривизну балки как функцию времени, и его решение в координатах (z, x) имеет вид

$$z(x)=[A_1\sin(Kx) + A_2\cos(Kx) + A_3\sinh(Kx) + A_4\cosh(Kx)]\cos(\omega t + \theta),$$

где A_n — константы, определяемые граничными условиями; $K^4 = \frac{\omega m_{эфф}}{EIl}$.

Это решение показывает, что балки при резонансе осциллируют по синусоиде вдоль оси x, а их форма определяется граничными условиями. При этом первая и основная мода колебаний балки соответствует форме, которую она принимает при квазистатическом изгибе, т. е. при нулевой частоте и амплитудном значении прикладываемой нагрузки.

Для консольной балки $m_{эфф} = 3m/C^4_n$,где C_n — константа, равная для первой моды (n = 1) колебаний 1,875, для второй (п = 2) — 4,694 и т. д. Следовательно, при ее прямоугольном сечении ab и длине l при первой моде колебаний $m_{эфф} \approx 0{,}23m$. Для аналогичной мостиковой структуры $m_{эфф} \approx 0{,}735m$. В этих соотношениях m — истинная масса балки, равная ablρ (abl — объем балки, ρ — плотность материала). Эффективная жесткость колеблющихся балок равна их коэффициентам упругости, рассчитываемым при статическом изгибе. Для консольной и закрепленной балок эффективная

жесткость равна $k_{эфф} = \frac{Ea^3b}{4l^3}$ и $k_{эфф} = \frac{32Ea^3b}{l^3}$ соответственно. Сучетом $m_{эфф}$ и $k_{эфф}$ этих балок их резонансная круговая частота может быть с достаточно высокой точностью рассчитана по соотношению

$$\omega_0 = \left(\beta \frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \frac{a}{l^2}, \tag{8.23}$$

где β — коэффициент, близкий к 1. Резонансная периодическая частота заданной моды колебаний рассчитывается по соотношению :

$$f_{0n} = \frac{C_n^2}{2\pi}\sqrt{\frac{k_{эфф}}{3m}} = \frac{C_n^2}{4\pi\sqrt{3}}\sqrt{\frac{E}{\rho}}\frac{a}{l^2}. \tag{8.24}$$

Из этих соотношений следует, что резонансная частота механических чувствительных элементов масштабируется как *1/l* и при переходе на наномасштаб достигает очень больших значений. Так, мостиковая структура из кремния шириной 50 нм, толщиной 80 нм и длиной 780 нм при $m_{эфф}$ =5,3•10^{-15} г и $k_{эфф}$ = 290 Н/м имеет ω_0 порядка 1 ГГц, а консольная балка прямоугольного сечения из поликристаллического кремния длиной 10 нм и толщиной 1 нм имеет расчетную резонансную частоту первой моды колебаний порядка 20—30 ГГц при амплитуде в резонансе 10^{-3}—10^{-6} нм . Вблизи резонансного пика частотная зависимость амплитуды вынужденных колебаний балок как одномерных линейных, слабо демпфирующих гармонических осцилляторов при отсутствии внешнего трения (вязкости среды, т. е. в вакууме) описывается известным соотношением :

$$A(\omega) = \frac{A_0\omega_{0,n}^2}{\sqrt{\left(\omega^2 - \omega_{0,n}^2\right)^2 + \frac{\omega^2\omega_{0,n}^2}{Q_n^2}}}, \tag{8.25}$$

где A_0 — амплитуда колебаний при нулевой частоте; ω и $\omega_{0,n}$ — фактическая и резонансная (для моды n при отсутствии диссипации энергии) круговая частота соответственно; Q_n — добротность осциллятора (Q-фактор) для моды n. Величина Q является, наряду с собственной или резонансной частотой, важнейшим параметром осциллятора, равным отношению запасенной

упругой энергии за один цикл колебаний ($E_з$) к рассеиваемой энергии ($E_р$) или к средним за цикл потерям мощности (P/ω):

$$Q = \frac{E_З}{E_p} = \frac{\omega E_З}{P}. \tag{8.26}$$

При этом запасенная энергия в механическом осцилляторе равна половине произведения амплитудных значений силы и деформации, а рассеиваемая энергия в виде теплоты в единице объема определяется выражением

$$\Delta W_p = \frac{\pi\omega\varsigma_{эфф}F_0^2}{\left(k_{эфф} - m_{эфф}\omega^2\right)^2 + \omega^2\varsigma_{эфф}^2}. \tag{8.27}$$

Величина Q-фактора определяет избирательную и разрешающую способность осциллятора: чем больше Q, тем выше резонансный отклик системы по сравнению с нерезонансным и тем большее различие по величине откликов на одинаковые по амплитуде воздействия с близкими частотами. При вы- нужденных колебаниях осциллятора Q-фактор экспериментально определяется по отношению резонансной частоты ω_0 к ширине резонансного пика по частоте на уровне убывания его высоты в √2 раза (Δω): Q = $\omega_0/\Delta\omega$ (рис. 4). Величина Q зависит от механизма и интенсивности рассеяния энергии в процессе колебаний и связана с основными коэффициентами уравнения движения осциллятора и параметрами механических потерь простыми соотношениями:

$$Q = \frac{\sqrt{m_{эфф}k_{эфф}}}{\varsigma_{эфф}} = \frac{\omega_0 m_{эфф}}{\varsigma_{эфф}} = \frac{k_{эфф}}{\varsigma_{эфф}\cdot\omega_0} \quad и \quad Q = \frac{1}{tg\delta} = \frac{\omega_0}{2\alpha} = \frac{\pi}{\Delta}. \tag{8.28}$$

При проявлении нескольких источников диссипации энергии в колебательной системе складываются обратные величины Q-фактора: $\frac{1}{Q_\Sigma} = \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Q_i}$. При этом в случае многомодовых колебаний каждая из мод обладает собственным Q-фактором.

При анализе внутренних диссипативных потерь с использованием классической трехэлементной модели вязкоупругого тела (модели Зинера), состоящей из модели Максвелла (последовательного соединения пружины и демпфера), параллельно соединенной со второй пружиной [48], Q-фактор

обратно пропорционален тангенсу угла потерь (tgδ) материала балки и является функцией частоты:

$$tg\delta = Q^{-1} = \frac{\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}\,\frac{E_u - E_r}{E_r}.$$

где τ — среднее время релаксации, равное отношению коэффициента вязкости демпфера к коэффициентам упругости пружин; E_u, E_r — нерелаксированный и релаксированный модуль упругости соответственно.

Q-фактор колебательных систем на основе жестких материалов обычно очень большой вследствие высоких частот и малых времен релаксации и зависит преимущественно от геометрии балок и окружающей среды. Так, экспериментальные исследования зависимости Q-фактора консольных балок из поликристаллического кремния от их длины и резонансной частоты, варьируемых в пределах от 150 до 75 мкм и от 145 до 560 кГц соответственно, при постоянной ширине (15 мкм) и толщине (2 мкм) показали [18], что при малом атмосферном давлении (0,2 Па) Q-фактор для самой длинной балки с самой низкой резонансной частотой составлял значение больше 38 000, уменьшаясь до 15 000 при уменьшении длины и возрастании резонансной частоты балки. При повышенном давлении воздуха (40 Па) Q-фактор для самой

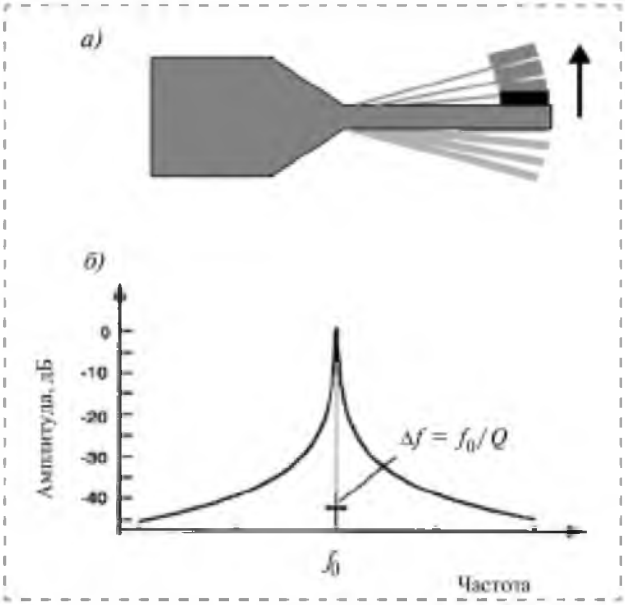


Рис.8.3. Схематическое изображение вибрирующей консольной балки (а) и амплитуды колебаний как функция частоты (б)

длинной балки составил 6000 и возрос до 16 000 при уменьшении длины балки до 75 мкм и возрастании резонансной частоты до 560 кГц.

Таким образом, окружающая среда с высокой плотностью ρ и вязкостью η может оказывать определяющее влияние как на резонансную частоту, так и на Q- фактор консольных балок в наномасштабе. Теоретически влияние только плотности невязкой среды на $\omega_{R,n}$ (по сравнению с резонансной частотой в вакууме) и Q описывается следующими соотношениями :

$$\omega_{R,n} = \omega_{0,n}\left[1+\frac{\pi\rho b^2}{4\mu}\right]^{-1/2} \text{ и } Q_n = \frac{4m}{\pi\rho b^2},$$

где $m = \rho_б ba$ — масса балки на единицу длины; $\rho_б$ — плотность материала балки.

Влияние вязкости среды на $\omega_{R,n}$ и Q-фактор свободной консольной балки при вынужденных колебаниях учитывается при этом через гидродинамическую функцию Г(ω), определяющую изменение Q в вязкой среде по сравнению с вакуумом. Важнейшим масштабным фактором при этом является ширина балки, которая значительно меньше ее длины. Функцию Г(ω) удалось определить только для консольной балки круглого сечения:

$$\Gamma_k = 1+\frac{4iK_1\left(i\sqrt{i\mathrm{Re}}\right)}{\sqrt{i\mathrm{Re}}K_0\left(-i\sqrt{i\mathrm{Re}}\right)}.$$

Здесь K_0 и K_1 — модифицированные Бесселевы функции 3-го типа; Re — число Рейнольдса: $\mathrm{Re} = \rho\omega d^2/4\eta$, где ρ и η — плотность и вязкость среды соответственно, d — диаметр балки.

Для тонкой консольной балки прямоугольного поперечного сечения, ширина b которой значительно больше толщины a, вводится поправочный коэффициент по отношению к цилиндрической балке Ω(ω), который представляет собой комплексную рациональную функцию lgRe: $\Omega(\omega)=\Omega_r(\omega) + i\Omega_i(\omega)$, удовлетворяющую предельным условиям: $\Omega(\omega) \to 1$ при $\mathrm{Re} \to 0$ и $\mathrm{Re} \to \infty$ и рассчитываемую численным нелинейным методом наименьших квадратов. Соответственно $\Gamma_n(\omega)=\Omega(\omega)\Gamma k = \Gamma_r(\omega) + i\Gamma_i(\omega)$. Значения $\omega_{R,n}$ и Q_n определяются при этом по соотношениям

$$\omega_{R,n} = \omega_{0,n}\left[1 + \frac{\pi\rho b^2}{4\mu}\Gamma_r(\omega_{R,n})\right]^{-1/2} \quad и \quad Q_n = \frac{\frac{4\mu}{\pi\rho b^2} + \Gamma_r(\omega_{R,n})}{\Gamma_i(\omega_{R,n})}$$

соответственно. Эти соотношения имеют большое значение как для расчета поведения балочных резонаторов в вязких средах (в том числе в воздухе), так и при градуировке кантилеверов СТМ и АСМ или измерении вязкости среды с их помощью.

Балочные чувствительные элементы сенсорных устройств обычно расположены на достаточно близком расстоянии h_0 от подложки и работают в воздушной среде. Поэтому важную роль в их высокочастотных колебаниях играет так называемое демпфирование за счет выдавливания (перетекания) воздуха из промежутка между балкой и подложкой (sqeeze damping) . Эффективный коэффициент демпфирования $\varsigma_{эфф}$ при первой моде колебаний, малом безразмерном параметре $\sigma = \frac{12\eta b^2}{p h_0^2}\omega$ и частоте, значительно меньшей критической $\omega_c = \frac{\pi^2 h_0^2 p}{12\eta b^2}$, рассчитывается по соотношению:

$$\varsigma_{эфф} = \frac{96\eta l b^3}{\pi^4 h_0^3}, \tag{8.29}$$

где η — вязкость среды, p — номинальное давление.

9. МИКРОСИСТЕМНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ [4]

Отмечалось, что измерение давления – одна из самых распространенных задач в технике. Широко используются датчики давления на кремниевых мембранах, получаемых анизотропным травлением кремния. Они могут использовать тензорезисторные преобразователи напряжений в электрический сигнал, несущий информацию о давлении, или емкостные преобразователи перемещений мембраны.

Наиболее распространенные конструкции чувствительных элементов таких датчиков, использующих мембраны, приведены на рисунке 9.1.

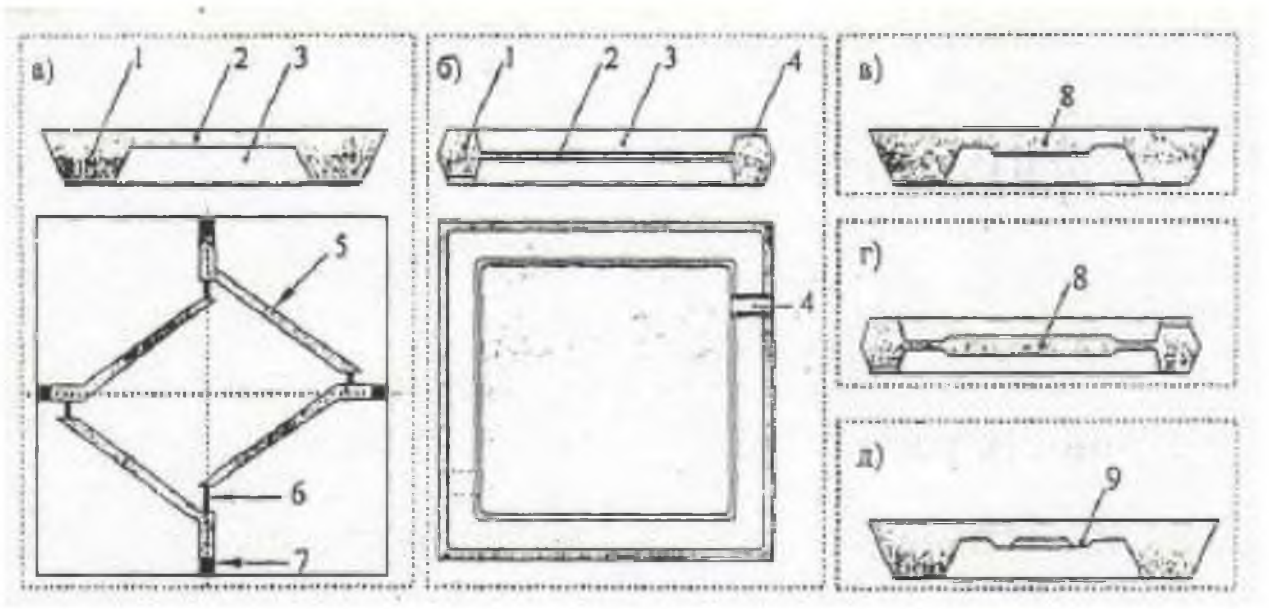


Рис.9.1. Варианты чувствительных элементов датчиков давления:
а) несимметричная мембрана; б) симметричная мембрана;
в), г) мембраны с жестким центром; д) двойная мембрана с жестким кольцом;
1- корпусная пластина; 2 - мембрана с жёсткой заделкой по контуру;
3 - подмембранная камера; 4 - каналы подвода давлений; 5 - проводящая дорожка; 6- интегральный тензорезистор; 7- контактная площадка; 8 - жесткий центр; 9 - жесткое кольцо.

Вариант а: Несимметричная мембрана (с одной стороны кристалла); обычно на n-кремнии плоскости(100); прямоугольная. На обратной по отношению к подаваемому давлению (газ; жидкость) сформированы диффузионные имплантированные, реже – эпитаксиальные тензорезисторы, чаще – p-типа. Они могут формироваться с одинаковыми или противоположными по знаку законами изменения сопротивления от деформации, обычно включаются по мостовой схеме непосредственно на кристалле.

Если датчик оформляется как самостоятельное устройство, с корпусом чувствительный элемент датчика соединяется посредствам промежуточных пластин диффузионной сваркой в электрическом поле. В корпусе же могут располагаться операционные усилители и другие элементы.

Точность измерения давления – на уровне 1%, верхний предел измеряемых давлений порядка 250 МПа.

Вариант б: отличается симметричным расположением мембраны. Это удобно при использовании дифференциально-емкостного датчика измерений. В перспективе такой вариант допускает использование противодавления, управляемого через следящую систему, так что датчик будет работать вблизи нуля деформаций, обеспечивая максимум чувствительности, линейности и безопасности при перегрузках.

Варианты в и **г:** используют мембраны с жестким центром. У них повышается концентрация напряжений в перемычке между жестким центром

и краем мембраны, что увеличивает линейность и чувствительность датчика. Перемычки очень тонкие. Недостатком этих датчиков является чувствительность их к линейным и угловым ускорениям (ниже мы рассмотрим использование этого явления). Для компенсации этого эффекта на одной пластине делают два одинаковых датчика, причем на второй давление не подано, а используют его как опорный датчик ускорений для компенсации влияния этих в ускорений в первом.

Вариант д: использует жесткое кольцо, разделяющее диафрагму на две части – внешнюю (по отношению к кольцу) и внутреннюю. Возможно двоякое использование такой структуры. Первое (основное) - исключение температурных напряжений, возникающих в месте соединения внешней оправы с металлической корпусной деталью. Тонкая перемычка между массивной частью кристалла и внутренним кольцом гасит температурные напряжения. Рабочей частью мембраны является внутренняя часть, окруженная кольцом; там и располагаются тензорезисторы.

Другой вариант применения такой мембраны – создание двупредельных чувствительных элементов. При этом тензорезисторы располагаются и на внешней и на внутренней мембранах. Конструктивных вариантов использования подобных чувствительных элементов в собственно датчиках очень много. Чаще всего это гибридные конструкции.

Интерес представляют комбинированные варианты, например, датчика давления и температуры.

Это сделать не очень просто. Например, требования к тензо- и терморезисторам противоречивы: тензорезистор должен быть термостабилен, а терморезистор - наоборот, должен чувствовать изменение температуры. Поэтому идут другим путем. Например, на чипе, где находится диафрагма датчика давления (иногда прямо на диафрагме) формируют биполярный транзистор, переход эмиттер-база которого используется как чувствительный элемент датчика температуры. Такие транзисторы используют иногда для других целей, например, как источник тепла в системах, где организуется термостабилизация датчика давления.

Рассмотрим далее чувствительный датчик давления, использующий технологию поверхностной микрообработки. Возможна также пара таких датчиков, из которых один открыт, а второй защищен от воздействия давления и используется как элемент сравнения (рис.9.2).

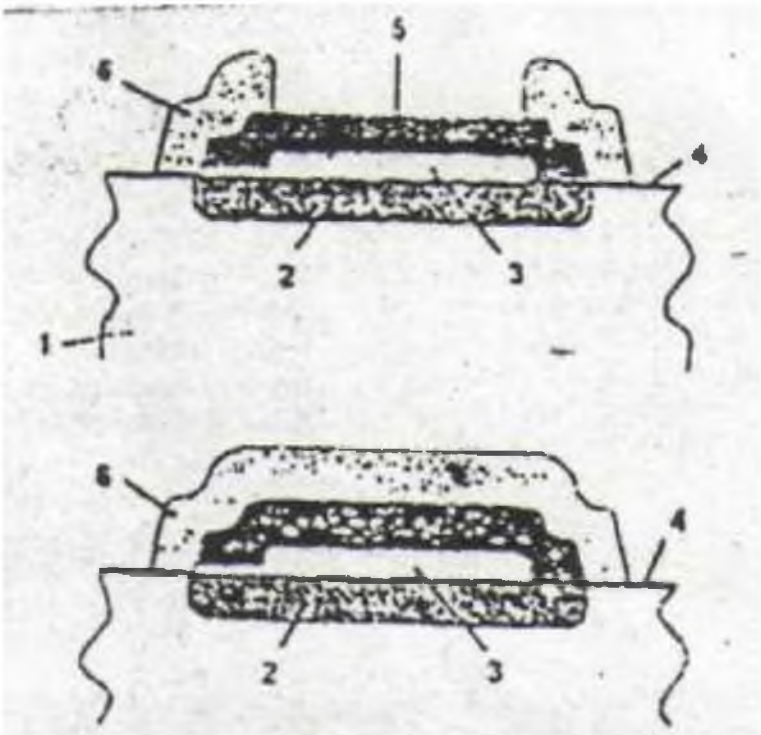


Рис.9.2. Структура чувствительного элемента датчика: 1 - Si подложка n-типа; 2 – n-электрод: 3 - полость: 4 - диэлектрик: 5 - мембрана: 6 - оксид кремния.

Технология поверхностной микромеханики свободна от многих недостатков объемной микромеханики и позволяет изготавливать подвижные структуры размером до нескольких микрометров. Основой преобразователя является поликремниевая мембрана, сформированная с помощью технологии поверхностной микромеханики (рис. 9.3).

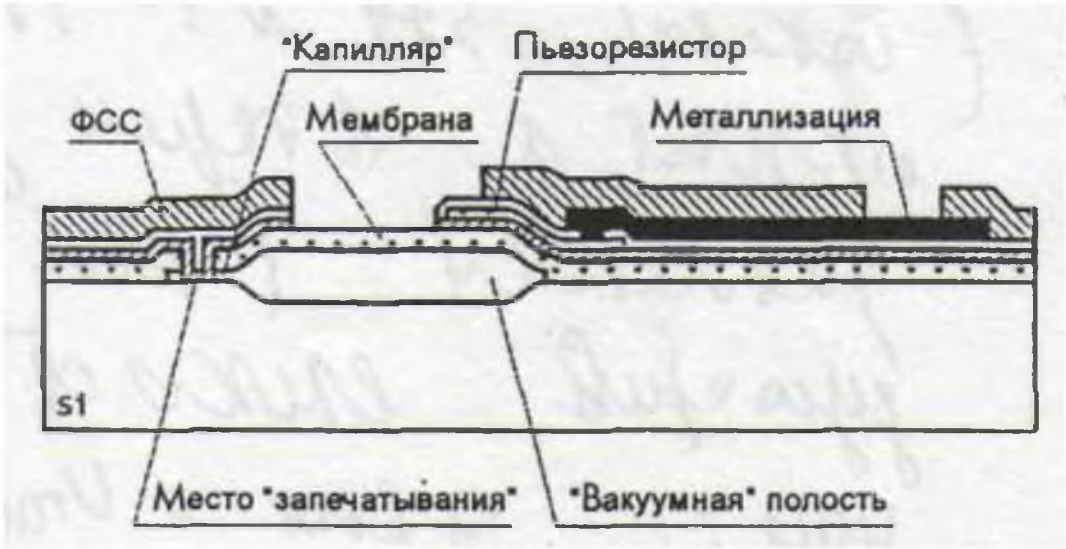


Рис. 9.3. Конструкция поверхностного микромеханического преобразователя давления.

По периметру мембраны нанесены слои диэлектрика, повышающие жесткость крепления мембраны. На противоположных краях мембраны размещены два легированных бором поликремниевых резистора.

Пьезорезисторы соединены с двумя поликремниевыми резисторами той же топологии в мост с двумя активными плечами (рис. 9.4).

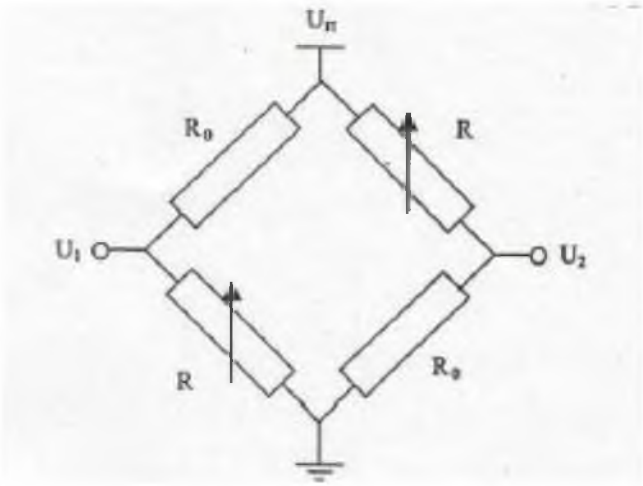


Рис. 9.4. Схема объединения резисторов преобразователя

Для уменьшения начального разбаланса моста резисторы придвинуты к мембране на минимальное возможное расстояние. Для устранения вклада в разбаланс моста сопротивления металлизации шины, идущие к контактным площадкам, подсоединены к серединам шин, соединяющих пьезорезисторы и резисторы. Выходной сигнал преобразователя определяется соотношением

$$U_1 - U_2 = \frac{R - R_0}{2R_0} U_{\text{пит}},$$

где R_0 — сопротивление резистора; R — сопротивление пьезорезистора; $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания.

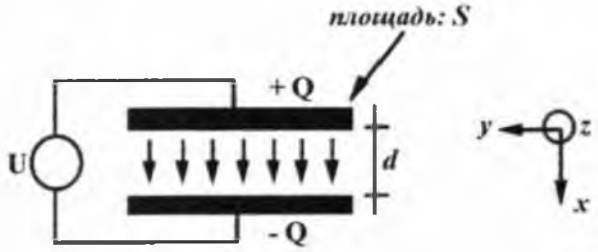
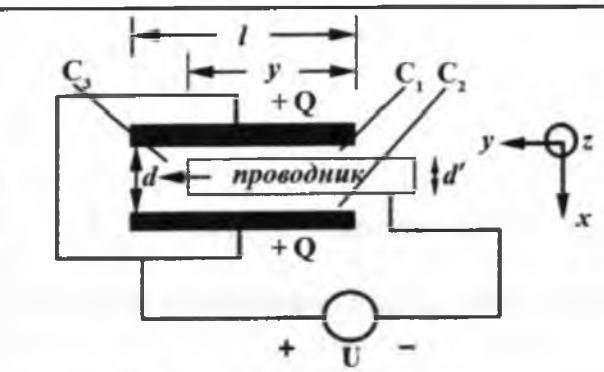
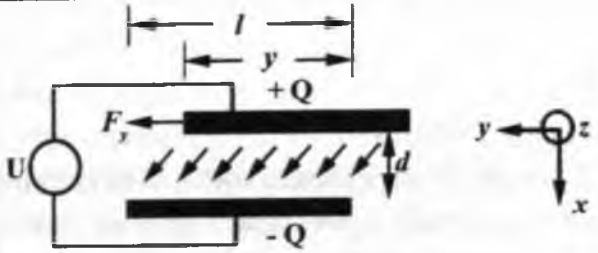
В силу того, что остаточное давление в "вакуумной" полости составляет 10–30 Па, преобразователь можно считать преобразователем абсолютного давления.

10. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ [5]

Как отмечалось во введении, электрическое поле в компонентах МСТ используется двояко: или для реализации актюаторов на основе сил, действующих в поле, или для получения информации о перемещении (изгибе, смещении) некоторых подвижных элементов. Принцип работы электростатических актюаторов основан на взаимном притяжении заряженных элементов электромеханических систем. Основной способ реализации электростатических актюаторов заключается в создании системы плоскопараллельных конденсаторов. Однако для генерации значительных сил притяжения необходима высокая емкость конденсаторов, что может быть реализовано только увеличением площади взаимодействующих пластин. Такого увеличения площади достигают созданием гребневых микродвигателей. имеющих большое количество встречностержневых проводящих

полос . При этом увеличение емкости пропорционально количеству стержней, а КПД такого двигателя достигает 50%.

Варианты реализации электростатических актюаторов на основе плоскопараллельных конденсаторов

Метод активации	Схема реализации актюатора	Емкость кондесатора и действующая сила
Перпенди-кулярное движение		$C=\frac{\varepsilon_0 S}{x}$, $F(x)=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 S}{x^2}U^2$
С сердечником из диэлектрика		$C=\frac{\varepsilon_0(l-y)z}{d}+\frac{\varepsilon_D yz}{d}$, $F(y)=\frac{1}{2}\frac{(\varepsilon_D-\varepsilon_0)z}{d}U^2$
С сердечником из проводника		$F(y)=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 zd'}{d(d-d')}U^2$
Боковое движение		$C=\frac{\varepsilon_0 yz}{d}$, $F(y)=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 z}{d}U^2$

Следует отметить, что при использовании принципа электростатической активации сила, действующая на электроды, всегда является силой притяжения, вне зависимости от полярности или разности потенциалов. В связи с этим движение элемента в двух направлениях будет требовать приложения двух фаз. Реализация двигателя роторного типа возможна только при наличии трех фаз.

Информация о перемещении получается за счет преобразования перемещений в изменение емкостей в некоторой системе электродов и измерения этих изменившихся емкостей. Такие преобразователи называют емкостными датчиками перемещений.Если на начальном этапе развития МСТ для этих целей активно разрабатывались тензорезисторные преобразователи, то в последние годы более перспективными представляются емкостные датчики перемещений в связи с рядом их преимуществ, перечисленных ниже:

1. В емкостных преобразователях с переменным зазором в электрический сигнал преобразуется прогиб упругого элемента, являющийся интегральным эффектом его деформации (ёмкостной датчик давления), в то время как тензорезистивные преобразователи воспринимают локальные деформации этого элемента.
2. Емкостные преобразователи меньше подвержены влиянию внешних факторов, поскольку диэлектрическая проницаемость воздушного зазора существенно стабильнее, чем удельная электропроводность полупроводниковых тензорезисторов.
3. Емкостные преобразователи обеспечивают больший динамический диапазон и лучшую помехоустойчивость, т.к. относительное изменение зазора при воздействии входной величины может достигать почти 100%, в то время, как предельные значения относительной деформации упругих элементов, как правило, не превышает 0,1%.
4. Интегральная технология позволяет реализовать воздушные зазоры в преобразователях в диапазоне 1-10 мкм, что соответствует удельной емкости 9-0,9 пФ/мм^2 и получить размер емкостных преобразователей, не превышающие габаритов тензопреобразователей.

Конструкции емкостных датчиков перемещений весьма разнообразны и тесно связаны с конструкцией и способом изготовления объекта, на котором они установлены. Из выражения для емкости плоского конденсатора, которое в СИ преобразуется в форму:

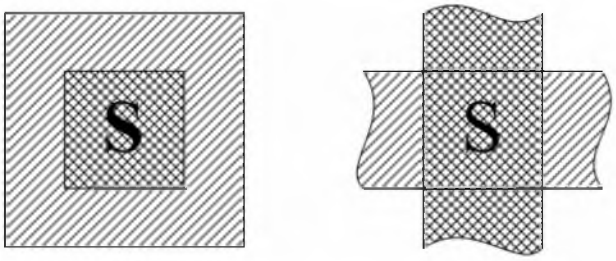
$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h},$$

следует, что вариацию емкости за счет перемещений конструктивных элементов можно получить как изменением площади обкладок S, так и зазора h между ними. Чаще всего используется изменение зазора. В этом

случае для уменьшения ошибок измерения необходимо принять меры по сохранению постоянства эффективной площади обкладок при изменении зазора. Обычно это условие выполняется, если одна обкладка по площади заметно меньше другой (рис.10.1,а) или используется вариант «пересечения» обкладок и рабочая площадь определяется только площадью пересекающихся частей (рис.10.1,б). Постоянство рабочей площади обкладок способствует также повышению температурной стабильности датчика.

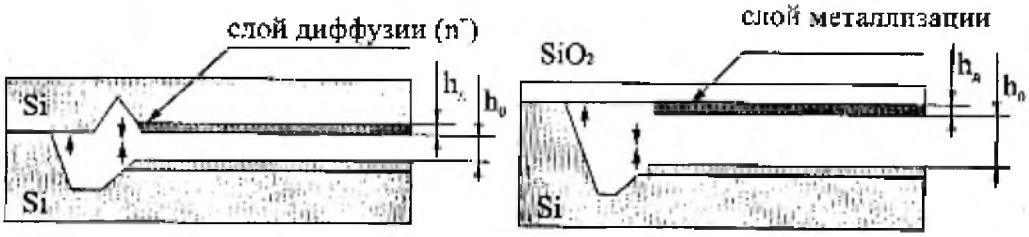
При проектировании емкостного датчика перемещений не следует забывать, что наличие между электродами разности потенциалов вызывает силы притяжения, стремящиеся изменить зазор. В пределе это может привести к залипанию электродов и отказу датчика.

Фрагменты конструкции емкостного чувствительного элемента акселерометра с обкладками, получаемыми металлизацией или диффузией, приведены на рис.10.2.



а б

Рис. 10.1. Способы стабилизации рабочей площади обкладок: а – полное перекрытие; б – пересечение обкладок



а б

Рис.10.2. Подвижный и неподвижный электроды:
а – электроды, изготовленный с помощью операции диффузии; б – электроды, изготовленный с помощью операции металлизации

Для повышения чувствительности и стабильности емкостные датчики перемещений могут быть выполнены по дифференциальной схеме (рис. 10.3). В этом случае при взаимном перемещении электродов происходит одновременные изменения зазоров и емкостей в противоположных направлениях в соответствии с выражениями:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h_0 + \Delta h};$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h_0 - \Delta h},$$

где h_0 – начальный зазор между электродами; Δh – смещение подвижного электрода относительно неподвижного.

Информация об измеренном перемещении должна преобразовываться в электрический сигнал по цепочке: перемещение → изменение емкости → изменение электрического сигнала. Естественно, что преобразование емкости в электрический сигнал возможно только на переменном токе или в импульсном режиме. Существует множество вариантов схем, реализующих такое преобразование, причем полезную информацию может нести амплитуда или частота переменного тока, ширина и форма электрических импульсов и другие их параметры.

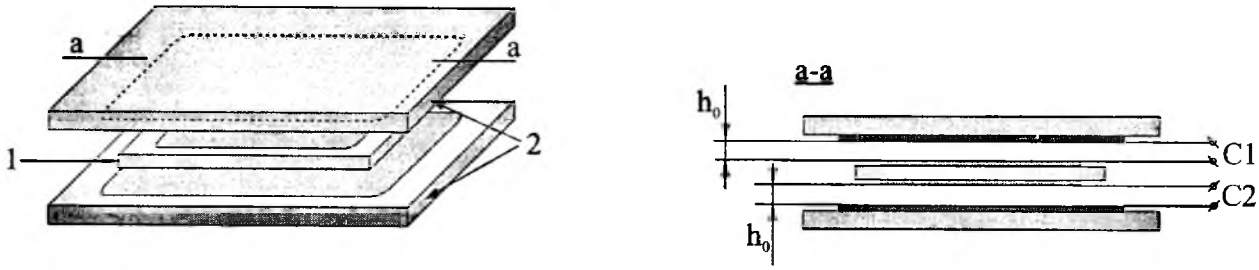


Рис.10.3. Емкостной преобразователь перемещений:
1 – подвижный электрод; 2 – неподвижные электроды

В простейших случаях используются делители напряжения переменного тока, составленные из последовательно включенных элементов с постоянной (эталонной) емкостью C_0 и элемента с емкостью, несущей информацию о перемещении C_x (рис.10.4).

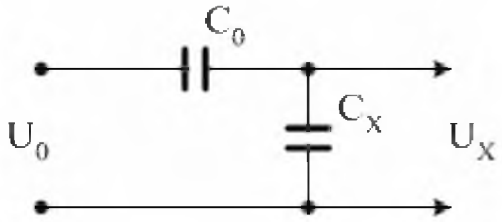


Рис. 10.4. Простейшая схема включения емкостного датчика перемещений

На этот делитель подается переменное напряжение постоянной амплитуды U_0, напряжение на выходе делителя несет информацию об изменении емкости, которое связано с перемещением:

$$U_x = U_0 \frac{C_0}{C_0 + C_x}.$$

Для уменьшения погрешности, в первую очередь температурных, в датчиках, использующих опорный элемент (конденсатор), последний имеет ту же конструкцию и выполняется по той же технологии, что и несущий

информацию о перемещении. Размещаются они так, чтобы оба элемента находились в одинаковых условиях. На рис.10.5 представлен вариант такой пары конденсаторов, образующих чувствительный элемент датчика давления. Конденсаторы практически идентичны за исключением одной детали: опорный элемент, изображенный в нижней части рисунка, защищен от воздействия на мембрану измеряемого давления толстым слоем оксида кремния, в то время как мембрана верхнего элемента не защищена и прогибается под действием измеряемого давления и емкость конденсатора C_x меняется.

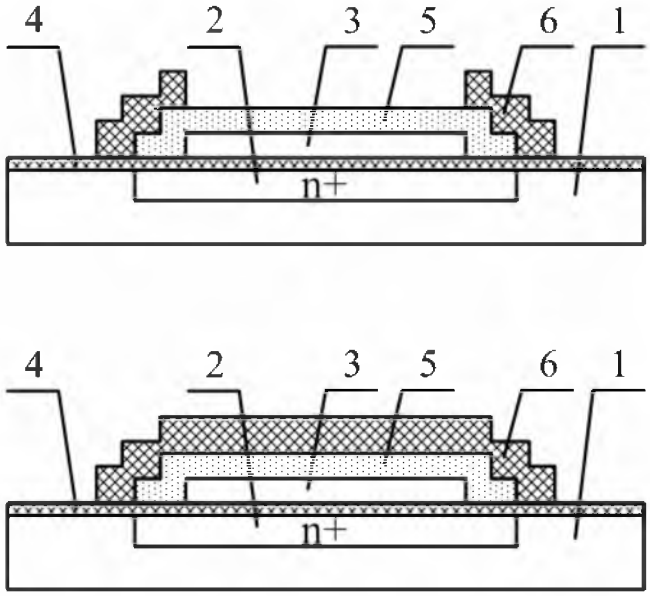


Рис. 10.5. Структура чувствительного элемента датчика:
1 – подложка n-типа; 2 – n+-электрод; 3 – полость; 4 – диэлектрик; 5 – мембрана; 6 – оксид кремния

Для повышения чувствительности преобразователя нередко используют мостовые схемы включения чувствительных элементов датчиков. В частности, для такого включения идеально подходит рассмотренный ранее дифференциальный чувствительный элемент (см. рис.10.3). Принцип его работы можно понять с помощью рис.10.6. Емкости C_1 *и* C_2, включенные последовательно, составляют два плеча мостовой схемы, а роль двух других плеч играют двуполярные источники питания $\pm U_{on}$. Опорное напряжение подается на емкости через ключевую схему, которая на рис.10.6 представлена условно, а практически реализуется на МОП-транзисторах, управление которыми осуществляется последовательностью импульсов в виде меандра. Таким образом, постоянное опорное напряжение преобразуется в последовательность импульсов, запитывающих мост то в одной, то в противоположной полярности.

При балансе моста (Δh=0; ΔC=0) выходное напряжение равно нулю, а при наличии разбаланса

$$\Delta U = U_{оп}\frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = U_{оп}\frac{\Delta h}{h}$$

Это напряжение для дальнейшей обработки подается на схему измерений. Наконец, в последнее время стали применяться более сложные компенсационные схемы измерения, в том числе и в датчиках перемещений.

