

# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ И СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Ю.А. Родионов

Учебное пособие

*Минск БГУИР*

# **МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ И СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

**Ю.А. Родионов**

Учебное пособие

*Минск*  
2019

УДК 681.586(075.8)  
ББК 32.965-04я73  
Р60

**Рецензенты:**

кафедра физики твердого тела  
Белорусского государственного университета  
(протокол №7 от 16.02.2017);

начальник управления «Микромеханика»  
Открытого акционерного общества «Минский НИИ радиоматериалов»  
кандидат технических наук, доцент  
И. А. Таратын

**Родионов, Ю. А.**

Р60 Микроэлектронные датчики и сенсорные устройства : учеб. пособие /  
Ю. А. Родионов. – Минск : БГУИР, 2019. – 300 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-432-1.

Кратко рассмотрены элементы метрологии, используемые в микросенсорике. Подробно рассмотрены основные твердотельные датчики, используемые преимущественно в наукоемких областях (точная механика и оптика, микро- и наноэлектроника, атомная энергетика, военное дело): датчики на основе гальваномагнитных эффектов, датчики давления, температуры и теплового излучения, скорости и ускорения, газоанализаторы, датчики влажности, изображения, детекторы радиоактивного излучения, актюаторы и сенсоры вакуумно-плазменных технологий, обеспечивающие высокое качество продукции при изготовлении указанных датчиков. Все рассмотренные датчики описываются по единому принципу: детальное рассмотрение физического эффекта, лежащего в основе работы; выбор и практическая реализация конструктивно-технологических решений.

**УДК 681.586(075.8)**  
**ББК 32.965-04я73**

**ISBN 978-985-543-432-1**

© Родионов Ю. А., 2019  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	9
2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТРОЛОГИИ.....	14
2.1. Систематические и случайные погрешности.....	14
2.2. Основные методы построения градуировочных графиков.....	15
2.3. Электрические схемы формирования выходного сигнала пассивных сенсоров.....	17
2.3.1. Потенциометрическая схема.....	18
2.3.2. Мостовая схема.....	20
2.4. Статический и динамический режимы работы сенсоров.....	23
3. ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ.....	27
3.1. Датчики магнитного поля на основе эффекта Холла.....	27
3.1.1. Пленочные датчики Холла.....	31
3.1.2. Кремниевые интегральные датчики Холла.....	36
3.2. Магниторезистивные преобразователи.....	39
3.2.1. Магниторезистивный эффект.....	39
3.2.2. Конструкции магниторезисторов.....	40
3.2.3. Параметры магниторезисторов.....	41
3.3. Гальваноманитные преобразователи на активных элементах.....	42
3.3.1. Магнитодиоды.....	42
3.3.2. Магнитотранзисторы.....	44
3.4. Гальваноманиторекомбинационные преобразователи.....	46
3.4.1. Гальваноманиторекомбинационный (ГМР) эффект.....	46
3.4.2. Гальваноманиторекомбинационный преобразователь (ГМРП).....	50
3.4.3. Кремниевые интегральные ГМРП.....	50
3.5. Магнитоинтегральные интегральные схемы.....	53
3.5.1. Магнитокоммутируемые ИС на основе эффекта Холла.....	53
4. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ.....	57
4.1. Общие понятия о давлении.....	57
4.2. Тензорезистивный эффект в полупроводниках.....	58
4.3. Первичные тензопреобразователи.....	59
4.4. Классификация интегральных тензопреобразователей давления.....	62
4.4.1. Пути интеграции тензопреобразователей.....	62
4.4.2. Классификация структур интегральных тензопреобразователей.....	66
4.4.3. Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей.....	67
4.5. Принципы размещения тензорезисторов на мембранах полупроводниковых и интегральных тензопреобразователей давления.....	69

5. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	72
5.1. Терморезистивные датчики.....	78
5.1.1. Резистивные детекторы температуры.....	78
5.1.2. Кремниевые резистивные датчики.....	80
5.1.3. Термисторы.....	81
5.2. Термоэлектрические контактные датчики.....	83
5.3. Полупроводниковые датчики температуры на основе р-п-перехода..	100
5.4. Детекторы ИК-излучения.....	102
5.4.1. Детекторы излучений на основе термоэлементов.....	103
5.4.2. Пироэлектрические датчики ИК-излучений.....	105
5.4.3. Болометры.....	116
6. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ.....	118
6.1. Акселерометры.....	119
6.1.1. Емкостной акселерометр.....	120
6.1.2. Пьезорезистивные акселерометры.....	121
6.1.3. Пьезоэлектрические акселерометры.....	123
6.1.4. Тепловые акселерометры.....	126
6.1.5. Акселерометры с нагреваемым газом.....	127
6.2. Гироскопы.....	129
6.2.1. Роторный гироскоп.....	130
6.2.2. Вибрационные гироскопы.....	132
6.2.3. Оптические гироскопы.....	138
7. ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ.....	145
7.1. Адсорбция на поверхности твердых тел.....	145
7.1.1. Роль электронов и дырок при адсорбции.....	146
7.1.2. Взаимодействие поверхности с объемом.....	148
7.1.3. Химические реакции на поверхности полупроводников.....	150
7.2. Датчики на основе окислов металлов.....	154
7.3. Датчики на органических полупроводниках.....	156
7.4. Каталитические датчики.....	156
7.5. Электрохимические газовые датчики.....	158
7.6. Датчики на основе МДП-структур.....	159
7.7. Газовые датчики с барьером Шоттки.....	163
7.8. Газовые датчики на основе приборов, чувствительных к изменению массы.....	164
8. ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ.....	167
8.1. Единицы измерения влажности.....	167
8.2. Температурно-градиентные датчики влажности.....	168
8.2.1. Психрометрические датчики.....	168
8.2.2. Конденсационные датчики.....	168
8.3. Сорбционные датчики влажности.....	173
8.3.1. Кулонометрические датчики.....	173
8.3.2. Сорбционно-импедансные датчики.....	175
8.3.3. Пьезосорбционные датчики.....	181

9. ДАТЧИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ .....	183
9.1. Физические основы принципов работы полупроводниковых датчиков изображения.....	183
9.2. Составляющие элементы датчиков изображения .....	186
9.2.1. Пиксель.....	186
9.2.2. Фотодиод.....	187
9.2.3. ПЗС-структура.....	187
9.3. Виды полупроводниковых датчиков изображения и их основные функции.....	188
9.3.1. Основные функции полупроводниковых датчиков изображения.....	188
9.3.2. Устройство ПЗС-матрицы .....	189
9.3.3. Устройство КМОП-матрицы .....	191
9.4. Особенности конструкций полупроводниковых датчиков изображения.....	193
9.4.1. Получение цветного изображения .....	193
9.4.2. Трехматричные системы .....	193
9.4.3. Матрицы с мозаичными фильтрами .....	194
9.4.4. Матрицы с полноцветными пикселями .....	196
9.5. Микролинзы .....	197
9.6. Датчики изображения с обратной засветкой.....	199
9.7. Организация переноса кадра в ПЗС-матрицах.....	200
9.7.1. Полнокадровая матрица .....	200
9.7.2. Матрицы с буферизацией кадра.....	201
9.7.3. Матрицы с буферизацией столбцов .....	201
9.8. Преимущество и недостатки КМОП- перед ПЗС-матрицами .....	202
10. ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	204
10.1. Сцинтилляционные детекторы.....	208
10.2. Ионизационные детекторы.....	211
10.2.1. Ионизационные камеры.....	211
10.2.2. Пропорциональные камеры.....	212
10.2.3. Счетчики Гейгера – Мюллера .....	213
10.2.4. Полупроводниковые детекторы радиоактивности.....	214
10.2.5. Принципы работы, материалы и конструкции полупроводниковых детекторов радиоактивного излучения .....	217
11. АКТЮАТОРЫ .....	224
11.1. Интегральные микрозеркала с электростатической активацией .....	228
11.2. Волоконно-оптические переключатели.....	230
11.3. Матрицы микрозеркал на кремниевом чипе .....	233
12. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В МИКРОСЕНСОРИКЕ .....	238
12.1. Графен и его структурные особенности .....	238
12.2. Газоанализаторы на основе графена .....	243
12.2.1. Газочувствительность пленок графена на полуизолирующем SiC к NO <sub>2</sub> и парам C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH .....	245

12.2.2. Датчики на основе взаимодействия графена с аналитами .....	247
13. ДАТЧИКИ В ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ .....	249
13.1. Вакуумные датчики .....	249
13.1.1. Классификация датчиков и методы измерения вакуума .....	249
13.1.2. Тепловые датчики .....	252
13.1.3. Ионизационные датчики .....	254
13.1.4. Баратроны .....	258
13.1.5. Течеискание .....	259
13.1.5.1. Основные методы контроля герметичности .....	260
13.1.5.2. Масс-спектрометр .....	262
13.2. Кварцевый датчик измерения толщины пленок в процессе создания .....	274
13.2.1. Пьзоэлектрический эффект .....	274
13.2.2. Пьзоэлементы на основе кварца .....	278
13.2.3. Резонансная частота кварца .....	280
13.2.4. Метод измерения масс .....	282
13.2.5. Кварцевый сенсор .....	284
13.3. Эллипсометрический датчик измерения толщины пленок в процессе создания .....	278
Заключение .....	288
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	296
ЛИТЕРАТУРА .....	306

## ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс абсолютно во всех сферах жизнедеятельности человека невозможен без практических измерений параметров процессов, определяющих эту деятельность. В современных условиях, как правило, это осуществляется автоматизированными системами контроля, измерения и управления. При этом определяющим элементом таких систем является первичный датчик. Номенклатура датчиков постоянно расширяется. Охватить все виды существующих датчиков практически невозможно. Поэтому с учетом специфики специальности «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» в данном учебном пособии рассматриваются только датчики, практически реализуемые базовыми технологическими процессами микро- и нанoeлектроники (создание диэлектрических пленок высоко- и низкотемпературными методами, формирование разного типа проводимости полупроводниковых слоев, вакуумно-плазменные технологии создания проводящих слоев разного рода микролитографиями, элементами пленочной и гибридной технологии).

Одной из основных задач датчиков и систем на их основе является исключение человеческого фактора, зачастую приводящего к опасным ситуациям и катастрофам (утечка отравляющих веществ, Чернобыль, Фукусима и т. д.). Датчики также позволяют нам облегчить жизнь (автопилот, охранная сигнализация, распознавание образов).

Как правило, практически все датчики работают на принципах, хорошо известных из курсов физики и химии средней школы. Однако это не означает, что в практической реализации датчика все предельно просто. Это большое заблуждение. От общеизвестного принципа работы до практической реализации надежно и точно работающей конструкции требуются большие интеллектуальные нагрузки в решении конструктивно- технологических проблем разработчика и производителя современного датчика (см. приложение). В реальной эксплуатации к датчику предъявляются очень жесткие требования (высокая точность и информативность по основному сигналу в поле сильных помех самого разнообразного характера, долговечность, технологичность производства на доступном оборудовании, материалы, себестоимость).

Понятие «датчик» сегодня уже не то, что было буквально несколько лет назад. Для освоения современного датчика на должном уровне специалист должен хорошо знать не только основные законы физики, но и электрофизические свойства простых и сложных полупроводников, основные микроэлектронные технологии, совместимость этих технологий с применяемыми материалами.

Поэтому целью данного учебного пособия является рассмотрение общеизвестных физических принципов со спецификой их использования в реальном датчике, конкретизация имеющихся знаний о метрологии при измерении слабых неэлектрических сигналов, рассмотрение современных



конструкций датчиков и приемов их реализации в едином технологическом цикле.

Наука, занимающаяся разработкой первичных преобразователей и схем обработки, полученных от них сигналов в микроэлектронном исполнении, получила название *микроэлектронной сенсорики*. Наиболее амбициозной задачей современной микросенсорики является достижение того совершенства датчиков и сенсорных устройств, которое заложила природа в биологические объекты, например в человека. Одной из основных задач микроэлектронной сенсорики является изучение влияния на полупроводниковые структуры различных требуемых внешних воздействий и при этом минимизация паразитного влияния внешних факторов, которые мы называем помехами. К сожалению, бурный рост технического прогресса попутно порождает огромное количество электрических помех, которые мы называем электромагнитным «мусором». На фоне этого мощного «мусора» очень сложно выделить, как правило, очень слабый сигнал от нашего датчика. С другой стороны, эти трудности в решении практических задач способствуют повышению нашего интеллекта и делают нашу работу в области изучения датчиков очень привлекательной и интересной.

## 1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Современные средства измерения обычно представляют собой *электронные* устройства, приборы или многоканальные системы для измерений различных физических величин, которые с помощью датчиков преобразуются в *электрический* сигнал. Преобразование физических величин в электрический сигнал обеспечивает и упрощает дальнейшую передачу и обработку измерительной информации с помощью электронных устройств. Это позволяет повысить точность и быстродействие измерений, обрабатывать данные в ЭВМ в реальном масштабе времени и выводить результаты на современные средства отображения и записи информации (дисплеи, цифropечатающие устройства, самописцы, графopостроители и магнитные носители записи).

По типу информативных параметров входной и выходной величин *электронные преобразователи* подразделяются на три класса:

- 1) преобразователи электрических величин в электрический сигнал (например, электроды, усилители, АЦП);
- 2) преобразователи электрических величин в неэлектрические величины (например, светодиоды, электронагреватели или охладители, электродвигатели, электрогенераторы химических веществ – так называемые обратные преобразователи, или *актюаторы*);
- 3) преобразователи неэлектрических величин в электрический сигнал (например, термопары, тензорезисторы, фототранзисторы и другие чувствительные элементы датчиков).

В измерительных системах преобразование обычно осуществляется последовательно соединенными преобразователями, которые образуют *измерительный канал*. Первый преобразователь в измерительном канале, который непосредственно взаимодействует с объектом измерения, называется *первичным измерительным преобразователем* (ПИП), а последующие преобразователи – *вторичными измерительными преобразователями* (ВИП). Эти понятия отражают структурно-функциональные свойства устройств, т. е. их место и роль в измерительном канале.

*Электронный датчик* – конструктивно законченное средство измерения, способное преобразовывать одну или несколько физических величин в электрический сигнал для последующих преобразований, передачи, обработки и отображения измерительной информации, но не дающее пользователю возможность непосредственно получить количественные данные об измеряемой величине. По принципу работы ПИП и датчики могут быть *параметрического* или *генераторного* типа (с подведением дополнительной электроэнергии и без ее подведения). В параметрических ПИП изменение входной величины приводит к изменению электрического сопротивления, емкости или индуктивности преобразователя. К числу таких относятся терморезисторы, тензоконденсаторы, фоторезисторы. В преобразователях генераторного типа выходными величинами являются напряжение и ток, значения которых непосредственно (без подведения электроэнергии)

изменяются под действием входной величины (например, термопара, фотодиод).

Если преобразователь или датчик изготавливается с использованием микро- и/или нанотехнологий, в том числе и технологий интегральных микросхем, то его обычно называют *микроэлектронным* (МЭД).

Микроэлектронные преобразователи или датчики могут состоять из одного элемента (*дискретные* МЭД) или из нескольких (*интегральные* МЭД). Интегральные МЭД по конструктивно-технологическому признаку можно разделить на полупроводниковые, пленочные, гибридно-пленочные и микросборки. По структурно-функциональной сложности среди интегральных МЭД условно можно выделить простые и сложные.

*Простые интегральные датчики* (ИД) содержат, как правило, один чувствительный элемент (ПИП) и простейшие элементы вторичного преобразования (мостовые схемы, преобразователи сопротивления, предусилители). Простые ИД можно отнести к разряду интегральных микросхем (ИМС) низкой и средней степени интеграции.

*Сложные ИД* могут содержать несколько чувствительных элементов, различные элементы вторичного преобразования (усилители, коммутаторы, преобразователи напряжения – частота, АЦП и др.), устройства обработки и хранения данных (компараторы, счетчики, сумматоры, перемножители, схемы памяти, процессоры) и исполнительные элементы. Сложные ИД с большим количеством однородных чувствительных элементов (микрополосковые координатно-чувствительные датчики, фотоприемные матрицы) называют датчиками *матричного* типа. Сложные ИД, способные выполнять функции измерения и контроля нескольких физических величин одновременно, автоматического переключения каналов, автоматической коррекции систематических погрешностей, адаптации к изменению эксплуатационных условий, вычислений, сравнений, принятия решений и формирования соответствующих сигналов, называют *интеллектуальными* датчиками. Сложные ИД относятся к разряду ИМС средней и высокой степени интеграции (СИС, БИС и СБИС). Обобщенная структурно-функциональная схема *сложного интегрального датчика* представлена на рис. 1.1. Пользуясь стандартной терминологией для ИМС, физически разделимые составные части датчика называют *компонентами* датчика (кристалл, керамическая подложка, основа корпуса, крышка корпуса, выводы), а физически неотделимые от полупроводникового кристалла части датчика называют *элементами* кристалла датчика (например, диффузионный резистор, биполярный или МДП-транзисторы, кремниевые мембраны и балки).



Рис. 1.1. Обобщенная структурно-функциональная схема сложного интегрального датчика:

$X_i$  и  $Z_j$  — основные и дополнительные входные величины датчика;  $Y_k$  — выходные величины; 1, 2, 3 — соответственно основные, дополнительные и вспомогательные компоненты, или элементы первичного преобразования — чувствительные элементы; 4 — компоненты, или элементы, вторичного преобразования; 5, 6 — основные, или дополнительные актюаторные компоненты, или элементы; 7 — устройства обработки и хранения данных; 8 — корпус

Компоненты и элементы могут играть роль первичных, вторичных и актюаторных преобразователей, а также устройств оперативного хранения и обработки данных или составных частей этих устройств и преобразователей. Компоненты датчика (КД) могут быть безвыводные, бескорпусные и корпусные. Для пользователя любой датчик (простой или сложный) играет роль первичного измерительного преобразователя. В интегральных МЭД преобразование измеряемых величин в выходной сигнал осуществляется, как правило, посредством многоступенчатых преобразований физических и электрических величин. Кроме того, в самом ИД с помощью различных преобразователей может быть реализована частичная обработка данных в реальном времени. Чтобы не было путаницы в терминологии у разработчиков и

потребителей МЭД, для интегральных датчиков вводятся следующие понятия, отражающие структурно-функциональные особенности компонентов и элементов ИД:

- 1) основные чувствительные элементы (компоненты) первичного преобразования – устройства, играющие роль преобразователя основных измеряемых величин в первичный электрический сигнал;
- 2) дополнительные чувствительные элементы (компоненты) первичного преобразования – устройства, играющие роль преобразования параметров внешних побочных факторов в первичный электрический сигнал;
- 3) вспомогательные чувствительные элементы (компоненты) первичного преобразования – устройства контроля нормального рабочего режима датчика;
- 4) элементы (компоненты) вторичного преобразования – устройства нормализации и преобразования выходных электрических сигналов первичных преобразующих элементов (компонентов) для дальнейшей передачи, обработки и отображения данных;
- 5) основные актюаторные элементы (компоненты) – устройства, предназначенные для принципиального обеспечения процесса измерения с помощью основных элементов (компонентов) первичного преобразования данного датчика;
- 6) дополнительные актюаторные элементы (компоненты) принципиально обеспечивают работу дополнительных первичных преобразующих компонентов и/или служат для улучшения метрологических характеристик датчика (повышения чувствительности, точности и быстродействия измерений);
- 7) элементы (компоненты) устройств обработки и хранения данных;
- 8) корпус датчика.