Работа таких схем основана на следующих принципах. Чувствительный элемент (в нашем случае подвижный электрод емкостного датчика перемещений) находится под действием двух сил. Одна создается измеряемым внешним воздействием (например, давлением) и стремится вызвать перемещение рабочего электрода и изменение емкости в одну сторону. Другая сила создается самим измерительным устройством, например, это может быть сила электрического тяжения, действующая на тот же электрод в противоположном направлении. Величина этой силы изменяется («управляется») с помощью цепи обратной связи. Она охватывает измерительную цепь таким образом, чтобы суммарное воздействие обеих сил было скомпенсировано и рассогласование в их взаимодействии, которое улавливает чувствительный элемент, было бы минимальным. В результате точность работы, динамический диапазон измерений, линейность в системе существенно повышаются.

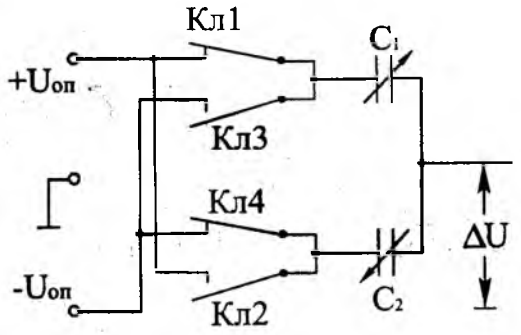


Рис. 10.6. Измерительная цепь акселерометра

11. СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ [4]

11.1 Термоэлектричество

Термоэлектрические сенсоры реализуют прямое преобразование теплоты в электрический сигнал и не нуждаются в источниках питания. Создание подобных сенсоров температуры возможно также на основе использования пироэлектрического эффекта.

В основе термоэлектрического преобразования лежит эффект Зеебека (1770-1831), открытый в 1821г. Изучая тепловые эффекты в гальванических устройствах, Зеебек соединил попарно концы двух полукруглых дуг (проводников), изготовленных из висмута и меди. При наличии разности

температур между спаями стрелка лежащего рядом компаса отклонялась. Отклонение наблюдалось и при других парах металлов.
Зеебек назвал наблюдаемое явление термомагнетизмом, но не связал отклонение компасной стрелки с протеканием в таком замкнутом контуре электрического тока.
Термоэлектрическую природу эффекта независимо друг от друга поняли годом позже Фурье и Эрстед; они же предложили первые термоэлементы.

Физическое объяснение явлению Зеебека было дано сначала с позиции класической физики, опирающейся на разную концентрацию электронов в разных металлах (Ме) и диффузию их от горячего спая к холодному.

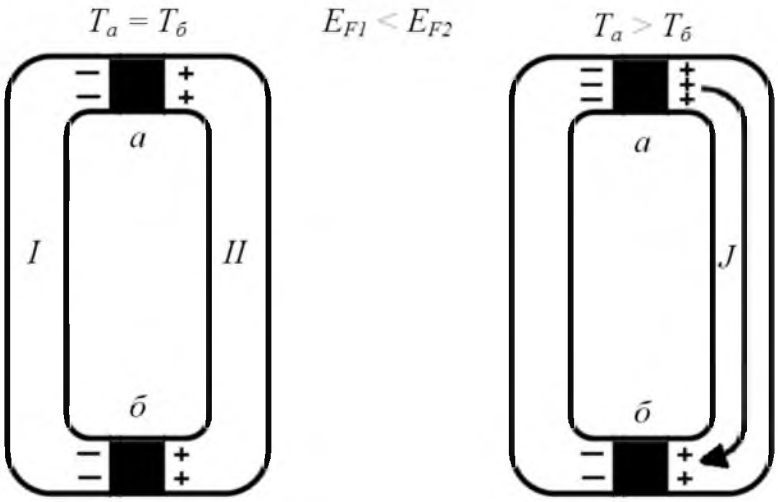


Рис.11.1 – К объяснению эффекта Зеебека.

Квантовая механника уточнила классическое объяснение явления Зеебека: при контакте двух Ме с разными энергиями Ферми ($E_{F1} < E_{F2}$) происходит переход электронов из $Ме_2$ с большей энергией Ферми на свободные уровни $Ме_1$ – так образуется внутренняя контактная разность потенциалов. Эта разность одинакова, при одинаковой температуре в спае *а* и в спае *б*, и так как электрическое поле направленно в противоположенные стороны, тока нет (рис.11.1 а). При нагревании одного из спаев равновесие нарушается из-за того, что скорость «подъема» уровня Ферми с температурой в разных металлах неодинакова (например, в $Ме_2$ больше, чем в $Ме_1$) и в спае *а* контактная разность потениалов увеличивается (рис. 11.1 б), что приводит к возникновению тока. Разная скорость диффузии электронов, определяемая эффективной массой m*, может как увеличивать, так и уменьшать результирующее электрическое поле. Возникающая термоЭДС есть функция каждой пары металлов в отдельности.
Напряжение на соединении будет равно

$$dV_{AB} = \alpha_{AB}\, dT$$

или

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT}.$$

Коэффициент Зеебека не зависит от способа реализации спая (сварка, скрутка, спайка) и определяется только природой контактирующих металлов.

Из изложенного ясно, что эффект Зеебека реализует прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Для повышения индуцированного напряжения Джоуль впервые предложил соединять несколько термопар в батарею.

Термопары естественно использовать для измерения температуры. Впервые такое предложение сделал Беккерель в 1826г. Реальные конструкции термопар выполнил Г. Ле-Шателье в 1886г. на основе проводов из платины и сплавов платины с родием; позднее и на основе других материалов.

Функцию напряжения, генерируемого термопарой, от температуры часто аппроксимируют уравнением второго порядка:

$$V_{AB} = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 .$$

Например, для термопары медь (+) – константан (-) уравнение выглядит так:

$$V_{AB} = V_T = -0{,}0543 + 4{,}094 \cdot 10^{-2} T + 2{,}874 \cdot 10^{-5} T^2 .$$

Тогда коэффициент Зеебека этой пары принимает вид

$$\alpha_T = \alpha_{AB} = dV_{AB} / dT = 4{,}094 \cdot 10^{-2} + 5{,}748 \cdot 10^{-5} T$$

и является линейной функцией температуры. Иногда его называют чувствительностью термопары.

Термопары относятся к классу относительных датчиков, т.к. напряжение определяется разностью температур спаев. Обычно один спай является опорным (эталонным), его температура поддерживается постоянной и известна, как правило это холодный спай.

В микросистемной технике используют термопары плоской формы и как правило изготовленные одним из способов формирования пленочных слоев. Для повышения чувствительности несколько термопар объединяют в термобатарею (термоэлемент). Проводники термопары могут размещаться в одном или нескольких слоях, разделенных диэлектриком.

На рис. 11.2 представлен фрагмент конструкции датчика расхода газа, в котором о скорости газового потока судят по перепаду температуры.

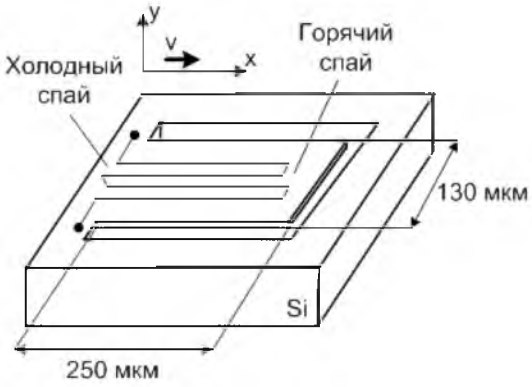


Рис.11.2. Сенсор перепада температуры в газовом потоке

Сенсор перепада температуры здесь содержит две последовательно включенные термопары. Они расположены на основании, выполненном на тонкой консольной балке, сформированной химическим травлением кремниевой подложки датчика. Такая конструкция использована с целью уменьшения влияния температуры подложки на сенсор перепада температуры в газовом потоке и уменьшения тепловой инерции устройства.

В микросистемных устройствах на кремнии естественно использовать этот материал как один из проводников термопары в монокристаллической или поликристаллической форме. Следует отметить, что коэффициент Зеебека в полупроводниках сильно зависит от их легирования. В частности, для монокристаллического кремния n-типа при комнатной температуре коэффициент Зеебека определяется формулой

$$\alpha_n = \frac{m \cdot k}{q} \ln \frac{\rho}{\rho_0}$$

где $\rho_0 \approx 5 \cdot 10^6$ *Ом·м* и $m \approx 2{,}5$ – константа; k – постоянная Больцмана; q - заряд электрона.

Значения коэффициента Зеебека для кремния в монокристаллической и поликристаллической форме по отношению к меди при комнатной температуре приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1. Коэффициенты термоЭДС Si по отношению к Cu при t_0= 25°C

Материал	α_{AB}, мкВ/К
p – Si	$10^2 \div 10^3$
p – поли Si	$10^2 \div 5 \cdot 10^2$
n – Si	$-10^2 \div 10^3$
n – поли Si	$-10^2 \div 5 \cdot 10^2$

При подключении термопары к интерфейсной измерительной схеме следует соблюдать осторожность в выборе материалов. В частности, такой вход измерительной схемы всегда должен использовать идентичные проводники. Поскольку термоЭДС при малых перепадах температуры обычно невелики, необходимо также соблюдать меры по предотвращению помех.

11.2. РЕЗИСТИВНЫЕ СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Физические свойства материалов и параметры выполненных из них деталей в той или иной степени зависят от температуры и несут таким образом информацию о её величине. Для извлечения этой информации необходимы дополнительные устройства, в связи с чем такие сенсоры и датчики на их основе относятся к числу пассивных.

Зависимость сопротивления металлов от температуры *R(T)* впервые заметил Х. Дэви в 1821г., а в 1871г. В. Сименс сделал первый резистивный термометр из платиновой проволоки. Сейчас существует большое разнообразие резистивных датчиков температуры. В микросистемной технике используют тот же принцип, т.е. измеряют зависимость сопротивления от температуры, только резисторы берут обычно пленочные или полупроводниковые. Их достоинствами являются высокая чувствительность, простой интерфейс, долговременная стабильность.

Рассмотрим сначала *датчики на основе металлических пленок*. Зависимость *R(T)* наблюдается у всех металлов, но не все используют в качестве основы для сенсоров. Известно, что электрические свойства материалов в тонких слоях сильно отличаются от объемных и зависят также от способа изготовления пленки. Поэтому, круг материалов, используемых для изготовления сенсоров, ограничен наиболее изученными и стабильными. Среди металлов это платина (при измерениях температуры до 600°С) и молибден при измерениях более высоких температур.

Конструкция резистивного сенсора температуры является типичной для пленочных схем (рис. 5). Подложкой является диэлектрик (ситалл, керамика) или кремний, покрытый диэлектрической пленкой окиси SiO_2 или нитрида кремния Si_3N_4. В плане структура может быть линейной (А) или иметь форму меандра для повышения сопротивления за счет увеличения отношения длины к ширине резистора (В).

Величина сопротивления определяется выражением

$$R = R_{\square}\frac{l}{b}$$

где $R_{\square}$ - сопротивление квадрата пленки, для платины лежит в пределах 100 ÷1000 Ом/□ в зависимости от толщины материала.

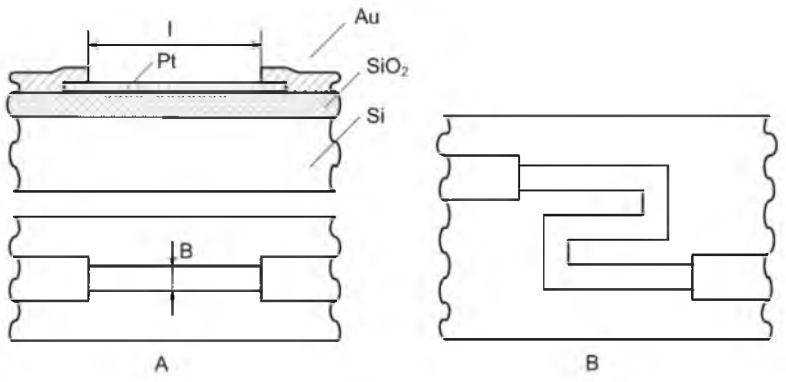


Рис. 11.3. Структура тонкопленочного терморезистора:
А – линейного; В – типа «меандр»

Функция изменения сопротивления от температуры обычно апроксимируется линейной зависимостью вида

$$R = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)],$$

где R_0 – значение сопротивления при эталонной (например, комнатной) температуре; α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Для расчетов в более широком диапазоне температур иногда используют полиномиальную зависимость второго порядка. Например, для платинового проволочного сенсора справедливы следующие аппромаксимации:

$R = R_0 (1+36,79 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t)$ или $R = R_0 (1+36,79 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t - 5,8 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta t^2)$.

Наряду с металлопленочными резисторами в изделиях МСТ могут применяться *термисторные сенсоры*, т.е. резисторы специально изготовленные из керамических полупроводников с большими значениями ТКС. Если в традиционной электронике термисторы изготавливаются в виде самостоятельных изделий в формах диска, капли, трубки, пластины и т.п., то в МСТ они получаются методами толстопленочной электроники на достаточно термостойкой подложке (например, керамике). Термисторы получают спеканием нескольких оксидов из ряда следующих металлов: никель, марганец, кобальт, титан, железо. При этом можно получить элементы в широком диапазоне сопротивлений: от единиц Ом до многих МОм как с положительным, так и с отрицательными ТКС. Поскольку зависимости сопротивлений от температуры существенно нелинейны, их аппроксимируют нелинейными уравнениями. В частности, нередко используют выражение

$$R_t = R_{t_0} \, e^{-\beta (1/T - 1/T_0)},$$

где T_0 – калибровочная температура в К; R_{t_0} – значение сопротивления при температуре калибровки; β – характеристическая температура материала в К. Обычно β составляет 3000 – 5000 К.

В изделиях МСТ естественно использовать также накопленный в микроэлектронике опыт проектирования и изготовления в качестве датчиков температуры *полупроводниковых кремниевых резисторов.*

Проводимость полупроводников (и, в частности, кремния) определяется двумя главными факторами: концентрацией носителей заряда и их подвижностью. Оба эти параметра существенно меняются при колебаниях температуры. Рассмотрим качественно суть этих изменений.

В собственном полупроводнике при фиксированной температуре проводимость определяется наличием электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Это количество увеличивается с ростом температуры, что и обуславливает отрицательный ТКС полупроводника.

В примесном полупроводнике проводимость в основном определяется концентрацией легирующих примесей и их характером. Избыточную (по отношению к собственной) концентрацию электронов создает донорная примесь, избыток дырок обеспечивают акцепторы. В широком диапазоне температур все примесные атомы активированы. Концентрация примесных носителей зарядов практически постоянна и преобладает над собственной. Практический температурный предел работоспособности полупроводниковых приборов чаще всего определяется тем фактом, что нарастающая с ростом температуры генерация собственных носителей заряда вначале сравнивает их концентрацию с концентрацией примесных, а затем становится преобладающей. Для кремния эта область "конкуренции" примесной и собственной концентраций лежит в районе 200°С.

Не менее сложной является картина влияния подвижности на температурную зависимость проводимости полупроводника. Она определяется характером рассеяния носителей заряда. В области очень низких температур (обычно за пределами традиционного температурного диапазона работы аппаратуры) подвижность носителей определяется механизмом их рассеяния на ионизированных примесях. При этом подвижность пропорциональна $T^{3/2}$, т.е. нарастает с повышением температуры. При более высоких температурах (в том числе и обычных "рабочих" температурах устройств) начинает преобладать рассеяние носителей на тепловых колебаниях решетки (фононное рассеяние) и зависимость подвижности от температуры пропорциональна $T^{-3/2}$.

Таким образом, при различных выборах материалов и в разных температурных диапазонах температурный коэффициент сопротивления кремния может быть как положительным, так и отрицательным. Для грубой ориентировки можно считать, что при температурах ниже 200 ^{0}С температурный коэффициент кремниевых резисторов будет иметь положительное значение, а при $t > 200$°C – отрицательное.

В диапазоне температур $-50 \div +150$ ^0C типичная чувствительность кремниевого резистивного сенсора составляет $0{,}7\%$ / °C, а его параметры можно аппроксимировать полиномом второго порядка

$$R_T = R_0\,(1 + A\Delta t + B\Delta t^2),$$

где R_0 – значение сопротивления резистора в эталонной точке, Δt – значения отклонений температуры от нее.

О порядке величин коэффициентов A и B можно судить по их значениям в типичном датчике температуры KTY-81:

$A = 7{,}87 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, $B = 1{,}874 \cdot 10^{-5}\ K^{-2}$ в диапазоне температур $-55 \div +150^{o}\ C$.

Использование резистивных сенсоров в датчиках температуры имеет характерную особенность. Поскольку такой сенсор не вырабатывает информационный сигнал самостоятельно, для измерения его сопротивления приходится пропускать ток от измерительного устройства. Этот ток вызывает саморазогрев резистивного сенсора, что увеличивает погрешность измерений. Отсюда следует, что необходимо использовать измерительные схемы, требующие минимальных значений протекающего через сенсор тока, в частности, эти схемы обычно используют очень низкие значения напряжений питания.

Наиболее часто для измерений сопротивления в резистивных сенсорах используют потенциометрические и мостовые схемы. Конструктивная реализация полупроводниковых резистивных сенсоров температуры допускает любой конструктивнотехнический вариант выполнения, используемый в микроэлектронике. Типичные структуры приведены на рис.11.4.

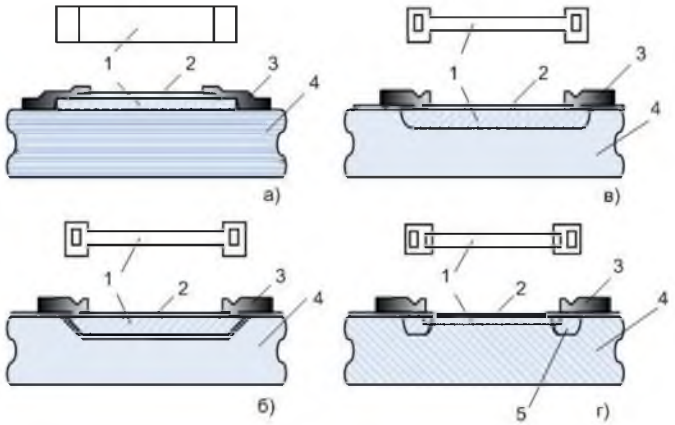


Рис. 11.4. Однополосковые структуры интегральных терморезистивных сенсоров: а) равномерно легированный эпитаксиальный терморезистор с мезаструктурой; б) равномерно легированный терморезистор с окисной изоляцией; в) диффузионный терморезистор; г) ионноимплантированный терморезистор; 1 – терморезистор; 2 – защитное покрытие; 3 – металлизированные токоведущие дорожки; 4 – подложка; 5 – сильнолегированная подконтактная область.

11.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Характеристики полупроводникового p-n – перехода в диодах и биполярных транзисторах сильно зависят от температуры. Эти зависимости можно использовать для измерения температуры, главная трудность при этом – линеаризация характеристики сенсора.

Вольт-амперная характеристика p-n перехода описывается выражением:

$$I = I_0 exp\ \frac{q \cdot V}{2 \cdot k \cdot T},$$

где I_0 – ток насыщения перехода, значение которого также зависит от температуры.

Если задавать ток I через переход, то напряжение на нем можно представить в виде:

$$V = \frac{E_q}{2} - \frac{2kT}{q}(lnk - lnI)$$

здесь E_q - ширина запрещенной зоны кремния, при $T=0K$; q – заряд электрона; k – константа.

Отсюда видно, что если фиксировать ток I, напряжение на переходе будет линейно зависеть от температуры, причем наклон этой зависимости определяется выражением:

$$b = \frac{dV}{dT} = -\frac{2k}{q}(lnk - lnI)$$

Соответствующие графики представлены на рис.11.5.

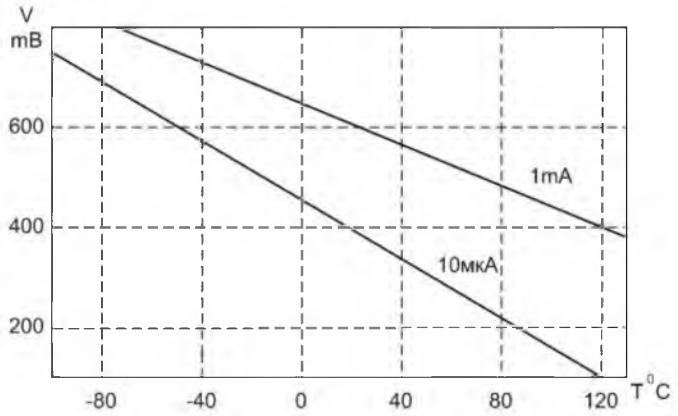


Рис.11.5. Зависимость напряжения от температуры прямосмещенного кремниевого перехода при постоянном токе

Таким образом, любой прямосмещенный диод, запитанный от источника постоянного тока, можно использовать как чувствительный элемент датчика температуры, измеряя снимаемое с него напряжение. Подобный датчик можно получить используя биполярный транзистор (рис.11.6).

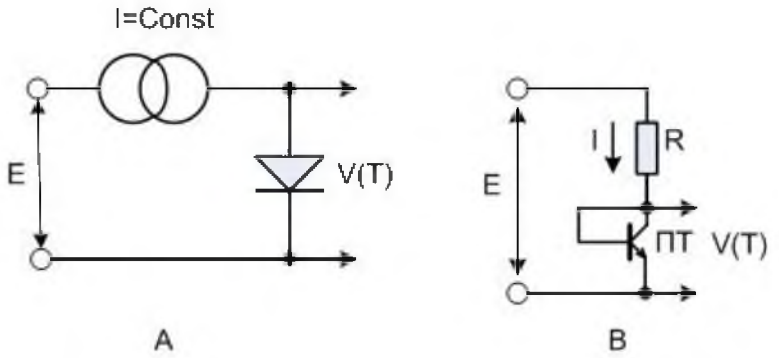


Рис.11.6. Простейшие сенсоры температуры на полупроводниковом диоде (А) и биполярном транзисторе (В)

Но наибольшее распространение нашли датчики температуры на основе использования напряжения база – эмиттер биполярного транзистора, которое определяется выражением:

$$V_{БЭ} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{I_C}{I_s}$$

где I_C - ток коллектора, I_S - тепловой ток коллекторного перехода.

Возьмем $N+1$ совершенно одинаковых транзисторов и все (кроме одного) соединим параллельно, согласно рис. 9 (обычно такие транзисторы выполняются на одном чипе).

Зададим в N транзисторах суммарно тот же ток коллектора I_C, что и в одиночный транзистор, тогда разность напряжения база – эмиттер одиночного и группы транзисторов составит:

$$V_{БЭ} = V_{БЭ} - V_N = \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{I_C}{I_s} - \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{I_C}{N \cdot I_s} = \frac{k \cdot T}{q} \ln N$$

Таким образом, разность напряжений $\Delta V_{БЭ}$ пропорциональна абсолютной температуре.

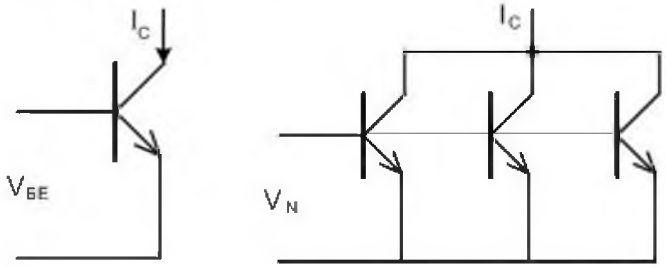


Рис.11.7. К сравнению напряжений $V_{БЭ}$ одиночного и V_N группы транзисторов

На этом принципе можно построить множество практических схем измерения температуры.

11.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Пьезоэлектрический эффект состоит в том, что под действием

механического напряжения или деформации в кристалле возникает электрическая поляризация, величина и знак которой зависят от приложенного напряжения. Обратный пьезоэлектрический эффект – это механическая деформация кристалла, вызванная приложенными электрическими силами, причем величина и тип деформации зависят от величины и направления приложенного поля (см. раздел 5.2).

Очевидно, что свойства пластин пьезоэлектрического материала, вырезанных из кристалла с различной ориентацией относительно его кристаллографических осей (так называемых "срезов") могут сильно отличаться (см. рис.5.1).

Пьезоэлектрический эффект был открыт братьями Кюри в 1880г. в кварце. Позднее было установлено, что он характерен только для кристаллов с определенными типами симметрии (в кристаллах 11-ти классов симметрии из 32 известных он не наблюдается). В частности, самые популярные полупроводники (германий, кремний, алмаз) не обладают пьезоэффектом. В то же время он есть у арсенида галлия, окиси цинка и некоторых других полупроводниковых и полимерных материалов.

Наибольшее распространение в радио- и измерительной технике получило использование пьезоэффекта для стабилизации частоты электрических колебаний (кварцевые стабилизаторы частоты). Суть в том, что механические колебания кварцевой пластины могут иметь значительно более высокую стабильность (малый температурный коэффициент частоты колебаний) по сравнению со стабильностью колебаний частотозадающих устройств, выполненных на традиционных компонентах (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности или другие активные элементы). Эта стабильность кварцевых резонаторов может быть многократно повышена правильным выбором срезов кварца (традиционно это АТ- и ВТ-срезы). Поэтому, в качестве частотозадающего элемента в автогенераторах радиоустройств или часах используют «кварц» - в простейшем случае это прямоугольная пластина, вырезанная из кристалла кварца с двумя нанесенными на противоположные грани электродами. Обычно используется режим резонанса механических и электрических колебаний, причем частота и стабильность их обеспечивается кварцем. Такие системы обладают также высокой добротностью (порядка 10^6).

Исследования показали, что можно получить срезы кварца, в которых частота колебаний зависит от температуры, причем эта зависимость близка к линейной и, что самое главное, характеризуется высокой воспроизводимостью параметров. Такие кварцы естественно использовать в качестве сенсоров температуры, выходным параметром которых является частота электрических колебаний.

Первый пьезоэлектрический кварцевый датчик температуры был реализован на основе кристалла с Y срезом с чувствительностью $35 \cdot 10^{-6}$ [$\Delta f/f$ °C] в диапазоне температур –80°C ÷ +230°C при точности калибровки

0,02°С. Возможна также реализация датчиков с большей чувствительностью (но худшей линейностью) на других срезах (например, LC) или использующих более сложные колебания пластин (изгибные или торсионные). Недостатком пьезоэлектрических датчиков является достаточно большая тепловая инерция.

11.5. БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Тепловое излучение

Измерение температуры нагретого тела на расстоянии основано на приеме лучистой энергии, излучаемой его поверхностью. Известно, что любое тело, температура которого отличается от абсолютного нуля, является источником электромагнитного излучения. Это связано с тепловым движением зарядов в веществе. Все тела обладают также способностью поглощать лучистую энергию. Излучение нагретых тел охватывает длины волн порядка 0,3 – 100 мкм. Поскольку глаз человека чувствителен, в основном, к лучам в интервале длин волн 0,4 – 0,7 мкм, то большая часть теплового излучения лежит за пределами видимой части спектра и относится к так называемому инфракрасному излучению.

Элемент поверхности абсолютно черного тела испускает лучи во всех направлениях. Количество тепла, излучаемого единицей поверхности в единицу времени называется излучательной или лучеиспускательной способностью Е. Тепловое излучение тела всегда содержит лучи с разной длиной волны. Для того, чтобы иметь возможность изучать распределение энергии излучения по длинам волн, вводят понятие спектральной интенсивности излучения, которая определяется как излучательная способность тела для интервала длин волн $d\lambda$:

$$E_\lambda = dE / d\lambda .$$

Исследуя распределение теплового излучения по длинам волн, Макс Планк пришел к своей знаменитой квантовой теории (1900г.).

Закон Планка для спектральной интенсивности теплового излучения абсолютно черного тела имеет вид:

$$\frac{dE_0}{d\lambda} = E_{\lambda 0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \ exp\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \ exp\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1}$$

где индекс «0» присвоен абсолютно черному телу;

$C_1 = 2\pi hc^2 = 0{,}374 \cdot 10^{-15}$ Вт · м^2 – первая постоянная Планка;

$C_2 = hc/k = 1{,}4388 \cdot 10^4$ мкм · К – вторая постоянная Планка;

$h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – универсальная постоянная Планка;

$c = 2{,}9979 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме;

$k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

λ – длина волны; T – абсолютная температура.

Этот закон хорошо подтверждается экспериментально и дает наиболее общую характеристику излучения.

Графически зависимость $dE_{\lambda 0} / d\lambda$ представлена на рис. 11.8.

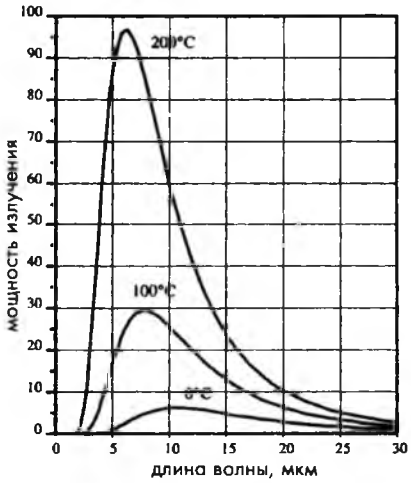


Рис. 11.8. Зависимость интенсивности теплового излучения от длины волны и температуры

Как видно, абсолютно черное тело излучает при любой температуре в широком диапазоне волн. С возрастанием температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн. Это явление описывается законом Вина: $\lambda_{макс} = 2898/T$ *[мкм* К]*.

Видимая часть спектра на рис.11.8 расположена слева от максимумов, т.е. тепловое излучение, максимум которого находится в области более длинных волн, обычно невидимо. Только при температурах тела 700 – 800°С человеческий глаз начинает воспринимать темно-красное свечение, когда несколько увеличивается доля энергии в видимой части спектра. Даже при Т = 3000 К, соответствующей температуре вольфрамовой нити горящей электрической лампочки, видимая часть излучения составляет малую долю полной лучистой энергии. Только при температуре порядка 5500 К, соответствующей температуре поверхности Солнца, максимум излучения лежит в видимой части спектра.

Закон Планка позволяет определить интенсивность излучения, отнесенную ко всему спектру, т.е. излучательную способность абсолютно черного тела. Для этого $dE_{\lambda 0}$ надо проинтегрировать по всем длинам волн:

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{\lambda 0} d\lambda = \sigma T^4 ,$$

где $\sigma = 5{,}6687 \cdot 10^{-8}$ Вт/м$^2 \cdot$ К^4 – постоянная Стефана-Больцмана. Таким образом, $E_0 = \sigma T^4$,

т.е. излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана). Этот закон опытным путем установлен Стефаном (1879г.) и теоретически обоснован Больцманом (1881г.) еще задолго до работ Планка.

Уже отмечалось, что все реальные тела имеют излучательную

способность меньшую, чем у абсолютно черного тела. Кроме того, эта способность может описываться зависимостями от температуры и длины волны, отличающимися от установленных для абсолютно черного тела. Твердые тела, обладающие шероховатой поверхностью, имеют, как правило, сплошной спектр излучения, мало отличающийся от спектра излучения абсолютно черного тела. Если эти спектры подобны, то реальное тело называют серым. С некоторым приближением большинство реальных тел можно рассматривать как серые.

Для количественной характеристики излучательной способности реальных тел введено понятие степени черноты тела

$\varepsilon = Q/Q_0 = E/E_0 \leq 1$, тогда для реального тела $E = \varepsilon\sigma T^4 = \varepsilon C_0 (T/100)^4$,

где C_0 = 5,6687 Вт/м^2· К^4.

Степень черноты тела ε лежит в пределах 0 – 1. Значения ε, как правило, устанавливаются опытным путем.

Таким образом, регистрируя энергию излучаемую нагретым телом и исследуя ее зависимость от длины волны, можно судить о температуре поверхности тела.

Принцип действия приемников теплового излучения

Принцип действия приемников теплового излучения достаточно прост. Падающие на чувствительный элемент приемника инфракрасные лучи повышают его температуру, что приводит к изменению свойств материала в результате проявления тепловых эффектов, например, рассмотренных ранее термоэлектрического и терморезистивного. Исторически первым измерил тепловое излучение в 1800 г. Гершель, открывший инфракрасные лучи, используя для их обнаружения обычный термометр. Позднее, для детектирования инфракрасного (ИК) излучения стали использовать и другие эффекты, например, пироэлектрический и так называемые газовые термометры (рассмотрены ниже). Чувствительные элементы всех этих приемников реагируют собственно на температуру как результат усреднения кинетической энергии огромного числа колеблющихся частиц. Приблизительно с 1930г. в развитии ИК техники появилось второе направление, основанное на использовании фотонных детекторов, в которых решающую роль играют квантовые свойства излучения и которые охватывают как ИК, так и оптический диапазон волн. В настоящее время эти направления развиваются параллельно, дополняя друг друга. В пособии вопросы фотонного детектирования не затрагиваются.

Простейшая схема теплового приемника представлена на рис.11.9. Детектор представлен чувствительным элементом с теплоемкостью С, соединенным тепловой перемычкой, обладающей теплопроводностью G, с теплоотводом, имеющим постоянную температуру Т. В отсутствие внешнего сигнала средняя температура детектора равна Т, причем она

флуктуирует около среднего значения. При поступлении излучения на вход приемника повышение температуры можно найти, решая уравнение теплового баланса:

$$C\frac{d\Delta T}{dt} + G\Delta T = \Phi$$

где ΔT – разность температур детектора и окружающей среды, обусловленная лучистым сигналом Ф; ε – излучательная способность детектора.

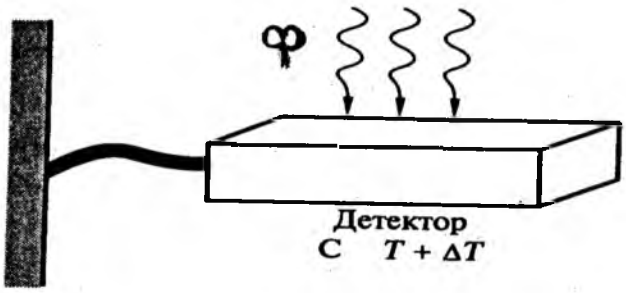


Рис. 11.9 Тепловая схема детектора

Если предположить, что мощность падающего излучения является периодической функцией

$$\Phi = \Phi_0 e^{i\omega t},$$

где Φ_0 – амплитуда синусоидального сигнала, то решение дифференциального уравнения получим в виде

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-\frac{G}{c}\omega t} + \frac{\varepsilon\Phi_0 e^{i\omega t}}{G + i\omega c}$$

Первое слагаемое описывает переходный процесс и со временем экспоненциально стремится к нулю, поэтому им можно пренебречь без потери общности решения. Тогда для любого теплового приемника ΔT, обусловленная падающим потоком излучения, запишется как

$$\Delta T = \frac{\varepsilon\Phi_0}{G+\omega^2c^2\ ^{1}\ _{2}}.$$

Уравнение поясняет некоторые свойства теплового приемника. Ясно, что необходимо обеспечить как можно большее значение ΔT. Для этого необходимо, чтобы теплоемкость детектора C и его тепловой контакт с окружающей средой (т.е. G) были как можно меньше. Взаимодействие теплового приемника с падающим излучением необходимо оптимизировать, в то время как все другие тепловые контакты с окружающей средой должны быть сведены к минимуму. Это означает, что желательно иметь детектор малой массы и обеспечить минимальную теплопроводность на теплоотвод.

11.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОМБИНАЦИИ С ДРУГИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

11.6.1. Каталические сенсоры концентрации газов

В некоторых комбинированных сенсорных преобразователях в качестве промежуточного этапа преобразований используется сенсор температуры. Так, для измерения концентрации содержащихся в воздухе некоторых легкоокисляющихся веществ (пары бензина, спиртов, эфиров, водорода, метана и пр.) используются каталические сенсоры. Они содержат развитую поверхность, покрытую тонкой пленкой катализатора (платина, палладий), в присутствии которого происходит окисление (сгорание) вещества, концентрация паров которого измеряется. Сгорание сопровождается выделением тепла и нагревом поверхности. Таким образом, измеряя температуру можно судить о концентрации измеряемой примеси в воздухе.

На рис.11.10 приведена структура интегрального каталического сенсора водорода. Измерение температуры в нем осуществляется по изменению напряжения эмиттер – база в биполярном транзисторе.

Таким образом, в сенсоре реализуется цепочка преобразований $N - Q - T - U$, где N – концентрация примеси, Q – теплота, T – температура, U – напряжение.

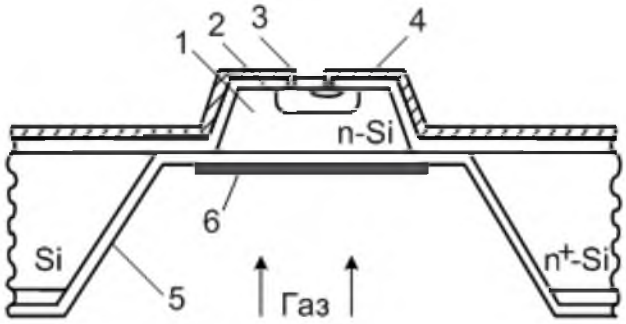


Рис. 11.10. Интегральный кремниевый сенсор водорода:
1 – коллектор; 2 – пиролитическая SiO_2 (0,6мкм);
3 – контакты к базе Al; 4 – контакты к эмиттеру; 5 – слой Al_2O_3 (0,1мкм); 6 – Pd-катализатор (0,02мкм).

Сенсор выполнен на кремниевом чипе. Это позволяет использовать весь арсенал типовых технологических процессов микроэлектроники при его изготовлении. Использование анизотропного травления кремния позволяет выполнить всю активную структуру на тонкой диафрагме, что уменьшает ее массу и теплоемкость. В результате повышается чувствительность и быстродействие (сокращается время протекания инерционных тепловых процессов).

11.6.2. Тепловые расходомеры

Для измерения расхода жидкости или газа, протекающих по трубе, необходимо знать среднюю скорость потока и его сечение. Традиционные методы измерения расхода, основанные на использовании подвижных элементов (поршни, турбины и т.д.) неэффективны при малых расходах и плохо поддаются миниатюризации.

Если в некоторой точке потока установить нагревательный элемент, то распределение температуры в его окрестностях будет зависеть от скорости потока V (рис. 11.11).

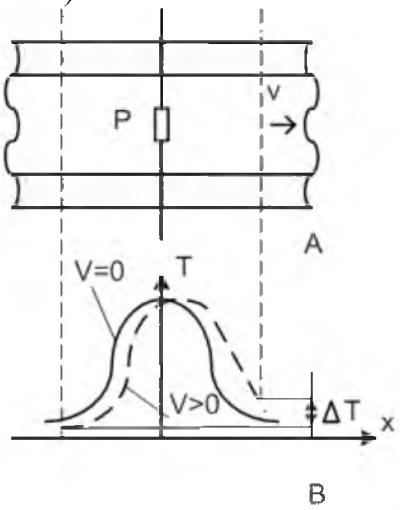


Рис.11.11. Канал газового потока с нагревателем Р в нем (А), распределение температуры в канале (В)

При нулевой скорости потока распределение температуры симметрично с максимумом, совпадающим с положением источника тепла. При конечной скорости потока положение максимума сохраняется, а кривая распределения температуры «перекосится», так как набегающий «холодный» поток снизит температуру слева от нагревателя и повысит ее справа за счет нагрева. Таким образом, перепад температуры ΔT между двумя точками, расположенными слева и справа относительно нагревателя несет информацию о скорости потока.

Конструкции тепловых расходомеров несколько различаются в зависимости от принятого способа измерения температуры (рис. 11.12).