Следует отметить, что дополнительные и вспомогательные чувствительные элементы (ЧЭ) могут использоваться не только как составные части сложных датчиков, но и как встроенные ЧЭ устройств систем контроля нормальных режимов работы ИМС и различного класса аппаратуры (не обязательно измерительной). К числу контролируемых параметров относятся температура, влажность, давление и радиационный фон, величины которых могут измеряться с помощью встроенных ЧЭ.

Наиболее перспективными считаются полупроводниковые интегральные МЭД, в которых ЧЭ (ПИП) создаются в едином технологическом цикле на одном чипе вместе с ВИП и другими элементами измерительного канала. Гибридные МЭД изготавливаются, как правило, в тех случаях, когда технология изготовления элементов датчика не совместима друг с другом, или со стандартными процессами технологии получения полупроводниковых ИМС.

В настоящее время уже созданы интегральные датчики давления, температуры, индукции магнитного поля, концентрации ионов в растворах и молекул в газах, фотоэлектрические и радиационные преобразователи. Помимо совершенствования перечисленных преобразователей имеется тенденция к

созданию многофункциональных интегральных датчиков, содержащих на одной подложке несколько элементов, чувствительных к различным видам физических величин (мультисенсоры). С помощью таких датчиков можно будет не только одновременно измерять несколько параметров, но и автоматически корректировать систематические погрешности, обусловленные действием влияющих (побочных) факторов, что позволит улучшить метрологические характеристики измерительных систем. Кроме того, мультисенсоры являются основой для создания сложных микросистем, выполняющих функции обоняния («электронных носов») и вкуса («электронных языков»).

К числу основных *эксплуатационных характеристик* МЭД относятся масса, габариты, потребляемая мощность, напряжение питания, количество выводов, время подготовки, время непрерывной работы, срок службы. Основные *метрологические характеристики* датчиков и преобразователей: функция преобразования (передаточная характеристика), чувствительность, погрешность, быстродействие, порог чувствительности, рабочий диапазон преобразования и диапазон измерений.

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТРОЛОГИИ

### 2.1. Систематические и случайные погрешности

Всякое измерение содержит в себе ошибку (погрешность). В общем случае погрешность – это отклонение измеренной величины  $m$  от ее истинного значения  $m^*$ :  $\Delta m = m^* - m$ . Установить точную величину погрешности чаще всего невозможно, поскольку неизвестно истинное значение измеряемой величины. Погрешности разделяют на систематические и случайные.

Систематические ошибки носят постоянный характер. Они обусловлены некорректностью работы аппаратуры или методов проведения анализа. При проведении серии повторных измерений систематические ошибки, как правило, смещают измеренную величину от истинной в одном направлении и на постоянное значение. Таким образом, систематическую погрешность можно устранить путем измерения эталонной физической величины.

Случайные ошибки возникают под действием факторов, не поддающихся учету, и при проведении серии повторных измерений смещают измеренную величину от истинной в разных направлениях и на разные значения. Однако при проведении большого числа повторных измерений можно определить среднее значение величины, причем при увеличении числа измерений среднее значение все более приближается к истинному:

$$m_{\text{ср}} = \frac{\sum_i m_i}{n}. \quad (2.1)$$

Случайная ошибка измерения характеризуется среднеквадратичным отклонением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{\text{ср}})^2}{n - 1}}. \quad (2.2)$$

Случайная погрешность может быть определена как  $dm = t\sigma$  (где  $t$  – коэффициент Стьюдента).

Плотность вероятности – это отношение вероятности того, что измеренная величина примет значение в пределах данного интервала к величине этого интервала. Наиболее часто для описания плотности вероятности случайной величины используют функцию Гаусса (или, как ее называют, – нормальный закон распределения):

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(m - m_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.3)$$

Функция имеет максимум при  $m = m_{\text{ср}}$ . Это означает, что наиболее вероятно среднее значение, но и другие результаты измерений не исключены.

Из теории вероятности следует, что вероятность того, что при однократном измерении случайная величина не отклонится от среднего значения больше чем на величину  $er$ , равна интегралу

$$\Phi\left(\frac{er}{\sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{er/\sigma} \exp(-x^2) dx. \quad (2.4)$$

Систематические и случайные ошибки зависят от величины входного сигнала. В документации любого прибора обычно указывается величина погрешности при различных диапазонах измеряемых величин.

Чтобы найти вероятность того, что случайная величина  $m$  попадет в некоторый интервал значений  $[m_1, m_2]$ , необходимо проинтегрировать функцию Гаусса на этом интервале:

$$P = \int_{m_1}^{m_2} \varphi(m) dm = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{m_1}^{m_2} \exp\left(-\frac{(m - m_{cp})^2}{2\sigma^2}\right) dm. \quad (2.5)$$

Данный интеграл не может быть выражен через элементарные функции, поэтому его находят численными методами или как площадь под кривой функции Гаусса на интервале  $[m_1, m_2]$ .

## 2.2. Основные методы построения градуировочных графиков

Зависимость выходного сигнала от измеряемой величины чаще всего невозможно предсказать теоретически. Поэтому применяют предварительную градуировку, т. е. находят приближенную (аппроксимированную) зависимость между этими величинами по эталонным значениям измеряемой величины. Полагают, что любое значение измеряемой величины в пределах проградуированного диапазона подчиняется этой зависимости.

Для построения градуировочного графика находят аппроксимирующую функцию (либо регрессию, либо интерполяцию). Если случайные ошибки велики, то применяют регрессию, поскольку она не требует, чтобы кривая проходила точно через заданные эталонные значения (узлы). Если случайные погрешности малы, то можно применить интерполяцию, кривая которой проходит через заданные точки.

Рассмотрим в общем виде построение регрессии по методу наименьших квадратов. Пусть аппроксимирующую функцию можно задать в виде полинома:

$$y(x) = \sum_{j=0}^n a_j x^j = a_0 x^0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \dots = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots. \quad (2.6)$$

Для нахождения коэффициентов  $a_j$  необходимо решить так называемую нормальную систему метода наименьших квадратов:



$$\sum_{j=0}^m \left( \sum_{i=0}^n x_i^{j+k} \right) a_j = \sum_{i=0}^n y_i x_i^k, \quad (2.7)$$

где  $n$  – число узлов на графике минус один;

$k = 0, 1, \dots, m$ .

Эта система представляет собой систему линейных уравнений относительно коэффициентов  $a_j$ .

*Пример 1.* Пусть необходимо построить линейную регрессию, тогда

$$y(x) = a_0 + a_1 x; \quad k = 0, 1; \quad j = 0, 1.$$

Нормальная система примет вид

$$(n+1)a_0 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i \right] a_1 = \sum_{i=0}^n y_i,$$

$$\left[ \sum_{i=0}^n x_i \right] a_0 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^2 \right] a_1 = \sum_{i=0}^n y_i x_i.$$

*Пример 2.* Пусть необходимо построить квадратичную регрессию, тогда

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2; \quad k = 0, 1, 2; \quad j = 0, 1, 2.$$

Нормальная система примет вид

$$(n+1)a_0 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i \right] a_1 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^2 \right] a_2 = \sum_{i=0}^n y_i,$$

$$\left[ \sum_{i=0}^n x_i \right] a_0 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^2 \right] a_1 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^3 \right] a_2 = \sum_{i=0}^n y_i x_i,$$

$$\left[ \sum_{i=0}^n x_i^2 \right] a_0 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^3 \right] a_1 + \left[ \sum_{i=0}^n x_i^4 \right] a_2 = \sum_{i=0}^n y_i x_i^2.$$

Для решения полученных систем линейных уравнений относительно коэффициентов  $a_j$  можно применить метод Крамера. Обозначим множители перед коэффициентами как элементы определителя  $A$ , а суммы после знака равенства как элементы вектора  $B$ , тогда нормальная система примет вид

[illegible]

# Определитель системы

$$D = \begin{matrix} & A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1k}, \\ & A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2k}, \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & A_{k1} & A_{k2} & \dots & A_{kk}. \end{matrix}$$

Корни системы равны  $a_j = D_m/D$ , где

$$D_m = \begin{matrix} & B_{11} & A_{12} & \dots & A_{1k}, \\ & B_{21} & A_{22} & \dots & A_{2k}, \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & B_{k1} & A_{k2} & \dots & A_{kk}. \end{matrix}$$

Для определителя 2-го порядка  $D = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}$ .

Для определителя 3-го порядка  $D = A_{11}A_{22}A_{33} + A_{12}A_{23}A_{31} + A_{13}A_{21}A_{32} - A_{13}A_{22}A_{31} - A_{11}A_{23}A_{32} - A_{12}A_{21}A_{33}$ .

Критерием точности построенной регрессии  $y(x)$  является среднеквадратичное отклонение аппроксимации:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y(x_i) - y_i)^2}. \quad (2.8)$$

### 2.3. Электрические схемы формирования выходного сигнала пассивных сенсоров

По способу формирования выходного сигнала все сенсоры можно разделить на активные и пассивные. Активные сенсоры выдают готовый электрический сигнал в виде напряжения или тока. Пассивные сенсоры сами не формируют сигнал, а лишь меняют под действием измеряемой величины свои электрофизические свойства: сопротивление, индуктивность или емкость. Пассивные сенсоры необходимо включать в дополнительную электрическую схему, которая формирует выходной сигнал, в зависимости от изменения свойств сенсора.

### 2.3.1. Потенциометрическая схема

Рассмотрим потенциометрическую схему как простейшую схему формирования электрического сигнала от пассивного датчика (рис. 2.1). Для получения выходного сигнала от такого сенсора через него нужно пропускать ток от внешнего источника. Выходным сигналом сенсора будет откладываемое на нем напряжение  $u_m$ .

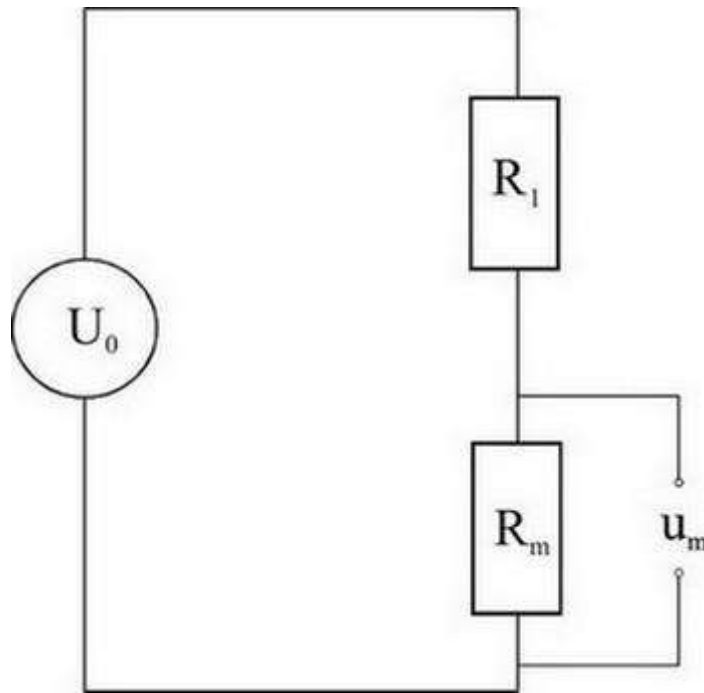


Рис. 2.1. Потенциометрическая схема для пассивного сенсора

Пусть сенсор меняет свое сопротивление под действием измеряемой величины  $m$ :  $R_m = R_0 + \Delta R$ , где  $R_0$  – исходное сопротивление сенсора, т. е. сопротивление при нулевом значении измеряемой величины. Пусть связь  $\Delta R$  с  $m$  линейна, тогда  $R_m = R_0 + km$ , где  $k$  – постоянный коэффициент. В такой схеме последовательно с сенсором необходимо поставить постоянный резистор  $R_1$ . В отсутствие этого постоянного резистора напряжение, снимаемое с выходных контактов, совпадало бы с питающим напряжением  $U_0$ . Через оба резистора течет одинаковый ток  $I$ . Следовательно, напряжение, снимаемое с сенсора,

$u_m = R_m I$ , где  $I = U_0 / R_{\text{общ}}$ . Для последовательно соединенных сопротивлений  $R_{\text{общ}} = R_m + R_1$ , отсюда  $I = U_0 / (R_m + R_1)$ . Подставляя выражение для тока в выражение для напряжения на сенсоре, получим

$$u_m = U_0 \frac{R_m}{R_m + R_1} = U_0 \frac{R_0 + km}{R_0 + km + R_1}. \quad (2.9)$$

Это выражение можно представить как дробно-линейную функцию  $u_m = f_1(m)/f_2(m)$ , т. е. как

$$u_m = \frac{a_1 m + b_1}{a_2 m + b_2}, \quad (2.10)$$

где  $f_1 = a_1 m + b_1, a_1 = kU_0, b_1 = U_0 R_0$ ;  
 $f_2 = a_2 m + b_2, a_2 = k, b_2 = R_0 + R_1$ .

Таким образом, связь выходного сигнала с измеряемой величиной в потенциометрической схеме является нелинейной, даже если линейно изменение сопротивления сенсора под действием измеряемой величины. Кроме того, при нулевом значении измеряемой величины выходной сигнал не обращается в нуль  $u_m = U_0/(R_0 + R_1)$ .

Рассмотрим, как влияют параметры схемы, т. е.  $R_0, R_1, k$ , на вид зависимости выходного сигнала от измеряемой величины.

Вид графика дробно-линейной функции зависит от дискриминанта:

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1. \quad (2.11)$$

Если  $D < 0$ , то график имеет вид двух убывающих ветвей, если  $D > 0$ , то график имеет вид двух возрастающих ветвей. Разрыв происходит при  $m = -b_2/a_2$ . При  $m \rightarrow \pm\infty$  обе ветви стремятся к  $a_1/a_2 = U_0$ . При  $m = -b_2/a_2 = -(R_0 + R_1)/k$  происходит разрыв функции.

Для потенциометрической схемы дискриминант имеет вид

$$D = \begin{vmatrix} kU_0 & R_0 U_0 \\ k & R_0 + R_1 \end{vmatrix} = kU_0(R_0 + R_1) - kR_0 U_0 = kU_0 R_1. \quad (2.12)$$

Поскольку  $U_0$  и  $R_1$  – заведомо положительные величины, то вид зависимости  $u_m$  от  $m$  будет зависеть только от знака  $k$ . Кроме того, в реальной физической задаче необходимо учитывать ограничения, накладываемые на используемые величины. Поскольку  $R_m = R_0 + km, R_m \in [0, +\infty]$ , то если  $k > 0$ , то  $m \in [-R_0/k, +\infty]$ , а если  $k < 0$ , то  $m \in [-\infty, -R_0/k]$ .

На рис. 2.2 граница рабочего диапазона обозначена треугольником. В случае  $k < 0$  он располагается слева от треугольника, а в случае  $k > 0$  – справа от треугольника.

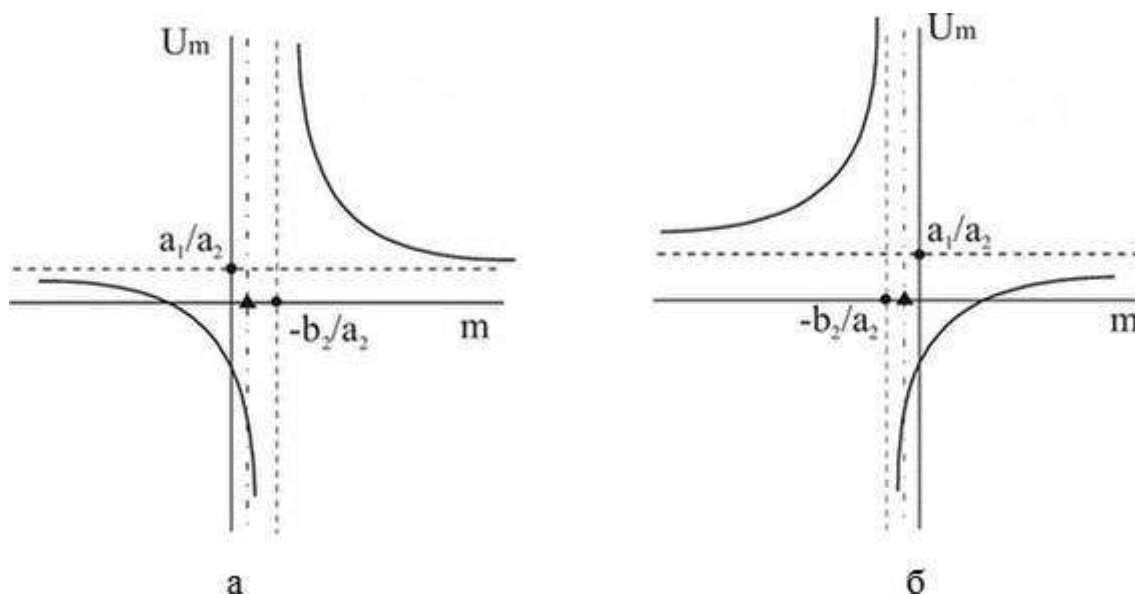


Рис. 2.2. Зависимость выходного сигнала потенциметрической схемы  $U_m$  от измеряемой величины  $m$ :

а – при  $k < 0$ ; б – при  $k > 0$

### 2.3.2. Мостовая схема

Мостовые схемы имеют ряд существенных преимуществ перед потенциметрическими. Использование мостовых схем позволяет:

- 1) устранить постоянную (фоновую) составляющую выходного сигнала;
- 2) линеаризовать выходной сигнал;
- 3) исключить вклад влияющих величин на выходной сигнал.

Рассмотрим, как эти преимущества можно осуществить.

Выведем формулу, связывающую диагональное напряжение с величинами сопротивлений плеч моста и питающим напряжением  $U_0$  (рис. 2.3).

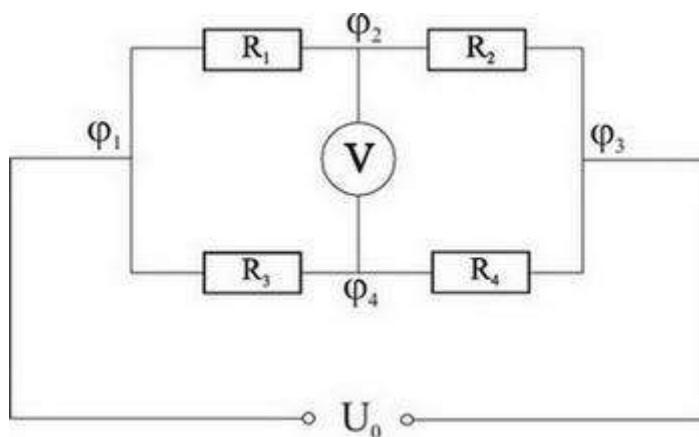


Рис. 2.3. Мостовая схема для пассивного сенсора

Пусть  $U_0$  – напряжение, подаваемое на мост,  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – сопротивления плеч. Между диагональными точками моста включен вольтметр с высоким собственным сопротивлением, т. е. ток по диагонали не течет. Необходимо найти показания вольтметра.

Мост, по сути, представляет собой две параллельные цепи, составленные из резисторов, каждая из которых составлена из последовательно соединенных сопротивлений  $R_1, R_2$  и  $R_3, R_4$  соответственно. Суммарное напряжение, откладываемое на обеих цепях, одинаково и равно  $U_0$ .

Ток верхней цепи  $I_1 = U_0/(R_1 + R_2)$ , ток нижней цепи  $I_2 = U_0/(R_3 + R_4)$ .

Обозначим потенциалы в узловых точках через  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ . Пусть  $\varphi_2$  будет положительным потенциалом, а  $\varphi_4$  – отрицательным. Тогда напряжение между диагональными точками моста равно  $v_d = \varphi_2 - \varphi_4$ . Напряжения, откладываемые на резисторах  $R_2$  и  $R_4$ , соответственно равны  $U_2 = \varphi_2 - \varphi_3$ ;  $U_4 = \varphi_4 - \varphi_3$ . Отсюда  $\varphi_2 = U_2 + \varphi_3$ ,  $\varphi_4 = U_4 + \varphi_3$ . Следовательно,

$$\varphi_2 - \varphi_4 = U_2 + \varphi_3 - U_4 - \varphi_3 = U_2 - U_4 = v_d,$$

$$U_2 = I_1 R_2, U_4 = I_2 R_4.$$

Отсюда, подставляя выражения для токов, получим

$$v_d = U_2 - U_4 = I_1 R_2 - I_2 R_4 = U_0 R_2 / (R_1 + R_2) - U_0 R_4 / (R_3 + R_4), \quad (2.13)$$

$$v_d = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (2.14)$$

Условием того, что напряжение  $v_d = 0$ , будет  $R_2 R_3 = R_1 R_4$ . В этом случае говорят, что мост находится в равновесии (или в балансе). Если это условие не соблюдается, то  $v_d$  называют напряжением разбаланса. В частном случае, если все резисторы одинаковы, то  $v_d = 0$ .

Рассмотрим мостовую схему, где один из резисторов представляет собой пассивный датчик резистивного типа с исходным сопротивлением  $R_0$ . Все остальные резисторы одинаковы и имеют постоянные сопротивления, также равные  $R_0$ . Если на сенсор не действует измеряемая величина, то мост находится в равновесии  $v_d = 0$ . Как только сопротивление сенсора изменится под действием измеряемой величины, то наступит разбаланс моста и возникнет некоторое напряжение  $v_d \neq 0$ , которое и является выходным сигналом, измеряемым потенциометром. Таким образом, реализуется 1-е преимущество – отсутствие постоянной составляющей сигнала при нулевом значении измеряемой величины.

Пусть резистор  $R_2$  является сенсором, который под действием измеряемой величины изменил свое сопротивление на  $\Delta R$  и стал равным  $R_0 + \Delta R$ . Тогда напряжение разбаланса будет

$$v_d = V_0 \frac{(R_0 + \Delta R)R_0 - R_0^2}{(R_0 + R_0 + \Delta R)2R_0} = V_0 \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R}. \quad (2.15)$$

Если  $R_0 \gg \Delta R$ , то данную формулу можно записать в виде

$$v_d = V_0 \frac{\Delta R}{4R_0}. \quad (2.16)$$

Если зависимость  $\Delta R$  от измеряемой величины близка к линейной, то в соответствии с этой формулой можно реализовать 2-е преимущество мостовых схем, т. е. выходной сигнал является линейной функцией от измеряемой величины.

Однако реальная ситуация осложняется тем, что на сенсор действует не только измеряемая величина, но и другие влияющие величины. Кроме того, при самонагреве происходит изменение сопротивления остальных сенсоров, причем эти изменения могут быть неодинаковыми. В результате действия всех этих факторов напряжение разбаланса перестает строго соответствовать измеряемой величине.

Пусть все четыре исходных сопротивления  $R_0$  изменились соответственно на  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  и стали равными  $R_0 + \Delta R_1, R_0 + \Delta R_2, R_0 + \Delta R_3, R_0 + \Delta R_4$ .

Тогда, подставив эти значения в общую формулу для напряжения на диагональных точках моста и полагая, что значения  $\Delta R_i$  малы по сравнению с  $R_0$ , получим выражение для напряжения разбаланса:

$$v_d = V_0 \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{4R_0}. \quad (2.17)$$

Исходя из этой формулы можно сделать вывод: если в исходном состоянии все плечи моста имеют одинаковое сопротивление, то одинаковое изменение двух смежных плеч не приводит к разбалансу моста. Данное свойство очень важное, поскольку на его основе можно сконструировать мостовую схему, компенсирующую влияющие величины.

Включим в мостовую схему два одинаковых сенсора в смежных плечах. Один из них будет подвергаться действию как измеряемой величины, так и влияющих величин, а второй – только влияющих величин. Пусть в изменение сопротивления измерительного сенсора  $R_2$  вносят вклад измеряемая величина  $\Delta R_{2m}$  и влияющие величины  $\Delta R_{2g}$ , т. е.  $R_2 = R_0 + \Delta R_{2m} + \Delta R_{2g}$ . На смежный сенсор действуют только влияющие величины:  $R_1 = R_0 + \Delta R_{1g}$ . Причем в силу идентичности сенсоров  $\Delta R_{1g} = \Delta R_{2g}$ . Пусть сопротивление других плеч остается постоянным и равным  $R_0$ . Тогда  $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ .

$$u_d = U_0 \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{4R_0} = U_0 \frac{R_0 + \Delta R_{2m} + \Delta R_{2g} - R_0 - \Delta R_{2g}}{4R_0} = U_0 \frac{\Delta R_{2m}}{4R_0}. \quad (2.18)$$

Таким образом, на выходной сигнал не оказывают действия влияющие величины, он зависит только от измеряемой величины. Иными словами, мы реализовали 3-е преимущество мостовых схем.

## 2.4. Статический и динамический режимы работы сенсоров

Если измеряемая величина постоянна, то режим работы сенсора называют статическим, а если измеряемая величина периодически меняется во времени, то такой режим работы называют динамическим. Для динамического режима вводится понятие полосы пропускания. Это диапазон частот измеряемой величины, где сохраняются высокие значения чувствительности.

Чувствительность в динамическом режиме зависит от частоты изменения измеряемой величины. Пусть измеряемая величина подчиняется косинусоидальному закону:  $m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t$ , где  $m_0$  – постоянная составляющая, на которую накладывается периодический сигнал, с амплитудой  $m_1$  и частотой  $f = \omega/2\pi$ .

Чувствительность в динамическом режиме определяется как отношение амплитуды колебания выходного сигнала к амплитуде колебания измеряемой величины:  $L_D = S_1/m_1$ .

Зависимость чувствительности от частоты измеряемой величины называется частотной характеристикой сенсора.

Для сенсоров, работающих в динамическом режиме, т. е. когда измеряемая величина быстро меняется во времени, связь между выходным сигналом и измеряемой величиной можно выразить дифференциальным уравнением 1-го или 2-го порядка. Частотная характеристика зависит от порядка уравнения. Уравнение 1-го порядка относительно  $S$  имеет вид

$$A \frac{dS}{dt} + BS = m(t) = m_1 \cos \bar{\omega} t,$$

где  $A, B$  – константы, зависящие от конкретного сенсора.

Решением этого уравнения является функция сигнала  $S(t)$  от времени вида

$$S(t) = \frac{m_1}{\sqrt{A^2 \bar{\omega}^2 + B^2}} \sin(\bar{\omega} t + \varphi) + S_0, \quad (2.19)$$

где  $S_0$  – постоянная величина, соответствующая  $m_0$ .

Отсюда амплитуда выходного сигнала равна

$$S_1 = \frac{m_1}{\sqrt{A^2 \bar{\omega}^2 + B^2}} = \frac{m_1}{B} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}, \quad (2.20)$$

где  $f_c = B/2\pi A$  – граничная частота.



Сдвиг фазы выходного сигнала  $\varphi$ , возникающий из-за отставания выходного сигнала от изменения измеряемой величины, тем меньше, чем больше быстродействие.

Сдвиг фаз определяется выражением

$$\varphi = \arctg(\bar{\omega}A/B) = -\arctg(f/f_c). \quad (2.21)$$

Итак, чувствительность в динамическом режиме для системы 1-го порядка равна

$$L(\bar{\omega}) = \frac{S_1}{m_1} = \frac{1}{\sqrt{A^2\bar{\omega}^2 + B^2}}. \quad (2.22)$$

При  $\omega$ , стремящейся к нулю, чувствительность стремится к чувствительности статической системы:  $L_D = L_S = 1/B$ . Следовательно, частотную характеристику можно записать в виде

$$L_D = L_S \frac{1}{\sqrt{1 + A^2\bar{\omega}^2}}. \quad (2.23)$$

При единичном значении коэффициента  $A$  график зависимости  $L_D/L_S$  от частоты будет иметь вид, представленный на рис. 2.4.

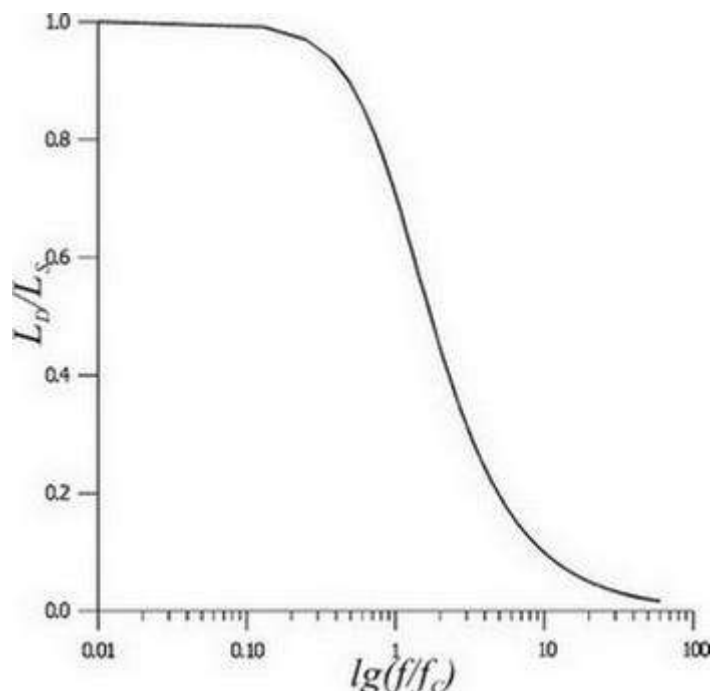


Рис. 2.4. Чувствительность сенсора в динамическом режиме для систем первого порядка

Системой 2-го прядка называется сенсор, работающий в динамическом режиме, выходной сигнал которого связан с измеряемой величиной через дифференциальное уравнение 2-го порядка:

$$A \frac{d^2 S}{dt^2} + B \frac{dS}{dt} + CS = m(t) = m_1 \cos \bar{\omega} t, \quad (2.24)$$

где  $A, B, C$  – постоянные коэффициенты, зависящие от природы сенсора.

Данный вид уравнения описывает многие системы, способные к автоколебанию (например, электрический колебательный контур, упругая мембрана микроэлектронного сенсора, торсионная связь инерционной массы вибрационного гироскопа или акселерометра с опорой из кремниевой подложки, маятниковый актюатор МЭМС). Таким образом, данное уравнение применимо к сенсорам, имеющим собственную частоту колебаний выходного сигнала  $f_0$  и коэффициент затухания колебаний  $k$ . Эти величины связаны с коэффициентами дифференциального уравнения следующим образом:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/A}, k = \frac{B}{2} \sqrt{CA}. \quad (2.25)$$

Чувствительность такой системы зависит от частоты колебаний  $f$  измеряемой величины следующим образом:

$$L(f) = \frac{S_1}{m_1} = \frac{1}{C \sqrt{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4k^2(f/f_0)^2}}. \quad (2.26)$$

В статическом режиме  $f = 0$ ,  $L(0) = 1/C = L_S$ , отсюда

$$L(f) = L_S \frac{1}{\sqrt{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4k^2(f/f_0)^2}}. \quad (2.27)$$

Сдвиг фазы выходного сигнала от измеряемой величины составит

$$\varphi = -\arctg \left\{ \frac{2k}{(f/f_0)[1 - (f/f_0)^2]} \right\}. \quad (2.28)$$

Если сенсор имеет коэффициент затухания близкий к нулю, то при совпадении частоты измеряемой величины с собственной частотой колебания сенсорной системы чувствительность резко повышается. Это означает, что выходной сигнал при такой частоте резко возрастает, т. е. функция  $L(f)$  проходит через максимум. Возникает явление резонанса. Это неблагоприятный случай, поскольку нарушается линейность системы и возрастает погрешность измерений.

В то же время чувствительность зависит от коэффициента затухания собственных колебаний сенсорной системы. Если коэффициент затухания отличен от нуля, то частота резонанса немного сдвигается в сторону меньших значений:

$$f_M = f_0 \sqrt{1 - 2k^2}. \quad (2.29)$$

При  $k \geq 1/(2)^{1/2} = 0.71$  максимум сглаживается и функция чувствительности монотонно убывает, при  $k < 1/(2)^{1/2}$  максимум сохраняется (рис. 2.5).

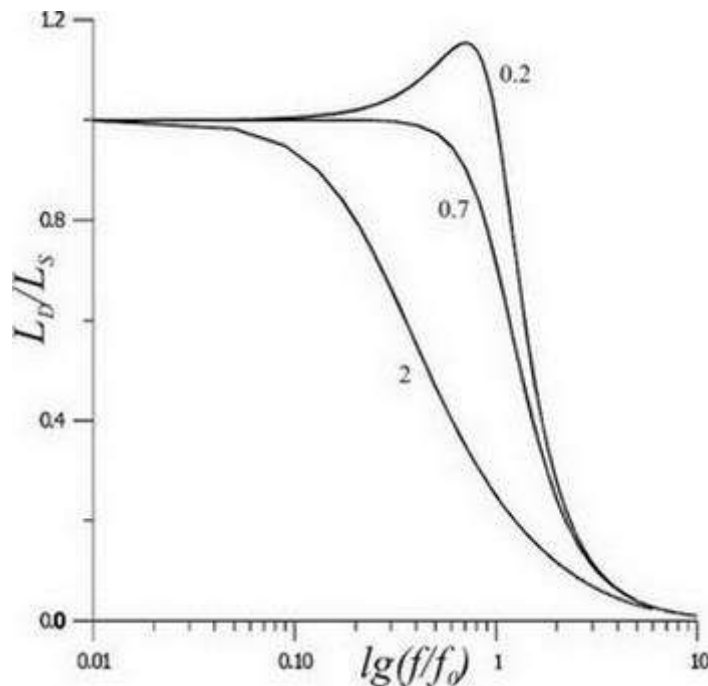


Рис. 2.5. Чувствительность сенсора в динамическом режиме для систем второго порядка при коэффициентах затухания  $k = 0.2, 0.7, 2$

Таким образом, оптимальным вариантом является датчик с коэффициентом затухания около 0.7. При этом чувствительность системы остается практически постоянной во всей полосе пропускания. При более высоких значениях коэффициента затухания чувствительность заметно снижается, а при меньших значениях наступает явление резонанса.

### 3. ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ

Кинетические явления, имеющие место *при одновременном воздействии на полупроводник электрического и магнитного полей*, называются гальваномагнитными эффектами. К ним относятся эффект Холла, магниторезистивный и гальваномагниторекомбинационный эффекты.

На основе этих эффектов в настоящее время работает широкий спектр датчиков, которые с успехом применяются в автоматике, вычислительной технике, электротехнике, автомобильной электронике и других областях, причем возможности их использования постоянно расширяются.

#### 3.1. Датчики магнитного поля на основе эффекта Холла

Высокая чувствительность и линейность характеристики датчиков Холла позволяют использовать их для измерения слабых магнитных полей, в том числе магнитного поля Земли.

Сущность эффекта Холла заключается в появлении поперечного электрического поля в образце полупроводника, помещенного в перпендикулярное магнитное поле, при пропускании вдоль него электрического тока (рис. 3.1). Рассмотрим этот эффект с учетом требований к параметрам датчика и требований к материалам для реализации нужной конструкции.

Рассмотрим прямоугольный полупроводник *n*-типа проводимости, по которому протекает ток *I* под действием электрического поля *E*. Плотность этого тока  $\vec{j}$  определится формулой

$$\vec{j} = -qn\vec{V}_x = \sigma\vec{E}_x, \quad (3.1)$$

где *q* – заряд электрона;

*n* – концентрация электронов;

$\vec{V}_x$  – скорость электронов в электрическом поле  $\vec{E}_x$ ;

$\sigma$  – удельная проводимость полупроводника.

Если полупроводник однородный, то в отсутствие магнитного поля эквипотенциальные поверхности будут перпендикулярны вектору напряженности электрического поля, а следовательно, и силовым линиям тока. В этом случае при расположении точек *A* и *B* на одной эквипотенциальной поверхности, т. е. строго напротив друг друга, напряжение между ними равно нулю. Поместим теперь образец в магнитное поле с индуктивностью  $\vec{B}$ , перпендикулярной плоскости рисунка и направлению электрического поля. При этом на носители тока в образце начинает действовать сила Лоренца:

$$\vec{F} = \pm q[\vec{V}_x \cdot \vec{B}], \quad (3.2)$$

направленная перпендикулярно дрейфовой скорости  $\vec{V}_x$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , причем знак (+) соответствует дырке, а (–) – электрону.