В структуре, представленной на рис.11.12А, измерение температуры производится с помощью терморезисторов (1) расположенных симметрично относительно нагревателя (2) и включенных в мостовую схему измерений. И нагреватель (тоже резистивного типа) и терморезисторы выполнены на тонкой мембране, полученной анизотропным травлением кремния, ориентированного в плоскости (100). Использование мембраны позволяет существенно снизить теплоемкость структуры и повысить скорость ее реагирования на изменение расхода. Кроме того, тонкая мембрана уменьшает нежелательную тепловую связь через подложку между нагревателем и терморезисторами. Тем не менее, для дальнейшего уменьшения этой связи, источник тепла формируется на консоли

(рис.11.12 В), что позволяет повысить чувствительность расходомера.

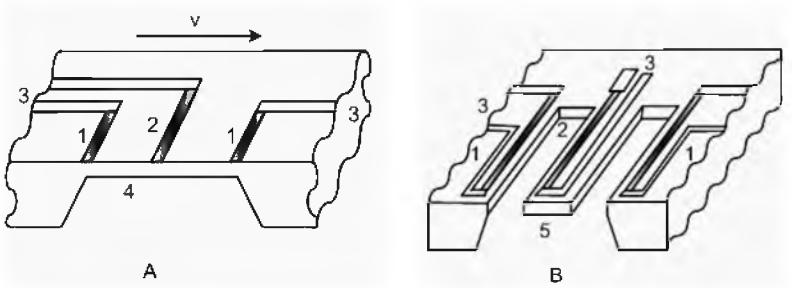


Рис.11.12. Кремниевые тепловые сенсоры расходомеров:
А – на диафрагме; В – консольного типа; 1 – терморезистор; 2 – нагреватель; 3 – пленочные проводники; 4 – диафрагма; 5 – консоль.

Другой вариант конструкции расходомера получается, если для измерения температуры использовать термопару или термобатарею. Это возможно и в структурах, представленных на рис.11.12, с заменой терморезисторов на термопары. Для нормальной работы тепловых расходомеров обычно достаточно маломощных источников тепла, обеспечивающих максимальный перегрев жидкости (газа) в области нагревателя в несколько десятков градусов относительно исходной температуры потока.

Тепловые расходомеры обеспечивают широкий диапазон измерений, высокую чувствительность, не содержат подвижных элементов и очень малогабаритны.

Акселерометры с нагревом газа

Акселерометры предназначены для измерения изменяющейся скорости (ускорения) и обычно строятся по схеме сейсмографа, т.е. содержат инертную массу, закрепленную в корпусе на упругом подвесе. При изменении скорости корпуса происходит деформация подвеса (поскольку инертная масса запаздывает с изменением скорости по сравнению с корпусом) и эта деформация несет информацию об изменении скорости объекта. В акселерометре с нагревом газа в качестве инертной массы используется неравномерно нагретый газ, заключенный в герметичный корпус. Принцип работы такого акселерометра поясняет рис. 11.13.

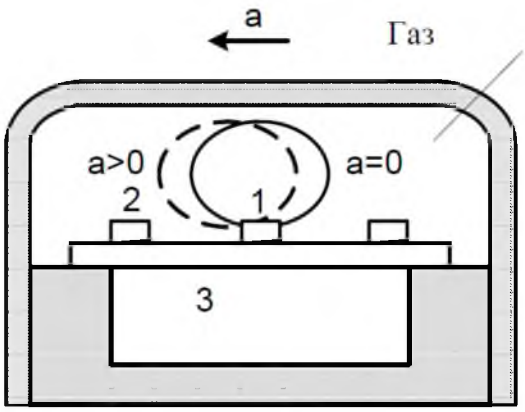


Рис. 11.13. Структура акселерометра с нагревом газа: 1 – нагреватель; 2 – измеритель температуры; 3 – диафрагма-подложка.

На дне герметичной полости, заполненной газом, расположена тонкая подложка, в центре которой размещен нагреватель. Если корпус прибора неподвижен, над нагревателем формируется симметричный факел нагреваемого газа. Неравномерность нагрева приводит к тому, что и плотность газа также распределена по объему неравномерно, но симметрично.

Если теперь корпус прибора изменяет скорость в горизонтальной плоскости и получает ускорение a, то произойдет перераспределение газа по объему, а именно, более холодный (и плотный) будет прижиматься к стенке противоположной направлению вектора ускорения. Таким образом, размещая на подложке в горизонтальной плоскости, по оси X и Y попарно и симметрично относительно нагревателя измерители температуры, можно по «перекосу» температуры судить об изменении скорости прибора в соответствующих направлениях.

Существенным преимуществом таких акселерометров, по сравнению с традиционными, является их высокая стойкость к большим (в десятки тысяч g) перегрузкам. Недостатки связаны в первую очередь с инерционностью тепловых процессов, а также с непредсказуемой реакцией прибора на хаотическое изменение его положения в пространстве.

На основе измерения температуры могут строиться также датчики излучений, влажности и другие приборы.

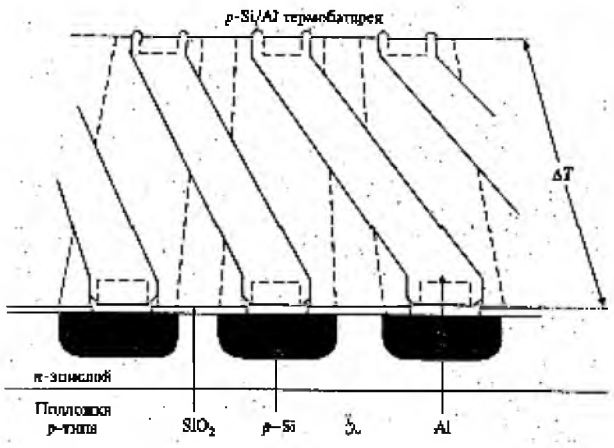
11.6.4. Сенсоры излучения на основе термоэлектрического и терморезистивного эффектов

Рассмотренные ранее способы регистрации температуры и ее изменений, основанные на измерении термоЭДС или вариаций сопротивления материалов при колебаниях температуры, вполне могут быть применены для дистанционного измерения температуры. Поскольку для фиксации сравнительно малых потоков лучистой энергии, т.е. для повышения чувствительности, теплоемкость и масса таких сенсоров должны быть минимальными, то методы микроэлектроники и

микросистемной техники для их реализации являются перспективными. Ограничимся рассмотрением нескольких примеров такого подхода. Например, интегральная термобатарея, структура которой представлена на рис. 11.14,А.

Для измерения термоЭДС используется контакт Al/p-Si. Полоски кремния p-типа сформированы в эпитаксиальном слое n-типа, толщиной 10 мкм. Алюминиевые пленочные перемычки связывают концы полосок кремния для формирования батареи, содержащий 44 пары горячих и холодных контактов. Для уменьшения теплоемкости сенсора исходная кремниевая подложка p-типа под батареей удаляется электрохимическим травлением вплоть до его остановки на переходе эпитаксиальный n-слой/p-подложка и образования диафрагмы десятимикронной толщины (рис. 11.14,Б). Контакт n^+-типа является технологическим. Облучаемые горячие спаи батареи покрываются поглощающим слоем. Для уменьшения теплопроводности от горячего спая к массе кристалла край диафрагмы, прилегающий к горячим спаям, удаляется плазменным травлением, так что диафрагма приобретает форму консольнозакрепленной балки.

Термобатареи генерируют ЭДС в ответ на облучение и не требуют тока питания для съема информации, что предотвращает паразитный нагрев и связанные с этим ошибки измерений. Поэтому сенсоры на их основе предпочтительнее для создания матриц больших размерностей и организации тепловизоров. В настоящее время известны опытные образцы тепловизоров с интегральной матрицей сенсоров размерностью до 128x128 элементов, совмещенной с системой считывания на ПЗС структурах.



А

Б

Рис. 11.14. Схема Al/p-Si термопары в интегральном исполнении (А) и ее поперечное сечение (Б)

Другим сенсором приемников теплового излучения является терморезистор, обладающий большим температурным коэффициентом сопротивления и имеющий малую теплоемкость. Как отмечалось, в отличие от термопары, он требует для регистрации изменения сопротивления источника питания с жесткими требованиями к стабильности тока и напряжения. Практически для регистрации излучения используются болометры, ассортимент которых весьма широк, что связано с необходимостью создания устройств для приема тепловых излучений с разной длиной волны. Как правило, это одиночные приемники, а не элементы матриц. Ограничимся одним примером реализации такого устройства, технология изготовления которого является вариантом поверхностной микрообработки в МСТ. Его конструкция схематически представлена на рис. 11.15.

Рис. 11.15. Болометр с вакуумной (воздушной) тепловой изоляцией

Главной конструктивной особенностью структуры является способ тепловой изоляции чувствительного элемента от подложки. Пленочный терморезистор сформирован на тонкой диафрагме (пленке), выполненной обычно из нитрида кремния. Эта диафрагма свободно висит над вакуумной полостью, глубиной до 2,5 микрометров, которая собственно и выполняет задачу тепловой изоляции. Эта полость создается на одном из последних этапов формирования всей структуры за счет удаления заполнявшего объем этой полости так называемого жертвенного слоя. Обычно его роль играет толстый слой окиси кремния, локально сформированный на кремниевой подложке на одном из первых этапов формирования структуры. Окись кремния сравнительно легко удаляется травлением растворами на основе фтористоводородной кислоты даже через узкие капилляры. Упрощенный вариант изготовления подобной структуры,

отличающийся способом нанесения жертвенного слоя, представлен на рис. 11.16.

В обоих случаях полупроводниковая кремниевая подложка не является пассивной, а содержит компоненты электронной схемы интерфейса для считывания информации с датчиков.

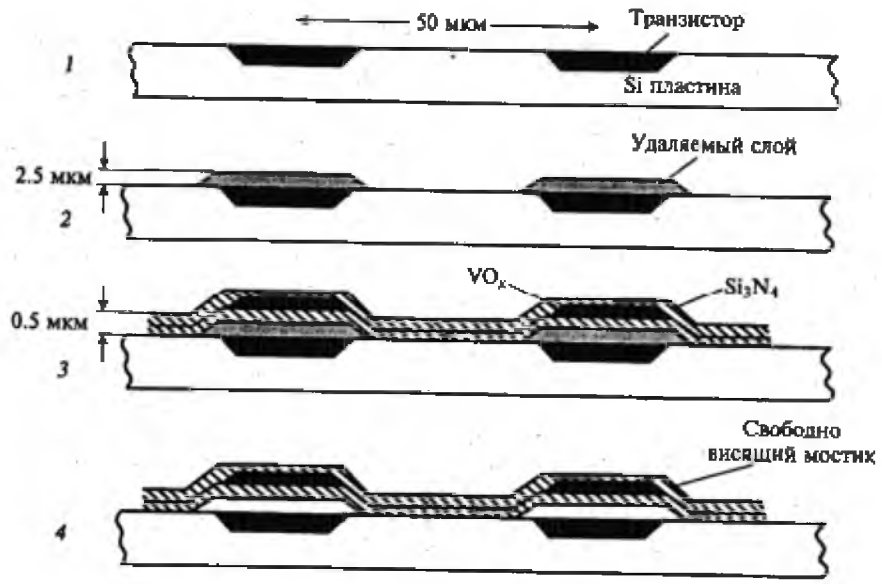


Рис.11.16. Вариант технологического процесса формирования сенсора с вакуумной термической изоляцией

В приведенных структурах микроболометры выполнены на диоксиде ванадия. Этот материал достаточно сложен в изготовлении из-за низкой стабильности диоксидов, связанной с обратимым фазовым переходом из металлического в полупроводниковое состояние в диапазоне температур 50 – 70 ^{o}C. Но именно благодаря этому он имеет высокий отрицательный температурный коэффициент сопротивления порядка 4% / К, что позволяет получить сенсоры с очень высокой чувствительностью (в литературе приводятся цифры чувствительности порядка 10^5 В / Вт).

Известны также болометры, использующие переход материала из обычного в сверхпроводящее состояние, однако их использование возможно только при криогенных температурах.

11.6.5. Пироэлектрические датчики ИК - излучения

Пироэлектричество проявляется в свойстве некоторых диэлектрических кристаллов изменять величин электрической поляризации при изменении температуры. В результате нагревания или охлаждения пироэлектрического кристалла на его гранях появляются электрические заряды. Кристаллы пироэлектрических веществ – это диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) электрической поляризацией. В таких кристаллах

можно выделить домены, имеющие нескомпенсированный электрический дипольный момент $p = ql$,
где q – заряд; l – расстояние между противоположными по знаку зарядами. Если диполи ориентированы одинаково, то кристалл оказывается электрически поляризованным. Поляризация оценивается как сумма дипольных моментов в единице объема. Численно она равна плотности зарядов на противоположных гранях кристалла, нормальных к направлению поляризации. Если кристалл достаточно долго находится при постоянной температуре, то избыточные заряды на его поверхности обычно компенсированы за счет ионов воздуха и утечек и практически не обнаруживают внешне электрической поляризации. Если же температуру кристалла изменить, то происходит анизотропное изменение расстояния между доменами и углов между ними и за счет смещения зарядов диполей в кристалле появляется поляризация вдоль направления, называемого электрической осью. Внешне эффект описывается нелинейным уравнением $\Delta p = \gamma_1 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2$,
где γ_1 и γ_2 – коэффициенты пироэлектрического эффекта [Кл/м^{2}К]; ΔT – изменение температуры.
Нередко достаточной аппроксимацией является линейная: $\Delta p = \gamma \Delta T$.
В технике пироэлектрики обычно используются в виде тонких пленок, с противоположных сторон которых нанесены электроды для зарядов. В модельном представлении это соответствует конденсатору, электрически заряжающемуся от потока тепла. Такой датчик является активным, т.е. он сам генерирует заряд и напряжение, несущее информацию об изменении температуры (в отличие от термоэлектрических устройств, которые регистрируют разность температур). Естественно, что необходима интерфейсная схема, регистрирующая изменение заряда (напряжения), пропорционального ΔT.
Можно показать, что при представлении модели пироэлектрического датчика конденсатора изменение напряжения ΔV на нем при отклонении температуры ΔT связаны соотношением

$$\Delta V = \gamma \frac{S}{C} \Delta T = \gamma \frac{\varepsilon_n \varepsilon_0}{h} \Delta T,$$

где C – емкость датчика; S – площадь перекрытия электродов; h – толщина пироэлектрической пленки; ε_n – относительная диэлектрическая проницаемость пироэлектрической пленки; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Впервые пироэлектричество было открыто в кристаллах турмалина в 19 веке, хотя эффект греки наблюдали еще в древности. К настоящему времени известно более 1000 веществ, обладающих свойством обратной поляризации, их иногда называют ферроэлектриками. В основном это кристаллы, хотя такое свойство обнаружено и у некоторых полимеров, в

частности у поливинилфторида (PVF) и поливинилидилфторида (PVDF, $\gamma = 4 \cdot 10^{-3}$).

Из наиболее популярных неорганических материалов можно назвать монокристаллы танталата лития (LiTaO, $\gamma = 2 \cdot 10^{-4}$), керамику из титаната бария (BaTiO , $\gamma = 4 \cdot 10^{-4}$), поликристаллические слои титаната свинца ($PbTiO_3$, $\gamma = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$). Последний материал удобен тем, что сравнительно легко может быть получен в виде пленки. Ориентируясь на приведенные цифры коэффициентов пироэлектрического эффекта легко показать, что сенсоры на его основе должны обладать высокой чувствительностью к изменениям температуры. И это действительно так: пироэлектрические датчики способны реагировать на вариации температуры порядка миллионных долей градуса.

В то же время при создании и использовании таких устройств возникают определенные трудности. В частности, все пироэлектрики обладают выраженным пьезоэлектрическим эффектом и поэтому реагируют на любую деформацию, связанную с механическими воздействиями (вибрации, удары). Поэтому, в датчиках обычно используют два чувствительных элемента, включенных последовательно, для компенсации зарядов, вызванных механическими нагрузками. При этом один из элементов покрывают красителем, повышающим поглощательную способность (он реагирует как на температуру, так и на механические воздействия), а второй экранируют от излучения и снабжает отражающим покрытием (он реагирует только на механические воздействия, и возникающий при этом заряд компенсирует паразитный сигнал от первого элемента). Для повышения поглощательной способности первого элемента можно использовать нихром, который одновременно является электродом.

Существует достаточно большое количество вариантов конструкций пироэлектрических сенсоров, в том числе и в микроэлектронной реализации. На рис. 11.17 представлена структура одиночного датчика в виде конденсатора, сформированного на тонкой мембране, которая получена анизотропным травлением кремния.

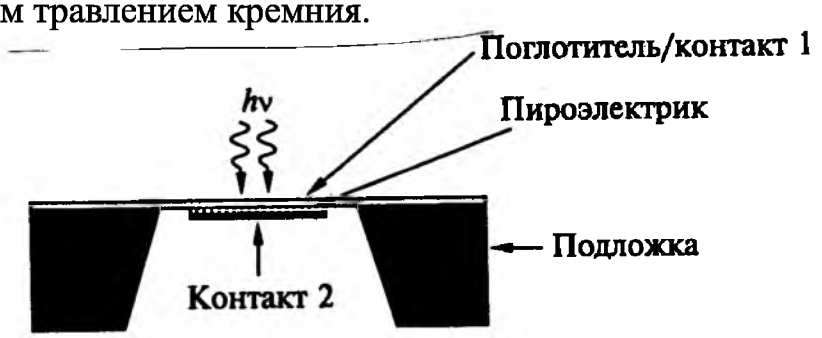


Рис.11.17. Пироэлектрический сенсор температуры

Как отмечалось, чаще используют сдвоенные структуры сенсоров. Типичная конструкция датчика на основе сдвоенных сенсоров рассмотрена в и приведена на рис. 11.18.

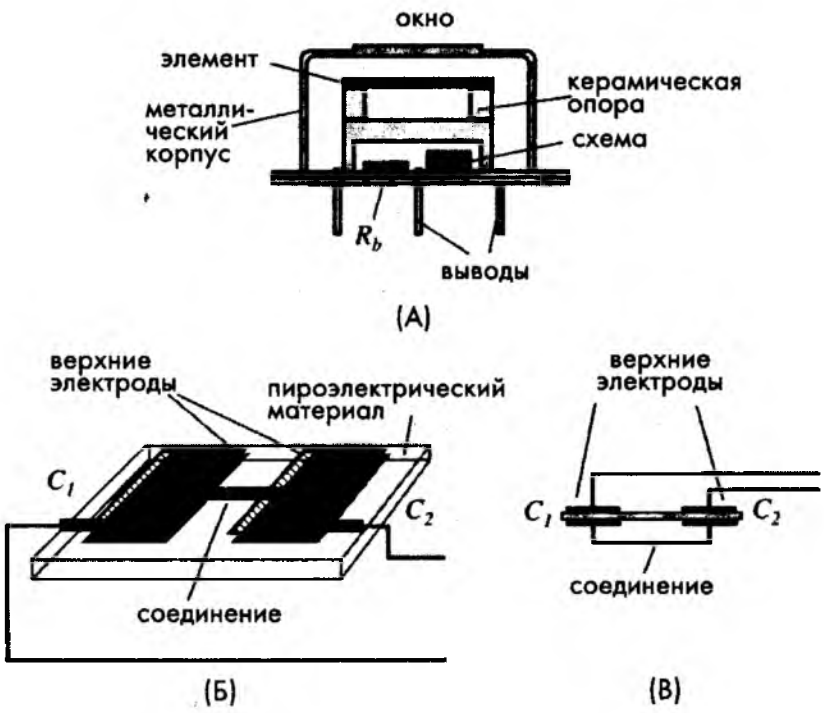


Рис.11.18 . Двойной пироэлектрический датчик:
А – конструкция датчика в металлическом корпусе, Б – металлические электроды нанесены на противоположные стороны материала, В – эквивалентная схема двойного элемента

Они размещаются в металлических корпусах, что обеспечивает хорошее экранирование и защиту от окружающей среды. Окошко, пропускающее излучение, обычно изготавливается из кремния. Внутреннее пространство корпуса часто заполняется сухим воздухом или азотом. Обычно используют два чувствительных элемента, соединенных последовательно или параллельно навстречу друг другу, для лучшей компенсации быстрых изменений тепловых потоков и механических нагрузок, возникающих из-за акустических шумов и вибраций. Иногда один из элементов покрывается красителем для увеличения поглощающей способности, а второй экранируется от излучений, а для улучшения его отражающей способности на него наносится слой золота. Иногда электроды пироэлектрического чувствительного элемента изготавливается из нихрома. Нихром обладает высокой излучающей (поглощающей) способностью, и поэтому электроды из него выполняют сразу две функции: поглощают тепловое излучение и собирают электрические заряды.

Двойной элемент часто изготавливается на одной подложке из кристаллического материала (рис.11.18,Б). Металлические электроды, нанесенные с двух сторон материала, формируют два последовательно соединенных конденсатора C_1 и C_2. На рис.11.18, В показана

эквивалентная схема двойного пироэлектрического элемента. Такая конструкция дает возможность хорошо отбалансировать оба элемента и, следовательно, устранить все синфазные помехи. Следует отметить, что чувствительные зоны расположены только в пространстве между электродами, остальная часть пироэлектрического материала, непокрытая электродами, в генерации полезного сигнала не участвует. Пироэлектрические детекторы очень чувствительны к механическим нагрузкам и вибрациям, что значительно осложняет их проектирование. В дополнение к этому, все пироэлектрики также являются и пьезоэлектриками, поэтому для них характерен так называемый микрофонный шум. Для борьбы с такими помехами кристаллический элемент отделяют от внешних частей детектора (особенно важно обеспечить отсутствие механических связей между пироэлектриком и металлическим корпусом, а также между ним и выводами).

В настоящее время на основе пироэлектрических сенсоров строятся тепловизоры, т.е. устройства визуализации изображения, которые несут ИК лучи. В этом случае используются десятки и сотни сенсоров, объединенных в матрицу, расположенную в фокальной плоскости объектива, формирующего тепловое изображение (матрица фокальной плоскости – МФП). Естественно, что наибольший эффект в этом случае можно получить, используя для конструирования и изготовления таких матриц приемы интегральной микроэлектроники. Уже существуют интегральные матрицы, в которых совмещены тепловые сенсоры с предусилителями вырабатываемого ими сигнала, выполненные на МОП-транзисторах. Примерная структура такой ячейки приведена на рис. 11.19.

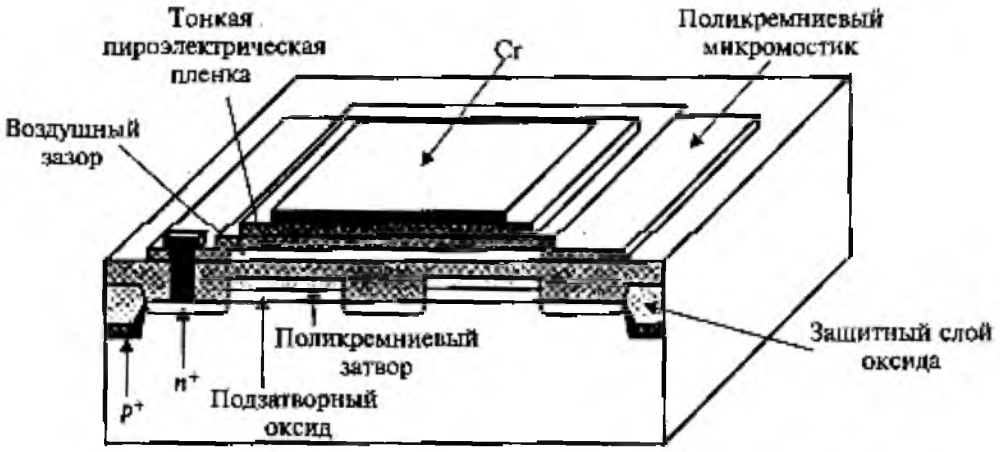


Рис.11.19. Схематическое поперечное сечение монолитного пироэлектрического элемента

11.6.6. Термопневматические детекторы

Один из самых старых и популярных способов измерения температуры основан на регистрации объемного расширения жидкости при её нагревании. Вместо жидкости можно использовать и газ, причём в

настоящее время стала возможной реализация таких устройств в микроисполнении на основе так называемой технологии поверхностной микрообработки.
Принцип действия термопневматического прибора, предназначенного для широкополосного детектирования ИК излучений и известного как ячейка Голея поясняет рис.11.20.

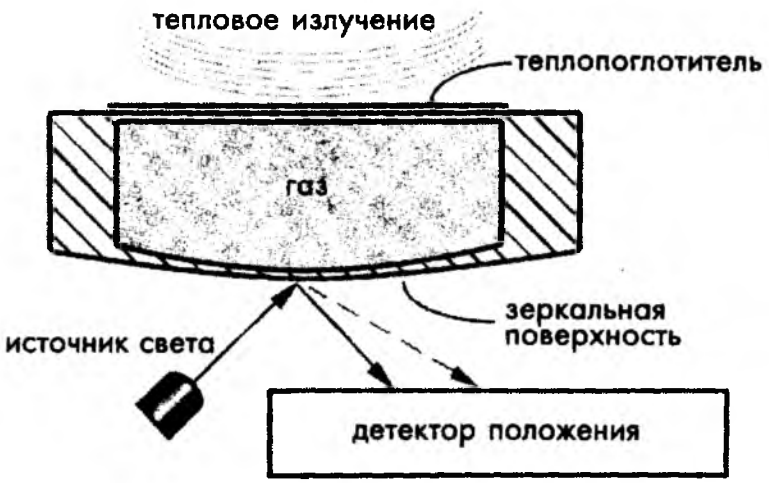


Рис.11. 20. Детектор излучений ИК диапазона на основе ячейки Голея

Ячейка Голея представляет собой заполненную газом миниатюрную замкнутую камеру с двумя мембранами: верхней и нижней. На верхнюю мембрану наносится слой, поглощающий тепло, а поверхность нижней мембраны делается зеркальной (например, покрывается Al).
Источник света направлен на зеркальную поверхность. Падающий луч света отражается от поверхности и попадает на детектор положения. На верхнюю мембрану действует исследуемое ИК излучение, поглощаемое ее покрытием. Поглощенное тепло приводит к повышению температуры мембраны, которая, в свою очередь, нагревает газ, заключенный в камере. Газ расширяется и его давление увеличивается. Увеличение внутрикамерного давления приводит к деформации нижней мембраны. Изменение кривизны зеркальной поверхности мембраны оказывает влияние на направление отраженного луча света, который теперь попадает на другое место чувствительной зоны датчика положения. Величина отклонения положения отраженного луча зависит от степени деформации мембраны и, следовательно, от интенсивности поглощенного излучения. Степень деформации мембраны иногда измеряется и другими методами, например, при помощи интерферометра.

12. АКТЮАТОРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ МСТ [5]

Актюатор – это исполнительное устройство, которое преобразовывает тепловую, электрическую и магнитную энергии в механическое движение. Актюаторные компоненты имеют размеры от нескольких квадратных микрометров до одного квадратного сантиметра.

Актюаторные компоненты микросистемной техники в настоящее время применяются почти во всех областях человеческой деятельности: в авиакосмической промышленности, в автомобилестроении, в робототехнике, в медицине и т.д.

12.1. Интегральные микромеханические ключи

Интегральные микромеханические ключи находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах в качестве логических элементов. В настоящее время разработано достаточно большое количество микромеханических ключей, изготавливаемых из алюминия и золота, что сужает области их применения, т.к. металлические ключи более чувствительны к ускорению, чем микромеханические, выполненные из полупроводниковых материалов. Кроме того, при изготовлении интегральных микромеханических ключей из металла необходимо использовать один жертвенный слой, что затрудняет их изготовление в одном технологическом процессе совместно с другими элементами МСТ и ИС.

Микромеханические ключи, в которых в качестве структурного материала используется поликремний, изготавливаются с помощью технологии поверхностной микрообработки, что в свою очередь позволит интегрально изготавливать их в одном технологическом процессе совместно с другими элементами МСТ и ИС.

Принцип действия микромеханических ключей может быть электростатическим, магнитным или электромагнитным. Каждый из перечисленных принципов имеет свои достоинства и недостатки. Электромагнитная активация микромеханических ключей позволяет снизить напряжения срабатывания, но при высоком потреблении тока. Преимущество микромеханических ключей с электростатической активацией заключается в отсутствии потребления тока, а недостаток – в высоком напряжении срабатывания (5-100 В). Ключи с таким видом активации применяются в микросистемах, для которых важным фактором является низкая потребляемая мощность.

Большинство микромеханических ключей с электростатической активацией, в качестве подвижного элемента, содержат консольную балку. Область, к которой непосредственно присоединена консольная балка, принято называть <u>истоком.</u> Область, расположенная под консольной балкой и используемая для создания электростатической силы, называется

затвором. Область, с которой происходит механический контакт консольной балки при ее отклонении от первоначального положения, за счет действия электростатической силы, называется областью стока.

На рис.12 .1 приведена структура интегрального микромеханического ключа.

Микромеханический ключ может работать в инверсном и нормальном режимах (рис.12.2).

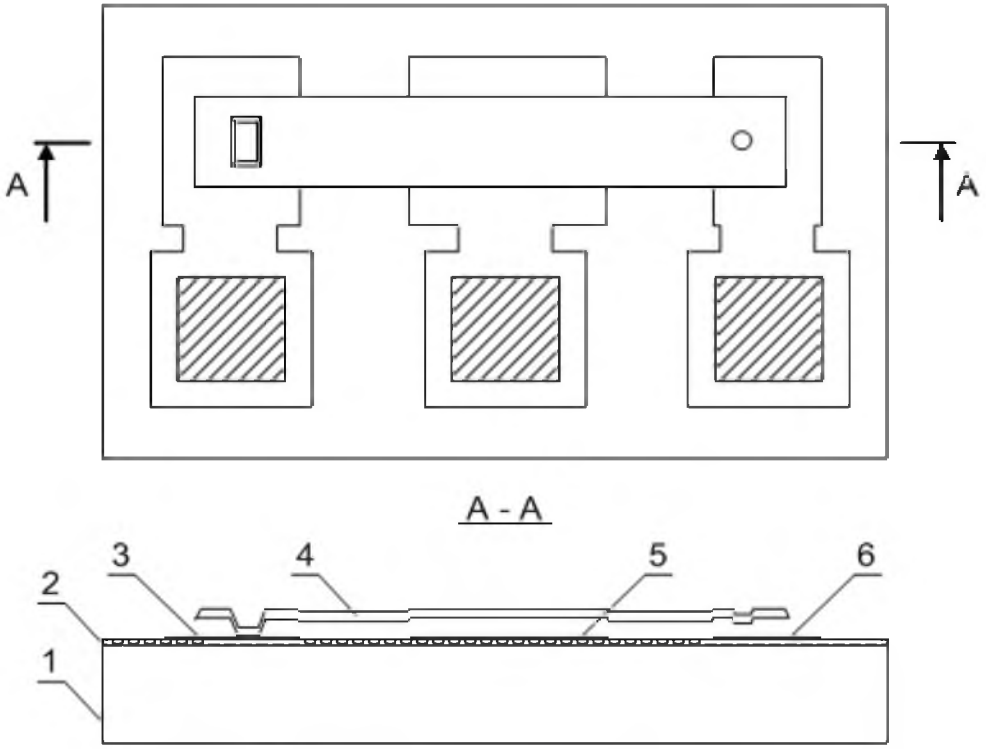


Рис.12.1. Структура интегрального микромеханического ключа:
1 –подложка; 2 – диэлектрик; 3 –область истока; 4 – консольная балка; 5 – область затвора; 6 – область стока

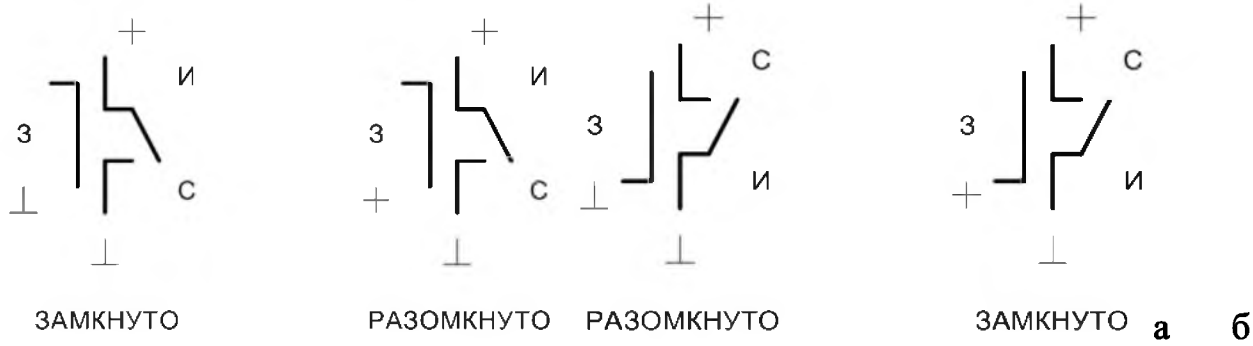


Рис. 12.2. Условные обозначения микромеханического ключа:
а – инверсный режим работы;б – нормальный режим работы

При инверсном режиме работы область истока подключена к шине питания, а область стока – к шине нулевого потенциала. При отсутствии отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой, соединенной с областью истока, возникает электростатическая сила, которая притягивает консольную балку к затвору. Это приводит к возникновению

электрического контакта между истоком и стоком. Интегральный микромеханический ключ замкнут. При подаче отклоняющего напряжения между затвором и консольной балкой, последняя возвращается в исходное положение. Микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии.

При нормальном режиме работы область стока подключена к шине питания, а область истока – к шине нулевого потенциала. В отсутствие отклоняющего напряжения между областью затвора и консольной балкой, последняя находится в исходном положении и электрический контакт исток-сток отсутствует. Интегральный микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии. При подаче отклоняющего напряжения на область затвора относительно консольной балки между ними возникает электростатическая сила.

На рис.12.3. показаны зависимости электростатической силы от величины зазора между консольной балкой и областью затвора при различных значениях отклоняющего напряжения (сплошная линия) и силы упругости от величины зазора (пунктирная линия).

Когда приложенное напряжение достигает порогового значения включения, консольная балка притягивается к нижним электродам. Это приводит к возникновению электрического контакта между истоком и стоком. Микромеханический ключ находится в замкнутом состоянии. При уменьшении отклоняющего напряжения до некоторого порогового значения выключения консольная балка возвращается в первоначальное положение. Микромеханический ключ находится в разомкнутом состоянии.

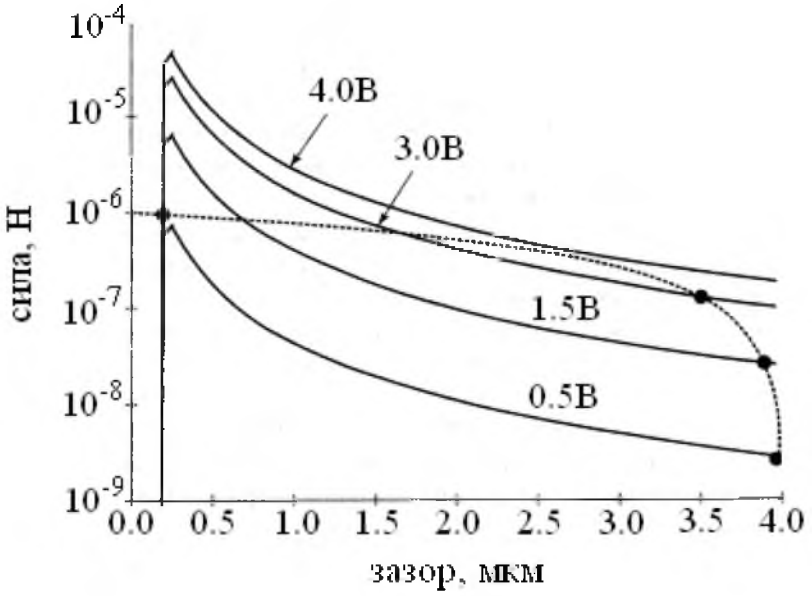


Рис.12.3. Зависимости электростатической силы и силы упругости от величины зазора

(при толщине балки 0,5 мкм и площади области затвора $4*10^4$ мкм^2)

Микромеханические ключи с электростатической активацией обладают

гистерезисом. Это связано с потерей стабильности механических структур, вызванное неконтролируемым электростатическим притяжением. Если конструкция микромеханического ключа позволяет балке переходить точку потери стабильности, то ключ замыкается и не размыкается до тех пор, пока отклоняющее напряжение не станет ниже порогового напряжения выключения, т.е. появляется гистерезис.

На рис.12.4 показан график изменения зазора в зависимости от отклоняющего напряжения.

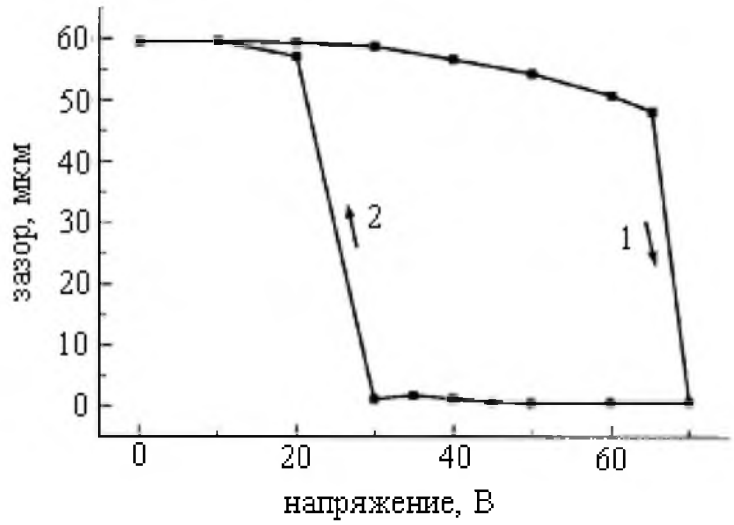


Рис.12.4. Зависимость изменения зазора от приложенного напряжения (при толщине балки 0,5 мкм и площади области затвора $4 \cdot 10^4$ мкм^2): 1– переход из разомкнутого состояния в замкнутое;2– переход из замкнутого состояния в разомкнутое;

Избавиться от гистерезиса можно только, если микромеханический ключ будет замыкаться до того как консольная балка достигнет точки потери стабильности. При этом пороговые напряжения включения и выключения будут одинаковыми.

В отсутствие отклоняющего напряжения микромеханический ключ обладает высоким импедансом из-за воздушного зазора. Поскольку микромеханические ключи имеют емкостную природу, то для работы им не требуется непрерывная подача постоянного тока. Для переключения ключа в замкнутое или разомкнутое состояние необходима электростатическая энергия, равная $0{,}5CU^2$. Таким образом, переключение микромеханического ключа определяется емкостью и прикладываемым напряжением.

При проектировании микромеханических ключей необходимо учитывать такой эффект как прилипание консольной балки к поверхности кристалла. В основе данного эффекта лежит действие микроскопических сил на поверхности контактов и, следовательно, этот эффект в сильной степени зависит от морфологии поверхности контактов. Проблема залипания подвижных частей особенно остро стоит для ключей с металлическими контактами.

Некоторые параметры микромеханических ключей

При разработке микромеханических ключей существенными являются следующие параметры:

– длительность переходных процессов;
– время переключения;
– согласование входных/выходных цепей; – ширина полосы пропускания;
– последовательное сопротивление; – напряжение срабатывания;
– срок службы;
– резонансная частота;
– согласование по амплитуде и фазе.

Длительность переходных процессов зависит от скорости изменения состояния ключа. Для операции включения она определяется как время нарастания выходного сигнала с 10% до 90% от его значения, а для операции выключения – как время спада выходного сигнала с уровня 90% до уровня 10%. Другими словами, длительность переходных процессов – это время, необходимое для изменения выходного напряжения на 1 дБ от состояния срабатывания. Для простого механического ключа это время определяется от момента отрыва подвижного контакта от одного стационарного контакта до момента его соприкосновения с другим стационарным контактом.