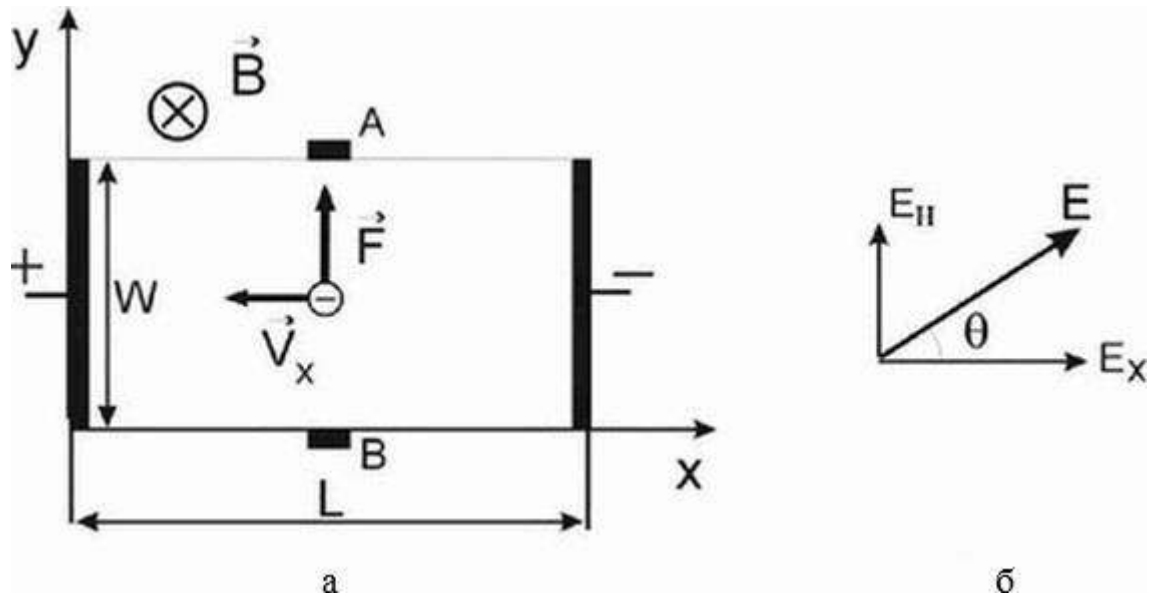


Рис. 3.1. Возникновение поля Холла (а) и результирующее электрическое поле в образце (б)

С другой стороны, дрейфовую скорость  $\vec{V}_x$  можно записать в виде

$$\vec{V}_x = \pm \mu \vec{E}_x, \quad (3.3)$$

где (+) соответствует дырке, а (–) – электрону, в результате чего

$$\vec{F} = q\mu[\vec{E}_x \cdot \vec{B}],$$

т. е. направление силы Лоренца не зависит от знака носителя, а значит, и электроны, и дырки под действием силы Лоренца будут отклоняться в одну сторону (к точке А на рис. 3.1, а). Полученный результат становится очевидным, если учесть, что при изменении знака носителя меняется и направление его движения в электрическом поле. Из вышеизложенного следует, что в полупроводнике *n*-типа проводимости и основные, и неосновные носители отклоняются к точке А и накапливаются около нее, но поскольку основных носителей много больше, чем неосновных, то в точке А будет избыток электронов, а точке В их недостаток. Таким образом, между точками А и В возникает дополнительное электрическое поле, направленное от В к А (в случае акцепторного полупроводника направление этого поля будет противоположным). Возникающее электрическое поле перпендикулярно как вектору магнитной индукции, так и направлению протекания тока и носит название поля Холла ( $\vec{E}_H$ ).

Поле  $\vec{E}_H$  будет расти до тех пор, пока не скомпенсирует силу Лоренца:

$$-q \cdot \vec{E}_H = q[\vec{V}_x \cdot \vec{B}]. \quad (3.4)$$

После достижения этого условия носители потекут по полупроводнику только под действием внешнего электрического поля, т. е. магнитное поле при этом как бы отсутствует. Однако суммарная напряженность поля в образце станет  $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_H$ , а ее вектор окажется повернут относительно исходного поля на некоторый угол  $\theta$ , называемый углом Холла (рис. 3.1, б). В результате этого эквипотенциальные поверхности также оказываются повернутыми относительно силовых линий тока на тот же угол и точки  $A$  и  $B$  окажутся теперь на разных эквипотенциальных поверхностях, следовательно, между ними возникнет разность потенциалов, называемая ЭДС Холла или холловским напряжением, которое в случае  $\vec{V}_x \perp \vec{B}$  и с учетом (3.1) запишется в виде

$$U_H = E_H \cdot W = -V_x \cdot B \cdot W = \frac{1}{qn} j \cdot B \cdot W = R_H \cdot j \cdot B \cdot W, \quad (3.5)$$

где  $W$  – ширина образца;

$R_H = 1/qn$  – постоянная Холла, определяемая концентрацией основных носителей тока в полупроводнике. Для полупроводника  $n$ -типа она определяется приведенной формулой и имеет знак минус, а для полупроводника  $p$ -типа она положительна и запишется как  $R_H = 1/qp$ .

Как видно из рис. 3.1, б,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_H}{E_x} = \frac{U_H}{U} \cdot \frac{L}{W} \quad (3.6)$$

и определяется отношением длины элемента к его ширине. Расчеты показывают, что оптимальным оказывается соотношение  $L/W = 1.5\text{--}3$ . Выбор такого малого значения отношения обусловлен тем, что с ростом  $L$  для сохранения постоянной плотности тока через образец необходимо увеличивать также и прикладываемое напряжение  $U$ . Если рост  $L$  ведет к увеличению угла Холла, то увеличение приложенного напряжения приводит к его уменьшению, т. е. зависимость  $\operatorname{tg} \theta$  от  $L/W$  имеет насыщение при  $L/W > 3$ .

С другой стороны, из (3.1) и (3.5) следует, что

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_H}{E_x} = \frac{R_H \cdot j \cdot B}{E_x} = R_H \cdot \sigma \cdot B. \quad (3.7)$$

Учитывая, что  $\sigma = q\mu n$  – удельная проводимость полупроводника, а  $R_H = 1/qn$ , то из (3.7) можно получить

$$\operatorname{tg} \theta = \mu_H B, R_H = \operatorname{tg} \theta / \sigma B. \quad (3.8)$$

Таким образом, угол Холла, а следовательно,  $R_H$  и  $U_H$  тем больше, чем больше подвижность носителей в полупроводнике и меньше его удельная проводимость. Отсюда следует, что для использования в датчиках Холла

следует выбирать полупроводники  $n$ -типа проводимости с высокой подвижностью носителей и малой концентрацией примеси.

Используемая в формуле (3.8) величина  $\mu_H$  называется холловской подвижностью, она отличается от дрейфовой подвижности  $\mu$  и записывается в виде

$$\mu_H = \sigma \cdot R_H. \quad (3.9)$$

На самом деле коэффициент Холла в приведенном выше виде неточен, поскольку в нем не учтена разница между полной скоростью электронов, входящей в выражение (3.2), и дрейфовой скоростью, которую электрон приобретает под действием электрического поля. Кроме того, не учитывается распределение электронов по скоростям и механизм рассеяния носителей. Более строгое выражение для коэффициента Холла имеет вид

$$R_H = \pm r_H / qn, \quad (3.10)$$

где  $r_H$  – холл-фактор, являющийся характеристикой данного твердого тела и зависящий от механизма рассеяния носителей.

Подвижность, определенная с помощью формулы (3.9), является холловской подвижностью. Учет более точного выражения (3.10) для коэффициента Холла показывает ее отличие от дрейфовой подвижности:

$$\mu_H = \sigma R_H = r_H \mu. \quad (3.11)$$

Таким образом, измерив холловскую подвижность и зная механизм рассеяния, можно определить дрейфовую подвижность  $\mu_d$ .

Если полупроводник имеет смешанную проводимость, то коэффициент Холла принимает следующий вид:

$$R_H = \frac{r_p p \mu_p^2 - r_n n \mu_n^2}{q(p \mu_p + n \mu_n)^2}, \quad (3.12)$$

или, полагая, что  $r_n = r_p = r_H$ ,  $n/p = a$  и  $\mu_n/\mu_p = b$ , можно записать

$$R_H = \frac{r_H (1 - ab^2)}{qp (1 + ab)^2}. \quad (3.13)$$

Нетрудно убедиться, что если  $n \rightarrow 0$  или  $p \rightarrow 0$ , то выражение (3.13) переходит в (3.10), а если  $ab^2 = 1$  (в частном случае, когда  $n = p$  и  $\mu_n = \mu_p$ ), то коэффициент Холла, а следовательно, и ЭДС Холла будут равны нулю. В случае собственного полупроводника, когда  $n = p$  и  $a = 1$ , выражение (3.13) упрощается и принимает вид

$$R_H = \frac{r_H (1 - b)}{qp (1 + b)}. \quad (3.14)$$

Отсюда видно, что в области собственной проводимости знак ЭДС Холла соответствует знаку того типа носителей, подвижность которых больше.

В случае смешанной проводимости выражение для электропроводности имеет вид

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) = qr\mu_p(1 + ab), \quad (3.15)$$

а для собственной проводимости:

$$\sigma = qr\mu_p(1 + b). \quad (3.16)$$

Выражение (3.13), как и (3.15), показывает, что относительный вклад более подвижных носителей заряда в образование холловского поля определяется величиной  $ab^2$ , в то время когда их вклад в проводимость определяется величиной  $ab$ , т. е. носители заряда с большей подвижностью играют более значительную роль в эффекте Холла, чем в проводимости.

Если в проводимости участвуют два типа носителей с разными эффективными массами, как это имеет место в  $p$ -германии, то выражения для электропроводности и коэффициента Холла принимают вид

$$\sigma = qp_1\mu_1 \left(1 + \frac{n_2\mu_2}{n_1\mu_1}\right), \quad (3.17)$$

$$R_H = \frac{3\pi}{8qr} \frac{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)\right]^2}, \quad (3.18)$$

где индексы 1 и 2 относятся к тяжелым и легким дыркам.

Соответственно выражение для холловской подвижности имеет вид

$$\mu_H = \sigma R_H = \frac{3\pi}{8} \mu_1 \frac{1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)^2}{1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)}. \quad (3.19)$$

### 3.1.1. Пленочные датчики Холла

Подставляя в (3.5) вместо плотности тока  $j_x$  его значение  $I$ , получаем выражение напряжения Холла через практически измеряемые параметры:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d}, \quad (3.20)$$

где  $d$  – толщина образца.



Из этого уравнения видно, что для получения высокой чувствительности к изменениям магнитной индукции ( $\gamma = \Delta U_H / \Delta B$ ) необходимо применять как можно более тонкие образцы полупроводников с высокими значениями коэффициента Холла и подвижности носителей заряда.

В настоящее время наиболее широко используемыми пленочными полупроводниками для создания датчиков Холла являются эпитаксиальные пленки арсенида галлия. Сочетание таких факторов, как большая ширина запрещенной зоны ( $E_g = 1.7$  эВ), высокие значения коэффициента Холла и подвижности носителей ( $\mu_n = 0.85$  м<sup>2</sup>/В·с), возможность автоэпитаксиального выращивания тонких слоев на полуизолирующих подложках, обусловило применение этого материала для разработки датчиков Холла.

Освоенные в промышленности арсенид-галлиевые датчики (ХАГ-П) обладают широким рабочим диапазоном температур (от минус 60 до плюс 300 °С) и высокой чувствительностью к магнитному полю (выходной сигнал при магнитной индукции 0.5 Тл не менее 1 В).

Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к подложкам датчиков, являются монокристалличность, хорошие изолирующие свойства, минимальные микро- и макронеоднородности по площади подложки, близость коэффициентов термического расширения подложки и пленки.

Датчики ХАГ-П изготавливаются выращиванием эпитаксиальной пленки толщиной 5–10 мкм на полуизолирующих подложках GaAs, GaP или InP, причем последний обеспечивает минимальное рассогласование параметров решетки при эпитаксии. Однако он характеризуется большими микро- и макронеоднородностями распределения электрофизических параметров, поэтому наиболее предпочтительным материалом для подложек является все же GaAs. В качестве легирующих донорных примесей обычно используют олово, теллур, селен или серу.

Конструкция датчиков представляет собой прямоугольную пластину размером 4 × 2 мм, расположенную на гибкой печатной плате и помещенную в металлический корпус из нержавеющей стали (рис. 3.2).

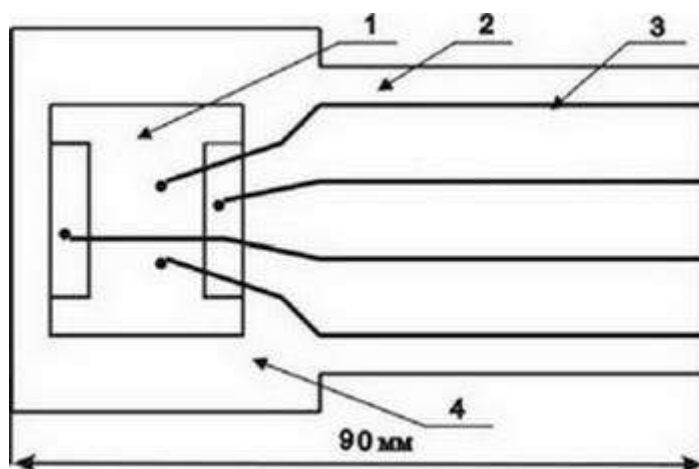


Рис. 3.2. Конструкция пленочного арсенид-галлиевого датчика Холла:

1 – эпитаксиальная структура; 2 – гибкая печатная плата на основе полиимидно-фторопластовой композиции; 3 – проводники; 4 – металлический немагнитный корпус

Для получения надежных омических контактов используются олово, серебро, золото, германий или никель, а также их сплавы.

Серебро образует легкоплавкую эвтектику с n-GaAs, имеет высокую тепло- и электропроводность и сравнительно медленно диффундирует в GaAs, но применение одного серебра не дает омических контактов, поэтому его используют с добавками металлов, дающих  $n^+$ -проводимость, например 93 % Ag + 7 % Sn.

Напыление сплава Ag – Sn проводится через металлическую маску при вакууме  $10^{-3}$  Па с последующим вжиганием при температуре 550–600 °С в течение 5–10 мин.

Применение выводов в виде проводников гибкой печатной платы на основе полиимидно-фторопластовой композиции (индекс 3 на рис. 3.2) позволяет повысить прочность и надежность конструкции и уменьшить механические напряжения, приводящие к временным дрейфам параметров датчиков.

Важной операцией при изготовлении датчиков является снижение (доводка) остаточного напряжения  $U_0$ , т. е. напряжения на холловских выводах в отсутствие магнитного поля. Причиной возникновения этого эффекта может служить как *несимметричность расположения холловских контактов*, так и искажение эквипотенциальных поверхностей из-за локальных неоднородностей полупроводниковой пленки.

В настоящее время операция снижения  $U_0$  автоматизирована и производится локальным вжиганием полупроводниковой пленки в области холловских контактов сфокусированным лазерным лучом.

Герметизация производится полимеризацией компаунда ЭП-514 на основе эпоксидной смолы Д-20 в камере тепла при  $T = 140$  °С в течение 4 ч.

На рис. 3.3 приведены зависимости холловского напряжения от величины управляющего тока для различных типов арсенид-галлиевых датчиков Холла.

Наряду с GaAs арсенид индия также является традиционным материалом для изготовления пленочных датчиков Холла. Гетероэпитаксиальные пленки InAs получают в основном методами жидкофазной и газофазной эпитаксий в хлоридно-гидридной системе. В качестве подложек используют полуизолирующий GaAs с удельным сопротивлением  $\rho = 10^7$  Ом · см при  $T = 300$  К.

Подвижность носителей заряда в пленке InAs, выращенной газофазной эпитаксией, имеет значения в диапазоне 13 200 – 17 600 см<sup>2</sup>/В · с для толщин пленок 7 – 18 мкм, что обеспечивает высокую магнитную чувствительность.

Выходной сигнал арсенид-индиевых ДХ имеет значения порядка 0.5 В при индукции 0.6 Тл, причем чувствительность датчиков монотонно повышается с уменьшением толщины пленки согласно формуле (3.20).

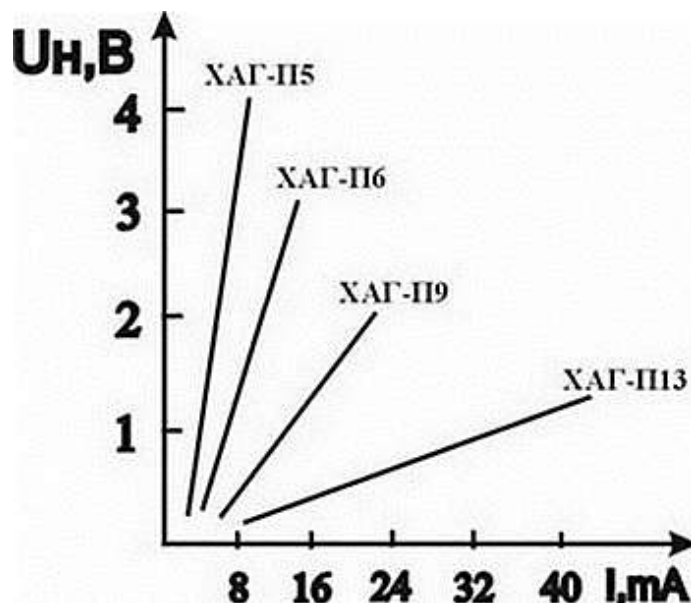


Рис. 3.3. Зависимость напряжения Холла от управляющего тока при  $B = 0.5$  Тл и  $T = 20$  °С

Однако вблизи подложки ход зависимости меняется и  $U_H$  датчиков резко уменьшается при дальнейшем утончении пленки.

На рис. 3.4 показано влияние толщины пленки арсенида индия на полуизолирующем GaAs на холловскую подвижность электронов.

Значение  $\mu$  не изменяется в интервале толщин 6–10 мкм, но быстро падает с уменьшением толщины пленки до 1–2 мкм, что свидетельствует о роли переходного слоя, возникающего вблизи границы эпитаксиальная пленка – подложка, ввиду несоответствия параметров решетки.

Поэтому для правильного конструирования датчиков необходимо знать не только электрофизические параметры пленки, но и оптимальное значение ее толщины.

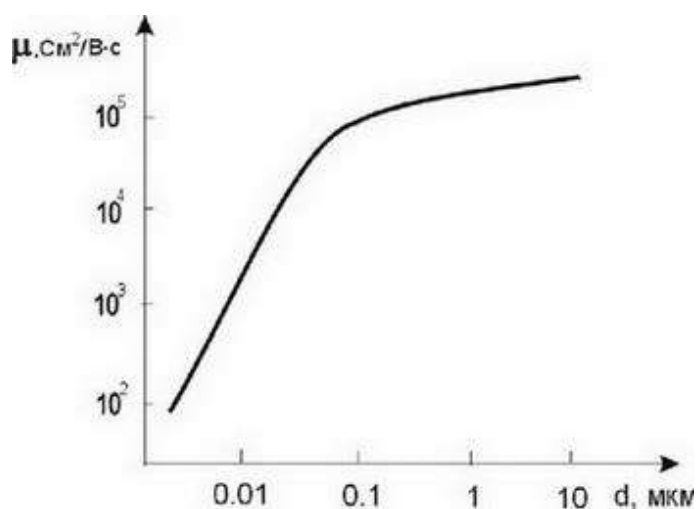


Рис. 3.4. Влияние толщины пленок арсенида индия на полуизолирующем арсениде галлия на холловскую подвижность электронов

По магнитной чувствительности арсенид-индиевые датчики превосходят германиевые, но уступают арсенид-галлиевым. Однако, несмотря на довольно высокую чувствительность и низкие значения остаточного напряжения  $U_0$  ( $\approx \pm 0.1$  мВ), арсенид-индиевые датчики пока не нашли широкого применения ввиду трудности получения высокой однородности выращиваемых пленок, что приводит к нестабильности параметров.

Широкое техническое использование явления сверхпроводимости выдвинуло проблему измерения сильных магнитных полей (до 10 Тл) при сверхнизких температурах. Для создания датчиков, работоспособных при таких температурах, необходимо использовать полупроводники с узкой запрещенной зоной. Использование эпитаксиальной технологии получения тонких слоев позволило получать пленки антимонида индия ( $E_g = 0.1$  эВ) с высокой однородностью на полуизолирующих подложках из GaAs.

Одним из распространенных в технологии датчиков методов получения пленок антимонида индия является *жидкофазная эпитаксия* (она практически не используется в серийном производстве ИС), которая позволяет получать наиболее совершенные пленки, причем процесс выращивания проводится всего при 300 °С. Этим способом формируются пленки InSb толщиной 1.8–9 мкм с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью 55 000–58 000  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Другим известным способом является термическое напыление с последующим отжигом при 500–600 °С, позволяющее получать практически монокристаллические пленки InSb на i-GaAs с концентрацией электронов  $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Датчики на таких пленках нашли применение для измерения сильных магнитных полей (до 14 Тл) в широком температурном диапазоне (4.2–350 К).

Для получения достаточно высокой чувствительности *следует использовать возможно меньшие толщины пленок, но в то же время они должны быть способны пропускать большой управляющий ток* (100–200 мА). Это обстоятельство предъявляет особые требования к омическим контактам датчиков. Обычно в качестве материала для контактов к InSb используется In. Однако при подпайке выводов к индиевым контактам часто происходит растекание припоя, ухудшающее электрические характеристики приборов.

Поэтому в качестве контактов для датчиков на основе InSb используется трехслойная металлизация: подслой ванадия (для улучшения адгезии), проводящий слой меди и защитное покрытие из никеля.

Для обеспечения линейной зависимости  $U_H = f(B)$  датчика на основе InSb отношение длины к ширине активной части датчика выбирают равным трем.

Сама пленка формируется в виде крестообразной структуры (рис. 3.5), исключающей влияние токовых контактов на основные характеристики, так как они вынесены за пределы активной области элемента Холла.

### 3.1.2. Кремниевые интегральные датчики Холла

Широкое применение дискретных датчиков Холла все же ограничивается высокой стоимостью полупроводниковых материалов класса  $A^{III}B^V$ . Использование стандартной микроэлектронной технологии кремниевых ИС позволяет располагать на едином кристалле как датчик, так и электронное обрамление схемы усиления и обработки сигналов, что компенсирует низкую чувствительность кремния и удешевляет стоимость приборов вследствие применения групповых методов обработки. Параметры датчиков при этом определяются конструктивно-технологическими особенностями изготовления ИС и обработки сигналов.

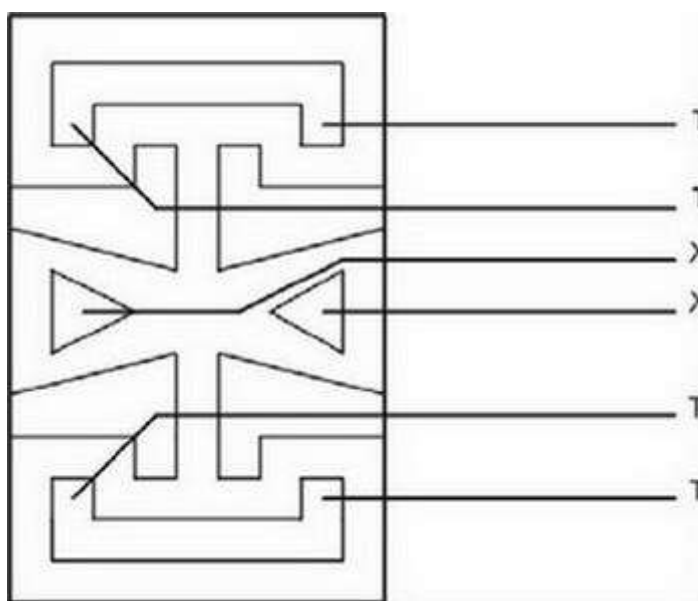


Рис. 3.5. Датчик Холла, вид со стороны эпитаксиального слоя:

T, X – токовые и холловские выводы соответственно

Как известно, в биполярной технологии изготовления кремниевых ИС существуют два основных типа изоляции элементов: обратнo смещенным  $p$ - $n$ -переходом и различными видами диэлектрических изоляций, самым распространенным из которых является технология кремниевых структур с диэлектрической изоляцией (КСДИ).

*Попытки создать кремниевые датчики Холла по технологии КСДИ ни к чему не привели*, так как приборы обладали большими временными и температурными дрейфами остаточного напряжения, связанными с упругими механическими напряжениями, возникающими в КСДИ в процессе их формирования вследствие различия термических коэффициентов расширения окисла, моно- и поликристаллических пленок кремния. При протекании через датчик даже сравнительно небольших измерительных токов происходит его

саморазогрев, приводящий к перераспределению упругих механических напряжений, что в свою очередь влечет за собой непредсказуемый дрейф  $U_0$ .

Влияние упругих механических напряжений на остаточное напряжение датчиков объясняется тем, что кремний является тензочувствительным материалом, а сам датчик представляет собой резистивный мост, состоящий из двух пар одинаковых резисторов: между положительным и отрицательным токовыми контактами и холловскими контактами. Изменение сопротивления какого-либо из этих резисторов приводит к разбалансу моста и к дрейфу  $U_0$ .

В датчиках с изоляцией обратно смещенным  $p$ - $n$ -переходом также наблюдается незначительный начальный дрейф  $U_0$ , обусловленный механическими напряжениями, возникающими в процессе технологических операций скрайбирования, посадки кристаллов в корпус и термокомпрессии. Однако электротермотренировка при  $120^\circ\text{C}$  в течение 48 ч полностью устраняет временной дрейф, сохраняя лишь естественный температурный дрейф не более  $10\text{ мкВ}/^\circ\text{C}$  при питании датчика Холла постоянным напряжением. Магнитная чувствительность кремниевых датчиков с изоляцией обратносмещенным

$p$ - $n$ -переходом лежит в пределах  $50\text{ мкВ}/\text{Гс}$ . Это вполне приемлемо для широкой гаммы непрецезионных датчиков общего применения.

Конструктивно-технологические параметры используемых структур соответствуют требованиям тех ИС, которые изготавливаются совместно с датчиком на едином кристалле: удельное сопротивление до  $1\text{ Ом}\cdot\text{см}$  и толщина эпитаксиальной пленки  $5\text{ мкм}$  для цифровых схем и  $\rho = 5\text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $h_{\text{эп}} = 12\text{ мкм}$  для линейных ИС.

Рассчитаем параметры датчика Холла, изготавливаемого совместно с линейной схемой операционного усилителя. Для этого зададимся следующими параметрами эпитаксиальной пленки: удельное сопротивление  $2\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , толщина эпитаксиальной пленки  $12\text{ мкм}$ . Отношение  $L/W$  выберем равным 2, напряжение питания  $U_{\text{пит}} = 5\text{ В}$ , а входной ток датчика  $I_{\text{пит}} = 1.5\text{ мА}$ , следовательно, сопротивление токового плеча датчика должно составлять  $3.3\text{ кОм}$ . Из формулы (3.20) чувствительность датчика к магнитному полю можно записать в виде  $U_H/B = R_H I/d_{\text{эп}} = I/qnd_{\text{эп}}$ . Вычисления по этой формуле при подстановке заданных выше параметров дают величину чувствительности порядка  $50\text{ мкВ}/\text{Гс}$ .

Выберем реальные размеры датчика. Ширина датчика определяется допустимой плотностью тока в ИС (порядка  $75\frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ ), тогда, исходя из заданной величины тока питания,  $W$  датчика определится по формуле  $j_{\text{доп}} = \frac{I}{S} = I/Wd_{\text{эп}}$ ;  $W = I/d_{\text{эп}}j_{\text{доп}}$ . Вычисления показывают, что ширина датчика должна быть не меньше  $170\text{ мкм}$ . Тогда, исходя из выбранного соотношения  $L/W = 2$ , длина датчика должна составлять  $340\text{ мкм}$ . Причем полученные значения  $L$  и  $W$  – это расстояния между токовыми и холловскими контактами соответственно. Как видим, при грамотном подходе (усвоении

вышеизложенных элементов теории) расчет не представляет особой сложности.

Рассмотрим топологические особенности интегрального датчика Холла с изоляцией обратносмещенным  $p$ - $n$ -переходом. Известно, что при изготовлении ИС на эпитаксиальных структурах, ориентированных в плоскости (111), боковой уход всех высокотемпературных диффузионных процессов составляет 0.8 от глубины процесса, т. е. боковой уход разделительной диффузии составит  $0.8d_{\text{эп}} = 9$  мкм. Учитывая этот уход и все фотолитографические и технологические допуски, расстояние от фотолитографического края контактных окон до фотолитографического края изолирующего  $p$ - $n$ -перехода должно быть выбрано не меньше 20 мкм. Исходя из этого и учитывая размеры самих контактных окон, фотолитографические размеры датчика должны составлять  $400 \times 220$  мкм. Таким образом, мы рассматриваем прямоугольный карман  $n$ -типа проводимости, окруженный со всех сторон областями  $p$ -типа проводимости, причем токовые и холловские контакты расположены на определенных расстояниях от края областей  $p$ -типа проводимости. При такой конструкции силовые линии тока, исходящие из токовых контактов, будут изгибаться по ширине элемента и тем самым приводить к искажению эквипотенциальных поверхностей, что в свою очередь приведет к появлению напряжения на холловских контактах даже при отсутствии магнитного поля. Чтобы избежать этого, карман для рабочей области датчика изготавливается сложной конфигурации (рис. 3.6).

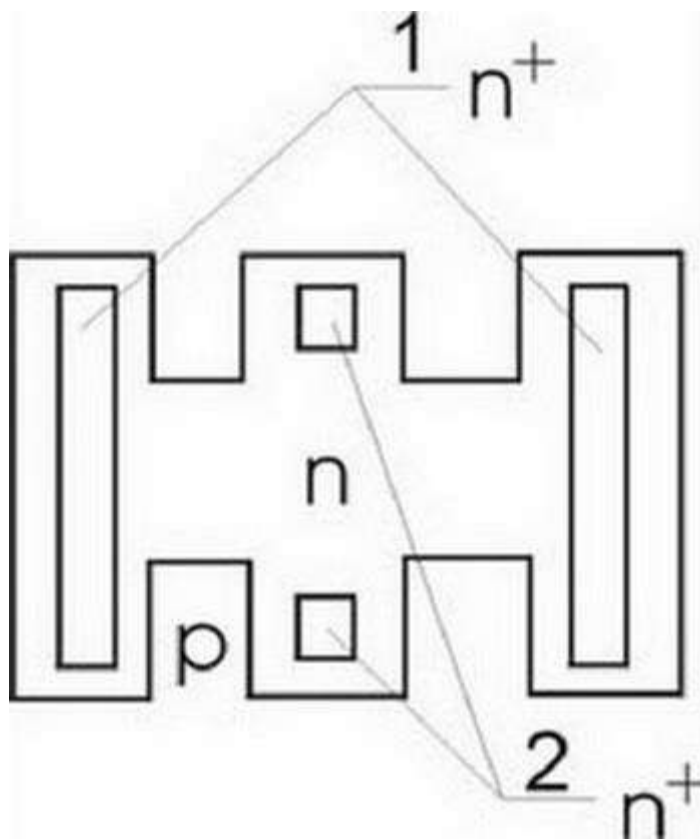


Рис. 3.6. Конфигурация кармана для изготовления интегрального ДХ:

1 – токовые; 2 – холловские контакты

Такая конструкция позволяет исключить краевые эффекты, связанные с искажением линий тока, и защитить от них холловские контакты за счет обрыва линий тока на выступах изолирующего *p-n*-перехода.

В табл. 3.1 приведены сравнительные характеристики некоторых типов дискретных датчиков Холла, освоенных в промышленности в настоящее время.

### 3.2. Магниторезистивные преобразователи

#### 3.2.1. Магниторезистивный эффект

*Изменение под действием магнитного поля сопротивления полупроводника, по которому протекает электрический ток, называется магниторезистивным эффектом.* Увеличение электрического сопротивления под действием магнитного поля происходит как в случае перпендикулярности вектора магнитной индукции поверхности полупроводниковой пластины (поперечный эффект магнитосопротивления), так и в случае их параллельности (продольный эффект магнитосопротивления). Однако изменение сопротивления во втором случае незначительно, а посему датчики на продольном эффекте изготавливаются только в специальных случаях.

Таблица 3.1

Параметры промышленных датчиков Холла

Тип	Материал	$n, \text{см}^{-3}$	Размеры, мм	Толщина $d$ , мкм	$\gamma$ , мВ/к	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
ДХК	Si	$2 \cdot 10^{15}$	$6 \times 3$	100	50	$-60 \dots + 130$
ХАГ-ПЗ	GaAs	$4 \cdot 10^{16}$	$4 \times 2$	20	500	$-60 \dots + 130$
ХАГЭ-1	GaAs	$2 \cdot 10^{15}$	$3 \times 10$	10	1000	$-60 \dots + 150$
ХИМ	InAs	$5 \cdot 10^{16}$	$4 \times 2$	350	4000	$-60 \dots + 100$
ХИС	InSb	$3 \cdot 10^{17}$	$4 \times 3$	370	4500	$-270 \dots + 70$
ПХИЗ12	InSb	$6 \cdot 10^{17}$	$3 \times 3$	1000	200	$-50 \dots + 150$

Изменение сопротивления полупроводника в магнитном поле пропорционально квадрату подвижности носителей тока:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \cdot \mu^2 \cdot B^2, \quad (3.21)$$



где  $c$  – коэффициент пропорциональности, связанный с рассеянием носителей заряда.

В полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле, на движущиеся носители зарядов действует сила Лоренца, уравнивающаяся холловским электрическим полем. Однако холловское поле уравнивает только те носители, которые движутся со средними скоростями. На более медленные носители сильнее действует поле Холла, на более быстрые – сила Лоренца, траектории тех и других искривляются, и эффективная длина свободного пробега уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления. Очевидно, что чем меньше эффект Холла в полупроводнике, тем больше его магнитосопротивление. В полупроводнике с двумя типами носителей поле Холла меньше, поэтому линии тока в нем не параллельны граням и эффект магнитосопротивления соответственно больше.

Исключить влияние эффекта Холла можно и в полупроводнике с преобладанием одного типа носителей, используя специальную геометрию образца. Наиболее наглядным примером влияния конструкции на эффект магнитосопротивления является диск Корбино, представляющий собой полупроводниковую пластину с концентрическим расположением контактов: один в центре, а второй по окружности на равных расстояниях от первого. Если к электродам такого диска приложить напряжение, то траектории электронов будут иметь вид радиальных лучей, расходящихся от центра. При помещении в магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластины, носители отклоняются вдоль поверхности, линии тока удлиняются, но накопления зарядов не происходит и поле Холла не возникает. В такой структуре наблюдается максимальный эффект магнитосопротивления, однако ввиду технических трудностей практическое применение диска Корбино сильно затруднено.

### **3.2.2. Конструкции магниторезисторов**

Увеличение эффекта магнитосопротивления за счет геометрии резистора может быть достигнуто также и в полупроводниковой пластине, длина которой  $L$  значительно меньше ее ширины  $W$ . При воздействии на такую пластину магнитного поля, направление которого перпендикулярно плоскости пластины, поле Холла оказывается ослабленным за счет шунтирующего действия токовых электронов. Геометрически эффект магнитосопротивления в этом случае проявляется тем сильнее, чем меньше отношение  $L/W$ . Еще более увеличить эффект можно путем последовательного соединения резисторов с малым отношением  $L/W$ .

Основой материала магниторезистора служит антимонид индия, обладающий высокой подвижностью носителей, к которому добавляется 1.8 % NiSb. После сплавления и последующего остывания антимонид никеля кристаллизуется в антимониде индия в виде игл толщиной в 1 мкм и длиной примерно 50 мкм, расположенных параллельно друг другу и перпендикулярно

направлению тока. Удельная проводимость игл из NiSb около  $10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а InSb на два порядка меньше.

Таким образом, иглы играют роль хорошо проводящих электродов, разделяющих основную массу полупроводника на отдельные зоны с малым отношением  $L/W$ . Это приводит к резкому подавлению поля Холла, а следовательно, к искривлению траектории электронов под действием магнитного поля, т. е. к возрастанию эффекта магнитосопротивления.

Другой способ реализации указанного принципа на основе микроэлектронной технологии заключается в формировании магниторезисторов на основе кремниевых эпитаксиальных пленок, содержащих низкоомные шунтирующие участки поликристаллического кремния, расположенные перпендикулярно направлению тока.

Технология изготовления таких магниторезисторов основана на одновременном выращивании моно- и поликристаллических пленок кремния. С помощью процессов окисления и фотолитографии формируются локальные области  $\text{SiO}_2$ , на которых в процессе выращивания эпитаксиальной пленки растут пленки поликремния.

Для закорачивания ЭДС Холла проводится легирование полученных областей поликремния атомами фосфора до концентрации  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , причем, учитывая более высокую скорость диффузии атомов легирующей примеси в поликремнии по сравнению с монокристаллическим кремнием, легирование проводится одновременно с процессом создания в монокристаллической пленке  $n^+$ -областей под омические контакты.

### 3.2.3. Параметры магниторезисторов

Основными параметрами магниторезисторов являются: начальное сопротивление  $R_0$  при  $B = 0$ , магниторезистивное отношение  $R_B/R_0$ , представляющее собой отношение сопротивления магниторезистора при определенном значении магнитной индукции (обычно 0.3 и 1.0 Тл) к начальному сопротивлению, магнитная чувствительность  $\gamma_{mp}$ , определяемая как относительное приращение сопротивления, деленное на соответствующее приращение магнитной индукции  $\Delta R/R\Delta B$ , и нагрузочная способность, определяемая предельным значением температуры перегрева, который допускается для магниторезистора. Нагрузочная способность указывается в паспорте в виде значений рассеиваемой мощности  $P$ , либо в виде предельно допустимого тока  $I_{\text{max}}$ , либо как тепловое сопротивление:

$$G_{\text{th}} = \frac{P}{t_{\text{max}} - t_{\text{окр}}}, \quad (3.22)$$

где  $P$  – мощность, выделяемая в магниторезисторе;

$t_{\text{max}}$  – максимально допустимая температура резистора;

$t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

При определении нагрузочной способности магниторезистора при постоянном токе исходят из максимального значения сопротивления  $R_b$  (т. е. при  $B_{\max}$ ), а при постоянном питающем напряжении – из минимального значения сопротивления  $R_0$  при  $B = 0$ . При работе на переменном токе магниторезистивный эффект не зависит от частоты вплоть до значений 10 ГГц.