Время переключения также определяется скоростью переключения ключа из одного состояния в другое. Однако здесь при операции включения это время определяется от момента достижения управляющим напряжением уровня 50% до момента перехода выходным сигналом уровня 90%. Аналогично, при выключении ключа время измеряется до момента достижения сигналом 10% уровня от первоначального значения. Следовательно, время переключения характеризует реакцию ключа на изменение управляющего напряжения. К времени, требуемому для механического переключения, или времени переходных процессов могут прибавляться различные дополнительные составляющие, например, время задержки или нарастания управляющего сигнала. Механические ключи имеют меньшее быстродействие, чем электронные, их скорость переключения лежит в диапазоне от микросекунд до миллисекунд в зависимости от материала и конструкции.

Переходные процессы при коммутации ключа – это экспоненциально убывающие всплески напряжений во входных и/или выходных цепях ключа, вызванные изменением управляющего сигнала. Переходные процессы коммутации являются важной характеристикой работы ключей. В процессе переключения возникают и электромеханические, и электромагнитные переходные процессы. Электромеханические переходные процессы возникают из-за механического перемещения элементов ключа, а электромагнитные – из-за взаимодействия электрических и магнитных полей электрических компонентов системы.

Под согласованием входных/выходных цепей подразумевается согласование их импедансов, что часто является для ключей непростой задачей. Входные и

выходные цепи ключа должны быть согласованы как во включенном, так и отключенном состояниях. Это необходимо для снижения влияния ключей на работу всей системы. Неправильное согласование иногда приводит к нежелательным переотражениям сигналов внутри цепи, которые могут стать причиной выхода системы из строя. Хотя на практике идеального согласования удается достичь очень редко, все же необходимо стремиться удерживать переотражения сигналов в пределах допустимых уровней.

Ширина полосы пропускания является важной характеристикой ключей. Как правило, ключи не имеют нижнего предела частоты рабочего диапазона, а имеют только верхний предел. Для электромеханических ключей это объясняется потерями, обусловленными сопротивлениями и паразитными связями, ограничивающими их быстродействие.

Развязка входа от выхода определяется в момент отсутствия передачи сигнала. Ее мерой также является коэффициент между входными и выходными выводами переключателя в выключенном состоянии, т.е. когда нет передачи сигнала. Большое значение этого коэффициента, измеряемое в дБ, соответствует очень маленькой связи между входом и выходом переключающего устройства. Желательно, чтобы у ключей этот коэффициент был максимальным. В микросистемах значение этого коэффициента может уменьшиться из-за возникновения связи между механическими частями и линиями передач, что вызывает появление токов утечки.

Последовательное сопротивление. На практике ключ часто включается последовательно с линией передачи сигнала. Любое сопротивление, вносимое ключом во время передачи сигнала (во включенном состоянии), вызывает снижение уровня сигнала. На низких частотах такое влияние ключа можно выразить в виде последовательного сопротивления, играющего роль во время прохождения сигнала.

Напряжение срабатывания. Для всех ключей, работающих в автоматических системах, необходим сигнал управления, координирующий их состояние (вкл/выкл). Уровень напряжения таких сигналов для разных ключей может сильно различаться. В современных электромеханических ключах это напряжение желательно снизить до уровня, на котором работают остальные компоненты схемы.

Срок службы для механических переключающих устройств, в состав которых входят механические части, является достаточно важной характеристикой. Поломки таких частей, вызванные усталостью материала или неблагоприятными окружающими условиями, снижают срок службы всей системы.

Резонансная частота. Все движущиеся части механических ключей имеют свою собственную резонансную частоту, которую можно выразить через их массу и коэффициент упругости. На этих частотах потенциальная и кинетическая энергии входят в резонанс, что ограничивает максимальную скорость переключения, но никак не влияет на частоту передаваемых сигналов.

Согласование по фазе и амплитуде является важной характеристикой многоканальных ключей, поскольку она определяется конструкцией всего устройства и параметрами отдельных каналов: их длиной и потерями в них. Поэтому, как правило, для каждого канала определяются свои фазовые и амплитудные характеристики.

Несмотря на то, что многие из микромеханических ключей обладают отличными характеристиками – низкими вносимыми потерями и высоким коэффициентом развязки обычно вплоть до частоты нескольких сотен МГц, они имеют очень низкое быстродействие. Обычно время переключения таких ключей составляет 2-50 мс, и они рассчитаны только на несколько миллионов переключений. Это обусловлено тем, что электромеханические ключи осуществляют реальный разрыв и соединение линии передач внутри устройства. Максимальное быстродействие таких ключей (их скорость переключения) определяется механической резонансной частотой подвижных частей.

12.2. Интегральные микрозеркала

Интегральные микрозеркала с электростатической активацией находят широкое применение в миниатюрных робототехнических системах (в качестве оптических ключей) и системах анализа и обработки изображений (для отклонения лазерного луча и/или светового потока).

На рис.12.5 приведена структура микрозеркала, изготовленного с помощью технологии объемной микрообработки.

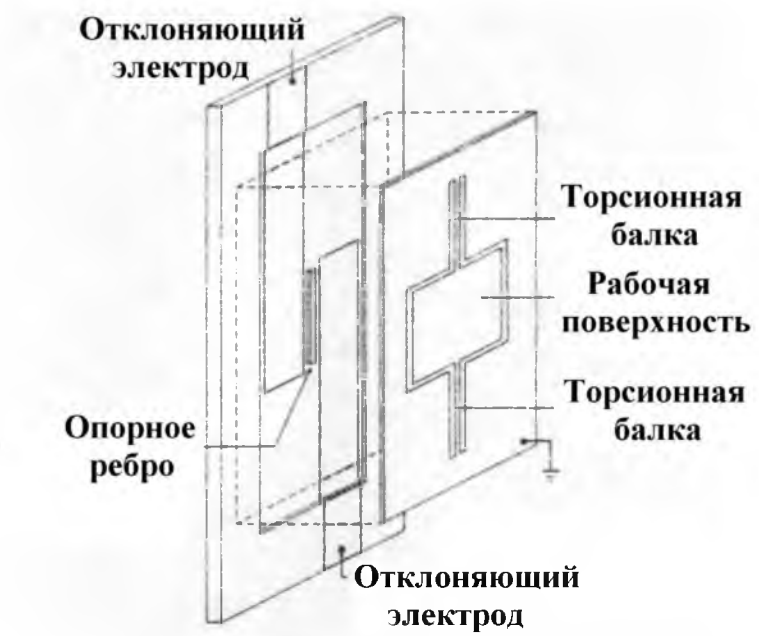


Рис.12.5. Микрозеркало с электростатической активацией, изготовленное с использованием технологии объемной микрообработки

Для отклонения структуры микрозеркала используются два электростатических актюатора, создаваемых структурой микрозеркала и

двумя электродами, расположенными под структурой микрозеркала. Структуру микрозеркала заземляют и на отклоняющие электроды попеременно подают напряжение. Движение микрозеркала осуществляется за счет кручения торсионных балок.

Изготовление данного микрозеркала с помощью технологии объемной микрообработки затрудняет его использование в интегральных микрооптико- электромеханических системах.

На рис.12.6 приведена структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией, изготовленного с использованием MUMPs-технологии.

Отклонение структуры микрозеркала осуществляется с помощью электростатического актюатора, создаваемого пластинами, выполненными из слоя поликремния (poly0) и второго структурного слоя (poly2).

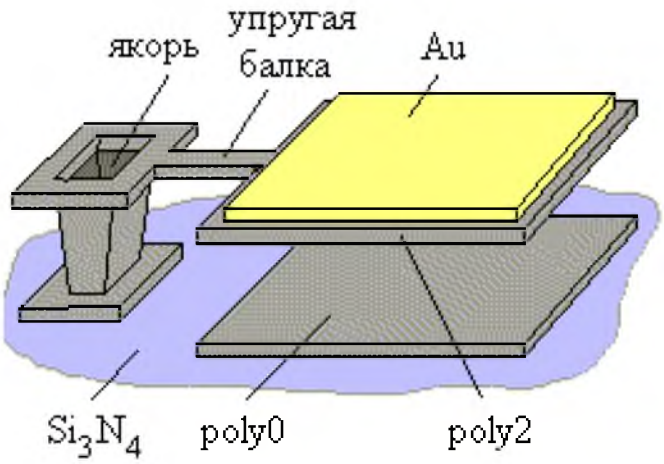


Рис.12.6. Интегральное микрозеркало с электростатической активацией, изготовленное с использованием MUMPs-технологии

Структуру микрозеркала заземляют (poly2) и на отклоняющий электрод (poly0) подают напряжение. Между структурой микрозеркала и отклоняющим электродом возникает электростатическая сила, которая отклоняет микрозеркало. Движение микрозеркала осуществляется за счет изгиба упругой консольной балки.

Недостатками данной структуры являются отсутствие функциональной возможности отклонения микрозеркала в обе стороны и потеря площади кристалла, связанная с необходимостью размещения якоря и упругой консольной балки микрозеркала.

На рис.12.7 приведена структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией, изготавливаемого по технологии поверхностной микрообработки.

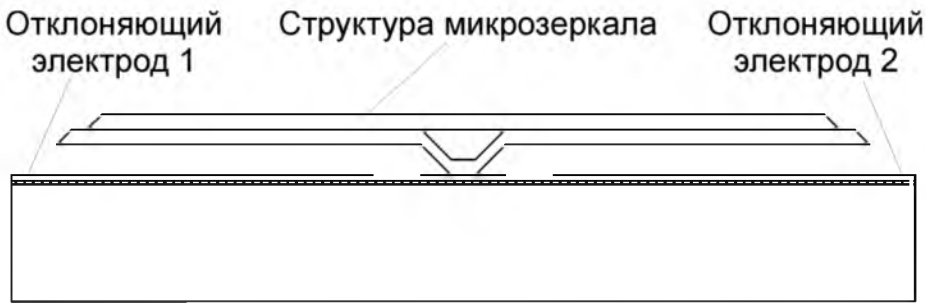


Рис. 12.7. Структура интегрального микрозеркала с электростатической активацией

При подаче напряжения на один из отклоняющих электродов между ним и структурой микрозеркала возникает электростатическая сила, которая притягивает микрозеркало к отклоняющему электроду. Когда отклоняющее напряжение убирается, микрозеркало под действием силы упругости возвращается в исходное положение.

Электростатическая сила F_{ai}, возникающая между отклоняющим электродом и структурой микрозеркала, определяется следующим выражением

$$F_{ai} = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L_{ai} \cdot W_{ai}}{d^2} U_{ai}^2, \qquad (12.1)$$

где L_{ai}, W_{ai} – длина и ширина части отклоняющего электрода, расположенной под структурой микрозеркала; U_{ai} – отклоняющее напряжение. В выражении (3.23) индекс i принимает значения 1, 2 для соответствующих отклоняющих электродов.

Под действием силы F_{ai} структура микрозеркала притягивается к отклоняющему электроду. По закону Гука, силе F_{ai}, действующей на микрозеркало, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю электростатической силе и противоположная по направлению:

$$F_{ai} = -F_{\text{упр}} = 2 \cdot k \cdot \gamma \qquad (12.2)$$

Жесткость пластин крепления определяется следующим выражением:

$$k = \frac{E \cdot J}{l_K^3} \qquad (12.3)$$

где l_K – длина пластин крепления.

Под действием электростатической силы F_{ai} пластины крепления будут изгибаться по окружностям с центром в точке 0, радиусом изгиба R и углом изгиба (рис. 12.8).

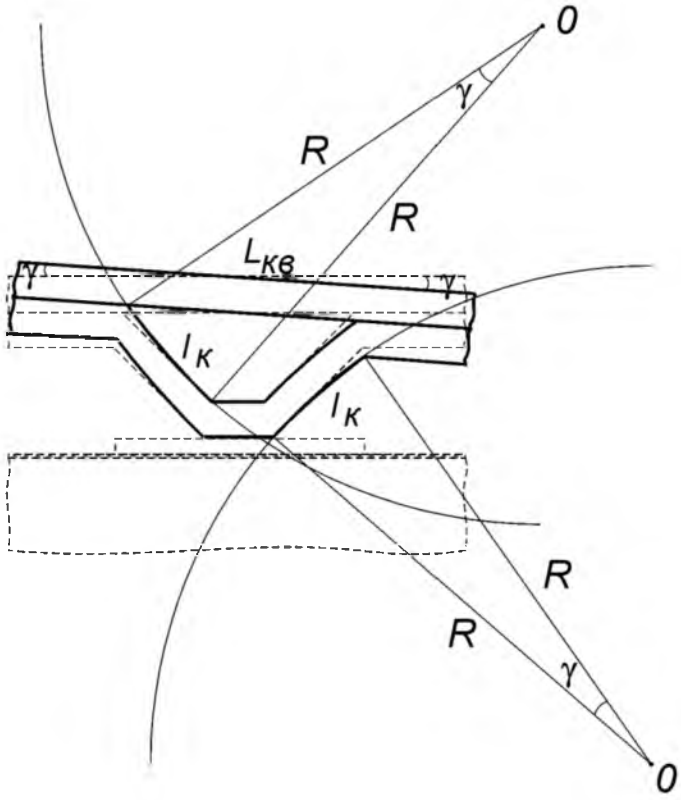


Рис.12.8. Модель движения структуры микрозеркала

Угол изгиба пластин крепления определяется выражением:

$$\gamma = \frac{1}{4}\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L_{ai} \cdot W_{ai}}{k \cdot l_K \cdot (d - x_{ai})^2} U_{ai}^2$$

где x_{ai} – отклонение, совершаемое структурой микрозеркала в сторону отклоняющего электрода.

Напряжение замыкания, при котором произойдет контакт структуры микрозеркала и отклоняющего электрода, определяется следующим выражением:

$$U_{ai}^* = \frac{4}{3} \cdot \gamma_{max} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot l_K \cdot d}{3 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot W_{ai}}}. \qquad (12.4)$$

На рис.1 2 .9 представлена зависимость отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai}.

Срез зависимости отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai} (рис. 12.9) соответствует режиму замыкания структуры микрозеркала и отклоняющего электрода.

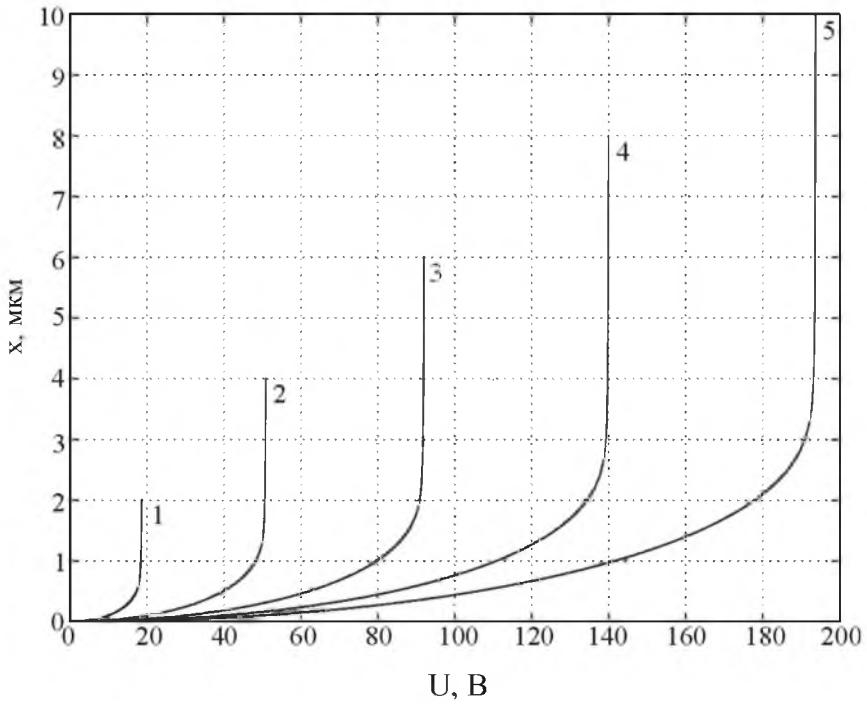


Рис. 12.9. Зависимость отклонения структуры микрозеркала x от отклоняющего напряжения U_{ai}:

1 – d =2 мкм; 2 – d =4 мкм; 3 – d =6 мкм; 4 – d =8 мкм; 5 – d =10 мкм

Как видно на рис.12.9, при достижении отклоняющим напряжением значения напряжения замыкания возникает эффект неконтролируемого электростатического притяжения, т.е. микромеханическая структура теряет стабильность. Это возникает из-за преобладания электростатической силы над силой упругости.

На рис. 12.10 – 12.13 представлены структуры интегральных микрозеркал с электростатической активацией, получившие наиболее широкое распространение.

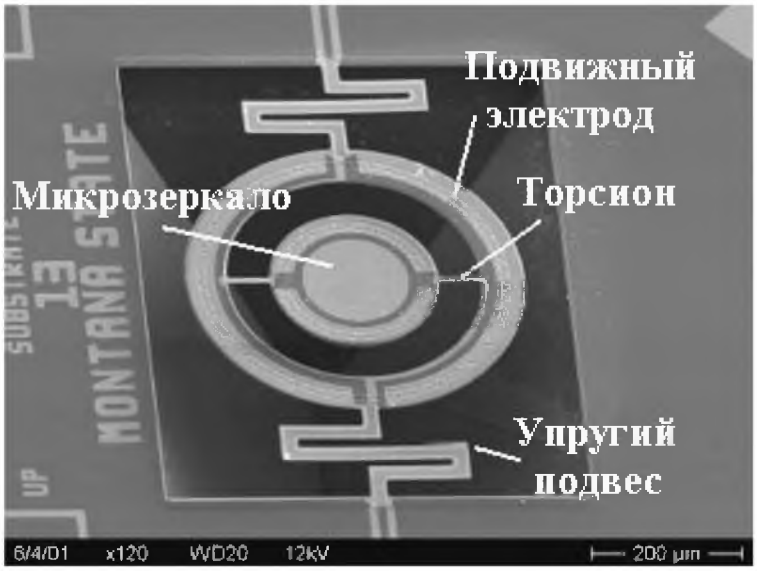


Рис. 12.10. Интегральное двухосное микрозеркало, выполненное по технологии объемной микрообработки

Рис. 12.11. Двухосное микрозеркало, выполненное с использованием операции микросборки

Для получения больших углов отклонения микрозеркал необходимо обеспечить большее расстояние между структурой микрозеркала и отклоняющих электродов. Использование технологии поверхностной микрообработки при изготовлении микрозеркал не позволяет получить больших зазоров, а применение объемной микрообработки снижает интеграцию элементов МСТ с ИС. Для устранения данного недостатка при изготовлении микрозеркал по технологиям поверхностной обработки применяется самосборка с использованием электростатических двигателей (ЭМД).

На рис.12.12 представлено интегральное двуосное микрозеркало, изготавливаемое с использованием технологии самосборки с помощью электростатических микродвигателей.

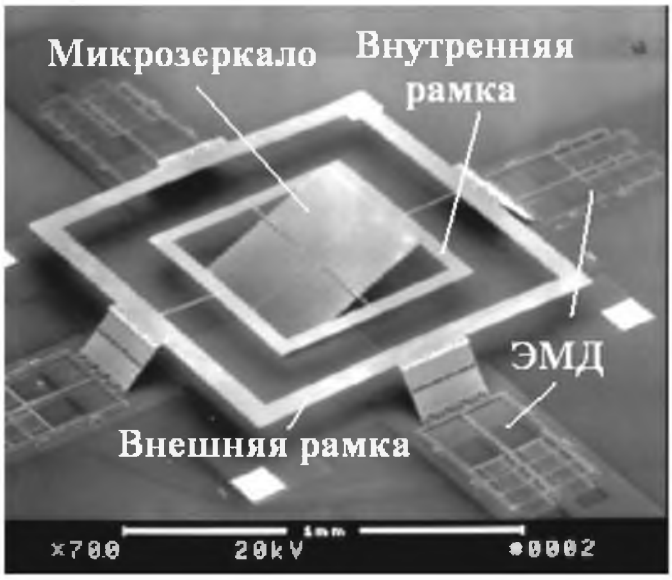


Рис.12.12. Интегральное микрозеркало с ЭМД

Данное микромеханическое устройство изготавливается в рамках MUMPs-технологии.

Для уменьшения энергопотребления электростатических актюаторов, входящих в состав микрозеркал, целесообразно использовать гребенчатые структуры, обладающие большей емкостью по сравнению с плоскими.

На рис. 1 2 .13 представлено интегральное микромеханическое зеркало с гребенчатыми электростатическими актюаторами.

При подаче отклоняющего напряжения на подвижный электрод, относительно неподвижного, на упругий подвес начинает действовать крутящий момент силы, определяемый выражением

$$M = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\theta}, \qquad (12.5)$$

где U – напряжение; $\frac{dC}{d\theta}$ – изменение емкости между подвижным и неподвижным электродами по мере отклонения микрозеркала от первоначального положения.Как интегральное микрозеркало отклоняется от своего первоначального положения показано на (рис.12.14).

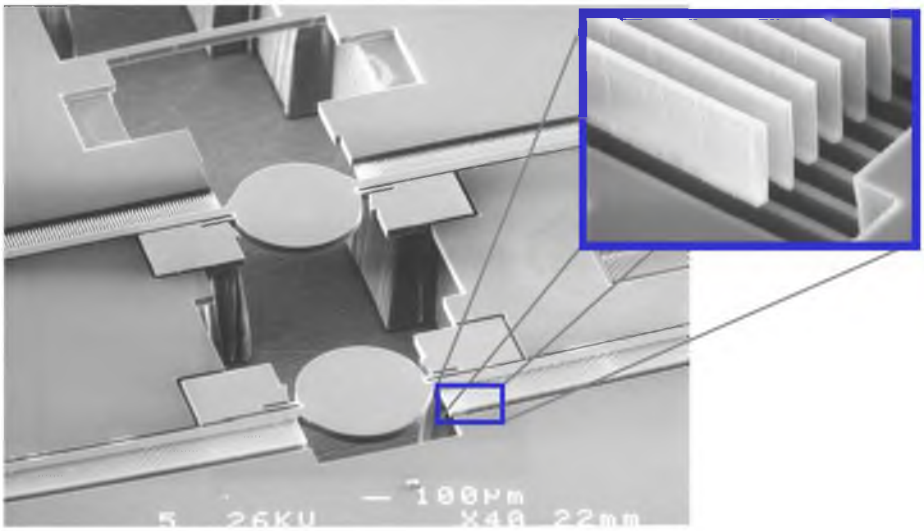


Рис. 12.13. Интегральное микромеханическое зеркало с гребенчатыми актюаторами

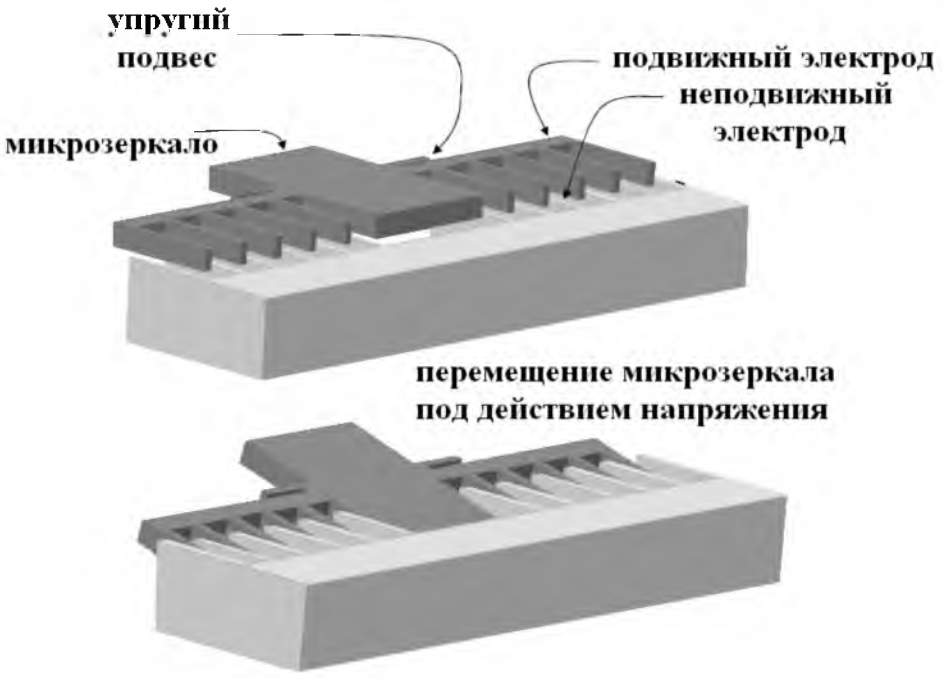


Рис. 12.14. Перемещение интегрального микромеханического зеркала под действием отклоняющего напряжения

Если толщина пальцев подвижного и неподвижного электродов превышает величину зазора между ними, то крутящий момент может быть определен без учета краевых полей. В этом случае величина емкости между подвижным и неподвижным электродами будет пропорциональна площади перекрытия электродов (рис. 12.15):

$$C = 2\frac{N \cdot \varepsilon_0}{g} S\ \theta\ , \qquad (12.6)$$

где N – количество пальцев на подвижном электроде; g – зазор между пальцами подвижного и неподвижного электродов; θ – угол поворота микрозеркала.

Изменение площади перекрытия электродов является нелинейной функцией от угла поворота микрозеркала и будет увеличиваться до тех пор, пока верх пальцев подвижного электрода не поравняется с верхом пальцев неподвижного электрода (рис.12.15).

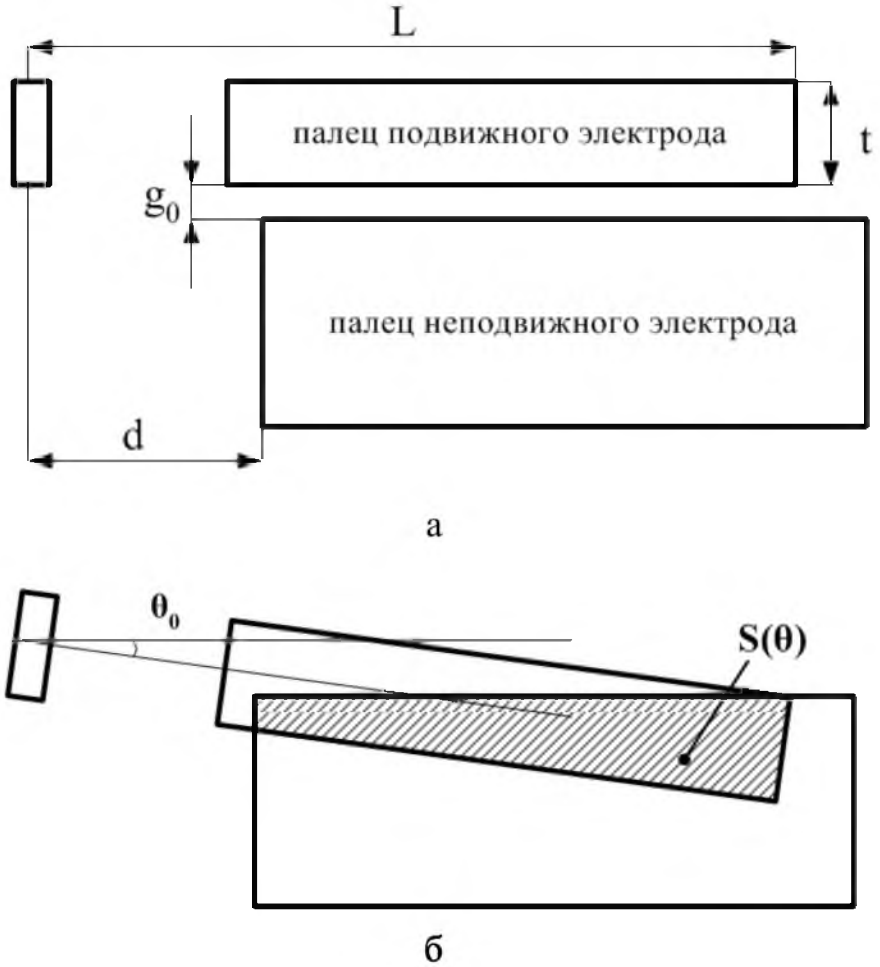


Рис. 12.15. Модель движения электростатического гребенчатого актюатора

В этом случае угол поворота достигнет некоторого значения ($\theta=\theta_0$) и максимальный крутящий момент будет определяться выражением:

$$M_{max} = \frac{U_{max}^2 \cdot N \cdot \varepsilon_0 \cdot \ L^2 - a^2}{2g}, \qquad (12.7)$$

где L – расстояние от оси вращения подвижного электрода до его края; d – расстояние от оси вращения до края неподвижного электрода.

Максимальный угол поворота будет определяться следующим выражением:

$$\theta_0 = sin^{-1} \ \frac{t + g_0}{L} \ , \qquad (12.8)$$

где t – толщина пальцев подвижного электрода; g_0 расстояние от верхнего края неподвижного электрода до нижнего края подвижного электрода.

На рис. 12.16 представлена зависимость изменения $\frac{dC}{d\theta}$ от длины пальцев подвижного электрода.

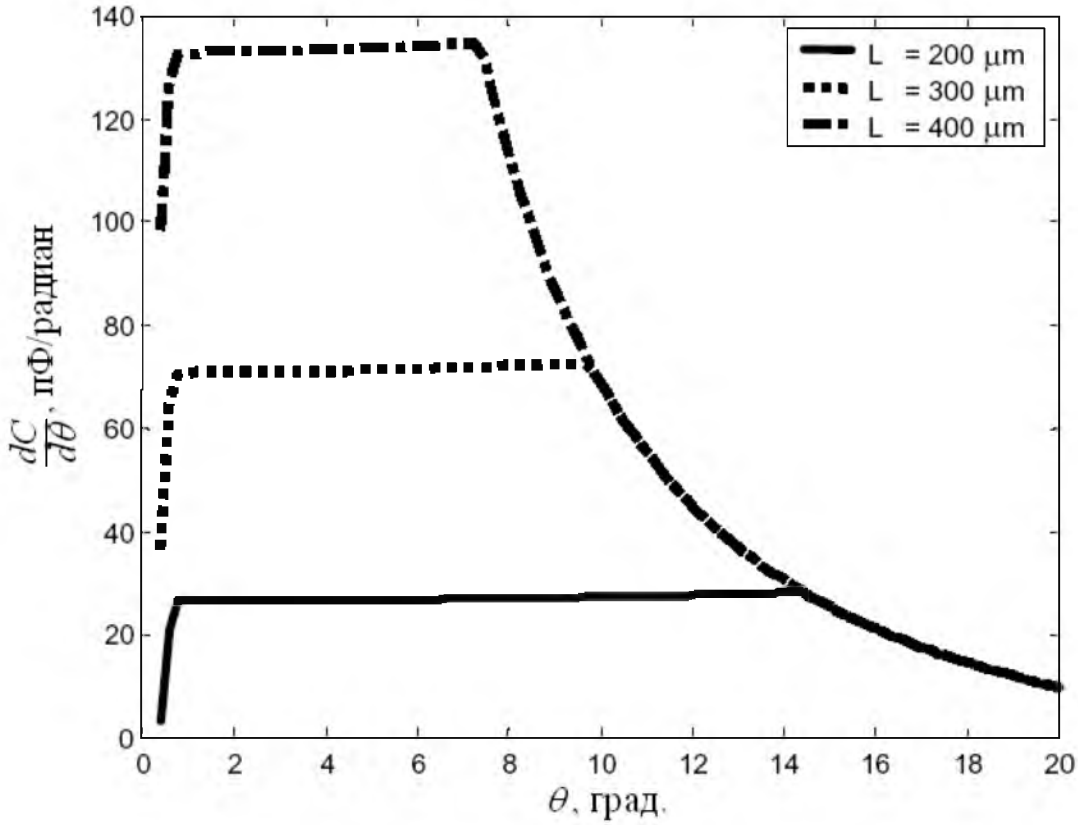


Рис. 12.16. Изменения $\frac{dC}{d\theta}$ от длины пальцев подвижного электрода

Изменение угла поворота от приложенного напряжения описывается трансцендентным уравнением:

$$\theta\ U = \frac{M(\theta, U)}{k_\theta} = \frac{U^2}{2 \cdot k_\theta} \cdot \frac{dC\ \theta}{d\theta}, \qquad (12.10)$$

где k_θ – угловая жесткость упругого подвеса микрозеркала, определяемая с помощью следующего выражения:

$$k_\theta = \frac{M_{max}}{\theta_0} = \frac{U_{max}^2 \cdot N \cdot \varepsilon_0 \ \frac{(t - g_0)^2}{sin^2\theta_0} - d^2}{2 \cdot g \cdot \theta_0}. \qquad (12.11)$$

Резонансная частота определяется следующим выражением:

$$\omega_r = \frac{3 \cdot U_{max}^2 \cdot N \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{(t - g_0)^2}{sin^2\theta_0} - d^2}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot t_m \cdot \omega_m \cdot (\lambda \cdot N_p)^3}, \qquad (12.12)$$

где ρ – плотность; t_m – толщина микрозеркала; w_m – ширина микрозеркала; λ – длина волны; N_p – оптическое разрешение микрозеркала, определяемая выражением:

$$N_p = \frac{8 \cdot \theta_0 \cdot L_m}{a \cdot \lambda}, \qquad (12.13)$$

где L_m – полудлина микрозеркала; a – фактор модели, определяемый экспериментально (для квадратного микрозеркала $a = 1$).

В настоящее время разработано большое количество интегральных

микрозеркал с гребенчатыми электростатическими актюаторами.
На рис.12.17. представлены структуры интегральных микрозеркал с гребенчатыми электростатическими актюаторами, получившие широкое распространение.

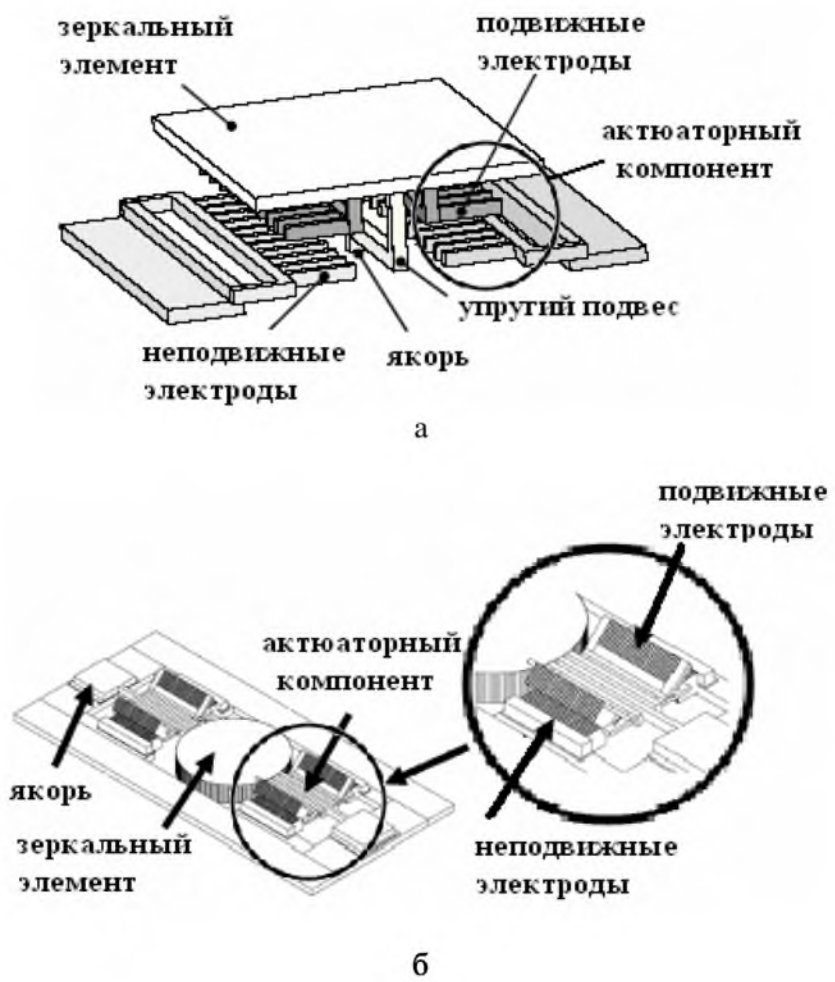


Рис. 12.17. Интегральные микрозеркала с гребенчатыми электростатическими актюаторами:
а – одноосное интегральное микромеханическое зеркало;
б – двухосное интегральное микромеханическое зеркало

13. Сенсоры угловых скоростей [3,5,8]

Механические величины можно разделить на три группы.
К первой группе относятся линейные и угловые размеры. Это геометрические параметры различных объектов, характеристики профилей и шероховатости поверхностей, расстояние, параметры износа трущихся частей и т.д.

Ко второй группе относятся различные силовые воздействия. Это механические напряжения в деталях и конструкциях, приложенная сила, крутящие моменты, давления жидкостей и газов, разности давлений и т.д.
Третью группу механических величин составляют параметры движения. Это перемещение объектов в пространстве, линейные и угловые скорости перемещения, ускорения.
Для создания сенсоров механических величин используют мембранные или балочные упругие элементы с различными топологическими параметрами.
Принцип действия сенсоров угловых скоростей (гироскопов) основан на оптических и пьезоэлектрических эффектах, эффекте изменения электрической емкости (упругие элементы являются обкладками конденсатора в емкостных сенсорах механических величин), эффекте изменения частоты колебаний (микромеханический резонатор).
Для изготовления сенсоров механических величин могут применяться как технологии объемной и поверхностной микрообработки, так и LIGA-технология.
В настоящее время наибольшее распространение получили волоконные оптические и микромеханические гироскопы.

13.1. Волоконный оптический гироскоп

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) – это оптикоэлектронный прибор, создание которого стало возможным лишь с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Прибор предназначен для измерения угловой скорости и углов поворота подвижного объекта. Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка.
Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием.
Сущность эффекта Саньяка заключается в следующем. Если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре фазовые набеги обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг оси, нормальной к плоскости контура, фазовые набеги лучей неодинаковы, а разность фаз лучей пропорциональна угловой скорости вращения контура.
Рассмотрим принцип работы волоконного оптического гироскопа на примере идеального кольцевого оптического контура (рис.13.1).

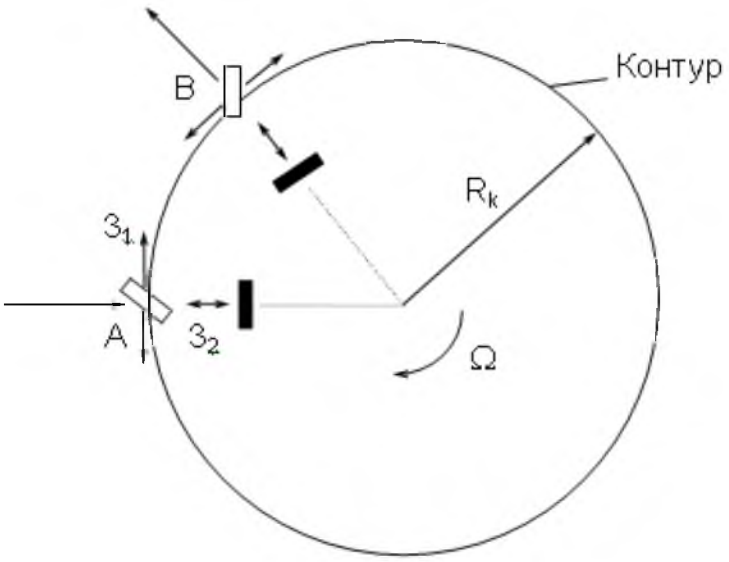


Рис.13.1 Эффект Саньяка в кольцевом оптическом контуре

Луч света приходит в точку А и с помощью зеркал З1 и З2 расщепляется на два луча, один из которых распространяется по часовой стрелке в контуре, а другой – против часовой стрелки. С помощью этих же зеркал после распространения в контуре лучи объединяются и направляются по одному пути. При неподвижном контуре пути прохождения лучей одинаковы и равны

$$2\pi R_K = c \cdot \tau, \qquad (13.1)$$

где R_k– радиус контура; c – скорость света; τ– время прохождения периметра контура лучом.