В случае наклейки магниторезисторов на металлическую подложку возможны возникновения токов Фуко, поэтому при высоких частотах применяется подложка из феррита. В табл. 3.2 приведены параметры магниторезисторов из эвтектического сплава InSb – NiSb при  $T = 25^\circ\text{C}$ , причем все подложки выполнены из ферритов.

Последние два типа указанных в табл. 3.2 магниторезисторов являются дифференциальными.

Таблица 3.2

Параметры магниторезисторов из сплава InSb – NiSb

Тип	Начальное сопротивление $R_0$ , Ом, при $B = 0$ , $T = 25^\circ\text{C}$	Относительное изменение $R_B/R_0$ , $T = 25^\circ\text{C}$ , $B = 1\text{ Тл}$	Размеры магниторезистора, мм	Максимальная рассеиваемая мощность, Вт
FP3050E	50	15	$3.2 \times 1.2 \times 0.4$	0.25
FP17200E	200	8.5	$3.2 \times 2.7 \times 0.4$	0.7
FP3060E	60	6	$3.2 \times 1.2 \times 0.4$	0.5
FP110155	$2 \times 155$	15	$3.2 \times 2.0 \times 0.4$	0.7
FP111100	$2 \times 100$	8.5	$3.2 \times 2.7 \times 0.4$	0.7

### 3.3. Гальваномагнитные преобразователи на активных элементах

#### 3.3.1. Магнитодиоды

*Магнитодиодом называется полупроводниковый преобразователь магнитного поля, принцип действия которого основан на магнитодиодном эффекте.*

Магнитодиодный эффект проявляется в диодах с длинной базой и заключается в резком изменении электрического сопротивления диода, включенного в прямом направлении, при воздействии поперечного магнитного поля. В диодах с длинной базой прямой ток определяется неравновесной проводимостью базовой области. Распределение инжектированных носителей в базе диода определяется подвижностью и временем жизни. В магнитном поле вследствие магниторезистивного эффекта уменьшается подвижность носителей и, следовательно, проводимость базы, что приводит к перераспределению напряжений, падающих на  $p$ - $n$ -переходе, и в толще базы: падение напряжения на базе растет, а на  $p$ - $n$ -переходе уменьшается. Уменьшение напряжения на  $p$ - $n$ -

переходе приводит к уменьшению уровня инжекции и к дальнейшему увеличению сопротивления толщи базы. Последнее вызывает новое перераспределение напряжения и т. д.

Таким образом, эффект магнитосопротивления за счет изменения уровня инжекции усиливается в сотни раз. *Магниточувствительность диодов с длиной базой во много раз превышает чувствительность магниторезисторов.*

*Существенным недостатком магнитодиодов является сильная зависимость электрических параметров от температуры, которая определяется температурной зависимостью подвижности носителей и увеличением концентрации основных носителей за счет их генерации с ростом температуры.*

В табл. 3.3 приведены параметры выпускаемых промышленностью магнитодиодов типа КД301 и КД303.

Таблица 3.3

Электрические параметры магнитодиодов

Тип	Прямое напряжение при $I = 3$ мА	Магнитная чувствительность, В/Тл, при $T = 25$ °С, $I = 1$ мА	Магнитная чувствительность, В/Тл, при $T = 25$ °С, $I = 3$ мА
КД301А	6.0–7.5	5	15
КД301В	9.2–10.5	10	30
КД301Д	12.2–13.5	15	45
КД301Ж	15.2–20.0	20	60
КД303А	4.0–5.0	—	10
КД303В	6.1–7.0	—	25
КД303Д	9.1–11.0	—	35
КД303	13.1–15.0	—	45

Магнитодиоды типа КД303 в отличие от КД301 имеют вольт-амперную характеристику, зависящую не только от значений прямого тока и магнитной индукции, но и от ее направления (рис. 3.7).

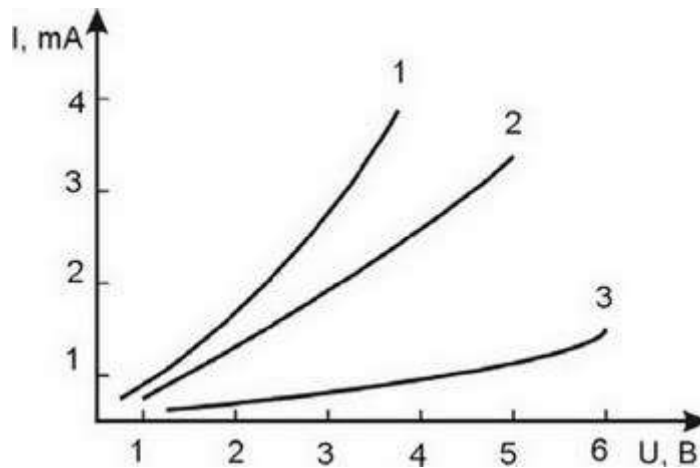


Рис. 3.7. ВАХ магнитодиода КД303 при разных значениях и направлениях магнитной индукции  $B$ :

$$1 - B = 0 \text{ Тл}; 2 - B = -0.2 \text{ Тл}; 3 - B = 0.2 \text{ Тл}$$

### 3.3.2. Магнитотранзисторы

В наибольшей степени магнитодиодный и магниторезистивный эффекты проявляются в магнитотранзисторах. Инжектированные из эмиттера носители преодолевают базу за счет процесса диффузии и попадают в коллектор. Магнитное поле, направленное перпендикулярно движению неосновных носителей заряда, отклоняет их от первоначального направления на угол  $\theta$ . При этом средний путь, пройденный носителями в базе, возрастает, что приводит к усилению процесса их рекомбинации и к уменьшению коэффициента передачи тока.

Для оценки магниточувствительности можно считать, что возросла эффективная толщина базы. Из рис. 3.8 видно, что  $W = W_0 / \cos \theta$ , где  $\theta$  – угол Холла. Тогда

$$W = \frac{W_0}{1 - 0.5\mu^2 B^2}, \quad (3.23)$$

где  $W_0$  – толщина базы в отсутствие магнитного поля.

Как известно, коэффициент передачи по току  $\alpha$  в схеме с общей базой равен

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{W}{L_p} \right)^2, \quad (3.24)$$

где  $L_p$  – диффузионная длина неосновных носителей.

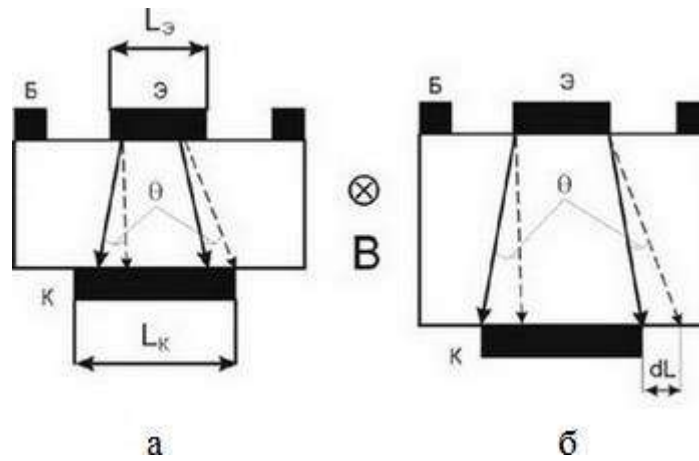


Рис. 3.8. Изменение траектории движения инжектированных носителей в магнитном поле  $p$ - $n$ - $p$ -биполярного транзистора с узкой (а) и широкой (б) базой

В схеме с общим эмиттером коэффициент усиления тока  $\beta$  связан с коэффициентом передачи  $\alpha$  следующим образом:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (3.25)$$

Поскольку значение коэффициента передачи  $\alpha$  близко к единице, то можно записать приближенно  $1 - \alpha = 1/\beta$ :

$$\beta = 2 \left( \frac{L_p}{W_0} \right)^2 (1 - 0.5\mu^2 B^2)^2. \quad (3.26)$$

Поскольку в транзисторах  $W_0 \ll L$ , то магниточувствительность в схеме с общим эмиттером больше, чем в схеме с общей базой.

Одновременно с уменьшением коэффициента передачи по току в поперечном магнитном поле происходит увеличение сопротивления базы транзистора, как и в магнитодиоде. В схеме с общим эмиттером оба эти эффекта изменяют коллекторный ток в одну сторону, поэтому магниточувствительность транзисторов выше, чем у магнитодиодов.

Для увеличения магниточувствительности транзисторов необходимо, чтобы искривление траектории движения носителей приводило не только к увеличению эффективной толщины базы, но и к отклонению части носителей от коллектора.

Для этого используют конструкцию транзистора с удлиненной базой. Магнитное поле искривляет траектории носителей, так что часть носителей, ранее попадавшая в коллектор, отклоняется от него (см. рис. 3.8). Таким образом, в такой структуре магнитное поле приводит к дополнительному по сравнению с обычным транзистором уменьшению коэффициента передачи тока.

Чтобы отклоняемые носители не накапливались в базовой области, необходимо, чтобы вблизи коллектора была высокая скорость поверхностной

рекомбинации. Для создания магнитотранзисторов используют обычно конструкцию биполярного транзистора, в котором увеличена ширина базы, а в область перехода база – коллектор введены центры рекомбинации, обеспечивающие увеличение ее скорости.

### 3.4. Гальваномагниторекомбинационные преобразователи

#### 3.4.1. Гальваномагниторекомбинационный (ГМР) эффект

ГМР-эффект относится к магниторекомбинационным явлениям и заключается в следующем. В полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, под действием силы Лоренца пары носителей отклоняются и скапливаются у одной из поверхностей, тогда как у противоположной поверхности концентрация электронно-дырочных пар уменьшается. Если скорость рекомбинации на одной грани больше, чем на другой, то при отклонении носителей к этой грани наблюдается резкое убывание тока с ростом магнитного поля.

Относительное изменение проводимости вдоль оси  $X$  (рис. 3.9), обусловленное изменением средней по сечению образца концентрации носителей заряда, равно

$$\frac{\Delta\sigma_B}{\sigma_0} = \frac{a_m q \mu_n (1+b)^2 n_0 p_0 L_D^2 E_x B_z \theta}{(n_0 + p_0)(n_0 + b p_0) k T d}, \quad (3.27)$$

$$\theta = \frac{1 - L_{s0}/L_{sd}}{\left(\operatorname{cth} \frac{d}{2L_d} + \frac{L_D}{L_{sd}}\right) \left(\operatorname{cth} \frac{d}{2L_D} + \frac{L_{s0}}{L_{sd}}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{L_{s0}}{L_{sd}}\right) \operatorname{csch}^2 \frac{d}{2L_d}}, \quad (3.28)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$\mu_p, \mu_n$  – подвижности электронов и дырок;

$b = \mu_p/\mu_n$ ;

$n_0, p_0$  – концентрация электронов и дырок в образце при  $B = 0$ ;

$L_D = \sqrt{D\tau}$  – длина биполярной диффузии;

$\tau$  – время жизни носителей;

$E_x$  – напряженность электрического поля вдоль оси  $X$ ;

$B_z$  – магнитная индукция вдоль оси  $Z$ ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура окружающей среды;

$d$  – ширина образца;

$L_{s0}$  и  $L_{sd}$  – длины диффузионных пробегов носителей в направлении соответствующих граней.

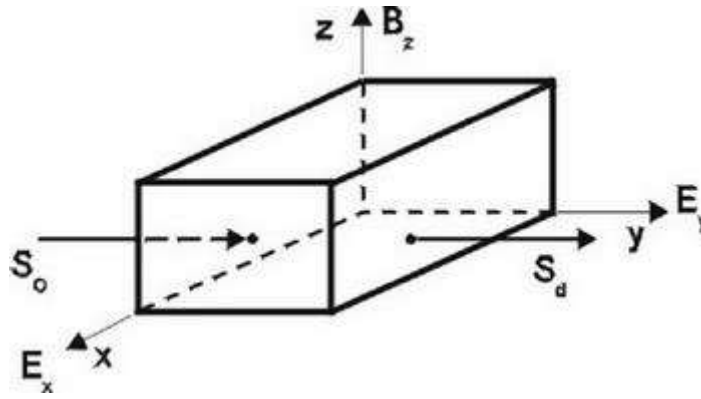


Рис. 3.9. Полупроводниковая пластина с разными скоростями поверхностной рекомбинации на боковых гранях в скрещенных электрическом и магнитном полях

$$L_{s0} = \frac{D}{S_0}, L_{sd} = \frac{D}{S_d}, D = \frac{\mu_n \mu_p (n_0 + p_0)}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0} \cdot \frac{kT}{q}, \quad (3.29)$$

$$a_m = \frac{3}{2} r \left(1 - \frac{\pi}{4}\right), \quad (3.30)$$

где  $S_0$  и  $S_d$  – скорость поверхностной рекомбинации на противоположных гранях образца;

$r$  – зависит от механизма рассеяния, например, при рассеянии на ионизированных примесях  $r = 3/2$ .

Как видно из формул (3.27) и (3.28), *относительное изменение проводимости образца под действием магнитного поля обращается в нуль при равенстве скоростей поверхностной рекомбинации на обеих гранях и достигает максимума при  $S_d/S_0 \rightarrow \infty$* . Чтобы объяснить полученный результат, необходимо вспомнить о самом понятии скорости поверхностной рекомбинации.

Энергетическая структура поверхности любого полупроводника всегда отличается от объемной, что обусловлено наличием в запрещенной зоне определенных разрешенных уровней энергии, связанных с обрывом кристаллических связей на поверхности (уровни Тамма), наличием на ней дефектов и дислокаций, адсорбированных атомов и молекул. Вся совокупность этих энергетических уровней называется *поверхностными состояниями*. Концентрация поверхностных состояний, связанная с уровнями Тамма, обусловлена кристаллической структурой полупроводника и для данного материала является постоянной.

*Концентрация же остальных поверхностных состояний определяется качеством обработки поверхности, ее защитой и составом окружающей среды (величина переменная), т. е. технологическими особенностями производства и условиями эксплуатации датчика*. В зависимости от своего расположения в запрещенной зоне полупроводника относительно уровня



Ферми энергетические уровни поверхностных состояний могут служить ловушками захвата или центрами рекомбинации.

Центрами рекомбинации служат поверхностные состояния, энергетические уровни которых расположены вблизи середины запрещенной зоны под уровнем Ферми, а следовательно, заполнены электронами. Тогда при захвате на них дырки из валентной зоны происходит акт рекомбинации. Скорость поверхностной рекомбинации определяется как

$$S = \frac{c_S}{\Delta n_S}, \quad (3.31)$$

где  $c_S$  – число электронно-дырочных пар, исчезающих каждую секунду на единице площади поверхности [ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ], или величина, характеризующая поверхность (число поверхностных состояний);

$\Delta n_S$  – концентрация избыточных носителей вблизи поверхности [ $\text{см}^{-3}$ ].

Таким образом, скорость поверхностной рекомбинации имеет размерность скорости [ $\text{см}/\text{с}$ ] и определяется концентрациями центров рекомбинации на поверхности и носителей заряда, подходящих к ней.

Рассмотрим теперь плоский образец полупроводника, вдоль которого протекает ток, причем образец однородный и, следовательно, линии тока параллельны его граням и концентрация носителей одинакова во всем объеме, если не учитывать влияние поверхностей. Однако на поверхности происходит рекомбинация электронно-дырочных пар, а следовательно, вблизи нее этих пар будет не хватать, т. е. создается градиент концентрации от поверхности к центру образца. Если скорости поверхностной рекомбинации на обеих гранях образца одинаковые, то градиенты концентрации от одной и от другой грани образца будут одинаково искривлять траектории движения носителей. Если теперь приложить к образцу магнитное поле, то за счет силы Лоренца концентрация носителей у одной из граней увеличивается, а у другой – уменьшается, за счет чего на первой скорость поверхностной рекомбинации возрастает, а на второй уменьшается. Однако общее число рекомбинирующих пар не изменится и проводимость образца может измениться только за счет искривления траектории движения носителей, что является обычным магниторезистивным эффектом. Но если скорость поверхностной рекомбинации на одной грани образца существенно больше, чем на другой, то помещение образца в магнитное поле приведет к существенному росту на этой грани поверхностной рекомбинации, а это значит, что под действием магнитного поля концентрация носителей в образце будет уменьшаться, что приведет к уменьшению проводимости. Это явление носит название гальваномагниторекомбинационного эффекта.

При выполнении условия  $S_d \gg S_0$  в режиме постоянного тока и в слабых магнитных полях падение напряжения на гальваномагниторекомбинационном элементе (ГМРЭ) можно представить в виде

$$\Delta U = J_0 R_0 \frac{\Delta \sigma_B}{\sigma_0} = \alpha_B E^2 B l, \quad (3.32)$$

где  $J_0$ ,  $R_0$  – ток через образец и его сопротивление при  $B = 0$ ;

$\alpha_B$  – константа, определяемая физическими параметрами полупроводника;

$E$  – напряженность электрического поля;

$B$  – магнитная индукция;

$l$  – длина ГМРЭ.

$$\alpha_B = \frac{a_m q \mu_n (1 + b)^2 n_0 p_0 L_D^2 \left( ch \frac{d}{L_D} - 1 \right)}{k T d (n_0 + p_0) (n_0 + b p_0) ch \frac{d}{L_D}}. \quad (3.33)$$

Величина  $\alpha_B$  при заданных  $L_D$ ,  $\mu$ ,  $b$  и  $T$  достигает максимума при  $d = 1.4 L_D$  и  $n_0 = p_0$  и принимает вид

$$\alpha_{B\max} = 0.2 \frac{q \mu_n (1 + b) L_D}{k T}. \quad (3.34)$$

Следует отметить, что введение понятия скорости поверхностной рекомбинации возможно при условии отсутствия объемного заряда у боковой поверхности полупроводника, т. е. только в том случае, когда основным препятствием для рекомбинации являются переходы электронов и дырок на рекомбинационные уровни поверхностных состояний. Но при большой ширине приповерхностного объемного слоя и особенно большой высоте барьеров основным препятствием для рекомбинации может стать именно слой поверхностного заряда, который не позволяет носителям достичь центров рекомбинации. Наличие обедненного слоя у поверхности зависит от параметров полупроводника (ширина запрещенной зоны) и состояния поверхности. Известно, что поверхность кремния окисляется на воздухе при комнатной температуре, а наличие слоя окисла у поверхности приводит к изгибу энергетических зон и появлению слоя объемного заряда. *Германий же практически не окисляется на воздухе, обладает меньшей шириной запрещенной зоны, и, следовательно, слой объемного заряда у поверхности германия оказывается меньшей ширины и обладает меньшей высотой барьера, чем у поверхности кремния.*

Максимальное значение отношения  $\Delta \sigma_B / \sigma_0$  в настоящее время достигнуто на германиевых ГМР-элементах (0.1 при  $B \cong 0.25$  Тл). Достичь такой высокой чувствительности на кремниевых образцах можно только в области высоких температур ( $T > 450$  К), при которых наступает собственная проводимость, т. е. выполняется условие  $n_0 = p_0$ . Поэтому германиевые структуры в реальности более востребованы.