Оба луча приходят в точку А на расщепитель в фазе. Если контур вращается с постоянной угловой скоростью Ω, то луч, распространяющийся по часовой стрелке, прежде чем попадет на перемещающийся расщепитель, пройдет путь равный

$$2\pi R_K + R_K \Omega \tau_+ = c \cdot \tau_+, \qquad (13.2)$$

Это вызвано тем, что за время прохождения луча по замкнутому контуру расщепитель, находившийся ранее в точке А, уйдет в точку В. Для луча, распространяющегося против часовой стрелки, путь составит

$$2\pi R_K - R_K \Omega \tau_- = c \cdot \tau_-, \qquad (13.3)$$

Как видно , пути распространения противоположно бегущих лучей разные. Поскольку скорость света величина постоянная, это эквивалентно разным временам прохождения лучей, распространяющихся в противоположенных направлениях замкнутого вращающегося контура τ_- и τ_+. Разность времен распространения определяется выражением:

$$\Delta\tau = \tau_+ - \tau_- = \frac{4\pi R_k^2 \Omega}{c^2 - R_k^2 \Omega^2}, \qquad (13.4)$$

В приближении первого порядка можно выражение (13.4) записать в виде:

$$\Delta\tau = \frac{4\pi R_k^2 \Omega}{c^2}, \qquad (13.5)$$

Как видно из выражения (13.5), разность времени прохождения противоположно бегущими лучами одного и того же расстояния будет прямо пропорциональна угловой скорости объекта.

13.2. Микромеханические гироскопы

Все микромеханические гироскопы по своему принципу функционирования являются вибрационными.

Вибрационный гироскоп был впервые представлен в начале 50-х годов прошлого века для замены вращающихся гироскопов в космической технике. Вибрационные микромеханические гироскопы отличаются от других сложностью их функционирования. Информационный сигнал не формируется на выходе устройства без механического возбуждения инерционных масс. Для получения информационного сигнала, необходимо привести инерционные массы в колебательное линейное или угловое движение. Сигнал очень мал, поэтому требуется механическое усиление его в форме совмещения частот возбуждения колебаний и резонансной частоты колебаний инерционных масс гироскопа.

Различают два типа микромеханических гироскопов: камертонные и кардановые.

Принцип работы микромеханических гироскопов камертонного типа заключается в следующем (рис.13.2).

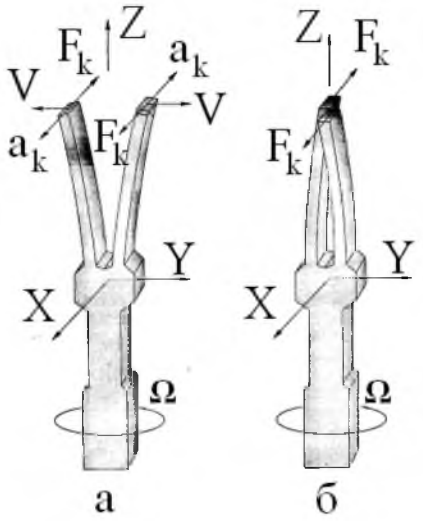


Рис.13.2. Принцип работы камертонных гироскопов

Инерционные массы гироскопа приводятся в противофазное колебательное движение в плоскости YZ. При этом они начинают перемещаться с некоторой скоростью V. При возникновении вращения основания гироскопа с некоторой угловой скоростью Ω вокруг оси Z возникает ускорение Кориолиса a_K, определяемое выражением (см. рис.13.2,а):

$$a_k = -2\ v \cdot \Omega$$

Направление вектора ускорения Кориолиса определяется правилом Н.Е. Жуковского: для определения направления вектора ускорения Кориолиса a_k необходимо вектор относительной скорости точки v повернуть в плоскости, перпендикулярной вектору угловой скорости Ω на 90°по направлению вращения устройства.

Сила инерции F_k, называемая силой Кориолиса, определяемая выражением (см. рис.13.2,б):

$$F_k = 2ma_k = 2 \cdot \ v \cdot \Omega \ m, \qquad (13.6)$$

где m – масса, будет направлена в противоположном направлении ускорению a_k. Таким образом, инерционные массы под действием силы F_k начинают совершать противофазные колебания в плоскости XZ. Амплитуда этих колебаний будет пропорциональна величине угловой скорости, а их фаза – направлению.

На рис.13.3 представлен микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности компании Draper Laboratory (США).

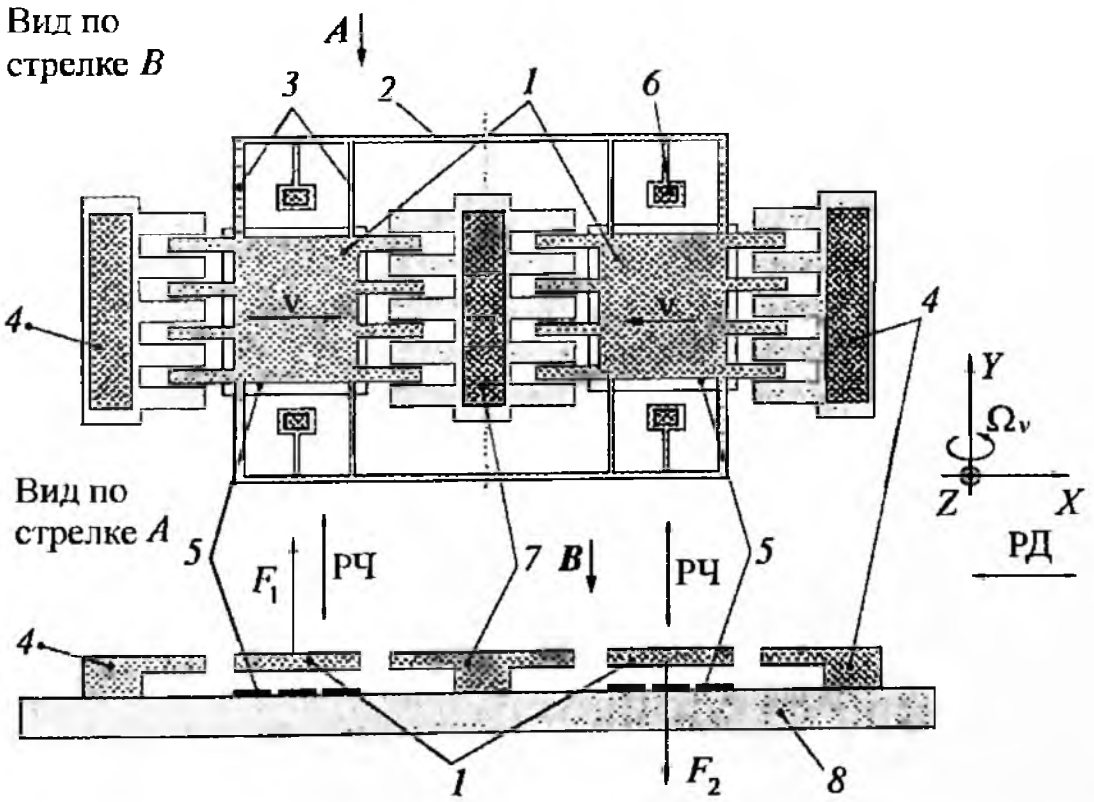


Рис.13.3. Микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности
1 – ИМ, 2 – базовый элемент конструкции подвеса, 3 – упругие элементы подвеса, 4 и 7 – электростатические гребенчатые приводы, 5 – электроды измерителей перемещений, 6 – анкер, 8 – подложка (основание)

Данный гироскоп относится к типу камертонных и позволяет измерять величину угловой скорости при вращении его основания вокруг оси Y, расположенной в плоскости подложки (см. рис.13.3). Регистрация амплитуды колебаний инерционных масс под действием сил Кориолиса производится с помощью емкостных преобразователей перемещений,

образуемых инерционными массами и неподвижными электродами, расположенными под ними.

Инерционные массы посредством трех электростатических приводов приводятся в колебательное движение в плоскости подложки. Векторы скоростей инерционных масс находятся в противофазе друг другу. При возникновении угловой скорости вокруг оси X под действием сил Кориолиса одна инерционная масса будет подниматься над плоскостью подложки, а другая опускаться. Таким образом, инерционные массы начинают совершать противофазные колебания перпендикулярно плоскости подложки. Емкостные преобразователи перемещений формируют выходной сигнал гироскопа, пропорциональный величине угловой скорости.

На рис.13.4 представлена структура одноосного микромеханического гироскопа.

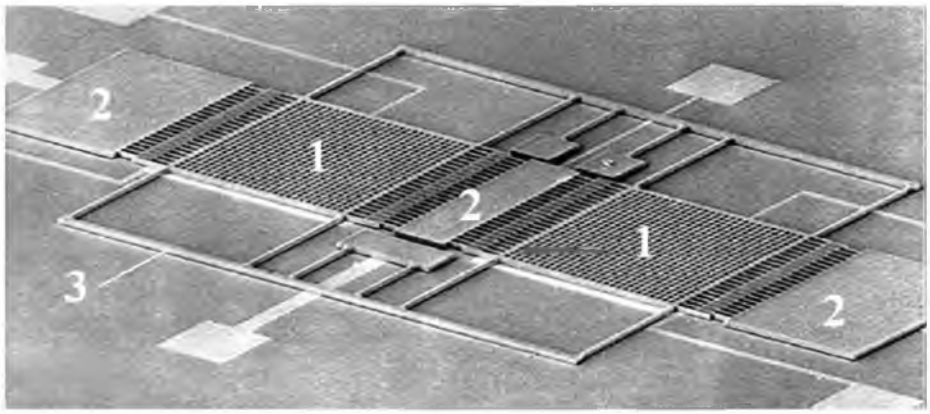


Рис.13.4. Структура одноосного микромеханического гироскопа:
1 – инерционная масса; 2 – неподвижные электроды электростатических приводов; 3 – упругий подвес

На рис.13.5 представлен интегральный микромеханический гироскоп с двумя осями чувствительности.

Данный гироскоп относится к типу камертонных гироскопов и позволяет измерять величины угловых скоростей при вращении его вокруг двух взаимно перпендикулярных осей X и Y, расположенных в плоскости подложки.

Принцип работы данного микромеханического устройства аналогичен предыдущему. Отличие только в том, что инерционная масса одна, и она совершает возвратнопоступательное движение вокруг своей опоры в плоскости подложки. При возникновении угловой скорости вокруг оси X инерционная масса начинает совершать колебания вокруг оси Y. При возникновении угловой скорости вокруг оси Y – инерционная масса колеблется вокруг оси X.

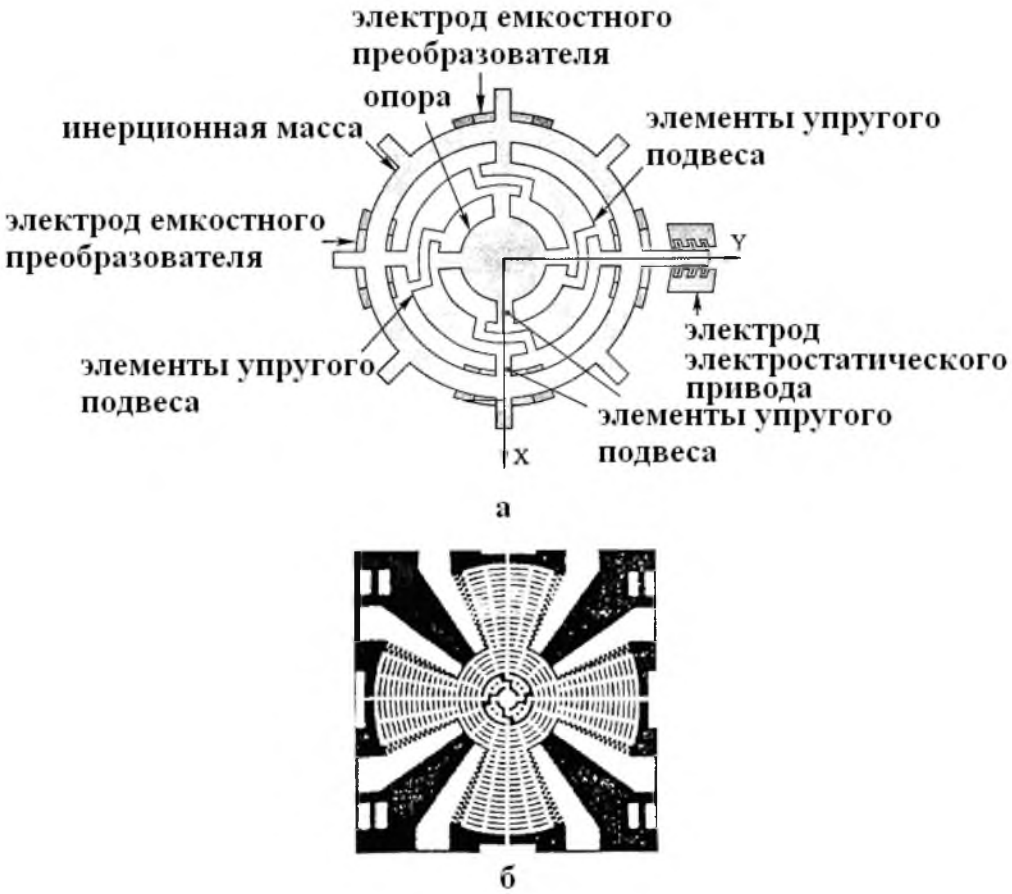


Рис.13.5. Микромеханический гироскоп с двумя осями чувствительности: а – структура; б – топология

Выходной сигнал гироскопа формируют емкостные преобразователи перемещений, образованные инерционной массой и электродами емкостных преобразователей, расположенные под ней.

На рис.13.6. представлен двуосный микромеханический гироскоп, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки.

На рис.13.7 приведен микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности карданнового типа.

Инерционная масса приводится в колебательное движение вокруг оси X с помощью электростатических приводов, образованных наружной рамкой и электродами электростатических приводов. При возникновении угловой скорости вокруг оси Z внутренняя рамка под действием гироскопического момента начинает совершать угловые колебания вокруг оси Y за счет кручения упругих торсионов. Амплитуда колебаний внутренней рамки будет пропорциональна величине угловой скорости, а фаза – направлению. Выходной сигнал формируется емкостными преобразователями перемещений, образованных внутренней рамкой и электродом емкостных преобразователей (рис.13.10).

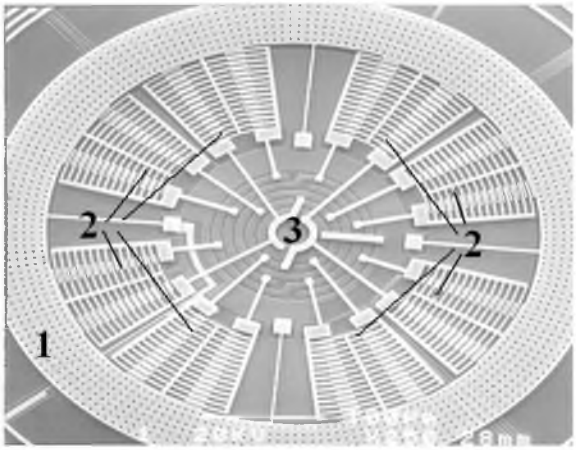


Рис.13.8. Двухосевой микромеханический гироскоп: 1 – инерционная масса; 2 – неподвижные электроды электростатических приводов; 3 – опора

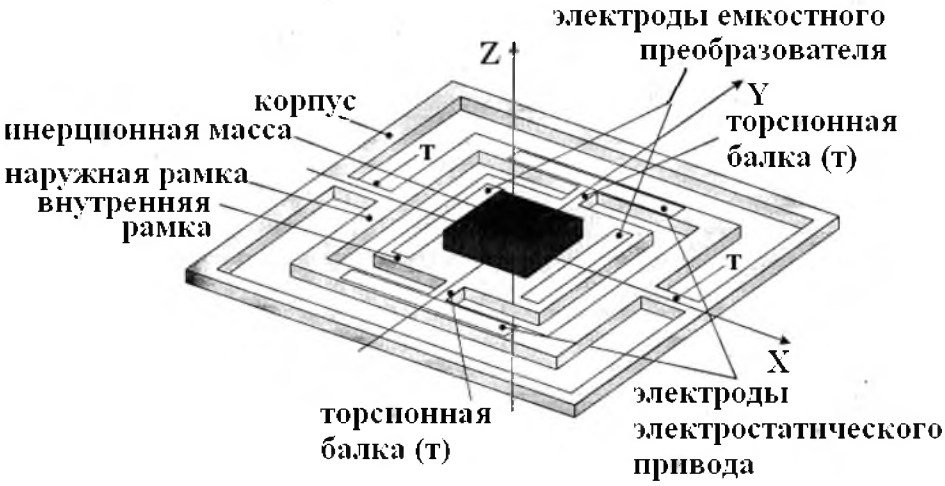


Рис.13.9. Микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности

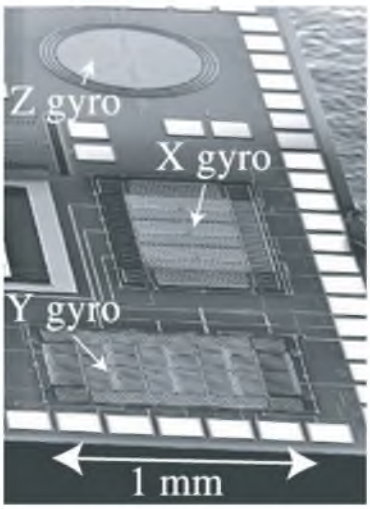


Рис.13.10. Интегральная сенсорная микросистема для регистрации угловых скоростей по трем осям чувствительности

14. Сенсоры магнитного поля [3]

Сенсор магнитного поля представляет собой входной элемент измерительной схемы, преобразующий магнитное поле в электрический сигнал.

Для изготовления интегральных полупроводниковых сенсоров магнитного поля используются методы, применяемые в технологии интегральных схем. Сейчас разрабатываются все новые типы интегральных сенсоров, предназначенных для различных областей применения, что объясняется теми преимуществами, которые дает интеграция на одном кристалле сенсорного элемента и схем обработки сигнала. Конечная цель состоит в создании разнообразных недорогих, изготавливаемых по групповой технологии высококачественных сенсоров, сопряженных с цифровыми системами обработки сигналов, которые находят все более широкое применение.

Существуют две группы применения сенсоров магнитного поля: непосредственные и косвенные применения.

14.1. Элемент Холла

К первой группе относятся измерение индукции магнитного поля, считывание с магнитных лент или дисков, распознавание рисунка магнитными чернилами на банкнотах и кредитных карточках и т.д.

На рис.14.1 приведена конструкция пленочного элемента Холла, предназначенного для измерения индукции магнитного поля.

В основе функционирования большинства типов магнитных сенсоров лежат те или иные эффекты, обусловленные действием силы Лоренца на носители заряда полупроводника, движущиеся в электрическом поле.

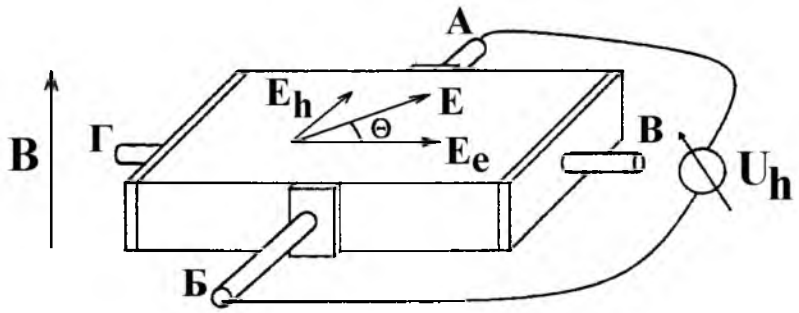


Рис.14.1. Элемент Холла

Сила Лоренца определяется выражением:

$$F = \pm q\ v \cdot B \qquad (14.1)$$

Где q – заряд электрона; v – дрейфовая скорость носителей зарядов; B– индукция перпендикулярного магнитного поля.

В выражении (14.1) знак «+» ставится, если носителями заряда являются

дырки, а знак «–» – электроны.
Дрейфовая скорость носителей заряда определяется выражением:

$$v = \pm\mu_n \cdot E_e \qquad (14.2)$$

где μ_n – подвижность носителей заряда; E_e – напряженность электрического поля.
Подставив выражение (14.2.) в (14.1), получим:

$$F = q \cdot \mu_n \; E_e \cdot B \;, \qquad (14.3)$$

т.е. направление силы Лоренца не зависит от знака носителей, следовательно, электроны и дырки будут отклоняться в одну сторону.
Если элемент Холла n-типа проводимости поместить в перпендикулярное магнитное поле, то основные (электроны) и неосновные (дырки) носители заряда отклоняются к электроду А и накапливаются около него. Но поскольку основных носителей намного больше чем неосновных, то у электрода А будет избыток электронов, а у электрода Б их недостаток. Между электродами А и Б возникает дополнительное электрическое поле, направленное от Б к А. Возникшее электрическое поле называют полем Холла. Его направление перпендикулярно вектору магнитного поля и электрическому току, текущему между электродами В и Г (см. рис.14.1).
Поле Холла будет расти до тех пор, пока не скомпенсирует силу Лоренца:

$$-q \cdot E_h = q \cdot \; v \cdot B \qquad (14.4)$$

где E_h – поле Холла.
После достижения этого условия носители заряда текут по полупроводнику только под действием электрического поля, т.е. магнитное поле как бы отсутствует. Однако суммарная напряженность поля в образце будет равной:

$$E = E_e + E_h, \qquad (14.5)$$

а ее вектор окажется повернутым на некоторый угол θ, называемый углом Холла. Между электродами А и Б возникает разность потенциалов, называемая ЭДС Холла или холловским напряжением, определяемая выражением:

$$U_h = E_h \cdot w = R_h \cdot j \cdot w \cdot B, \qquad (14.6)$$

где R_h – постоянная Холла; j – плотность тока; w – ширина сенсора; B – индукция магнитного поля.
Плотность тока определяется выражением:

$$j = \sigma \cdot E_e, \qquad (14.7)$$

где σ – удельная проводимость полупроводника:

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n \;, \qquad (14.8)$$

где n – концентрация электронов.
Постоянная Холла определяется выражением:

$$R_h = \; q \cdot n^{\;-1}. \qquad (14.9)$$

Угол Холла определяется с помощью следующего выражения:

$$tg\theta = \frac{E_h}{E_e} = \frac{U_h}{U_e} \cdot \frac{e}{w} = \mu_n^* \cdot B, \qquad (14.10)$$

где U_e – напряжение электрического поля; l – длина сенсора; – подвижность Холла:

$$\mu_n^* = \sigma \cdot R_h \tag{14.11}$$

14.2. Двухколлекторный магнитотранзистор

Ко второй группе применений сенсоров магнитного поля относится обнаружение немагнитных сигналов: обнаружение электрического тока по его магнитному полю, регистрация механического перемещения, определение направления воздействия магнитного поля. Доминирующую роль в данной группе применений сенсоров магнитного поля будут играть миниатюрные системы ориентации, навигации и управления.

При использовании в данных системах сенсоры магнитного поля объединяют в магниточувствительные микросистемы, содержащие интегральные двухколлекторные горизонтальные и вертикальные биполярные магнитотранзисторы, многостоковые МОП-транзисторы.

Биполярные магнитотранзисторы более универсальны и могут применяться для измерения всех компонентов вектора индукции магнитного поля и определения направления его воздействия. Кроме того, сенсоры магнитного поля на основе двухколлекторных биполярных магнитотранзисторов по сравнению с сенсорами магнитного поля на основе МОП-транзисторов обладают более низким температурным коэффициентом магниточувствительности.

Двухколлекторные магнитотранзисторы представляют собой биполярные транзисторы с коллектором, разделенным на два, причем каждый коллектор со своим выводом (рис.14.2,б). Оба коллектора расположены симметрично по отношению к эмиттеру. Поэтому при отсутствии магнитного поля носители заряда поровну распределяются между коллекторами

$$I_K = I_{K1} + I_{K2}. \tag{14.12}$$

При воздействии магнитного поля с индукцией B носители заряда под действием силы Лоренца отклоняются от первоначального положения на угол Холла (рис.14.2,а).

Это эквивалентно увеличению площади одного из коллекторов и уменьшению площади другого. В результате происходит увеличение тока одного коллектора и уменьшение тока другого коллектора. Расстояние, на которое отклонятся носители заряда под действием индукции магнитного поля, определяется следующим выражением:

$$\Delta x = W_K \cdot tg\theta = W_K \cdot \mu_n^* \cdot B\,. \tag{14.13}$$

где W_K – толщина коллектора.

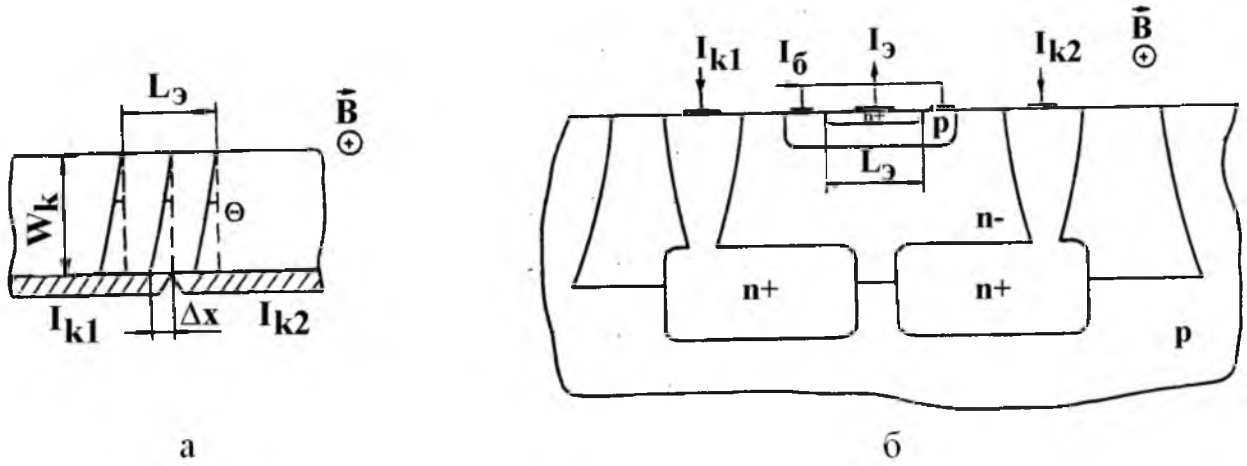


Рис.14.2. Двухколлекторный биполярный магнитотранзистор

Таким образом, изменение токов первого и второго коллекторов под действием внешнего магнитного поля описывается следующим выражением:

$$\Delta I_{K1,K2} = \pm\frac{\Delta x}{L_э} = \pm 2\frac{W_K \cdot \mu_n^* \cdot B}{L_э} I_K. \qquad (14.14)$$

Сенсоры магнитного поля, по сравнению с сенсорами механических величин, имеют существенное преимущество при использовании их в качестве элементной базы систем ориентации, навигации и управления. Это преимущество заключается в том, что сенсоры магнитного поля могут определять положение объекта в пространстве, находящегося в состоянии покоя. Тогда как сенсоры механических величин – только в состоянии движения.

Технология изготовления сенсоров магнитного поля МСТ полностью совместима с технологией изготовления ИС, что позволяет создавать сенсорные элементы данного вида совместно с устройствами обработки, хранения и передачи информации на одном кристалле.

14.3 Нанометровые магнитные сенсоры

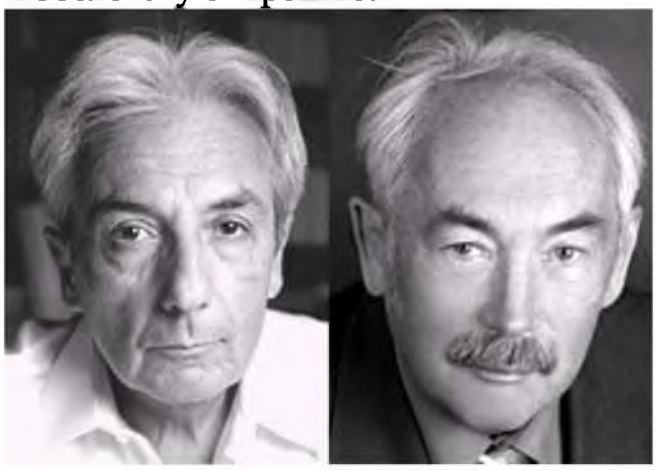
Общая задача, решаемая магнитным сенсором (МС) – зафиксировать магнитное поле и его изменение. Для решения этой задачи можно применить множество физических явлений, использующих эффекты влияния магнитного поля на какой либо процесс, например, эффект Холла. Существует обширная физическая и техническая литература по этим вопросам, существуют выпускаемые массово промышленностью приборы, предназначенные для устройств измерения параметров магнитного поля (магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы и пр.).

Остановимся только на одном вопросе, важном для устройств вычислительной техники в первую очередь – магнитные сенсоры в накопителях на жестких магнитных дисках (НЖМД), где достигаются

предельные по габаритам и чувствительности параметры МС.
Исторически МС пришли в вычислительную технику из магнитофона. Там использовались «магнитные головки» при записи и воспроизведении информации на магнитной ленте или проволоке. Такой сенсор представлял собой трансформатор с малым магнитным зазором, поперек которого (или через который) проходила магнитная лента, содержащая слой ферромагнетика, который мог перемагничиваться под действием поля в зазоре (при записи) или индуцировать в сердечнике и обмотке головки сигнал, записанный на ленте, при воспроизведении записанной информации.
Существенные изменения в считывании информации (речь идет о сенсорах) произошли с появлением персональных компьютеров.
Стремление к уменьшению размеров головки для повышения плотности записи (уменьшению размера информационного «пятна» на носителе – магнитном диске), приводит к неприятностям при воспроизведении. Дело в том, что домены в материале головки хаотически движутся (колеблются). В большой по массе головке эти колебания усредняются, а в малой приводят к флюктуационному шуму, ограничивающему чувствительность головки и плотность записи.
Поэтому в состав современных НЖМД входят три главных элемента: диск и две головки – записывающая и считывающая. С записью проблем нет: можно компенсировать малые размеры увеличением мощности (тока) записи. Здесь шум «задавлен». Современная плотность записи в 150 Мбит/см^2 – не предел, ее можно увеличить еще по крайней мере на порядок. Но важно уметь быстро считывать слабый сигнал (слабый, потому что информационное пятно становится все меньше и меньше).
Важнейшим моментом, который позволяет решить эту задачу явился отказ от считывающей магнитной головки и переход к головкам с «магнитным сопротивлением» (МС).
Магнитным сопротивлением (МС) называют изменение удельного электрического сопротивления вещества под воздействием магнитного поля, это явление (в металлах) обнаружил британский физик У.Томсон (Лорд Кельвин) еще в 1857г., и оно (в металлах) практически ничтожно мало. В полупроводниках эффект заметно больше, а в последние годы обнаружены и организованы структуры, где он чрезвычайно велик.
Механизм обычного магнитного сопротивления достаточно прост. Рассмотрим его в полупроводнике. Дрейфовый ток в полупроводнике заставляет хаотично двигающиеся носители заряда упорядоченно смещаться под действием сил внешнего поля. Если поперечно к линиям тока направить магнитное поле, возникнут силы Лоренца, которые искривят траекторию движения носителей (отсюда – эффект Холла и даже – в сильных полях – вихревое движение носителей).

Гигантское магнитное сопротивление (ГМС)

В 1988г. П. Грюнберг и А. Фертом открыли эффект, названный гигантским магнитным сопротивлением (ГМС). За это открытие им в 2007 году присудили Нобелевскую премию.



Альберт Ферт (р.1938) и Питер Грюнберг (р.1939) –
нобелевские лауреаты по физике 2007 года

Со времен открытия прошло почти 20 лет, и за это время приборы, основанные на гигантском магнитном сопротивлении (ГМС, или, как принято его называть в англоязычной литературе GMR), вошли в плоть и кровь современной цифровой цивилизации (головки считывания на ГМС используются в жестком диске каждого компьютера), а концепция спинового транспорта, спиновой инжекции, спиновых поляризаторов и анализаторов легли в основу понятийного аппарата нового направления науки и техники - спиновой электроники.

Эффект гигантского магнитосопротивления первоначально наблюдался в многослойных структурах, которые состоят из чередующихся магнитных и немагнитных проводящих слоев, например, (Co/Cu)n или (Fe/Cr)n, где n-число слоёв. Такие структуры называют магнитными сверхрешетками. Толщины слоев, как правило, составляют доли-единицы нанометров. Эффект состоит в том, что сопротивление структуры, измеренное при токе, текущем в плоскости системы, зависит от взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Так, при параллельной намагниченности слоев сопротивление, как правило, низкое, а при антипараллельном – высокое. Относительное изменение сопротивления системы составляет от 5 до 50% в зависимости от материалов, количества слоев и температуры. Эта величина на порядок больше, чем у предшественника эффекта гигантского магнитосопротивления – эффекта анизотропного магнитосопротивления, чем и объясняется название первого.

Направление намагниченности одного ферромагнитного слоя поддерживается неизменным, а второго изменяется под действием внешнего магнитного поля (которое считывается). Когда направления

намагниченности ферромагнитных слоев совпадают, ток в немагнитной пленке максимален, а когда они противоположны – минимален.
Эффект ГМС основан на сложном квантовом взаимодействии электронов проводимости, движущихся через кристаллическую решетку материала в магнитном поле. Его суть можно понять, рассматривая упрощенную модель (рис. 14.3).

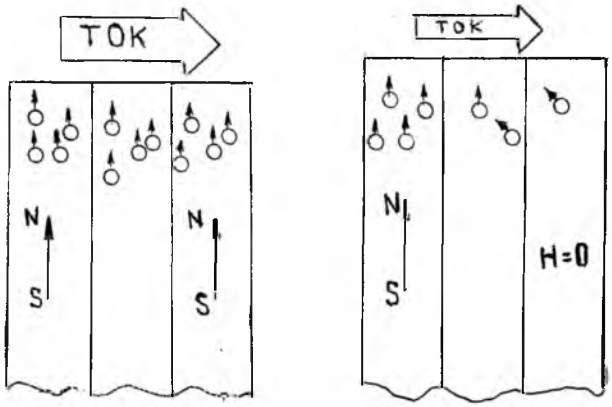


Рис.14.3 Схема движения электронов в структуре с ГМС

Структура содержит два слоя железа, разделенные слоем немагнитного хрома. Слои имеют нанометровую толщину. Поток электронов движется через структуру в поперечном направлении (слева направо). Известно, что электрическое сопротивление возникает в основном из-за рассеивания носителей заряда на атомах кристаллической решетки. Движение электронов в магнитных материалах имеет свои особенности. Электроны со спином, ориентированном вдоль направления намагниченности, рассеиваются слабее, чем электроны, имеющие другую ориентацию спинов.
При прохождении левого слоя, имеющего значительную постоянную намагниченность, основная часть электронов поляризуется, т.е. их спины ориентируются в соответствии с направлением магнитного слоя. Далее они попадают в слой хрома, где внешнее поле практически отсутствует, и за счет температурных колебаний должна происходить деполяризация спинов. Чтобы этого не случилось, время прохождения электронов в центральном слое должно быть настолько малым, чтобы спин электронов за счет их инерции не успевал изменить свое положение. Поэтому, центральная пленка должна быть нанометровой толщины. Условия дальнейшего движения электронов зависят от магнитного состояния правого слоя (рис.1 4.3). Если его намагниченность направлена, согласно с поляризацией спинов электронов, их движение будет происходить с малым рассеиванием и сопротивлением. Если намагниченность правой пленки отсутствует (или даже противоположна поляризации электронов) сопротивление потоку электронов будет большим. Намагниченность правой пленки определяется тем, в каком магнитном состоянии в данный момент находится информационное пятно

на поверхности дорожки НЖМД, которое должно предельно близко (с магнитным зазором) пробегать мимо описанной структуры, расположенной на считывающей головке накопителя. Изменение сопротивления в структуре, несмотря на громкий эпитет (гигантское), не превышает 10%, что вполне достаточно для нормальной работы считывающего устройства. Таким образом, сопротивление (и ток) через структуру определяется информацией, записанной в магнитной форме на поверхности НЖМД.

Устройства, использующие ГМС, являются одним из примеров массового применения современных технологий. Во-первых, в таких структурах успешно используются спиновые свойства электронов (спинтроника). Известные структуры спиновых транзисторов способны работать только при криогенных температурах в связи с необходимостью сохранения неизменной поляризации спинов. Головки считывания, использующие ГМС, имеют удовлетворительные параметры при нормальной температуре. Во-вторых, эффект можно применять только при наноразмерной толщине центрального слоя (нанотехнология), иначе, за счет тепловых флюктуаций, электроны потеряют согласованную ориентацию спинов, и эффект исчезнет.

Некоторые цифры по ГМС:

МС = 10%, плотность записи 125 Гбит/дюйм^2, сигнал/шум = 29; постоянная времени 0,1 нс, минимальные магнитное поле 0,005 Тесла.

Исследования МС различных структур продолжались и продолжаются в направлении увеличения собственно МС, повышении быстродействия, снижении уровня шума и пр. Так, М. Жульер исследовал структуры, внешне похожие на рассмотренные, в которых центральная пленка заменена слоем диэлектрика настолько тонкого, что через него могут туннелировать электроны (так называемый туннельный магниторезистивный эффект). Для таких структур МС примерно вдвое больше, меньше уровень шума и необходимое магнитное поле. По рекламным сообщениям, основанная на этом эффекте энергонезависимая магнитная память с произвольным доступом (MRAM), уже появилась на рынке.

Есть сообщения об еще более многообещающем ЭМС – экстраординарном магнитном сопротивлении (открыто в 1998г., автор С. Солин и др). Главное отличие – отсутствие магнитных слоев, отсюда ряд достоинств.

Принцип работы прост до примитивности.

Берется тонкий слой полупроводника, например, InSb (желательно с высокой подвижностью носителей) в форме полоски с контактами на краях. В пленку внедряют металлические диски, например, золота малых размеров. Проводимость золота примерно в 2000 раз выше, чем у полупроводника. Поэтому при подаче напряжения металлический диск искажает поле и форму силовых линий тока таким образом, что ток концентрируется в дисках, где его плотность выше (рис.14.4). Сопротивление системы достаточно мало за счет дисков, которые «шунтируют»

полупроводник.

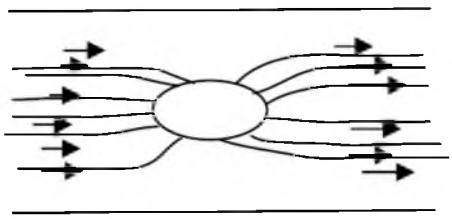


Рис. 14.4. Распределение тока в пленке с проводящими дисками

При воздействии поперечного магнитного поля картина меняется (рис.14.5). Носители заряда (электроны и дырки) вытесняются на края полоски и ток протекает, минуя проводящие диски. Сопротивление резко возрастает, ток падает. Реальные размеры дисков порядка сотен нанометров.