### 3.4.2. Гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМРП)

ГМРП представляет собой резистор, управляемый магнитным полем, принцип действия которого основан на магниторекомбинационном эффекте. Схема включения ГМРП приведена на рис. 3.10.

Номинал нагрузочного резистора  $R_H$  определяет режим работы преобразователя. Если сопротивление  $R_H$  на порядок превышает сопротивление  $R_r$ , то последний работает в режиме питания от источника тока ( $I = \text{const}$ ).

При этом схема обеспечивает режим максимальной чувствительности ГМРП.

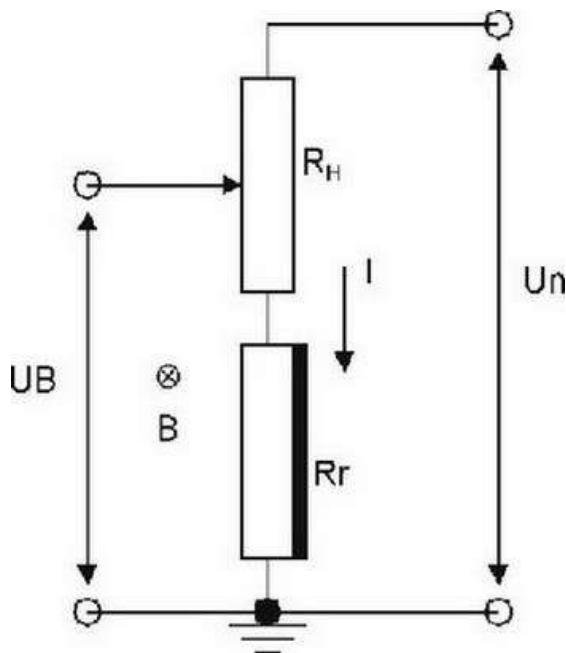


Рис. 3.10. Схема включения ГМРП

### 3.4.3. Кремниевые интегральные ГМРП

Наличие в монокристаллическом кремнии на границе с пленкой поликремния дефектов упаковки на расстоянии, равном примерно толщине пленки, создает условие, при котором величина ГМР-эффекта может оказаться достаточной для его наблюдения в области рабочих температур ИС. Так, при толщине пленки 6 мкм ширина объемного приповерхностного слоя при удельном сопротивлении пленки  $0.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  меньше 1 мкм, и в слое монокремния на границе с пленкой ПК создается боковая поверхность с повышенной скоростью рекомбинации вне слоя объемного заряда. При этом более низкое значение чувствительности для кремниевых образцов, по сравнению с германиевыми, может быть скомпенсировано с помощью схемы усиления сигнала, которую, благодаря эпитаксиально-планарной технологии изготовления, можно расположить на едином кристалле с ГМРП.

Существует ГМР-элемент на основе кремниевой эпитаксиальной пленки  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и толщиной 5 мкм,

выращенной на подложке КДБ-10. Роль боковой поверхности с повышенной скоростью рекомбинации играет пленка поликремния, выращенная в едином технологическом процессе с монокристаллической, а противоположная боковая поверхность элемента формируется с помощью диффузии атомов бора на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис. 3.11).

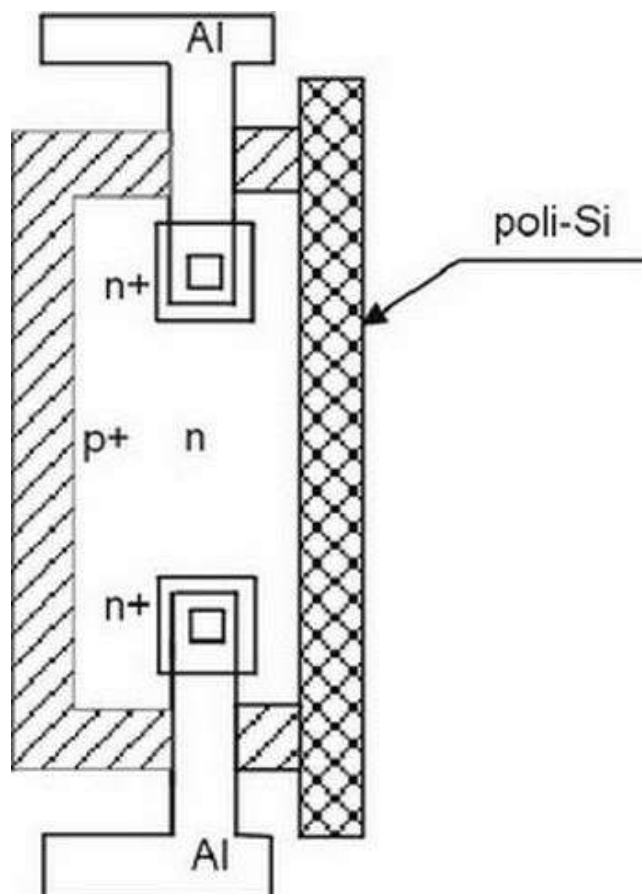


Рис. 3.11. Топология ГМР-элемента

Для пленки с концентрацией электронов  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижностью носителей  $10^3 \text{ см}^2/\text{с}$  и временем жизни носителей, равным  $0.1 \text{ мкс}$ , длина диффузионного пробега, вычисленная из соотношений  $L_D = \sqrt{D\tau}$ ,  $D = \frac{kT}{q}\mu$ , оказывается равной  $15 \text{ мкм}$ .

Для получения максимальной чувствительности ширина образцов выбиралась равной  $1.4L_D$ , т. е.  $22 \text{ мкм}$ .

Чувствительность ГМР-элемента для Si собственной проводимости из-за более низкой подвижности носителей на порядок меньше, чем в германии. Для легированных кремниевых пленок n-типа проводимости чувствительность ниже на много порядков, в частности, для пленок с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , применяемых для изготовления линейных ИС, чувствительность составляет  $45 \text{ нВ/Т}$ . Применение же описанной конструкции интегрального ГМР-элемента, изготовленного на одновременно выращенных пленках моно- и поликристаллического кремния, позволяет получить чувствительность в

пределах 0.15–0.3 мВ/мТ, что почти на 7 порядков выше расчетных значений для данной концентрации.

Истощение рабочей области ГМРП свободными носителями заряда происходит вследствие расширения объемного пространственного заряда обратносмещенного  $p$ - $n$ -перехода, созданного с помощью разделительной диффузии атомов бора. Действительно, при напряжении 30 В в пленке с концентрацией легирующей примеси  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  обедненный слой  $p$ - $n$ -перехода расширяется в область монокремния примерно на 14 мкм. Если учесть боковой уход границы  $p$ - $n$ -перехода при проведении разделительной диффузии на расстояние  $0.8h_{\text{эп}}$  (4.8 мкм) и наличие с противоположной стороны у границы поликремниевых областей с высокой концентрацией дефектов с шириной, равной толщине пленки (6 мкм), то рабочая область ГМРП практически оказывается полностью перекрытой объемно-пространственным зарядом и обладает собственной проводимостью.

Еще большее повышение чувствительности, а также температурной стабильности достигается применением дифференциального ГМРП, представляющего собой два одинаковых элемента, отделенных друг от друга пленкой поликристаллического кремния (рис. 3.12).

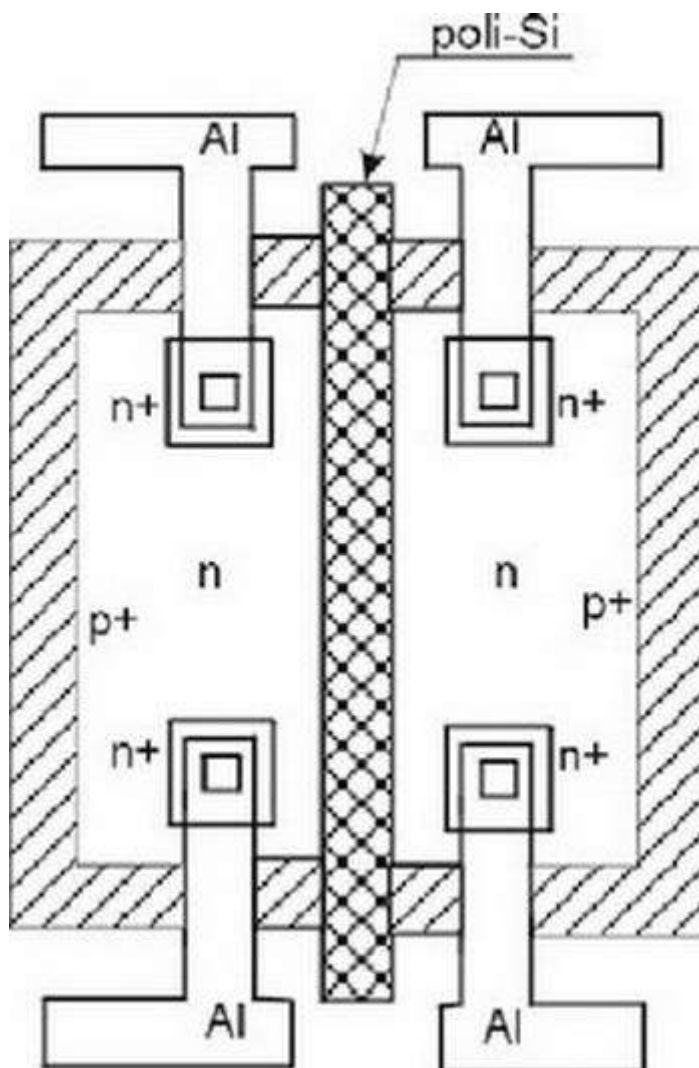


Рис. 3.12. Топология дифференциального ГМРП

При воздействии магнитного поля носители тока в одном из элементов отклоняются к границе раздела с пленкой поликремния, а в другом – от этой границы к противоположной грани, представляющей собой обратносмещенный  $p$ - $n$ -переход. Сопротивление первого элемента при этом повышается, а второго – понижается, вследствие чего дифференциальное выходное напряжение возрастает в 2 раза.

Поскольку оба элемента обладают одинаковыми температурными коэффициентами сопротивления, при изменении температуры их сопротивления будут изменяться на одинаковую величину (компенсация температурной погрешности) и, следовательно, выходное напряжение будет температурно-независимым. Температурный коэффициент сопротивления дифференциального ГМРП в диапазоне температур от комнатной до 120 °С не превышает 0.12 %/град.

### 3.5. Магниточувствительные интегральные схемы

#### 3.5.1. Магнитокоммутируемые ИС на основе эффекта Холла

В настоящее время разработаны магниточувствительные ИС как с цифровым, так и с линейным выходами, изготавливаемые по гибридно-пленочной, биполярной и МОП-технологии.

Типичная магниточувствительная коммутирующая микросхема (МКМ) состоит из датчика Холла (ДХ), дифференциального усилителя (ДУ), порогового устройства и выходного логического каскада. Рассмотрим принцип действия электрической схемы МКМ (рис. 3.13).

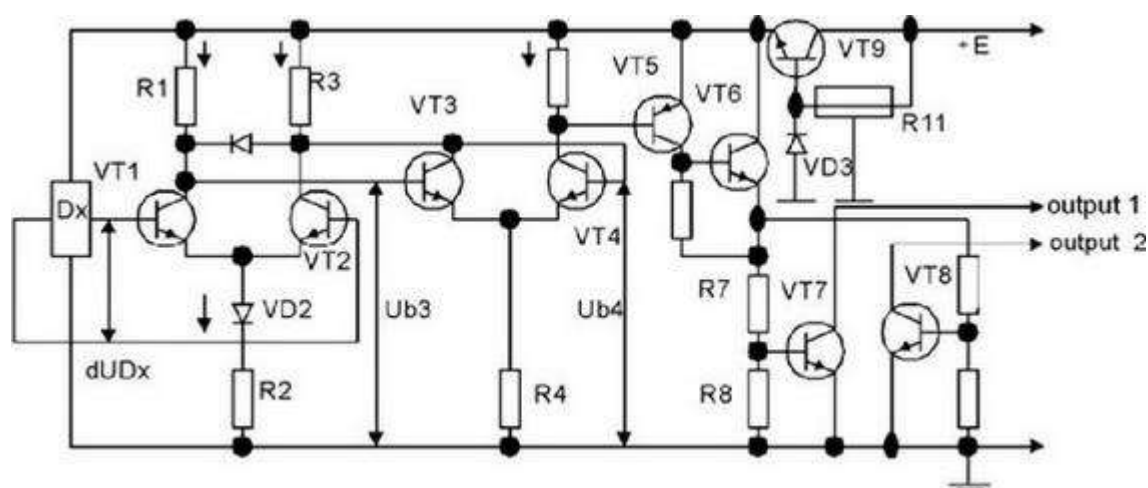


Рис. 3.13. Принципиальная схема твердотельной МКМ на эффекте Холла

В качестве усилителя использован дифференциальный каскад на  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторах  $T1$ ,  $T2$  с резистивной нагрузкой  $R1$ ,  $R3$  и токозадающим резистором  $R2$ . К коллекторам транзисторов ДУ подключена бистабильная схема, выполненная на  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторах  $T3$ ,  $T4$  с эмиттерной связью.

Резистор  $R3$  является одновременно коллекторной нагрузкой транзистора  $T3$  и правого плеча ДУ. Нагрузкой транзистора  $T4$  служит прямосмещенный переход база – эмиттер транзистора  $T5$ , с коллектора которого снимается инвертированный выходной токовый сигнал. Выходной сигнал далее усиливается эмиттерным повторителем на  $n-p-n$ -транзисторе  $T6$  и через два резистивных делителя, ограничивающих эмиттерный ток, поступает на базы выходных транзисторов  $T7, T8$  с открытыми коллекторами.

Для повышения стабильности параметров МКМ и расширения диапазона питающего напряжения в нее включен внутренний стабилизатор напряжения на транзисторе  $T9$ , стабилитроне  $D3$  и токозадающем резисторе  $R11$ . Стабилизатор обеспечивает внутреннее питание схемы напряжением 5 В, независимо от приложенного с внешнего источника напряжения в диапазоне 9 – 30 В.

Основные технические характеристики МКМ К1116КПЗ следующие:

- 1) магнитная индукция срабатывания: 200 Гс;
- 2) магнитная индукция включения: 350 Гс;
- 3) гистерезис переключения: 50 Гс;
- 4) потребляемый ток: 6 мА;
- 5) температурный диапазон работы:  $-40 \dots + 125$  °С.

*Использование гибридно-пленочной технологии изготовления позволяет вместо обычно применяемого ДУ ввести операционный усилитель с высоким коэффициентом усиления, что повышает магнитную чувствительность и температурную стабильность, а также дает возможность с помощью внешних подстроечных резисторов регулировать величину гистерезиса и магнитной индукции переключения.* На рис. 3.14 приведена принципиальная схема МКМ в гибридно-пленочном исполнении.

Питание датчика Холла осуществляется через два равных по величине токоограничивающих резистора  $R1$  и  $R2$ , между которыми включен датчик Холла. Такое включение обеспечивает подачу синфазного напряжения на вход операционного усилителя (ОУ) 740УД4, равного половине напряжения питания, что обеспечивает нормальную работу выходного каскада усилителя при одностороннем питании. Кроме того, применение токоограничивающих резисторов позволяет снизить дрейф параметров схемы при изменении входного сопротивления датчика с температурой.

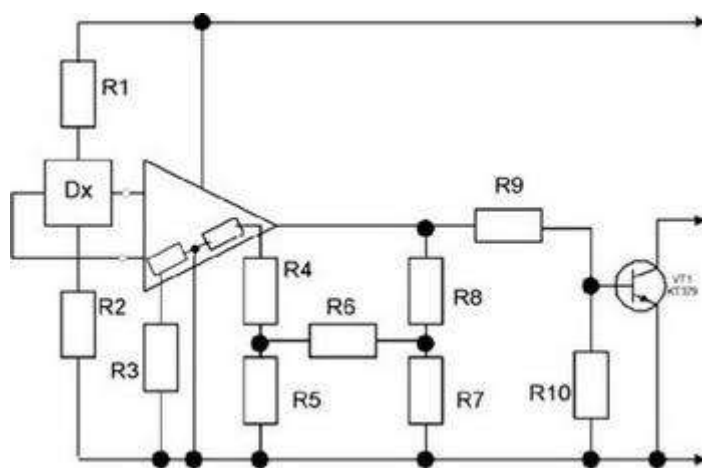


Рис. 3.14. Принципиальная схема гибридно-пленочной МКМ

Положительная обратная связь на резисторах  $R5-R7$  введена для получения гистерезиса переключения, повышающего помехоустойчивость схемы. Глубина положительной обратной связи регулируется лазерной подгонкой резистора  $R6$ , а начальное смещение выбирается подгонкой резистора  $R3$ . В качестве материала пленочных резисторов применяется сплав РС-3710

с  $ТКС = 10^{-4} \text{ град}^{-1}$  и поверхностным сопротивлением  $1 \text{ кОм/кВ}$ . Поскольку ТКС используемых резисторов меньше, чем ТКС кремниевой пленки, на которой сформирован ДХ, включенный последовательно с ними, то степень влияния последнего на общее температурное изменение сопротивления цепи значительно снижается.

Выходом схемы является открытый коллектор бескорпусного транзистора КТ-379, который работает в ключевом режиме и обеспечивает согласование схемы со стандартными логическими схемами. Напряжение питания гибридной МКМ – 27 В, потребляемый ток – 6 мА, а магнитная индукция переключения лежит в диапазоне 100–500 Гс.

*Основной проблемой магниточувствительных ИС с датчиком Холла является температурный и временной дрейфы остаточного напряжения датчика, связанные с перераспределением упругих механических напряжений в объеме кристалла датчика, возникающих при изменениях температуры и протекании тока. Для уменьшения дрейфов применяется ортогональное соединение холловских элементов, которое обеспечивает снижение влияния механических напряжений на остаточное напряжение датчиков.*

Помимо этого, для уменьшения влияния дрейфа положительных ионов на границе  $\text{Si} - \text{SiO}_2$  на дрейф нулевого смещения проводится ионное легирование рабочей поверхности датчика атомами бора. Тем самым на поверхности создается тонкий слой  $p$ -типа проводимости, отделяющий объем  $n$ -типа проводимости от границы  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ . Указанные меры применены в МКМ серии КП1159, что позволило снизить дрейф остаточного напряжения  $U_0$  до  $0.02 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$ .

В табл. 3.4 приведены параметры некоторых типов МКМ.