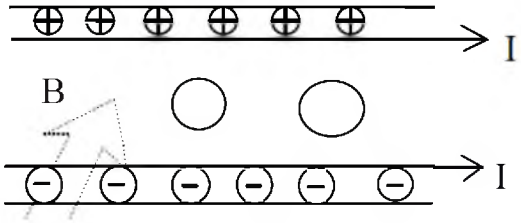


Рис.14.5. Распределение носителей заряда и тока в пленке с проводящими дисками при наличии магнитного поля

Ожидаемые цифры:
МС>35% (при 300К); плотность записи > 300 Гбит/дюйм^2, сигнал/шум 43; постоянная времени < 0,001 нс; минимальное поле 0,05 Т.
Достоинства: быстродействие повышается примерно в 100 раз, совместимость с микроэлектронной интегральной технологией.
Недостатки: структуры не работают при повышенных температурах (выше комнатной), нелинейность динамических характеристик (сигнал пропорционален квадрату магнитного поля); коммерческого товара пока нет.
Для функционирования устройств на основе эффекта ГМС важной является возможность создания антипараллельной конфигурации слоев. Такие конфигурации удается получать при нулевом поле благодаря наличию так называемого межслойного обменного взаимодействия. Оказывается, энергия $E_{int.l}$. взаимодействия двух магнитных слоев с намагниченностями M_1 м M_2, разделенных немагнитной прослойкой толщиной d_s, имеет (в первом приближении) гейзенберговский вид:

$$E_{int.l} = -J_1(M_1 \cdot M_2)$$

При этом коэффициент J_1 зависит от толщины немагнитной прослойки d_s осциллирующим образом, так, что при одних значениях d_s J_1 является положительной, а при других – отрицательной величиной. Соответственно, можно подобрать толщину немагнитных слоев так, чтобы энергетически

выгодной была антипараллельная конфигурация слоев. Интересно, что именно исследованием межслойного взаимодействия в многослойных магнитных структурах занимались первоначально открыватели эффекта, прежде чем обнаружили новое необычное их свойство – гигантское магнитосопротивление.

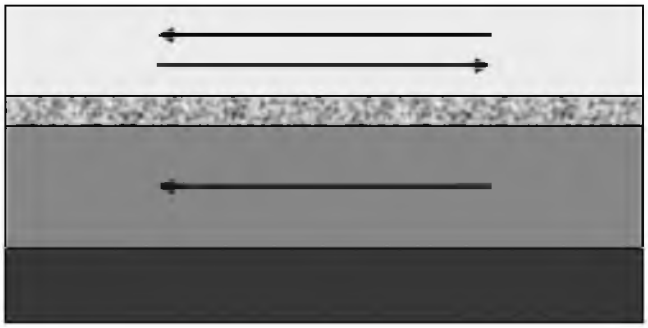


Рис.14.7. Схематичное изображение спинового вентиля. Нижний слой – слой антиферромагнетика.

В качестве элементов на основе эффекта ГМС как правило используется структура, получившая название спиновый вентиль (spin valve), см. рис.14.7. В ней один магнитных из слоев (например, Co или $Co_{90}Fe_{10}$) напылен на слой антиферромагнетика (напр., $Mn_{76}Ir_{24}$ или $Mn_{50}Pt_{50}$). Благодаря обменному взаимодействию между электронами ферромагнетика и антиферромагнетика спины в этих двух слоях становятся жестко связанными между собой. Поскольку внешнее магнитное поле не очень большой величины не оказывает влияния на антиферромагнетик, то намагниченность магнитного слоя оказывается закрепленной (это явление получило название однонаправленной или обменной анизотропии.

Такой слой, намагниченность которого в некотором интервале полей может считаться неизменной, называют закрепленным или фиксированным. Второй же магнитный слой (часто Co, или Co90Fe10, или двухслойный Ni80Fe20/Co или $Ni_{80}Fe_{20}/Co_{90}Fe_{10}$) может быть свободно перемагничен внешним полем, поэтому его называют свободным. Промежуточный слой немагнитного металла, как правило, представлен Cu. Такая структура получила название спинового переключателя или спинового вентиля (spin-valve). Сопротивление спинового вентиля R может быть с хорошей точностью описано с помощью формулы: $R = R_0 + \Delta R_{gmr} sin^2(0{,}5\ \theta\ )$.

Здесь R_0 – сопротивление структуры при параллельной намагниченности слоев, дельта R_{gmr} – инкремент сопротивления, обусловленный эффектом ГМС, и Q – угол между намагниченностями магнитных слоев (принимает значения между р и –р). Типичные значения R составляют десятки Ом, а для используемых в индустрии спиновых вентилей составляет 6-10%.

Эффект ГМС был обнаружен при измерении сопротивления магнитных сверхрешеток по току, текущему в плоскости системы. В 1991 году

изменение сопротивления магнитных металлических сверхрешеток при изменении взаимной ориентации магнитных слоев было обнаружено для тока, текущего перпендикулярно плоскости слоев. Эти две геометрии измерения сопротивления многослойных магнитных структур обозначаются ставшими уже стандартными аббревиатурами CIP (current-in-plane) и CPP (current-perpendicular-to-plane) соответственно. Механизмы эффектов ГМС в CPP и в CIP геометриях в основных чертах схожи; при этом значения магнититосопротивления, полученные для первого эффекта, примерно в два раза больше, чем для второго. Однако абсолютное сопротивление металлических сверхрешеток, полная толщина которых составляет порядка десятков нанометров, при измерении в CPP геометрии очень мало и его довольно трудно измерить. Поэтому для практических применений эффект ГМС в CPP геометрии гораздо менее привлекателен.

Следующий прорыв в области эффектов магнитосопротивления обусловлен обнаружением эффекта туннельного магнитосопротивления (ТМС). Он имеет место в CPP системах, в которых место проводящей немагнитной прослойки занимает тонкий (1-2 нм) слой изолятора. Сопротивление такой структуры, измеренное в CPP-геометрии, сильно зависит от относительного направления намагниченности слоев благодаря различным вероятностям прохождения носителей с противоположными ориентациями спина через туннельный барьер. Оказалось, что для весьма распространенного аморфного изолирующего слоя Al_2O_3 относительное изменение сопротивление достигает 70% при комнатной температуре (КТ). Ещё более перспективным является барьер в виде монокристаллического слоя MgO, который позволяет достичь значений до 500% при комнатной температуре.

ГМС в индустрии памяти

В настоящее время эффекты магнитосопротивления уже получили широкое коммерческое применение. Наиболее часто эти эффекты используются для создания магниточувствительных элементов датчиков различного назначения. Так, уже более 10 лет магниточувствительные элементы на основе магниторезистивных наноструктур используются в считывающих головках в жестких дисках. Кроме того, широким фронтом идут разработки новых видов памяти, основанных на магниторезистивных элементах; совсем недавно начались продажи одного из них – так называемой магнитной оперативной памяти MRAM. По целому ряду показателей последняя превосходит существующие в настоящее время полупроводниковые аналоги.

Ниже рассказывается об этих двух ключевых приложениях: о строении считывающих головок в HDD и о магнитной памяти MRAM.

Считывающие головки для жестких дисков

Наибольший рост последние годы продемонстрировали продажи самых миниатюрных жестких дисков (предназначенных для портативных карт памяти, mp3-плееров, видеокамер, сотовых телефонов и др.) они заняли до 23% всего рынка жестких дисков (HDD – hard disc drivers); ожидается, что к

2009 году эта доля увеличится до 40%, обогнав сегмент HDD для настольных компьютеров. В результате, общие тенденции рынка ведут к потребности появления устройств со все большей плотностью записи информации. Так, последние десять лет плотность записи в коммерческих устройствах растет со скоростью от 50-100% в год. Поддержание столь активной тенденции к миниатюризации требует использования самых высоких инновационных технологий в области создания магнитных сред (для хранения информации), записывающих и считывающих головок, системной электроники.

С самого начала в жестких дисках (первые HDD появились в середине 1950-х годов) использовались индуктивные считывающие головки. Их в начале 1990-х сменили магниточувствительные датчики, схематичное устройство которых изображено на рисунке 14.8. Считывающая головка состоит из тонкопленочного магниторезистивного элемента, экранированного с двух сторон с помощью пленок мягкого магнитного материала. (Роль экранов заключается в том, чтобы по возможности уменьшить до нуля поле от дальних битов). Эта конструкция пролетает на расстоянии порядка десятков-единиц нанометров над поверхностью магнитной пленки, на которой в виде направления намагниченности в доменах, упорядоченных по размеру и расположению, записана информация. Домены противоположной полярности соответствуют битам «0» или «1». Поле от границы между противоположно намагниченными битами, над которой пролетает головка, перемагничивает магниторезистивный элемент. В результате сопротивление элемента меняется, что фиксируется электроникой и передается на шину данных. Данная конструкция в целом используется и в настоящее время.

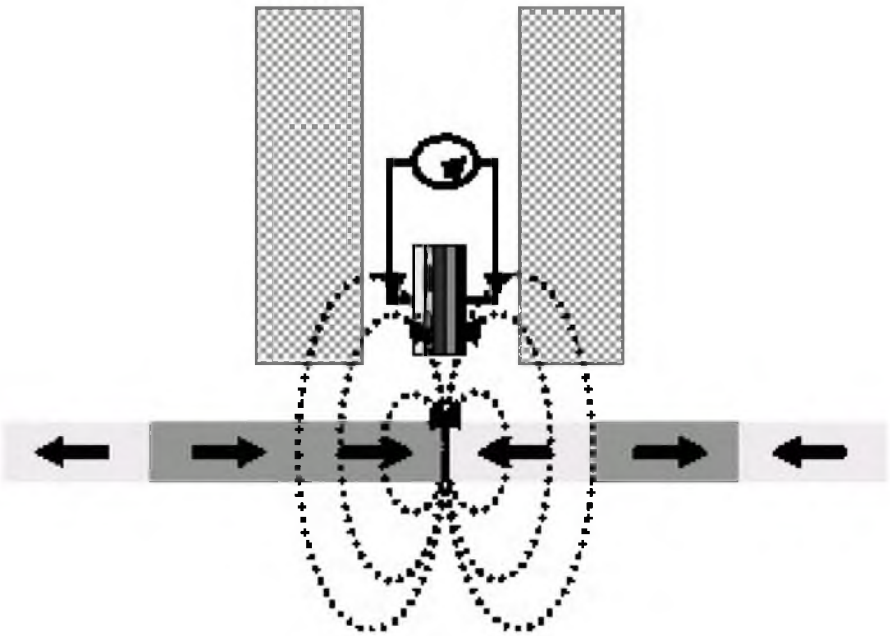


Рис. 14.8. Схематичное изображение считывающей головки жесткого диска и принципа ее работы.

Постоянное увеличение плотности записи (соответственно, уменьшение размера одного бита), приводит к уменьшению магнитного потока, приходящегося на магниточувствительный элемент. Чтобы сохранить отношение сигнал/шум, требуется использование все более и более чувствительных головок.

Магниточувствительные элементы на эффекте анизотропного магнитосопротивления имели выход (отношение сопротивления головки при переходе от «0» к «1») порядка 2%, обладали простой конструкцией и позволили создавать HDD с плотностью записи до 1-5 Гбит/дюйм^2. Дальнейшее повышение плотности записи потребовало введения считывающих элементов на основе эффекта ГМС. Они обладают гораздо более сложной конструкцией (магниточувствительный элемент содержит до 10 различных слоев), и, в различных модификациях, позволяют получить выход от 6 до 12% и плотность записи до 50 Гбит/дюйм2. Переход на считывающие головки, основанные на эффекте ГМС, был осуществлен практически всеми основными производителями жестких дисков с 1997 года. Следующее поколение головок основано на эффекте ТМС. Как ожидается, они позволяют получить выход более 200% и плотность записи до 1 Тбит/дюйм2. В настоящее время происходит переход производителей жестких дисков на этот тип считывающих головок.

Магнитная оперативная память MRAM

В компьютерах, контроллерах, мобильных устройствах используется одновременно несколько типов полупроводниковой памяти. Одни из них, например SRAM (static random access memory), являются очень быстрыми, они используются в качестве кэш-памяти в процессорах; однако они имеют сложную конструкцию и поэтому очень дорогие. Другие виды памяти, например, оперативная память DRAM (dynamicrandom access memory), являются более простыми и дешевыми, но и более медленными. Также, SRAM и DRAM не сохраняют свое состояние при отключении энергии. Память типа EEPROM (наиболее известная ее модификация – Flash-память), сохраняет свое состояние при отключении энергии, однако она является очень медленной и не может выполнять функции оперативной памяти даже в относительно несложных устройствах типа mp3-плееров или сотовых телефонов. Кроме того, Flash-память очень энергоемкая и обладает ограничением на количество циклов перезаписи (порядка 10^5-10^6), при превышении которого она может выйти из строя.

В этом контексте особое внимание стало уделяться созданию универсальной памяти, которая смогла бы совместить в себе достоинства всех перечисленных видов памяти. Согласно сказанному выше, она должна обладать:

а) достаточно простой конструкцией,

б) высокой скоростью записи/считывания,

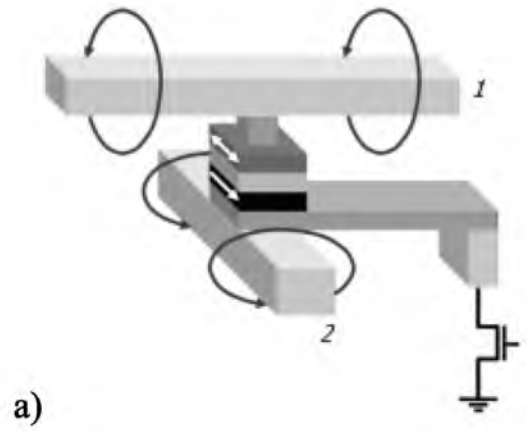
в) сохранять свое состояние при отключении энергии,

г) позволять производить большое количество циклов записи,

д) потреблять малое количество энергии.

В настоящее время наиболее вероятным кандидатом на роль такой универсальной памяти считается так называемая магнитная оперативная память MRAM (magnetic random access memory). Схема работы MRAM изображена на рисунке 14.9. Ячейка памяти состоит из многослойного магниторезистивного элемента, основанного на эффекте ТМС. Свободный слой этого элемента содержит в себе информацию в виде направления намагниченности. Считывание производится путем измерения сопротивления Rm данного элемента: при параллельной конфигурации свободного и фиксированного слоев оно будет малым, а при антипараллельной – большим. Этим двум значениям приписываются логические «0» и «1». Запись производится с помощью подачи на токовые шины 1 и 2 (которые по аналогии с полупроводниковыми видами памяти называют соответственно битовой и словарной) импульсов тока. При этом вокруг каждой из них возникает вихревое магнитное поле. Конфигурация элементов подбирается так, что для перемагничивания каждой ячейки необходимо действие поля от обеих токовых шин, а при воздействии поля только от одной из шин элемент сохраняет свое магнитное состояние (см. рис.14.9,б). В качестве свободного слоя используются, например, Fe или двойной слой CoFe/NiFe, в качестве фиксированного – CoFe на подложке из антиферромагнетика IrMn, в качестве туннельного контакта – оксид алюминия Al_2O_3 или, обладающий лучшими параметрами ТМС, оксид марганца MnO.

Такая память обладает простой конструкцией (один магниторезистивный элемент и один транзистор на каждую ячейку), она естественным образом сохраняет свое состояние при отключении энергии. Кроме того, она позволяет производить практически бесконечное количество циклов перезаписи (10^{16} и более), и, как показывают эксперименты, время цикла записи/считывания составляет для разных образцов десятки-единицы наносекунд (подобно памяти типа SRAM).



а)

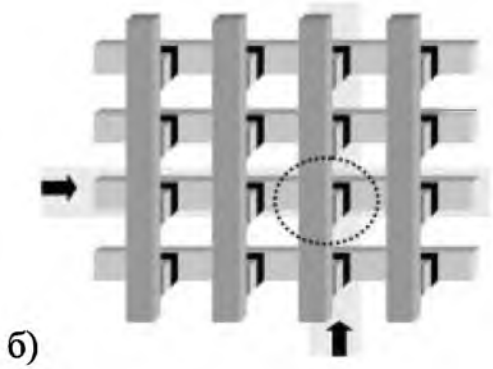


Рис. 14.9. а) Схематичное изображение ячейки памяти MRAM. При записи в ячейку вокруг токовых шин создается магнитное поле, которое перемагничивает данный элемент. б) адресация ячейки при записи.

Магнитное поле создается вокруг всей токовой шины, однако перемагничивается только тот элемент, который расположен на пересечении двух токовых шин.

На пути воплощения идеи о MRAM как универсальной памяти возникает немало проблем, связанных, в основном, с механизмом записи информации: необходимость создания больших магнитных полей записи, относительно большая потребляемая мощность данного устройства (порядка 100 пВт на цикл записи), повышенные требования к надежности процесса переключения ячейки и др., но можно с уверенностью говорить, что рано или поздно они будут решены.

В заключение, стоит отметить следующее. Не секрет, что сейчас модный ярлычок «нано-» приклеивается сейчас повсеместно, но само по себе наличие структуры с характерным размером 1-100 нм и менее еще не является нанотехнологией в подлинном смысле, поскольку отражает лишь количественную, а не качественную сторону явлений. Так 45-нм технология освоенная микроэлектроникой является лишь очередным шагом на пути масштабирования, физические же принципы, лежащие в основе их действия, остаются неизменными. В то же время, эффект ГМС – это возникновение принципиально нового свойства у системы, структурированной на наномасштабе: толщины проводящих слоев должны быть меньше длины свободного пробега электрона (CIP геометрия) или длины релаксации спина (CPP геометрия), которые составляют единицы нанометров. В этом контексте становится ясной формулировка Шведской Академии Наук, присудивших Нобелевскую премию «за открытие эффекта гигантского магнитосопротивления» технологии, которая «может рассматриваться как первое по-настоящему эффективное приложение многообещающей области нанотехнологий».

15. АКТЮАТОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ [3,4,5]

Актюатор – это механическое устройство, которое преобразовывает

различные виды энергии (электрическая, химическая или термическая) в механическую работу, излучение тепла и света .

В настоящее время разработаны термические, термопневматические, пьезоэлектрические, электростатические и магнитные актюаторы.

Термоактюаторы были разработаны одними из первых и использовались в сенсорах измерения и определения потоков жидкости и газов в качестве нагревательных элементов. Основное применение термоактюаторы нашли в механизмах горизонтального и вертикального поворота структур элементов МСТ.

Принцип работы термоактюаторов основан на тепловом расширении структурных материалов элементов микросистемной техники.

Если при однородном нагреве температура твердого тела возрастает на T, то тело испытывает деформацию, описываемую следующим выражением (рис.15.1):

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T, \qquad (15.1)$$

где α – коэффициент теплового расширения; T – температура.

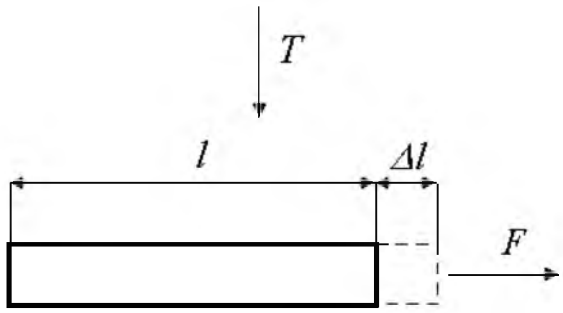


Рис.15.1. Деформация термоактюатора при нагреве

Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \qquad (15.2)$$

где Δl – абсолютное удлинение; l – первоначальный размер тела.

Подставив (15.2) в (15.1), получим выражение, позволяющее определять абсолютное удлинение термоактюатора:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T \qquad (15.3)$$

Напряжением называется физическая величина, равная упругой силе, приходящейся на единицу площади сечения тела:

$$\sigma = \frac{F_n}{S}, \qquad (15.4)$$

где Fn – сила; S – площадь сечения, расположенная перпендикулярно нормали силы F .

Согласно закону Гука, сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела l . Величина l зависит от размеров стержня, материала и величины приложенной силы:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \qquad (15.5)$$

где E – модуль Юнга.

Подставив (15.1) и (15.4) в (15.5), получим выражение для определения силы,

создаваемой термоактюатором:

$$F_n = w \cdot h \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (15.6)$$

где w – ширина; h – толщина.

Тепловая деформация зависит от кристаллографической ориентации структурного материала. Таким образом, для анизотропных сред, выражение (15.1) примет вид

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_{ij} \cdot \Delta T, \quad (15.7)$$

Термоактюаторные элементы МСТ изготавливаются по технологии поверхностной микрообработки и MUMPs-технологии.

Дальнейшее развитие термоактюаторы получили в виде термопневматических актюаторов. Данный тип актюаторов содержит нагревательный элемент и герметичную полость с упругой мембраной (рис.15.2).

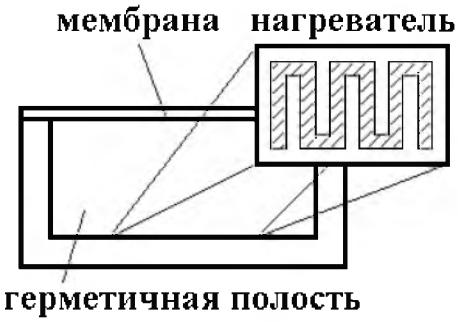


Рис.15.2. Термопневматический актюатор

Нагреватель представляет собой полупроводниковый резистор меандрового типа. Электрический ток, протекая через резистор, нагревает его. Количество теплоты, выделяемое в нагревателе, определяется следующим образом:

$$Q = \frac{U^2 \cdot t}{R}, \quad (15.8)$$

где U – напряжение на нагревателе; t – время прохождения тока через нагреватель; R – сопротивление нагревателя.

В результате происходит расширение газовой среды в герметичной области, что в свою очередь приводит к деформации мембраны. Так как объем герметичной полости остается постоянным, то изменение давления в полости описывается следующим выражением:

$$P_T = P_0 \cdot \beta \cdot T, \quad (15.9)$$

где P_0 – давление газа до нагревания; β – коэффициент объемного расширения; T – температура нагревания.

Коэффициент объемного расширения практически одинаков у всех газов и с хорошим приближением равен коэффициенту объемного расширения идеального газа: $\beta = 0{,}003661\ K^{-1}$.

Сила, создаваемая термопневматическим актюатором, будет определяться следующим выражением:

$$F_n = S \cdot P_0 \cdot \beta \cdot T, \quad (15.10)$$

где S – площадь мембраны.

Термопневматические актюаторы изготавливаются по технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

Более простым вариантом термопневматического актюатора является пьезоэлектрический актюатор. Данный тип актюаторов содержит пьезоэлектрический диск и упругую мембрану (рис.15.3).

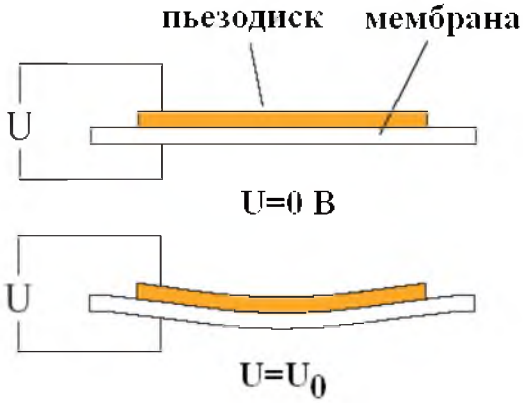


Рис.15.3. Структура пьезоэлектрического актюатора

В основу работы пьезоэлектрических актюаторов положен обратный пьезоэлектрический эффект: под действием электрического поля в пьезоэлектриках появляется механическая деформация.

При обратном пьезоэлектрическом эффекте электрическое поле и деформацию актюатора связывают те же пьезоэлектрические коэффициенты, которые связывают напряжение и поляризацию при прямом эффекте:

$$\varepsilon_{ij} = \pi_{ij} \cdot E_i, \qquad (15.11)$$

Где ε_{ij} – тензор относительной деформации; π_{ij} – тензор пьезо-коэффициентов материалов; E_i – напряженность электрического поля. В качестве материалов пьезоэлектриков используются кварц, $LiTaO_3$ и ZnO. Данный тип актюаторных элементов изготавливается с использованием технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

Следующим типом актюаторных элементов МСТ являются электростатические актюаторы. В общем виде электростатический актюатор содержит подвижный и неподвижный электроды (рис.15.4).

Рис.15.4. Электростатический актюатор

В качестве подвижного электрода выступают консольные балки и

мембраны.

Принцип действия данных актюаторов основан на возникновении электростатической силы между подвижным и неподвижным электродами.

При подаче отклоняющего напряжения на неподвижный электрод относительно подвижного, на последний начинает действовать электростатическая сила, определяемая выражением:

$$dF_{эл} = E \cdot dq, \qquad (15.12)$$

где E – напряженность электрического поля; q – заряд электрона.

Поскольку $dq = C \cdot dU$; $E = \frac{U}{d}$,

выражение (15.12) примет вид:

$$dF_{эл} = \frac{C}{d} \cdot U \cdot dU, \qquad (15.13)$$

Электростатическая сила, действующая на подвижный электрод, будет определяться следующим выражением:

$$dF_{эл} = \frac{C}{d} \cdot \int_0^U U \cdot dU = \frac{C \cdot U^2}{2d}, \qquad (15.14)$$

где U – отклоняющее напряжение; d – расстояние между подвижным и неподвижным электродами; C – емкость, создаваемая подвижным и неподвижным электродами, определяемая выражением:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \qquad (15.15)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ε_0 – электрическая постоянная ($8.85*10^{-12}$ Ф/м); S – площадь подвижного электрода. Подставив (15.15) в (15.14), получим выражение для определения силы, действующей на подвижный электрод:

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d^2} \cdot U^2. \qquad (15.16)$$

При подаче отклоняющего напряжения U между подвижным и неподвижным электродами возникает электростатическое взаимодействие и подвижный электрод притягивается к неподвижному. По мере отклонения подвижного электрода от первоначального положения расстояние между электродами d будет уменьшаться, что, согласно выражению (15.16), приводит к увеличению электростатической силы $F_{эл}$. Следовательно, при расчете электростатической силы, действующей на подвижный электрод относительно неподвижного, необходимо учитывать уже совершенное отклонение:

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{(d-y)^2} \cdot U^2. \qquad (15.17)$$

При изготовлении электростатических актюаторов могут использоваться технологии поверхностной и объемной микрообработки и MUMPs-технология.

Магнитные актюаторы являются новым типом актюаторных элементов

МСТ. Принцип их работы основан на деформации поликремниевых балок или мембран, с нанесенным на них слоем пермаллоя (NiFe), под действием внешнего магнитного поля (рис.15.5).

При помещении во внешнее магнитное поле генерируются две компоненты магнитной силы F_1 и F_2, определяемые выражениями (в системе СГС):

$$F_1 = q_m \cdot H, \qquad F_2 = -q_m \cdot H, \tag{15.18}$$

где q_m – магнитный заряд (момент силы /ампер [Н*м/А]);

H – напряженность внешнего магнитного поля.

$$q_m = J \cdot b \cdot \mu_0 \cdot N, \tag{15.19}$$

где b – ширина, N – число витков.

Крутящий момент, создаваемый магнитным актюатором, определяется с помощью следующего выражения:

$$M = q_m \cdot l_{NiFe} \cdot H \cdot sin\alpha, \tag{15.20}$$

Где l_{NiFe} – длина слоя NiFe; α – угол между направлением напряженности магнитного поля и плоскостью актюатора.

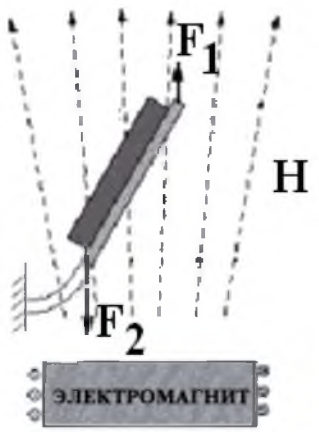


Рис.15.5. Магнитный актюатор

Данный тип актюаторов нашел широкое применение в интегральной микросборке элементов МСТ.

Основной недостаток магнитных актюаторов – необходимость использования внешних источников магнитного поля.

Данный тип актюаторов изготавливается по MUMPs-технологии.

В настоящее время актюаторные элементы микросистемной техники широко используются при создании актюаторных микросистем, таких как микронасосы, интегральные микрозеркала и микромеханические ключи.

15.1. Микронасосы

По принципу функционирования микронасосы делятся на два класса.

К первому классу относятся немеханические микронасосы (не содержащие подвижные микромеханические части). Данный класс включает микронасосы на основе электрогидродинамического, электроосмотического и ультразвукового эффектов.

Ко второму классу, самому распространенному, относятся

механические микронасосы (содержащие подвижные микромеханические части) с активными и пассивными клапанами.

15.1.1. *Электрический микронасос*

Одним из весьма распространенных и перспективных изделий МСТ является микронасосы, предназначенные для перекачки небольших количеств жидкостей с самыми разнообразными свойствами. Обычная их сфера использования – аналитические системы в медицине, при мониторинге окружающей среды, а также в некоторых технических устройствах, например, принтерах. Принципы функционирования и конструкции микронасосов весьма разнообразны, обычно связаны с использованием подвижных элементов, таких как диафрагмы, клапаны и пр. Использование неоднородного электрического поля позволяет создать микронасосы, предназначенные для перекачки малых количеств непроводящих дипольных жидкостей, не содержащие подвижных элементов.

В физике давно установлен факт, что на диполь, находящийся в неоднородном электрическом поле, действует сила, вынуждающая диполь перемещаться в сторону, где поле имеет большее численное значение. Это явление достаточно описано в литературе. Для построения модели, описывающей силу, действующую на диполь, рассмотрим фрагмент неоднородного электрического поля с находящемся в нем диполем, который представлен на рис. 15.6.

Известно, что напряженность электрического поля определяется как сила, действующая на единичный заряд, находящийся в электрическом поле.

Дипольную частицу жидкости будем рассматривать как два постоянных, противоположных по знаку электрических заряда, находящихся на расстоянии Δl, которое связано с размерами молекулы жидкости. В поведении такого диполя в электрическом поле можно выделить два момента. Во-первых, он будет ориентироваться по силовым линиям электрического поля так, что положительный заряд диполя направится в сторону отрицательно заряженного электрода и наоборот. Во-вторых, если поле неоднородно, он будет испытывать силу притяжения к заряженному электроду. Действительно, если поле неоднородно, его напряженность E меняется вдоль силовой линии. Это значит, что силы, действующие на пробный заряд, в точках, отстоящих на расстоянии Δl, будут разными. Равнодействующая этих сил будет приложена к диполю и вызовет его перемещение вдоль силовой линии в направлении, где изменение напряженности проходит быстрее. Исходя из этого, можно построить математическую модель расчета сил, действующих на диполь.

Сначала для области, представленной на рис.15.6, необходимо найти распределение напряженности поля E. Для этого нужно решить уравнение Лапласа для потенциала. Ограничиваясь, как минимум, двумерной моделью структуры для распределения потенциала $\varphi(x,y)$, необходимо решить уравнение

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x}+\frac{\partial\varphi}{\partial y}=0,$$

при граничных условиях, задаваемых размерами и формой электродов, создающих поле и потенциалами этих электродов.

Найденное распределение потенциала позволяет определить значение напряженности поля *E* в той же области: $E(x,y)=grad\varphi$.

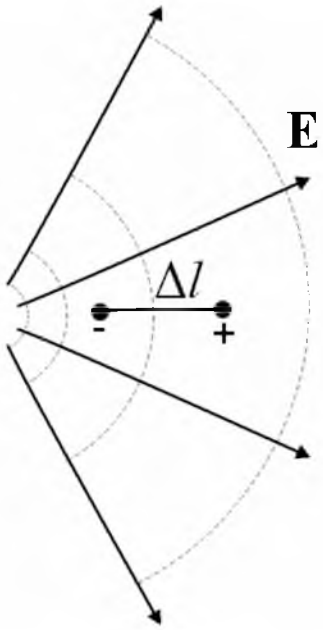


Рис.15.6. Диполь в неоднородном электрическом поле

Чтобы определить силы, действующие на диполь, необходимо вычислить изменение напряженности поля *E(x,y)* вдоль силовой линии, то есть градиент модуля *E*.

Произведение градиента модуля *E* на размер диполя *Δl* и его заряд q даст значение силы F, действующей на диполь и направленной вдоль силовой линии, т.е.:

$$F\ x,y\ =q\cdot\Delta l\cdot grad\ E\ .$$

Из изложенного ясно, что основным фактором, позволяющим увеличить силы, действующие на диполь, является градиент поля. При этом неоднородность поля, создаваемая в рабочей зоне насоса, должна проявляться на расстояниях, соизмеримых с размерами дипольной молекулы.

Конструкция и технология изготовления микронасоса, последовательно реализующая идеи интеграции, соответствует структура, представленная на рис.15.7. Отдельные самостоятельные секции сформированы в кремниевой пластине ориентации [100] в виде сетки (матрицы) отдельных ячеек, соединенных параллельно. Секция насоса содержит два электрода: кремниевый, имеющий в сечении V-образный профиль, и металлический, разделенные тонкой диэлектрической пленкой двуокиси или нитрида кремния.

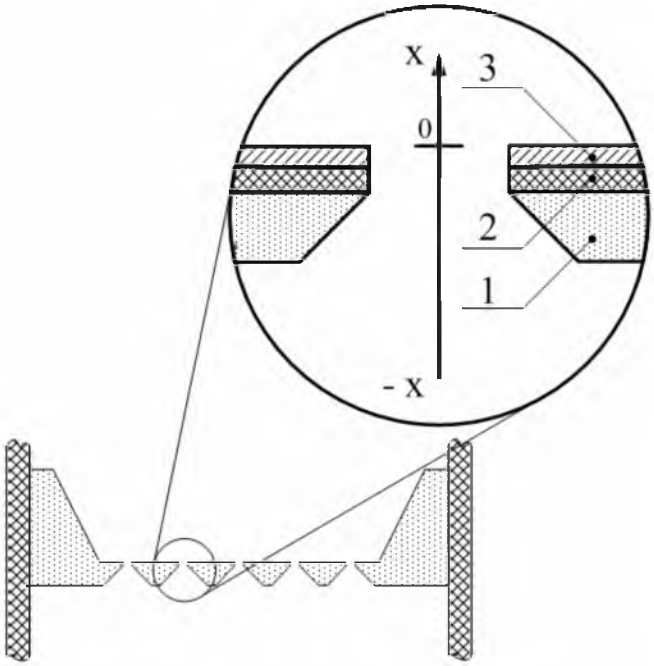


Рис. 15.7. Структура электростатического микронасоса:
1 – подложка; 2 – диэлектрик; 3 – металлический электрод

Технологический процесс изготовления такой структуры основан на последовательности типовых операций, хорошо известных в микроэлектронике. Некоторая специфика имеет место только при травлении: после анизотропного травления ямок (отверстий) пирамидальной структуры на всю глубину полупроводниковой пластины необходимо через эти же ямки организовать селективное сквозное травление вначале диэлектрической, а затем металлической пленки.

Предложенная структура обладает хорошей управляемостью конструктивными параметрами. Так, рабочий размер узкой части V-образного отверстия (ширина канала) определяется исходной толщиной пластины и размером окна в маске при проведении анизотропного травления. Величина зазора между электродами однозначно задается толщиной диэлектрической пленки. В необходимых пределах можно менять и толщину металлического электрода.

Исследование модели, описывающей реальную структуру насоса, подтверждает его работоспособность. Как отмечалось, силы, действующие на диполь, направлены в ту сторону, где изменение напряженности происходит быстрее. В рассматриваемой структуре изменение напряженности происходит как в верхней, так и в нижней части рабочей зоны, причем силы, действующие на диполь в этих частях, направлены в противоположные стороны. Но в силу асимметрии структуры эти силы не одинаковы, что подтверждается прямыми расчетами значений dE/dx на оси симметрии структуры, результаты которых приведены на рис.15.8. Преобладание сил, действующих на диполи в нижней части рабочей области создают давление, приводящее к направленному перемещению жидкости.

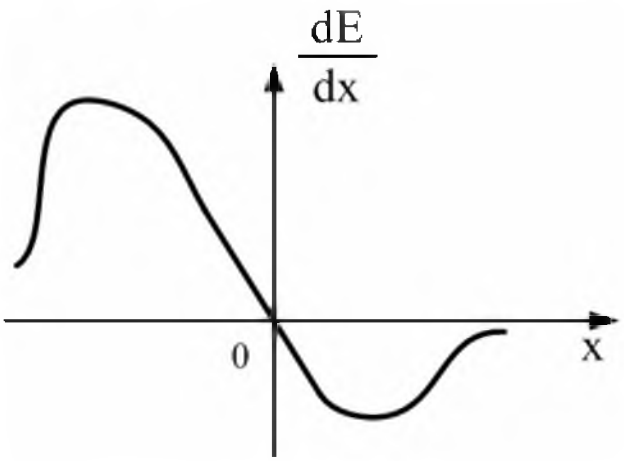


Рис.15.8. Характер распределения сил в рабочей зоне микронасоса

15.1.2. Механические микронасосы с активными клапанами

В качестве активационного механизма в механических микронасосах с активными клапанами используются пьезоэлектрические и термопневматические актюаторы. Микронасосы данного вида содержат несколько активных клапанов, расположенных последовательно друг за другом (рис.15.9).

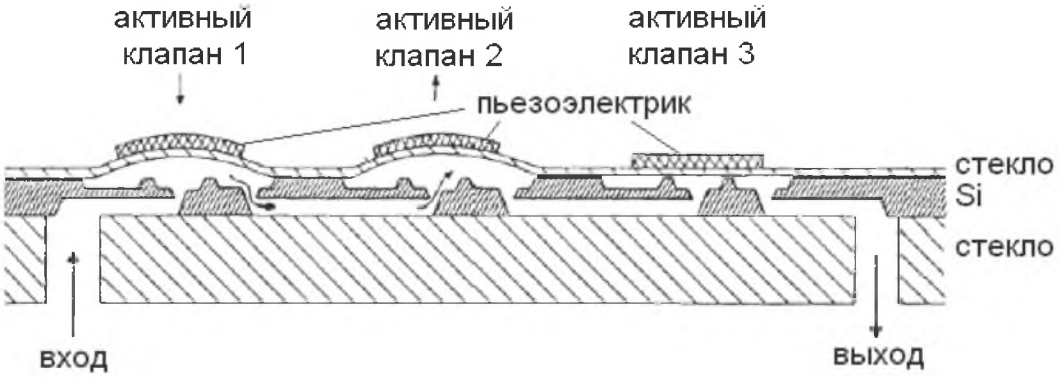


Рис.15.9. Механический микронасос с активными клапанами

При включении актюатора первого активного клапана происходит деформация мембраны, что приводит к открытию первого клапана. Жидкость со входа микронасоса через открытый первый клапан поступает на вход второго активного клапана. Выключение актюатора первого клапана происходит одновременно с включением актюатора второго клапана. Когда второй клапан открывается, жидкость поступает на вход третьего клапана. Далее производится одновременное открытие первого и третьего клапанов и закрытие второго. Жидкость с входа третьего клапана попадает на выход микронасоса, а жидкость с входа микронасоса попадает на вход второго активного клапана. Далее цикл повторяется.

Достоинством механических микронасосов с активными клапанами является то, что они позволяют перекачивать жидкость в обоих направлениях без изменения конструкции. Перестройка работы микронасоса

заключается только в обратной последовательности включения актюаторов активных клапанов.

15.1.3. Механические микронасосы с пассивными клапанами

Поршневой механический микронасос с пассивными клапанами содержит рабочую область с подвижной мембраной, управляемой актюатором, входной и выходной клапаны, управляемые потоком жидкости (рис.3.9).

По принципу действия используемого актюатора поршневые механические микронасосы разделяют на электростатические, пьезоэлектрические (рис.15.10,а), магнитные и термопневматические (рис.15.10,б).

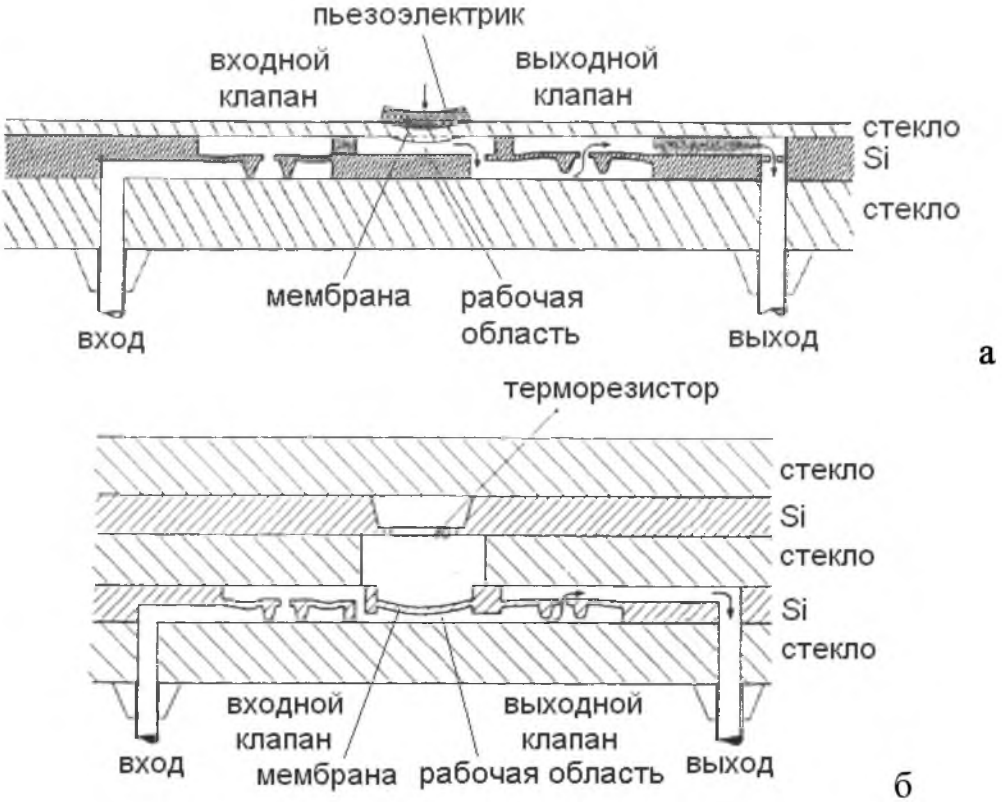


Рис.15.10. Поршневой микронасос: а – пьезоэлектрический;б – термопневматический

При включении актюатора, происходит деформация подвижной мембраны, что, в свою очередь, приводит к изменению объема рабочей области микронасоса. В результате возникает разность давлений жидкостей, находящихся в рабочей области, на входе и на выходе микронасоса. Под воздействием жидкости, находящейся в рабочей области, входной клапан закрывается, а выходной – открывается. При этом избыточная жидкость удаляется из рабочей области микронасоса через выходной клапан. Давления жидкости в рабочей области, на входе и выходе микронасоса выравниваются.

При выключении актюатора подвижная мембрана возвращается в первоначальное положение и объем рабочей области микронасоса восстанавливается. В результате снова возникает разность давлений жидкостей, находящихся в рабочей области, на входе и на выходе

микронасоса. Под воздействием жидкости, находящейся на входе микронасоса, входной клапан открывается, а под воздействием жидкости, находящейся на выходе микронасоса, выходной клапан закрывается. Рабочая область заполняется жидкостью через входной клапан.

Поршневые механические микронасосы получили более широкое распространение, чем механические микронасосы с активными клапанами, т.к. они позволяют перекачивать больший диапазон жидкостей.

Для увеличения объемов перекачиваемой жидкости микронасосы изготавливают с несколькими рабочими областями.

На рис.15.10 представлена конструкция двухкамерного механического микронасоса с пьезоэлектрической активацией.

Рис.15.10. Двухкамерный пьезоэлектрический микронасос

Механические микросмесители строятся на основе поршневых механических микронасосов. Основное отличие микросмесителей от микронасосов состоит в том, что конструкция микросмесителя содержит несколько входных клапанов и только один выходной.

В настоящее время не существует интегральных конструкций механических микронасосов и микросмесителей. Отдельные части микронасосов (микросмесителей) изготовляются в разных подложках с помощью технологий объемной микрообработки или LIGA. Затем изготовленные части собираются с помощью операции микросборки.

16. Интегральные микродвигатели[2,5,6,]

В настоящее время известны следующие типы интегральных микродвигателей:

1. Электростатические воздушные планарные микродвигатели (ЭВПД).
2. Электростатические диэлектрические планарные микродвигатели (ЭДПД).
3. Пьезоэлектрические микродвигатели (ПД).

В электромеханике известны два способа передачи энергии от статора к ротору – контактный и бесконтактный.

В случае контактного способа передачи энергии от статора к ротору либо

используются специальные элементы (фрикционная вставка в элемент пьезоэлектрического двигателя, ферромагнитная лента между статором и ротором в индуктивных волновых двигателях и т.д.), либо статор и ротор контактируют между собой за счет волновой деформации пьезоэлектрической керамики. В таких двигателях при использовании точных датчиков положения ротора достигается исключительно высокая точность его позиционирования. Вместе с тем в этих двигателях серьезной проблемой становится механическое изнашивание контактирующих элементов статора и ротора.

В ЭВПД используется бесконтактный, а в ЭДПД и ПД – контактный способы передачи энергии. В первом случае ротор не касается поверхности статора, силовое сцепление ротора со статором осуществляется благодаря концентрации полей (электрического или магнитного) над зубцами ротора и статора. Преимущество обусловлено тем, что отсутствует изнашивание поверхностей ротора и статора.

Основной недостаток – невысокая точность позиционирования (в шаговых двигателях), определяемая размерами зубцов ротора и статора. Высокой точности позиционирования можно достичь только при чрезвычайно малых размерах этих зубцов и при очень высокой точности их изготовления. Такое решение значительно усложняет технологию изготовления двигателя, существенно увеличивает его стоимость.

16.1. Электростатические воздушные планарные микродвигатели

Основное отличие электростатических воздушных планарных микродвигателей от классических электростатических двигателей – малый зазор между статором и ротором, равный 1-2 мкм (в классических электростатических макромашинах он равен 1-2 мм). Малый зазор в межэлектродном пространстве определяет относительно высокую плотность "накачиваемой" в образец электрической энергии и, следовательно, эффективность двигателя. Разрабатываются ЭВПД вращательного движения и возвратно-поступательного движения. Ротор в первом случае расположен в подшипниках, во втором – скользит по направляющим. Можно обеспечить достаточно высокую надежность этих двигателей при указанных в литературе основных параметрах (для микродвигателя вращения с диаметром ротора 100 мкм): напряжение электропитания – 100 В; скорость вращения ротора – 50000 об/мин; мощность – 10^{-6} Вт. В ЭВПД трудо осуществить суммирование мощностей. Поэтому маловероятно, что они найдут применение в точной механике широкого назначения. В технологии этих микродвигателей используются дорогостоящие операции: изготовление размеров деталей с точностью не ниже 0,1 мкм; глубокое прецизионное химическое травление и т.д.

Принцип работы планарных электростатических микродвигателей заключается в преобразовании электрической энергии в механическую, выраженную во вращательном движении ротора.

На рис. 16.1 представлен планарный электростатический микродвигатель с двенадцатью полюсами статора (n_1=12) и восьмью – ротора (n_2=8).

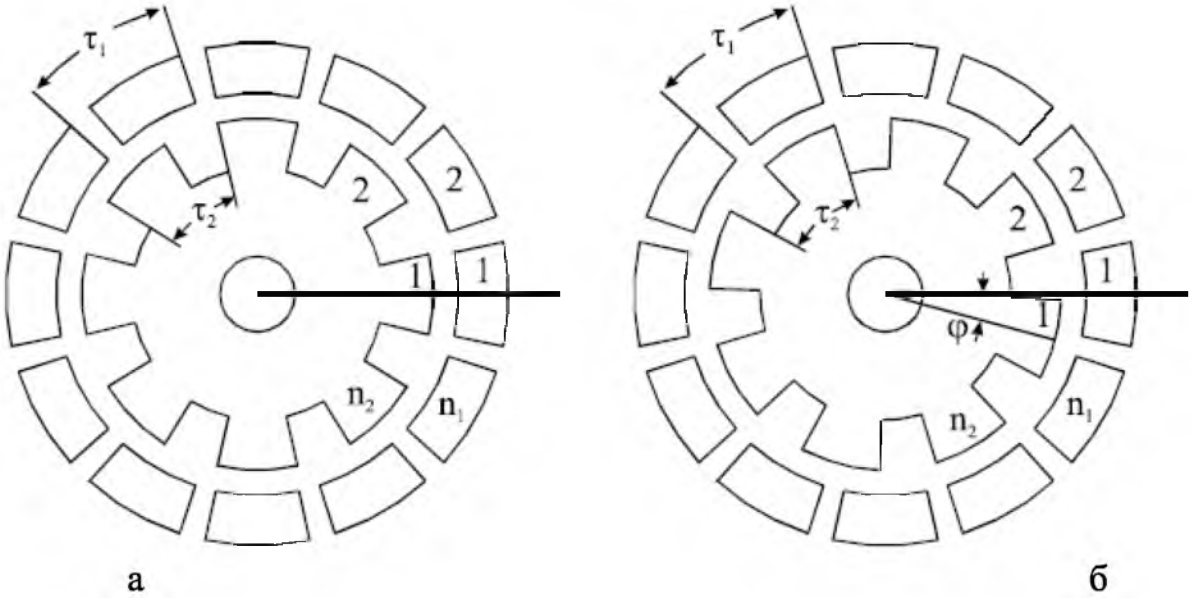


Рис.16.1. Планарный электростатический двигатель: а – начальное положение ротора микродвигателя; б – перемещение ротора микродвигателя

Достоинствами данного вида электростатических микродвигателей являются простота конструкции и не столь строгие требования к структурному материалу микродвигателя.

В основном, в качестве структурного материала планарных микродвигателей, используются электропроводящие материалы.

Угловой шаг размещения полюсов статора и ротора определяется следующим выражением (см. рис. 16.1):

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{n_1}; \qquad \tau_2 = \frac{2\pi}{n_2}; \tag{16.1}$$

где τ_1, τ_2 – угловой шаг полюсов статора и ротора; n_1, n_2 – количество полюсов на статоре и роторе соответственно.

Рассмотрим работу планарного электростатического микродвигателя. Предположим, что напряжение приложено к полюсу статора 1 (см. рис. 16.1,а), т.е. микродвигатель находится в относительном равновесии. Если напряжение будет приложено к полюсу 2 статора, то положение ротора изменится так, что он займет новое положение относительно данного полюса, т.е. вращающий момент, действующий на ротор, повернет его на некоторый угол (см. рис. 16.1,б). Далее цикл повторяется.

На рис. 16.2 приведена последовательность переключения фаз.

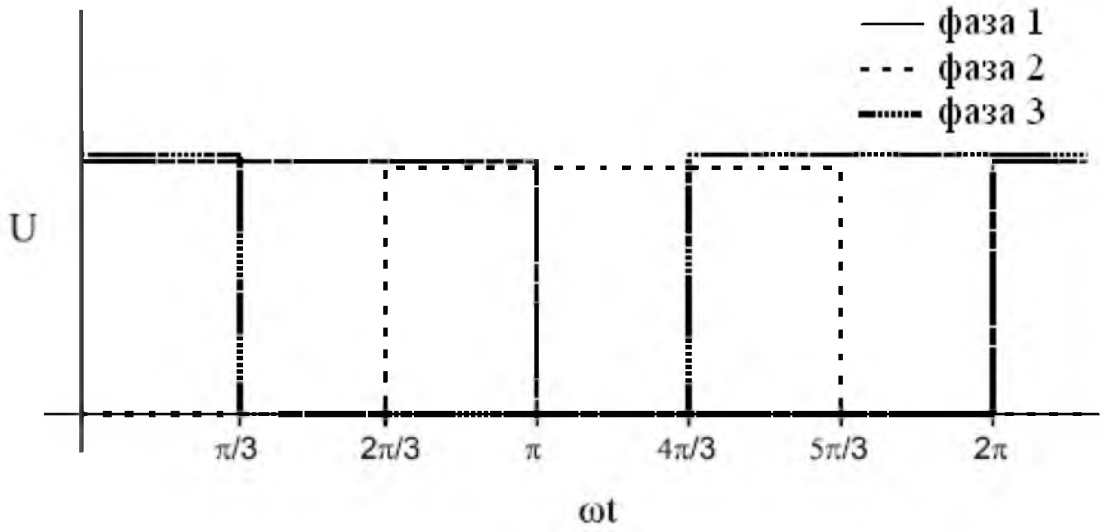


Рис. 16.2. Последовательное переключение фаз

Шаг приращения угла поворота ротора τ_S планарного микродвигателя может быть определен с помощью следующего выражения:

$$\tau_S = min \;\; \tau_1 - i \cdot \tau_2 \;\; = 2\pi \cdot min \;\; \frac{1}{n_1} - \frac{i}{n_2} \;\; = \frac{2\pi}{n_1 \cdot n_2} \cdot min \;\; n_2 - i \cdot n_1 \;\; , \quad i\epsilon \; 0, \; n_2 - 1 \;\; ; \qquad (16.2)$$

Если количество полюсов статора будет меняться в диапазоне $j\epsilon \; 0, q-1$, где q – количество фаз, то выражение (3.36) примет следующий вид:

$$\tau_S = min \;\; j \cdot \tau_1 - i \cdot \tau_2 \;\; = 2\pi \cdot min \;\; \frac{j}{n_1} - \frac{i}{n_2} \;\; = \frac{2\pi}{n_1 \cdot n_2} \cdot min \;\; j \cdot n_2 - i \cdot n_1 \;\; , \quad i\epsilon \; 0, \; n_2 - 1 \;\; , j\epsilon \; 0, q-1 \;\; . \qquad (16.3)$$

Угловая частота планарного электростатического микродвигателя может быть определена с помощью следующего выражения:

$$n = \frac{2\pi}{1 \cdot \tau_S}^{-1} \cdot f, \qquad (16.4)$$

где f – частота переключения фаз.

В табл.16.1 приведены значения углового шага размещения полюсов ротора τ_2 и шаг приращения угла поворота ротора τ_S в зависимости от количества полюсов ротора n_2, при $n_1 = 12$ $(\tau_1 = 30^\circ)$ и q = 3.

Таблица 16.1 Значения τ_2 и τ_S в зависимости от n_2

n_2	4	6	8	11	13	16	18	20
τ_2	90^0	60^0	45^0	32.7^0	27.7^0	22.5^0	20^0	18^0
τ_S	30^0	$\pm 30^0$	-15^0	-2.7^0	2.3^0	7.5^0	$\pm 10^0$	-6^0

Вращающий момент, действующий на ротор, может быть описан следующим выражением:

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta \varphi} = \frac{1 \cdot \Delta C}{2 \cdot \tau_S} U^2, \qquad (16.5)$$

где ΔC – изменение емкости между статором и ротором; U – напряжение между статором и ротором.

На рис. 16.3 представлен планарный электростатический микродвигатель, изготовленный с использованием MUMPs-технологии.

Рис.16.3. Планарный электростатический микродвигатель

16.2. Электростатические диэлектрические планарные микродвигатели

В электростатических диэлектрических планарных двигателях микродвижение создается при электростатическом накате металлизированной органической пленки на поверхность металла или диэлектрика (слои SiO_2, Al_2O_3) в зависимости от того, куда обращен слой металлизации. Основным элементом ЭДПД является пленочная петля (диаметр – несколько миллиметров) из металлизированной пленки полиэтилентерефталата. Характерная особенность ЭДПД – накопление объемного заряда в диэлектрике при каждом акте электростатического наката. Этот заряд формируется на глубоких энергетических центрах (ловушках), характерных для широкозонных некристаллических диэлектриков и препятствует повторному накату металлической пленки. Уменьшение влияния объемного заряда возможно за счет использования импульсов напряжения с более сложной формой – наполнения их более короткими импульсами с разной полярностью. Однако в этом случае значительно снижается энергетическая эффективность микродвигателя.

Схематически принцип работы такого микродвигателя иллюстрирует рис. 16.4.

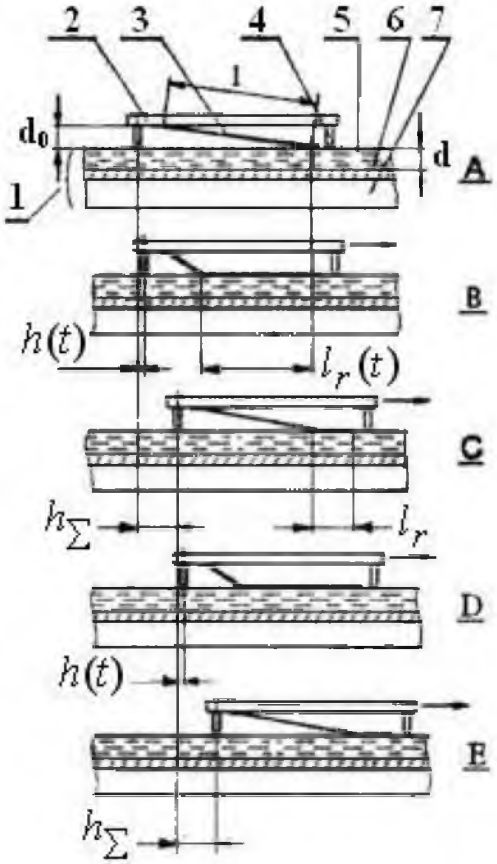


Рис.16.4. Принцип работы планарного микродвигателя на основе тонких сегнетоэлектрических пленок:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – лепесток; 4 – направляющие; 5 – диэлектрическая пленка; 6 – электрод; 7 – подложка

Неподвижная пластина (статор) 1 представляет собой кремниевую подложку 7, на поверхность которой последовательно нанесен электрод 6, а затем сегнетоэлектрическая пленка 5. Подвижная пластина (ротор) 2, разделенная от статора зазором d, с синтезированными на ее поверхность металлическими лепестками 3 длиной l перемещается относительно статора по направляющим (по опорам) 4. При подаче импульса напряжения между лепестком 3, находящимся в исходном состоянии (А), и электродом 6 происходит электростатический накат части поверхности лепестка на поверхность сегнетоэлектрика (состояние В). Перемещающаяся в пространстве металлическая пленка изгибается, происходит ее натяжение и она передает движение пластине 2, осуществляя таким образом электромеханическое преобразование энергии. Длина наката $l_r(t)$ возрастает во время действия импульса напряжения t_P, соответственно изменяется во времени и шаг $h(t)$ перемещения ротора.

После прекращения действия импульса напряжения лепесток под действием упругих сил, возникающих при его изгибе, возвращается в исходное положение А (при одиночном импульсе напряжения) или переходит в новое положение С, характерное для непрерывного движения ротора (при подаче на образец серии импульсов); при этом ротор продвигается по

инерции на расстояние h. От длительности этого процесса (процесса отлипания лепестка от поверхности сегнетоэлектрика) зависит минимальный интервал времени между соседними импульсами напряжения, т.е. максимальная частота следования f этих импульсов и соответственно мощность, развиваемая микродвигателем. При подаче на образец второго импульса напряжения движущаяся пластина с лепестками делает еще один шаг и переходит в состояние Е. После окончания импульса происходит пролет ротора по инерции в состояние D (и изменение конфигурации лепестков, аналогичное позиции С). При поступлении третьего импульса и далее движение происходит аналогично: от позиции В к позиции С с соответствующим перемещением пластины 2.

Распластывание лепестка под действием электростатических сил начинается с момента касания поверхности лепестка и сегнетоэлектрика – процесса "захвата" лепестка, который определяет дальнейший характер "электронного приклеивания" лепестка к поверхности сегнетоэлектрика.

Процесс отлипания лепестка определяют силы, удерживающие концы лепестков у поверхности сегнетоэлектрика – адгезионные, гидродинамические, электростатические силы, связанные с остаточными электрическими зарядами в диэлектрике, точнее, с поверхностной неоднородностью распределения зарядов под площадью лепестка.

После прекращения действия импульса напряжения в распластанной части лепестков вблизи микронеровностей возникает противодействие упругих сил локально деформированных участков лепестков и трех указанных сил.

Как показывают исследования, роль адгезионных сил значительно меньше роли сил, связанных с остаточными электрическими зарядами. Площадь физического касания лепестков с диэлектриком много меньше видимой площади их касания, а адгезионные силы проявляют себя только при прямом контакте двух тел. Кроме того, не происходит абсолютно плотного касания двух поверхностей, воздушный зазор между ними составляет от 30 до 200 А° в зависимости от шероховатости поверхности диэлектрика.

Ниже приведены некоторые экспериментальные результаты, полученные при исследовании данных микродвигателей

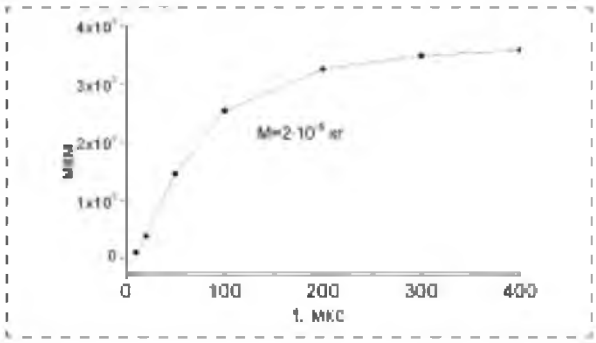


Рис.16.5. Изменение длины электростатического наката металлической пленки во времени в момент действия импульса напряжения

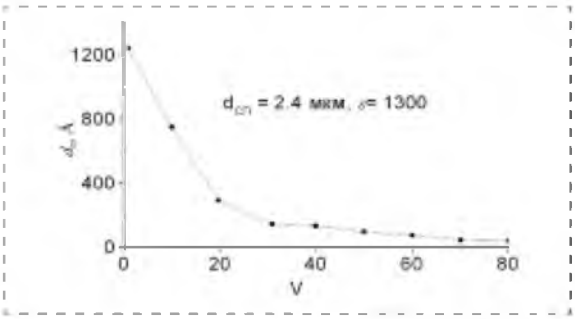


Рис.16.6. Изменение толщины воздушного зазора между поверхностями сегнетоэлектрика и металлической пленки с увеличением амплитуды напряжения

С использованием указанного способа преобразования энергии возможно создание семейства микродвигателей, отличие которых от электростатических микродвигателей на основе линейных диэлектриков связано с большим значением диэлектрической постоянной ε СП. Кроме того, в кристаллическом слое сегнетоэлектрика накапливается значительно меньший электростатический заряд, что также предопределяет достижение микродвигателем большей мощности, допускает его работу до тактовых частот 20 кГц и более. Высокое значение $C_{уд}$ структур металл — СП — лепесток, до 300...1000 пФ/мм^2, дает возможность "накачки" в образец исключительно большой удельной энергии A_R — до 0,3...3 Дж/м^2 и более.

Большие силы притяжения двух поверхностей определяют высокую скорость наката металлической пленки на поверхность сегнетоэлектрика. На рис.16.5 представлено увеличение длины электростатического наката во времени при нагрузке массой М = 2 • 10^{-6} кг. Как видно, за 50... 100 мкс длина наката может достигать значений 1...2 мм.

Экспериментальные образцы микродвигателей состояли из двух подложек с регулируемым зазором между ними в 50...200 мкм. На поверхность неподвижной пластины, статора, методом ВЧ-напыления наносились электрод ITO и далее сегнетоэлектрическая пленка $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Nb_2O_6$ (ниобат бария- стронция — НБС, с ε = 3000...4000). Толщина пленок НБС $d_{сп}$= 1...4 мкм, они текстурированы, с ориентацией кристаллической оси С нормально к плоскости подложки.

На поверхности ПП методами вакуумного напыления, фотолитографии и травления буферного подслоя формировалась закрепленная на одном конце свободная металлическая пленка — лепесток с длиной l = 1...3 мм, шириной b = 200...500 мкм и толщиной d_p = 1...2 мкм, изготовленная из бериллиевой бронзы (2 % бериллия). Обратимый характер электростатического наката лепестка дает возможность многократного осуществления этого процесса и перемещения ПП на большие расстояния, — в реальном эксперименте до 8... 10 см. Тактовая частота воздействия импульсов напряжения,

обеспечивающих движение ПП, полученная в реальных экспериментах 1...20 кГц. Сопоставление значений удельной емкости структур М—СП—М и структур М—СП—подвижный электрод (лепесток) дает возможность оценить, исходя из выражения $C = C_{мспм}C_z/(C_{мспм} + C_z)$, значение емкости воздушного зазора металл — сегнетоэлектрик C_z, толщину этого зазора d_z, и ее зависимость от напряжения V.

Типичный пример такой экспериментальной зависимости для одного из конкретных образцов М—СП—лепесток представлен на рис. 16.6. Как видно, при больших амплитудах V значение d_z может достигать 30...50 А, в зависимости от качества поверхности СП и технологии ее изготовления. Такое значение d_z дает основание рассчитывать на получение высокой напряженности электрического поля в зазоре и соответственно больших сил притяжения двух поверхностей, не достижимых ни в каких других многослойных конструкциях.

Анализ распределения электростатической силы притяжения лепестка F к поверхности СП с изменением значения d_z ($F = 0{,}5\ V^2(dC_z/d_z)$) для заданных значений V и соотношения $\varepsilon/d_{сп}$ (Рис. 16.7) показывает, что только при $\varepsilon/d_{сп}$ больше, чем $3 \cdot 10^8$ ($\varepsilon > 500$), можно получить высокие значения этих сил.Отметим, что при использовании линейных диэлектриков, например SiO_2, для получения эффекта нелинейного роста поля в воздушном зазоре, обеспечивающем соизмеримо высокую энергоемкость, соответствующую, например, $\varepsilon/d_{сп} = 10^9$, нужно, чтобы толщина этого слоя была 40 А, что для практических применений не реально. Поскольку ни один из линейных диэлектриков не обладает такими большими значениями ε, то можно утверждать, что только сегнетоэлектрические материалы способны обеспечить указанные высокие силы притяжения двух поверхностей под действием электрического поля. На основе указанного способа электромеханического преобразования энергии возможно построение не только силовых устройств, микродвигателей или микроактюаторов, но и принципиально других микроэлектронных конструкций.

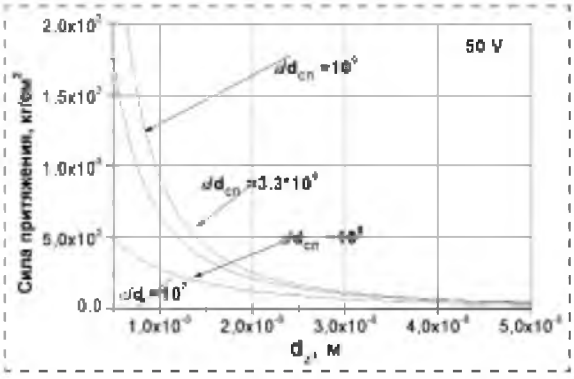


Рис.16.7. Изменение давления в зазоре металл-сегнетоэлектрик по мере их сближения для разных значений $\varepsilon/d_{СП}$.

Одним из таких устройств является микроклапан, его принцип действия основан на перекрытии отверстия в пластине, на поверхности которой создана структура металл — сегнетоэлектрик, тонкой металлической пленкой, прижимающейся к поверхности сегнетоэлектрика силами электростатики при включении импульса напряжения. Схематично одна из возможных конструкций такого микроклапана представлена на рис 16.8. Упругая металлическая пленка при воздействии импульса напряжения изменяет свою форму и прижимается к поверхности указанной пластины, перекрывая отверстие. Сила этого прижатия зависит от качества сегнетоэлектрической пленки, в первую очередь, от значения E, а также от площади металлической пленки и амплитуды импульса напряжения. Длительность процесса перекрытия отверстия может лежать в пределах 30...300 мкс в зависимости от значения V.

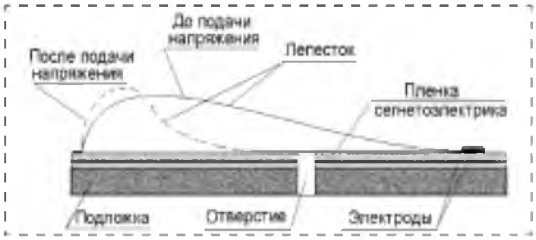


Рис.16.8. Схема конструкции микроклапана

Фотография одного из микроклапанов представлена на рис. 16.9. Он имеет два состояния: "открыто" (рис.16.9, а) и "закрыто" (рис. 16.9, б), и состоит из тонкой пленки бронзы, пластинки сапфира, на поверхность которой последовательно нанесены электрод из ITO и пленка НБС, толщиной 3 мкм. Отверстие в сапфире и в структуре СП—М с диаметром 100 мкм создано с помощью импульсного твердотельного лазера. Толщина металлической пленки бронзы 1,5 мкм, площадь электростатического наката — 10... 15 мм^2. Как видно из рис. 16.9.б, в момент наката сила прижатия металлической пленки к пластине настолько велика, что ее поверхность имеет однородный зеркальный блеск. Изменение значения емкости наката С данного образца микроклапана с увеличением прикладываемого к образцу напряжения представлено на рис. 16.10. Из этого графика, полагая, что отверстие находится на расстоянии 1 мм от точки начала наката, можно оценить силу, развиваемую при его закрытии. В частности, при V= 40 В эта сила равна порядка 10^{-2} Н. Тогда с учетом соотношения площадей электростатического наката и отверстия можно оценить давление, которое может "перекрыть" данный микроклапан, — оно должно лежать в пределах нескольких атмосфер.

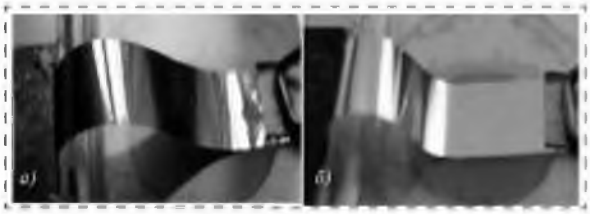


Рис.16.9. Фотографии одного из микроклапанов

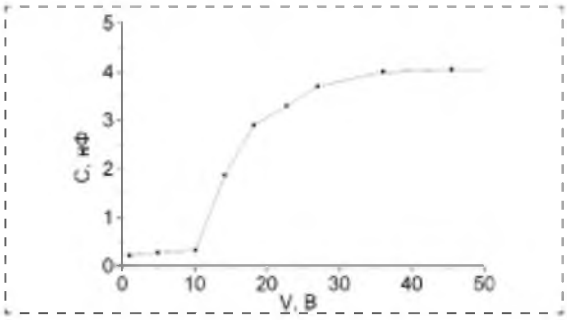


Рис.16.10. Изменение емкости электростатического наката при закрытии отверстия микроклапана

Перевод клапана из состояния "закрыто" в состояние "открыто" осуществляется при выключении импульса напряжения, за время $t_{выкл}$. Значение $t_{выкл}$ практически равно длительности спада этого импульса и может быть меньше, чем 1 мкс Столь короткое время определяется тем, что электростатический накат лепестка на микровыступы поверхности СП сопровождается обратимой локальной его деформацией. При снятии импульса напряжения накопленная упругая энергия высвобождается, что приводит к эффекту очень быстрого отрыва металлической пленки от поверхности СП. Этот эффект открывает возможность работы микроклапана на высоких тактовых частотах, свыше 1 — 10 кГц.

Высокие значения сил прижатия лепестка к поверхности сегнетоэлектрика, сил "электронного клея", и, соответственно, высокие значения тангенциальных сил, способных сдвинуть лепесток относительно поверхности СП, дают основания рассчитывать на то, что микроклапан в состоянии "закрыто" способен выдержать больший, чем при процессе его закрытия, перепад давления. Как показали прямые экспериментальные исследования сдвига двух указанных поверхностей одной относительно другой, сила, способная осуществить этот сдвиг, зависит от энергоемкости наката, с коэффициентом пропорциональности — (3-5)10^5 Н/Дж. При V= 40 В эта сила достигает значений до 1 — 1,5 Н и тогда, с учетом соотношения площадей отверстия и электростатически прижатого лепестка, указанный перепад давления может составлять до 10 атм и выше.

Отметим,что описанный принцип создания микроклапана может быть использован и при создании аналогичных структур на подложке из кремния, а

также на основе сегнетоэлектрической керамики, при этом большое соотношение площадей отверстия и электростатического наката не требует высокой точности в согласовании геометрических параметров компонентов микроклапана, даже при изготовлении матрицы микроклапанов.

16.3. Пьезоэлектрический микродвигатель

Принцип работы пьезоэлектрических микродвигателей основан на преобразовании колебаний пьезоэлектрического статора во вращательное движение полупроводникового ротора.

На рис.16.11 представлена структура пьезоэлектрического микродвигателя, состоящего из статора и ротора.

Рис.16.11. Пьезоэлектрический микродвигатель

Статор представляет собой мембрану, закрепленную на подложке с помощью упругого подвеса (рис.16.12). В центре мембраны расположен пьезоэлектрический слой ZnO. Диаметр статора – 2 мм.

На рис.16.13 представлен ротор пьезоэлектрического микродвигателя.

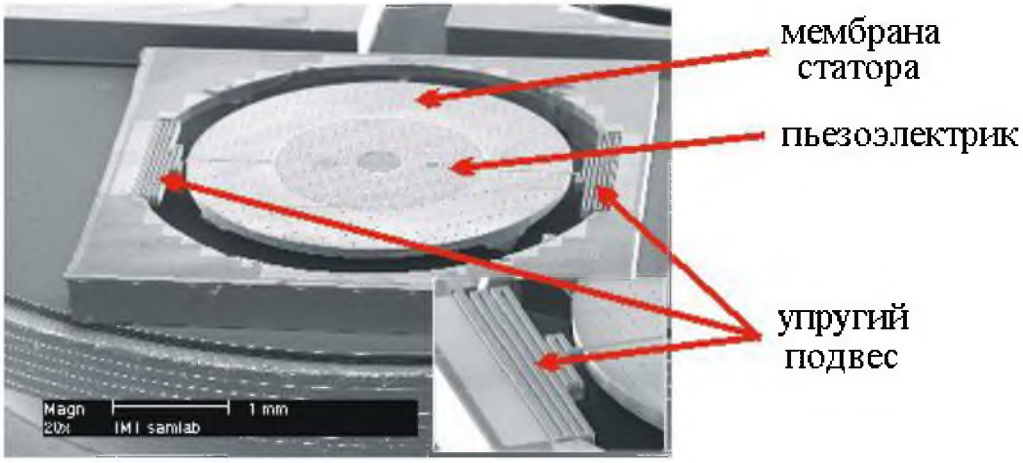
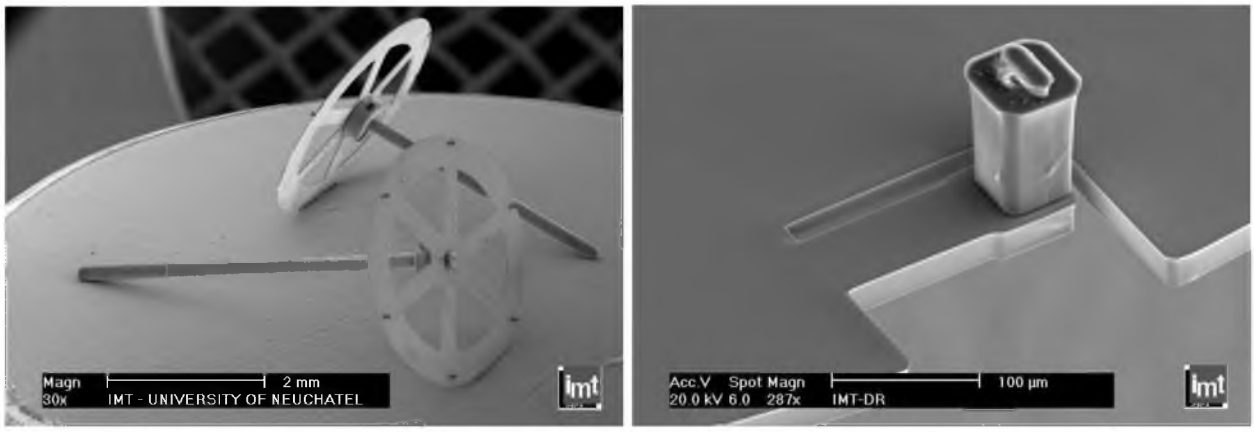


Рис.16.12.Статор пьезоэлектрического микродвигателя

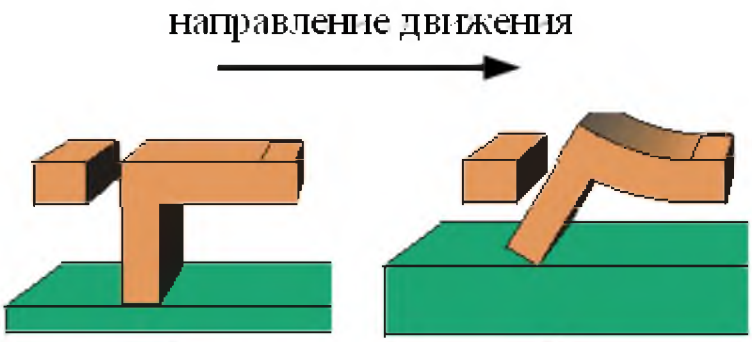
Как видно на рис.16.13, размеры ротора составляют: длина – 5 мм, диаметр– 2 мм. Высота зубцов ротора – 100 мкм.

При отсутствии внешнего напряжения статор и ротор находятся в покое (рис.16.14,а). При подаче импульса напряжения на пьезоэлектрический актюатор статора происходит изменение его геометрических размеров, что в свою очередь приводит к деформации зубцов ротора (рис.16.14,б). Таким образом, ротор под действием сил упругости смещается на некоторое расстояние вокруг своей оси. Когда напряжение убирается, статор возвращается в первоначальное положение, а ротор оказывается смещенным на некоторое расстояние относительно своего первоначального положения. Далее цикл повторяется.



а б

Рис.16.13. Ротор пьезоэлектрического микродвигателя: а – внешний вид ротора;б – зубец ротора



а б

Рис.16.14. Принцип работы пьезоэлектрического микродвигателя: а – до активации пьезоактюатора; б – после активации пьезоактюатора

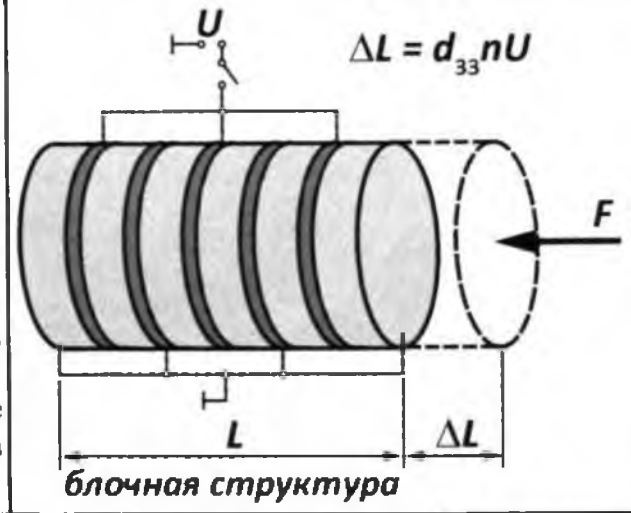
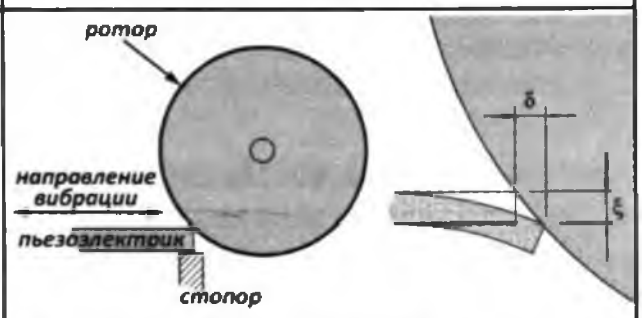
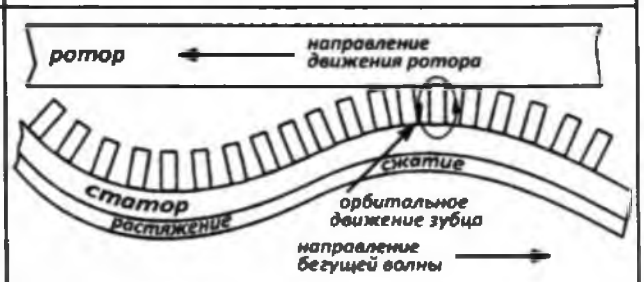
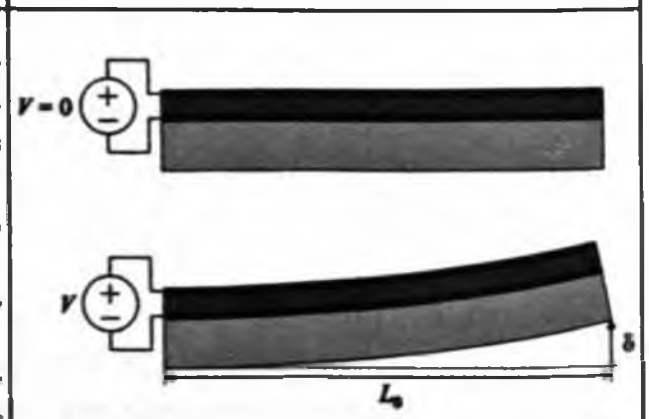
Данный вид микродвигателей изготавливается с использованием LIGA-технологии, позволяющей создавать роторы устройства с большим аспектным отношением. Основным недостатком данной конструкции микродвигателя является наличие операции микросборки в

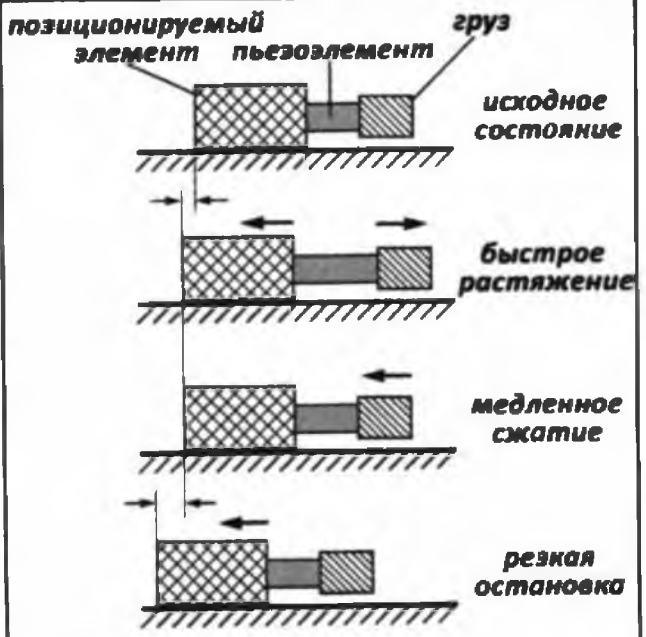
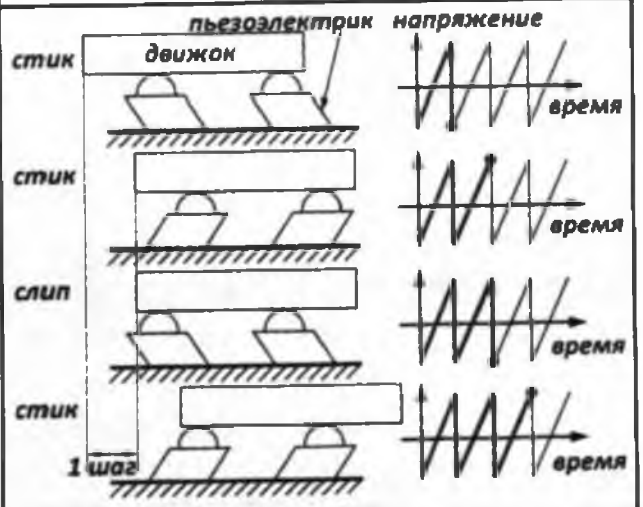
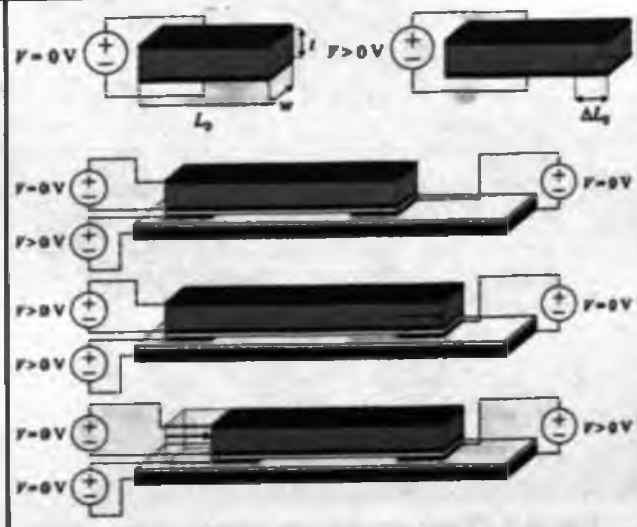
технологическом процессе изготовления, что не позволяет использовать групповые методы изготовления и снижает степень интеграции данных устройств.

На сегодняшний день известен широкий круг пьезоэлектрических материалов с различной степенью асимметричности кристаллической решетки, что позволяет подобрать необходимые пьезоэлектрические коэффициенты для конкретной области применения. Кроме того, стало возможным создавать пьезоэлектрическую керамику поляризацией некоторых сегнетоэлектрических материалов. Это обусловливает многообразие систем активации на основе пьезоэлектрических устройств

Схемы пьезоэлектрических микро- и наноактюаторов представлены в таблице 16.3.1.

Таблица 16.3.1.

Тип актюатора, принцип действия, основные преимущества и недостатки	Конструкция актюатора
Блочные актюаторы *Принцип действия:* пластины пьезоэлектрика и проводника располагают последовательно, расширение происходит за счет разности потенциала между пластинами проводника. *Преимущества:* простота реализации, высокое разрешение, высокая скорость отклика, высокая мощность, низкое энергопотребление. *Недостатки:* низкая степень деформации, гистерезис перемещения. Актюаторы этого типа получили широкое практическое применение (в частности, в устройствах нанопозиционирования).	
Двигатели вращения стоячей волны (ультразвуковые) *Принцип действия:* пьезоэлектрик используется для получения вибрации, вращающей ротор. *Преимущества:* простота реализации. *Недостатки:* низкая выходная мощность, низкое разрешение, низкий КПД.	
Двигатели вращения бегущей волны (ультразвуковые) *Принцип действия:* ротор подвергается сжатию в направлении, противоположном статору, образуя движение, обратное направлению волны. *Преимущества:* высокое разрешение, высокая выходная мощность. *Недостатки:* сложность реализации. Актюаторы используют в устройствах автофокусировки.	
Биморфные актюаторы *Принцип действия:* деформация балки за счет разности параметров ячейки двух пьезоэлектриков (один – в растянутом, другой – в сжатом состояниях). *Преимущества:* высокая общая деформация, низкая стоимость, малое энергопотребление. *Недостатки:* небольшая выходная мощность, медленное действие, низкий КПД. Находят широкое применение в микрозеркалах, микроманипуляторах, дозаторах, насосах, клапанах, датчиках расхода жидкости и газа.	

Тип актюатора, принцип действия, основные преимущества и недостатки	Конструкция актюатора
Двигатель с ударным механизмом *Принцип действия:* в двигателе этого типа используют трение покоя и силу удара, которая возникает из-за резкой деформации пьезоэлемента. На первой стадии движения пьезоэлемент быстро растягивают, генерируя большую "реактивную" силу позиционируемого элемента, превышающую силу трения покоя. Затем пьезоэлемент медленно сжимают и резко останавливают, что позволяет использовать инерцию груза и дополнительно передвинуть позиционируемый элемент. *Преимущества:* высокая скорость линейного движения, простота реализации. *Недостатки:* низкое разрешение, низкий КПД.	
Двигатель "стик-слип" *Принцип действия:* пьезоэлектрические ножки с подвижной верхней частью используют для пошагового перемещения движка, резкий перепад напряжения позволяет деформировать пьезоэлемент, тогда как положение движка не изменяется ввиду его инерции. *Преимущества:* высокая скорость линейного движения. *Недостатки:* низкое разрешение.	
Шаговые двигатели с червячной передачей *Принцип действия:* передвижение происходит за счет последовательного использования 3-х пьезоэлектриков. *Преимущества:* неограниченное перемещение, высокое разрешение, скорость до 2мм/с. *Недостатки:* сложность реализации, высокая цена, невысокая боковая нагрузка.	

17. ЛАБОРАТОРИИ-НА-КРИСТАЛЛЕ [3]

Под термином «лаборатория-на-кристалле» понимается миниатюрное устройство, предназначенное для проведения различных химических и физических процессов со сверхмалыми объемами и количествами веществ неорганической и органической природы, находящихся в жидком или газообразном состоянии, с высокой степенью локализации воздействия.

Типичные размеры элементов лабораторий составляют от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, а типичная скорость перекачки жидкости – от нескольких микролитров до десятков миллилитров в минуту.

Основное применение данные микросистемы находят в медицине (химический анализ жидкостей, крови, ДНК; системы дозирования и ввода различных лекарственных препаратов).

Лаборатории-на-кристалле по сравнению с традиционными системами анализа имеют следующие преимущества:

– малое время отклика. Микролаборатория с высокой скоростью позволяет доставлять малые объемы анализируемого вещества в область реакции, изменять его физические и химические характеристики (нагревать/охлаждать, смешивать с другими веществами) и далее доставлять продукты реакции в область анализатора;

– низкие потери. Интегральное исполнение лабораторий позволяет снизить потери в потоках реагентов и продуктов реакции. Это является важной характеристикой этих устройств при работе с опасными или дорогими реагентами, а также при дозировке лекарственных препаратов;

– высокое значение отношения площади поверхности к объему жидкости. Данное свойство позволяет эффективно смешивать жидкие реагенты или обеспечивать большую площадь реакции с реагентом в твердом состоянии, а также улучшать теплопередачу для нагревания или охлаждения анализируемых веществ и обеспечивать возможность эффективного контроля температурного режима реакций.

Состав каждой лаборатории-на-кристалле определяется ее назначением. При изготовлении лабораторий в основном нашли применения LIGA-технология, технология объемной микрообработки кремния, жидкостное химическое травление стекла и сухие пленочные фоторезисторы. Данные технологии позволяют снизить стоимость различных подсистем и изготавливать одноразовые подсистемы лабораторий, предназначенные для работы с образцами при диагностике опасных заболеваний (СПИД, гепатит и т.д.).

Также важной особенностью при изготовлении лабораторий-на-кристалле является выбор подложки, которая должна удовлетворять следующим требованиям:

– химическая инертность по отношению к анализируемым веществам, реагентам и продуктам реакции;

– возможность реализации в подложке канала с микронными размерами; – высокие диэлектрические свойства.

Несмотря на преимущества лабораторий-на-кристалле перед

традиционными системами анализа веществ, при проектировании данных микросистем также возникают некоторые проблемы. Уменьшение размеров подсистем лабораторий приводит к возникновению трудностей при моделировании как механических, так физических и химических процессов, происходящих в микросистеме.

17.1. Газовый хроматограф

В начале 80-х годов в Стэндфордском университете (США) был разработан первый прототип интегральной лаборатории-на-кристалле, названный газовым хроматографом.

Газовый хроматограф позволяет установить наличие тех или иных веществ в газовой пробе. Математическая обработка сигнала хроматографа позволяет определить не только факт наличия веществ, но и процентный состав анализируемой смеси.

Основная идея газовой хроматографии состоит в следующем. Смесь газов пропускают через транспортную систему, имеющую поверхность с известными характеристиками. Когда газовая проба вместе с газом-носителем движется через транспортную систему, взаимодействие молекул газа со стенками приводит к возрастанию отличий в подвижности между компонентами газовой смеси. Из-за различной подвижности разные компоненты смеси достигают конца системы за разное время, что позволяет идентифицировать составляющие фракции. Момент прихода того или иного компонента газа к концу колонки фиксируется терморезистором.

Блок-схема газового хроматографа показана на рис.17.1. Устройство размещено на кремниевой подложке и занимает площадь 4 мм^2.

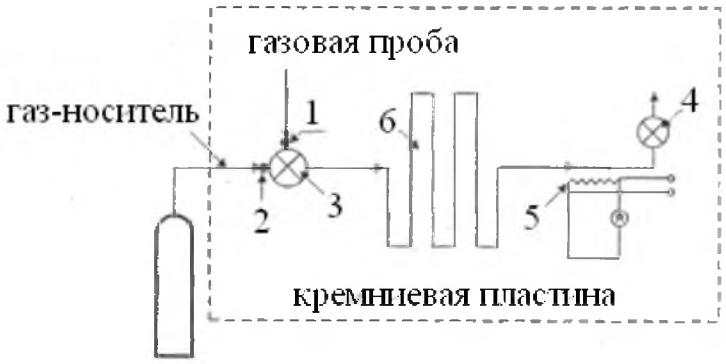


Рис.17.1. Структура газового хроматографа:
1 – вход вентиля газовой пробы; 2 – вход вентиля газа носителя; 3 – входной вентиль; 4 – выходной вентиль; 5 – терморезисторы; 6 – транспортная система

Все составляющие хроматографа выполнены с применением методов фотолитографии, химического травления и электростатического соединения.

Эффективность работы любого хроматографа пропорциональна отношению длины транспортной системы и коэффициента диффузии изучаемого компонента газовой смеси. Поэтому при конструировании хроматографов

стремятся увеличить длину транспортной системы.

В рассматриваемом хроматографе транспортная система представляет собой капилляр в виде спиральной канавки шириной 200 мкм, глубиной 40 мкм и длиной 1,5 м, полученной изотропным травлением кремниевой подложки. После того как кремниевая подложка электростатически соединяется со стеклянной пластиной, спиральная канавка превращается в капиллярную газовую разделительную систему, спиральные участки которой герметически изолированы благодаря прочному соединению кремния со стеклом.

Газ в колонку поступает через вентиль, выполненный в кремниевой подложке. Тело вентиля создается в три этапа. Сначала с помощью изотропного травления делают углубление, образующее цилиндр вентиля. Вторым изотропным травлением формируют углубление, где располагается диафрагма вентиля. На заключительном этапе с помощью анизотропного травления в пластине формируют маленькие отверстия входа и выхода вентиля. В качестве гибкой герметизирующей диафрагмы вентиля используют тонкий (5...15 мкм) никелевый диск, изгибаемый с помощью небольшого соленоида.

Поверхность герметизирующей диафрагмы и тело вентиля покрыты органической пленкой парилена, предохраняющей от утечек газа.

Терморезистор изготавливается методами микроэлектронной технологии на отдельной подложке кремния. На первом этапе исходная подложка окисляется с двух сторон, так что на обеих ее сторонах создается защитная маска из SiO_2. На одной стороне с помощью фотолитографии формируется терморезистор толщиной 1000 Å. На обратной стороне подложки вскрывают окно в защитном слое SiO_2 и с помощью технологии объемной микрообработки удаляют весь кремний до стоп-слоя из двуокиси кремния на передней стороне кремниевой подложки. Таким образом, терморезистор оказывается термически изолирован от кремниевой подложки. Газы, разделяемые в капиллярной системе, проходят над терморезистором, а затем выпускаются. Благодаря хорошей термической изоляции терморезистора от остальной конструкции хроматографа его сопротивление при заданном расходе протекающего газа зависит от теплопроводности окружающей газовой среды. Изменение теплопроводности приводит к изменению локальной температуры терморезистора и, следовательно, его сопротивления. Предварительная градуировка терморезистора позволяет по изменению его сопротивления установить наличие того или иного компонента газовой смеси. Этому способствует высокий температурный коэффициент сопротивления никеля – около 0,55 % град$^{-1}$.

Газовый хроматограф работает следующим образом. После полной продувки системы инертным газом-носителем, который поступает на вход 2 под избыточным давлением 0,2 атм., вентиль 3 открывается и через вход 1 в капиллярную систему поступает проба неизвестного газа под давлением

несколько выше, чем 0,2 атм. После введения пробы объемом около 5 нанолитров вентиль снова закрывается и газ-носитель переносит пробу через транспортную систему 6. Поскольку вытравленный капилляр имеет наполнитель для газовой хроматографии, входящие в состав пробы компоненты разного молекулярного веса проходят через систему с разной скоростью и поэтому выходят из системы последовательно. Терморезистор 5 воспринимает колебания теплопроводности газового потока, и изменение его сопротивления приводит к изменению падения напряжения на нем. Типичный вид сигнала с газового хроматографа показан на рис. 17.2.

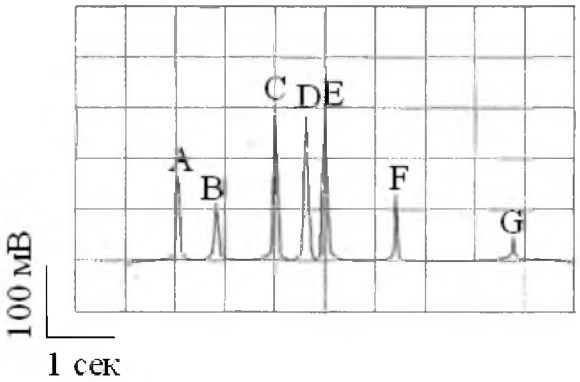


Рис.17.2. Выходной сигнал газового хроматографа: A – азот; B – пентан; C – дихлорметан; D – дихроформ; E – трихлорэтан; F – трихлорэтилен; G – толуол

В состав хроматографа входит несколько вентилей и вспомогательных газовых каналов, обеспечивающих предварительную подготовку прибора к работе, например, блок продувки, канал выброса неиспользованной пробы, автоматический измеритель интервалов времени.

В настоящее время имеются сообщения о разработке вариантов газового хроматографа, способного определить наличие в пробе газа восьми составляющих в течение трех минут с абсолютной погрешностью до 10^{-5}.

17.2. Жидкостный хроматограф

Жидкостный хроматограф включает в себя не только систему разделения, но и систему количественного измерения содержания каждого компонента, т.е. систему детектирования (вместе с системой обработки хроматографического сигнала).

Для обеспечения анализа многокомпонентных смесей с высокой чувствительностью жидкостный хроматограф должен иметь в своем составе ряд блоков.

Схема жидкостного хроматографа приведена на рис. 17.3. В состав любого хроматографа входят пять обязательных составных частей: насос для подачи подвижной фазы через колонку (1), дозатор для введения пробы в колонку (2), разделительная колонка – сердце хроматографа (3), детектор – устройство для получения аналитического сигнала, пропорционального концентрации компонента (4), система обработки – преобразователь

аналитического сигнала в форму, удобную для восприятия системой автоматического управления (5).

В состав хроматографа для удобства работы и расширения его аналитических возможностей могут входить ряд дополнительных устройств.

1) Устройство подготовки подвижной фазы.

Функции – фильтрование и дегазация растворителей. Фильтрование – методом пропускания растворителя через фильтр 0,2-0,5 мкм перед заливкой его в емкость или методом установки на входе насоса фильтра с небольшим сопротивлением. Дегазация – вакуумом или нагреванием, или пропусканием через растворитель инертного газа, например, гелия.

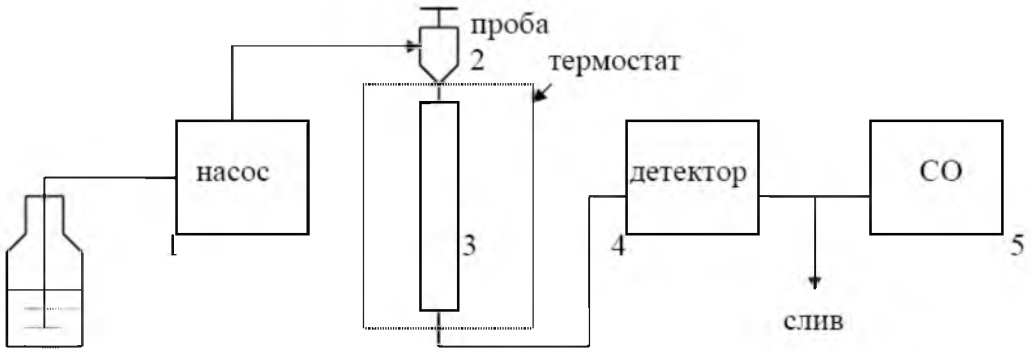


Рис.17.3.Структура жидкостного хроматографа

2) Термостат колонок.

Адсорбция в жидкостных и газовых хроматографах – процесс термодинамический, зависит от температуры. Следовательно, величина удерживания зависит от температуры. Кроме того, от температуры зависит вязкость растворителя, что определяет эффективность колонки. Таким образом, все три основные характеристики колонки: селективность, емкость и эффективность зависят от температуры. Для стабилизации условий разделения, чтобы получить воспроизводимые времена удерживания, амплитуды пиков и хорошее разделение, необходимо термостатирование колонок. Обычно температура термостата 30-50°С, стабильность поддержания температуры – 0,3-0,5°С. Многие жидкостные хроматографы не имеют термостатов, так как колебания температуры в комнате не очень велики и воспроизводимость показаний приемления.

3) Послеколоночный реактор.

В ряде случаев трудно найти подходящий способ прямого детектирования выходящих из колонки компонентов (анализ аминокислот, определение тяжелых металлов и т.д.). В этом случае после колонки ставится реактор, где смешивается реагент и разделенные вещества (например, металлы). При этом получают интенсивно окрашенное соединение, которое можно детектировать на фотометре.

4) Автоматический дозатор (автосамплер).

Автоматический дозатор необходим в случае многократного повторения анализа больших серий однотипных образцов. При этом используется один расход растворителя, одна колонка. После окончания анализа (выхода

последнего пика) производится автоматический ввод следующей пробы. Сами пробы предварительно заливаются в ампулы, которые устанавливаются на специальном столике. Специальный насос засасывает из ампулы пробу, прокачивает ее через пробоотборную петлю дозатора. При повороте дозатора петля промывается элюентом и проба попадает в колонку.

5) Градиентное устройство.

В ряде случаев при разделении сложных смесей необходимо в процессе разделения изменять состав растворителя по определенному закону для ускорения анализа и улучшения разделения. Эту роль выполняет градиентное устройство.

Все основные узлы жидкостного хроматографа связаны между собой транспортными системами (насос – дозатор – детектор). Для этих целей обычно используются капилляры из нержавеющей стали внутренним диаметром 0,2-0,3 мм, наружным диаметром 1,0-1,6 мм. Эти капилляры могут выдерживать давление до 1000 атм., достаточно гибки и не поддаются коррозии. Однако в ионообменной и ионной хроматографии коррозионная стойкость нержавеющей стали мала, происходит реакция железа, марганца, никеля, кобальта с реагентами, что вносит существенные помехи при определении этих металлов в пробе. В этом случае капилляры выполняются из титан-циркониевых сплавов.

В последнее время за рубежом получили распространение капилляры из полиэтерэтеркетона, обладающих высокой коррозионной стойкостью и большой механической прочностью (держат давление до 300-400 кгс/см^2). Однако их стоимость в 4-5 раза выше, чем у титановых капилляров. Применение фторопластовых капилляров себя не оправдало из-за их малой механической прочности.

Сорбенты, используемые в жидкостных хроматографах, характеризуются высокой скоростью массопередачи, что достигается, главным образом, уменьшением размера частиц сорбента. Это позволяет работать при высоких линейных скоростях потока подвижной фазы, что резко сокращает время анализа. Но при малых размерах частиц сорбента высокая скорость потока через колонку может быть реализована в случае, если растворитель подается в колонку под высоким давлением (до 150-250 атм.).

Для обеспечения высокой скорости разделения колонки в данных устройствах имеют небольшой размер. Но чем меньше колонка, тем меньше, для исключения перегрузок, должен быть объем вводимой пробы (не более 1% от объема колонки). При этом уменьшается и объем растворителя, соответствующего хроматографическому пику. Для исключения расширения пика в детекторе объем детектора должен быть не более 10% от объема минимального пика (не более 10 мкл). Так как пробы вводится в дозатор очень мало, то детектор в хроматографе должен иметь высокую чувствительность.

В табл.17.1 представлены характеристики хроматографической колонки.

Таблица 17.1. Характеристики жидкостного хроматографа

Параметр	Значение
Размер частиц сорбента, мкм	5 – 7.5
Длина колонки, см	15 – 25
Внутренний диаметр, мм	4,6
Расход подвижной фазы, мл/мин	1 – 2
Линейная скорость подвижной фазы, см/мин	15
Рабочее давление на входе в колонку, атм	50 – 200
Продолжительность цикла разделения, мин	10

. *17.3. Детектирующие устройства микролабораторий*

Детектор является преобразователем концентрации анализируемого вещества, растворенного в подвижной фазе, в электрический сигнал.

В первых хроматографах прошедшая через колонку подвижная фаза с компонентами пробы просто собиралась в небольшие сосуды, а затем методами титриметрии, калориметрии, полярографии и т.д. определялось содержание компонента в этой порции. Т.е. процессы разделения пробы и определения ее количественного состава были разделены во времени и пространстве. В современном хроматографе эти процессы объединены в одном приборе.

Для детектирования компонентов пробы может быть использовано любое физико-химическое свойство подвижной фазы (поглощение света, излучение света, электропроводность, показатель преломления и т.д.), которое изменяется при наличии в ней молекул разделяемых соединений. Из существующих 50 физико-химических методов детектирования в настоящее время активно используется 6.

Наибольшей сложностью при конструировании хроматографических детекторов было сочетание малых объемов ячеек с высокой чувствительностью (ввиду малого объема и низкой концентрации пробы).

В табл.17.2. приведены характеристики существующих детекторов хроматографов.

Таблица17.2 Характеристики детекторов хроматографов

Детектор	Измеряемое свойство	Чувстви-тельность, мг	Селективность
Фильтровый фотометричес-кий	Оптическая плотность на определенной длине волны, пропускаемой фильтром	10^{-10}	Высокая
Спектрофото-метрический	Оптическая плотность на выбранной длине волны мо-нохроматора	10^{-9}	Высокая

Рефрактометрический	Разность показателей преломления растворителя и раствора с пробой	10^{-6}	Низкая
Флуориметрический	Интенсивность излучения молекул пробы в элюенте	10^{-11}	Очень высокая
Амперометрический	Ток окисления или восстановления электрохимически активных соединений	10^{-9}–10^{-11}	Очень высокая
Кондуктометрический	Электропроводность ионов пробы в элюенте (воде)	10^{-10}	Низкая

Чувствительность – это важнейшая характеристика детектора. Лучше всего оценивать этот параметр по физической величине. Если определять чувствительность через двойную амплитуду шума нулевой линии, шум выражать в физических единицах, то чувствительность фотометрического детектора будет выражаться в единицах оптической плотности, рефрактометрического – в единицах показателя преломления, вольтамперометрического – в амперах, кондуктометрического – в сименсах.
Чувствительность детектора может быть примерно одинаковой ко всем компонентам пробы, а может быть совершенно разной даже для близких соединений. В первом случае говорят о неселективном детектировании. Это значит, что измеряется физическое свойство, присущее и пробе и растворителю (показатель преломления, электропроводность). Во втором случае – селективное детектирование, что позволяет измерять физическое свойство, присущее только молекулам пробы, например, способность флуоресцировать или поглощать свет. Селективное детектирование, с одной стороны, позволяет повысить чувствительность определения или исключить те вещества, которые определять не нужно (предельные углеводороды при определении ароматики), с другой стороны, допускает возможность не обнаружить нужных нам компонентов (те же предельные углеводороды в нефти). Поэтому при исследовании общего состава объекта лучше использовать неселективный детектор типа рефрактометра, при определении концентрации отдельных компонентов в сложной смеси лучше использовать селективные детекторы.

18.1 МОЛЕКУЛЯРНЫЕ АКТЮАТОРЫ [2]

Совершенно иной принцип механической активации связан с использованием молекулярных систем, способных к механическому перемещению под действием внешних факторов, таких, как УФ-излучение, температура, pH среды и т.д. Примером молекулярного актюатора является молекула азобензола (рис.18.1). Изомеры азобензола характеризуются различием спектров поглощения, а также возможностью изомеризации под воздействием излучения. Так, транс-азобензол переходит в цис-изомер под

воздействием излучения с длиной волны 313 нм. Воздействие на цис-изомер светом с длиной волны более 380 нм вызывает обратную перестройку молекулы в транс-форму.

Использование фотоизомеризации полиазобензола под действием света с длиной волны 365 нм позволяет создать механическое напряжение и движение кантилевера в системе, представленной на рис. 18.1. Воздействие на цис-изомер светом с длиной волны более 380 нм вызывает возвращение полимерной цепи в обычную транс-форму. Освещением полимера переменными импульсами света с длинами волн 420 и 365 нм можно осуществлять осцилляцию кантилевера. Это первая демонстрация искусственной одномолекулярной машины, преобразующей энергию света в физическую работу.

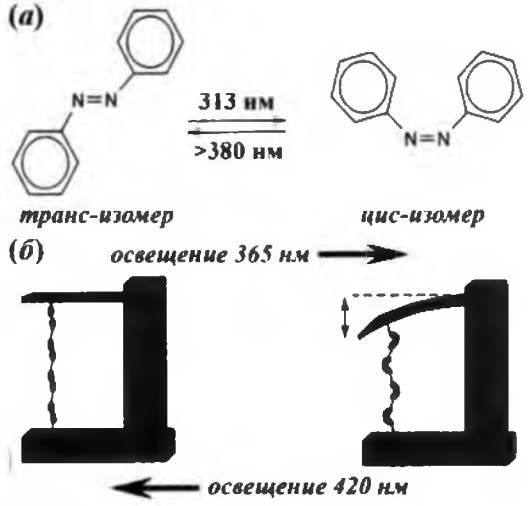


Рис.18.1. Цис-транс изомеризация азобензола, индуцированная УФ-излучением (а); молекулярный актюатор, основанный на изомеризации полиазобензола под действием УФ-излучения (б)

Возможность использования отдельных молекул для преобразования энергии послужила первым стимулом к поиску биологических систем, предназначенных для получения механической энергии на наноуровне. Действительно, для достижения высокой эффективности работы искусственно созданных машин человек во многом копирует устройство природных объектов. А так как в ходе длительной эволюции каждая деталь природных механизмов была отточена до совершенства, эффективность природных процессов очень высока. К примеру, КПД биологических моторов близок к ста процентам, в то время как КПД используемых в каждом доме динамиков и ламп накаливания, созданных человеком, не превышает 5%. В дальнейшем будут рассмотрены несколько примеров преобразования химической энергии АТФ в механическую энергию, позволяющую

направленно перемещать белковые молекулы во внутриклеточных структурах и осуществлять полезную работу, направленную на функционирование наших организмов.

18.2. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МОТОРЫ

Биологические молекулярные моторы - это созданные природой наномашины, превращающие химическую энергию в механическую работу. Эффективность, т.е. КПД таких моторов, во многих случаях близка к ста процентам.

Размер биомоторов составляет от нескольких нанометров до нескольких микрон. В большинстве своем это белковые машины, ферменты и катализаторы, такие, как кинезин, миозин, аденозинтрифосфат синтетаза (АТФ-синтетаза) и другие (см. ниже). Миллионы миозиновых двигателей обеспечивают сокращение мышц, заставляя сердце биться, линейные моторы транспортируют вещества в клетки мозга. В каждой клетке, передвигаясь вдоль спирали ДНК, работают различные моторы-роторы.

Сложная организация живой клетки оказывается возможной исключительно благодаря осуществляемому в ней транспорту, например передвижению вакуолей с питательными веществами вдоль микротрубок. Для перемещения некоторых клеточных составляющих путем диффузии требуется несколько дней, в то время как такое движение с помощью кинезина осуществляется за несколько минут. Считается, что в клетках действует не меньше полусотни переносящих или передвигающих груз молекул. Некоторые основные принципы их работы стали известны благодаря уже ставшим классическими работам по изучению физиологии и биохимии мышц. Все эти механизмы работают по одному и тому же фундаментальному принципу - катализатор (часто аденозинтрифосфат), взаимодействуя с молекулой «мотора», переводит ее в метастабильное, механически-ограниченное состояние, последующая релаксация которого совершает полезную работу. Таким образом, происходит преобразование химической (или электрической) энергии в механическую энергию гибкой молекулы, которая в результате оказывается способной хватать и перехватывать "руками" своих химических связей некое гибкое длинное внутриклеточное волокно (микротрубку, актиновое волокно или спираль ДНК) и в результате ползти по нему вместе с грузом.

По-видимому, природа "изобрела" этот принцип давным-давно, еще на заре возникновения жизни, во времена одноклеточных организмов и постепенно расширила сферу его применения на все виды внутри- и межклеточных движений.

Работы по использованию биологических систем в МСТ ведутся в настоящее время довольно интенсивно, практических результатов пока

мало, но перспективы открываются захватывающие. Приведём два примера

А ТФ-СИНТЕТАЗА

АТФ-синтетаза - фермент, предназначенный для синтеза или гидролиза молекул АТФ, а также для переноса протонов (H^+) через мембрану клетки, чем обеспечивается стабильный внутриклеточный pH цитоплазмы. АТФ-синтетаза преобразует энергию протонного градиента в химическую энергию (рис. 18.2а). За объяснение его функционирования внутри клетки Е. Скоу, П. Бойер и Дж. Уолкер (J. C. Skou, P. Boyer и J. Walker) получили Нобелевскую премию в 1997 году. Интересно, что при гидролизе АТФ одна из частей энзима совершает вращательное движение.

АТФ-синтетаза состоит из двух отдельных частей: F_0, гидрофобной части (включающей а, b_2 и C_{12}-субъединицы), связанной с липидной мембраной и ответственной за транспорт протонов, и F_1 гидрофильной части (состоящей из α, β, γ, δ и ε-субъединиц), ответственной за синтез и гидролиз АТФ. По мере того как протоны протекают через F_0 часть энзима, центральный сектор (γ-субъединица) F_1-АТФ-азы вращается по часовой стрелке, и идет синтез АТФ.

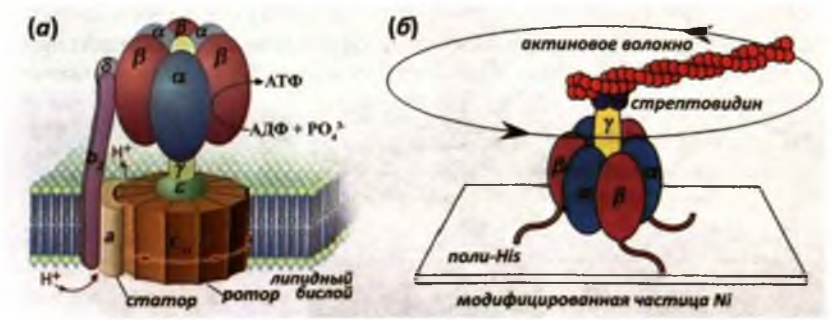


Рис.18.2. Структура и схема работы АТФ-синтетазы (а) и схематичное представление молекулярной турбины на основе АТФ-синтетазы с присоединенным актиновым волокном (б)

Гидролиз АТФ происходит при вращении γ-субъединицы против часовой стрелки; при этом направление протекания протонов меняется на обратное.

По эффективности работы и развиваемой силе АТФ-синтетаза существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы.

К. Киношита (K. Kinoshita) с соавторами удалось наблюдать вращение АТФ синтетазы при навешивании флуоресцирующего элемента на конечный участок вращающегося сегмента (рис. 18.2б). Типичная сила, продуцируемая

такой молекулярной турбиной, составляет около 1 пкН, а мощность - порядка 1 аВт ($1 \bullet 10^{-18}$ Вт).

ФЛАГЕЛЛЯРНЫЕ МОТОРЫ БАКТЕРИЙ

Бактерии вынуждены передвигаться в поисках лучших условий для жизни и размножения. Модель работы флагеллярного мотора бактерий была предложена в 1978 году А.Н. Глаголевым и В.П. Скулачевым. Согласно этой модели, вращение жгутика (неподвижной спирали - флагеллы) объясняется работой "роторного мотора", расположенного на клеточной мембране (рис. 18.3). Так же как и в АТФ-синтетазе, движущей силой для флагеллярных моторов бактерий является градиент протонов или ионов Na^+ на внешней мембране бактерии. Скорость вращения такого мотора может достигать тысяч оборотов в секунду. В целом механизм вращения флагеллярного мотора очень сложен (его считают одним из самых сложных известных механизмов в клетках) и до сих пор подробно не изучен. Однако известно, что во вращении оказываются задействованы несколько сотен молекул белков, образующих за один оборот до 16 различных последовательностей комплексов и химических связей. Сравнительный анализ различных видов подвижных бактерий показывает, что устройство двигателя у них во многом сходно, у близких видов вплоть до идентичности структурных белков и организации генетического аппарата. Таким образом, можно предположить, что однажды возникшие в природе "удачные" инженерные решения сохраняются и продолжают успешно функционировать внутри живых организмов, несмотря на сложные, зачастую приводящие к вымиранию большинства видов, пути макроэволюции.

Рис.18.3. Структура флагеллярного мотора E.Coli

Литература

1. .А.Н.Игнатов. Микросхемотехника и наноэлектроника. Уч. пособие. СПб.:Издательство «Лань», 2011г., с.406-442.

2. А.А.Елисеев, А.В.Лукашин. Функциональные нономатериалы. /под.ред. Ю.Д.Третьякова – М.:Физматгид, 2010г., 456с.

3. И.Е.Лысенко. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. УП, Таганрог: Издательство ТРТУ, 2005. – 103с. [*эл.ресурс*] - http://miel.tusur.ru

4. Е.Б.Механцев. Физические основы микросистемной техники. Курс лекций. – Таганрог, изд-во ТРТУ, 2007. – 126с. [*эл.ресурс*] - http://miel.tusur.ru

5. Е.Б.Механцев, Лысенко И.Е. Физические основы микросистемной техники. Уч. пособие.-Изд. ТРТУ, Таганрог, 2004г. 54с. //Электронный ресурс: http://miel.tusur.ru.

6. Э.Г.Косцов, В.Ф.Камышлов. Микромеханические быстродействующие микроклапаны. Нано – и микросистемная техника, №12, 2006, с.57-59.

7. П.Г. Бабаевский, Г.М. Резниченко.Электромеханические преобразователи сенсорных микро- и наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Часть1. НиМСТ, №11, 2008г.//Электронный ресурс: http://miel.tusur.ru/images/files/Uchebno-metodicheskii kompleks%20disciplin/

8. В.Я. Распопов. Микромеханические приборы; Учебное пособие.-М.: Машиностроение, 2007г.-164-168//Электронный ресурс: http://miel.tusur.ru