Таблица 3.4

Параметры магниточувствительных микросхем

Тип МИС	$B_{\text{ср}}$ , мТл, min/max	Гистерезис, мТл	$I_{\text{пит}}$ , мА	Диапазон температур, °С
K1116КПЗ, СССР	20/35	5	6	–40 ... + 125
1AV2A HONEYWELL, США	40/45	10	13	–40 ... + 150
SAS 221S4, «SIEMENS», ФРГ	25/40	5	7	–40 ... + 125
TL172 TEXAS INSTRUMENT, США	60/10	40	–	–40 ... + 125
DGN 3203 «SPRAQUE», США	35/10	20	–	–40 ... + 125
S6SS2 MICROSWITCH, США	62/12	40	–	–40 ... + 150
МКМ 1159КП1	5/15	2	6	–60 ... + 125

Существенным недостатком биполярных магниточувствительных ИС является большой ток потребления (6 мА), что особенно критично при их использовании в устройствах с автономными источниками питания.

Для уменьшения потребляемого тока используется КМОП-технология, которая позволяет также получить более высокую чувствительность и низкий уровень собственных шумов. Пороговая магниточувствительная ИС, изготовленная по КМОП-технологии, так же как и биполярная, содержит магниточувствительный элемент, схемы усиления и обработки сигналов, расположенные на едином кристалле. При напряжении питания 3 В ток потребления ИМС менее 0.5 мА, а индукция переключения находится в диапазоне 100 – 300 Гс.

Чувствительным элементом является элемент Холла, выполненный на основе тонкого инверсионного слоя  $n$ -канала МОП-транзистора. Помимо обычных областей стока, истока и затвора холловский транзистор содержит две дополнительные области холловских контактов, формируемых одновременно со стоком и истоком. Геометрические размеры транзистора близки к оптимальным. Напряжение Холла, возникающее при воздействии магнитного поля, передается непосредственно с холловских контактов на затворы двух усилительных транзисторов, управляя протекающими в них токами.

## 4. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

### 4.1. Общие понятия о давлении

В общем виде все материалы можно разделить на твердые тела и жидкие среды. Под термином *жидкая среда* здесь понимается все, что способно течь. Это могут быть как жидкости, так и газы, поскольку между ними не существует серьезных различий. При изменении давления жидкости превращаются в газы и наоборот. К жидким средам невозможно приложить давление ни в каком другом направлении, кроме перпендикулярного поверхности. При любом угле, кроме  $90^\circ$ , жидкость будет просто соскальзывать или стекать. Для жидкой среды в стационарных условиях давление можно выразить через отношение силы  $F$ , действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности  $A$ :

$$p = \frac{dF}{dA}. \quad (4.1)$$

Давление имеет механическую природу, и поэтому для его описания можно использовать основные физические величины: массу, длину и время. Хорошо известен факт, что давление сильно меняется вдоль вертикальной оси, тогда как на одинаковой высоте оно постоянно во всех направлениях. При увеличении высоты давление падает, что можно выразить следующим соотношением:

$$dp = -w dh, \quad (4.2)$$

где  $dp$  – изменение давления, соответствующее  $dh$ ;

$w$  – удельный вес среды;

$dh$  – изменение высоты.

Давление жидкой среды в замкнутом объеме не зависит от формы сосуда, поэтому при разработке датчиков давления такие параметры, как форма и размеры, часто бывают не очень существенными. Если на одну из сторон сосуда с жидкостью или газом действует внешнее давление, оно передается по всему объему без уменьшения его значения.

Кинетическая теория газов утверждает, что давление является мерой полной кинетической энергии молекул:

$$p = \frac{2}{3} \frac{KE}{V} = \frac{1}{3} \rho C^2 = NRT, \quad (4.3)$$

где  $KE$  – кинетическая энергия;

$V$  – объем;

$\rho$  – плотность;

$C^2$  – среднее значение квадрата скоростей молекул;

$N$  – число молекул в единице объема;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура.

В уравнении (4.3) предполагается, что давление и плотность газов связаны линейной зависимостью, т. е. увеличение давления приводит к пропорциональному росту плотности. В отличие от газов плотность жидкостей мало меняется в широком диапазоне давлений и температур. Избыточное давление – это давление газа, превышающее давление окружающей среды. В противоположном случае – речь идет о вакууме. Давление называется относительным, когда его измеряют относительно окружающей среды, и абсолютным, когда оно измеряется по отношению к нулевому давлению. Давление среды может быть стационарным, когда жидкая среда находится в покое, или динамическим, когда оно относится к жидкостям в движении.

В системе СИ единицей измерения давления является *паскаль*:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ . Это значит, что давление 1 Па равно силе, равномерно распределенной по поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ . Иногда в качестве технической единицы измерения давления применяется единица, называемая *атмосфера*, обозначаемая 1 атм. Одна атмосфера это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 м на площадь  $1 \text{ см}^2$  при температуре  $+4^\circ\text{C}$  и нормальном гравитационном ускорении.

Для грубых оценок можно запомнить еще одно соотношение: 0.1 мм  $\text{H}_2\text{O}$  создаст давление, приблизительно равное 1 Па. В промышленности применяется другая единица давления, называемая *торр* (это название дано в честь физика Торричелли), которая определяется как давление, создаваемое столбиком ртути высотой 1 мм при  $0^\circ\text{C}$ , нормальном атмосферном давлении и нормальной гравитации. Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется *технической атмосферой*:

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ торр} = 101.325 \text{ Па}$$

## 4.2. Тензорезистивный эффект в полупроводниках

Работа полупроводниковых датчиков давления основана в основном на использовании тензоэффекта, который у полупроводников значительно выше, чем у металлов.

Полупроводниковые кристаллы обладают преимущественно кубической симметрией, расстояния между атомами в кристаллах обусловлены минимумом энергии взаимодействия между соседними атомами. Любое приложенное извне механическое воздействие, достаточное для изменения расстояния между ближайшими соседними атомами в кристаллической решетке, приводит к изменению энергии взаимодействия между ними, а следовательно, и к существенному изменению энергетической зонной структуры полупроводника. *Изменение энергетической структуры неизбежно приводит к изменению концентрации свободных носителей заряда или их подвижности (главные факторы, определяющие величину электропроводности), в связи с чем*

*тензочувствительность полупроводников на порядок превосходит тензочувствительность металлов.*

*Тензорезистивным эффектом называется изменение электрического сопротивления полупроводника в результате действия механической нагрузки, создающей деформацию.*

Если ток направлен вдоль оси, по которой направлено растяжение (или сжатие), мы имеем продольный эффект, если ток направлен под углом  $90^\circ$  к оси, вдоль которой приложена внешняя нагрузка, то мы имеем поперечный эффект. Наиболее эффективен продольный эффект.

Численное значение продольного коэффициента пьезосопротивления зависит от направления оси образца относительно осей кристалла.

Значительно большее тензосопротивление наблюдается при одностороннем сжатии или растяжении.

Физической причиной тензосопротивления является изменение энергетической структуры полупроводника. Изменение ширины запрещенной зоны приводит к изменению концентрации носителей заряда и тем самым к изменению сопротивления.

В веществах, имеющих сложную структуру зон подобно *n*-кремнию, деформация кристалла, вызванная односторонним сжатием или растяжением, приводит к большому изменению сопротивления, которое не может быть объяснено только изменением общей концентрации носителей заряда. Основное объяснение состоит в том, что в результате анизотропной деформации экстремумы энергии структуры становятся неэквивалентными, происходит перераспределение электронов по экстремумам. Минимумы энергий, дно которых опустится, дадут больший вклад в проводимость, чем минимумы энергий, дно которых поднимется.

### **4.3. Первичные тензопреобразователи**

Полупроводниковые приборы, работа которых основана на тензоэффекте, можно назвать первичными тензопреобразователями. Самым простым первичным тензопреобразователем является полупроводниковый тензорезистор. Он может быть выполнен в виде дискретного стержня или пленки на соответствующей мембране из полупроводника с омическими контактами на концах. Номинал сопротивления тензорезистора задается технологически, путем соответствующего уровня легирования полупроводника. Как правило, размеры тензорезистора не превышают по длине и ширине нескольких миллиметров, а по толщине – десятков микрон. Тензорезистор из стержня крепят на опорной основе. Главным требованием такого варианта является отсутствие пластической деформации в месте крепления. Контакт опорная балка – тензорезистор должен быть максимально упругим и жестким (рис. 4.1).

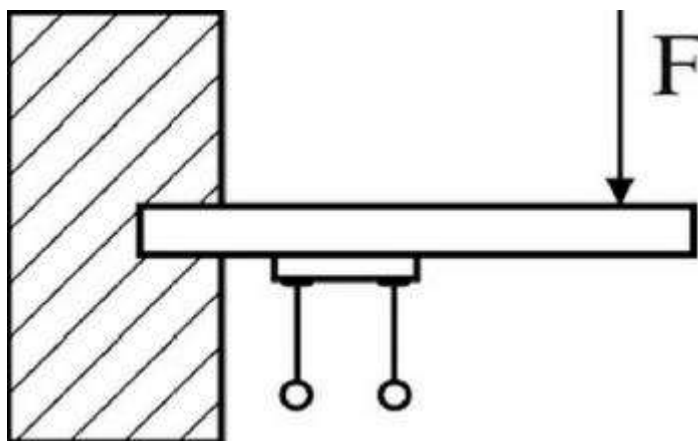


Рис. 4.1. Схема размещения тензорезистора

Деформация создается силой  $F$ , действующей на свободный конец стержня.

Для оценки изменения сопротивления тензорезистора при деформации пользуются коэффициентом тензочувствительности по сопротивлению  $m$ :

$$m = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta \rho}{\rho} / \frac{\Delta l}{l}. \quad (4.4)$$

Он представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении ( $l$  – размер полупроводника в направлении деформации).

*Для уменьшения влияния температуры на величину сопротивления тензорезисторы обычно изготавливаются из примесных полупроводников, в которых концентрация основных носителей равна концентрации примесей и не зависит от деформации. Поэтому изменение сопротивления при деформации определяется только изменением подвижности.*

Коэффициент тензочувствительности для германия и кремния имеет наибольшее значение порядка 140 ... 175. Большой тензочувствительностью обладают также полупроводниковые соединения GaSb, InSb, PbTe и др.

Для компенсации зависимости сопротивления от температуры часто в плече измерительного моста используются два тензорезистора с одинаковым температурным коэффициентом. Тензопреобразователем является только один резистор, а второй служит для компенсации температурного изменения величины сопротивления первого.

Как правило, тензорезистор используется в качестве одного из резисторов в мосте Уинстона. При этом на выходе моста получают зависимость выходного напряжения от величины прикладываемой силы или давления.

Тензорезистор является пассивным полупроводниковым прибором или пассивным тензоэлементом. Более современным является использование в качестве первичных тензопреобразователей активных полупроводниковых диодов на основе различных переходов и барьеров Шоттки, полевых и биполярных транзисторов.

*Тензодиоды.* Так как от деформации зависит только подвижность носителей заряда и ширина запрещенной зоны, то для получения максимальной тензочувствительности необходимо, чтобы при увеличении ширины запрещенной зоны величина подвижности уменьшалась и наоборот. Такое согласование нельзя получить в  $p$ - $n$ -переходах. Например, в кремнии величина ширины запрещенной зоны при сжатии уменьшается, подвижность электронов увеличивается, а дырок уменьшается. Следовательно, в качестве базы диода необходимо выбирать полупроводник, в котором неосновные носители – электроны, т. е. полупроводник  $p$ -типа, а значит, переход  $n$ - $p$ -типа (рис. 4.2).

Вследствие большей зависимости тока от подвижности тензочувствительность диода с короткой базой выше, чем с длинной.

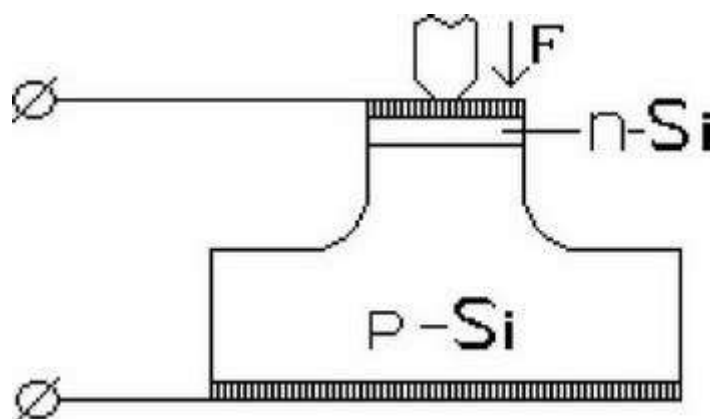


Рис. 4.2. Структурная схема тензодиода

Для структуры тензодиодов существенное значение имеет ориентация плоскости  $p$ - $n$ -перехода. Например, в структуре при использовании германия максимальная тензочувствительность может быть получена, если плоскость  $p$ - $n$ -перехода совпадает с плоскостью  $[111]$ , так как изменения ширины запрещенной зоны и при небольших деформациях максимальны в направлении  $[111]$ . Однако недостатком такого датчика является то, что при сжатии ток через  $p$ - $n$ -переход при малых давлениях уменьшается, а при больших – увеличивается. При ориентации же  $p$ - $n$ -перехода в плоскости  $[100]$  чувствительность меньше, но ток непрерывно уменьшается с ростом давления. Тензодиод можно включать и при прямом, и при обратном смещении, так как в обоих случаях ток пропорционален току насыщения.

*Преимуществом тензодиодов перед тензорезисторами является их более высокая чувствительность, а также возможность измерения деформаций при всестороннем сжатии.*

*Биполярные транзисторы.* Влияние деформации на характеристики биполярного транзистора можно получить при воздействии деформации на эмиттерный или коллекторный  $p$ - $n$ -переходы, что влияет на коэффициент передачи по току. Чувствительный к давлению транзистор получил название «питран». В «питране» слой эмиттер – база механически связан с воспринимающей давление мембраной.

Деформация тензотранзисторов осуществляется такими же методами, что и  $p$ - $n$ -переходов. Так как максимальная тензочувствительность достигается при точечной деформации, то деформируемый  $p$ - $n$ -переход можно сделать состоящим из множества выступов. Аналогичного результата можно добиться, если деформируемую поверхность  $p$ - $n$ -перехода сделать неровной за счет плазмохимического профилирования поверхности (типа гофра).

В специально сконструированном тензотранзисторе оптимальным выбором параметров всегда можно получить большее значение тензочувствительности, чем у  $p$ - $n$ -переходов.

*Полевые транзисторы с  $p$ - $n$ -переходом.* При деформации канала полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом происходит изменение подвижности носителей заряда и соответствующее изменение величины сопротивления канала  $R_k$ .

В режиме постоянного напряжения на затворе  $U_3$  и стоке  $U_{ст}$  изменение сопротивления канала ничем не отличается от аналогичного изменения сопротивления обычного тензорезистора, поэтому значение будет таким же.

В режиме постоянных  $I_{ст}$  и  $U_3$ , например  $U_3 = 0$  (затвор замкнут с истоком), обратное напряжение на  $p$ - $n$ -переходе равно  $U_{pn} = U_{ст} = I_{ст}R_k$ . Если при деформации  $R_k$  увеличивается, это приводит к росту  $U_{pn}$ . Из-за увеличения  $U_{pn}$  происходит сужение канала и дополнительное увеличение  $R_k$ . В данном случае величина  $U_{ст}$  увеличивается на большую величину, чем при изменении  $R_k$  только за счет изменения, т. е. тензочувствительность увеличивается. *Тензочувствительность полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом не выше, чем у биполярного.*

*МДП-транзисторы.* Влияние деформации на характеристики МДП-транзистора, работающего в режиме постоянных напряжений стока и затвора или постоянных напряжений затвора и тока стока, аналогично отмеченному выше, если не учитывать изменения свойств диэлектрика и заряда на поверхностных состояниях. Использование последних двух эффектов позволяет значительно увеличить тензочувствительность МДП-транзисторов.

Выходной характеристикой полевого МДП-транзистора может быть зависимость тока стока от приложенной нагрузки.

*Несмотря на очевидные преимущества активных тензоэлементов, наибольшее применение нашли тензопреобразователи на основе тензорезисторов прежде всего за счет простой технологии изготовления и соответственно дешевизны приборов.*

#### **4.4. Классификация интегральных тензопреобразователей давления**

##### **4.4.1. Пути интеграции тензопреобразователей**

В интегральных тензопреобразователях давления в качестве чувствительного элемента чаще всего используется диффузионный резистор.

На рис. 4.3 схематично показано устройство классического тензорезистивного преобразователя давления.

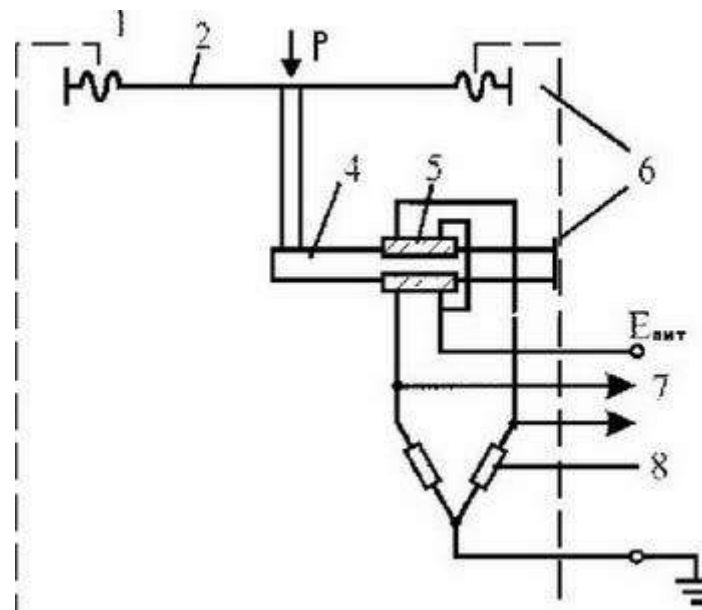


Рис. 4.3. Структурная схема тензорезистивного преобразователя давления на мембране:

1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – шток; 4 – балка; 5 – тензорезистор; 6 – крепление мембраны и балки; 7 – выход; 8 – постоянный или подстраиваемый резистор

Роль элемента, воспринимающего давление, выполняет мембрана, которая, деформируясь, передает воздействие через шток (передающий элемент) на балку (упругий элемент). Деформация упругого элемента вызывает появление механических напряжений в тензорезисторах, включенных в схему вторичного преобразователя, где могут использоваться усилители и преобразователи сигнала, а также подстроечные элементы.

Развитие тензопреобразователей происходило в несколько этапов так, что на каждом очередном этапе интегрировались отдельные физико-конструктивные элементы преобразователя, представленные структурной схемой на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Структурная схема интеграции элементов тензорезистивного преобразователя давления



На первом этапе интеграция сводилась к объединению воспринимающего, передающего и упругого элементов. Преобразователь давления, соответствующий этапу I, показан на рис. 4.5, а.

Тензорезисторы прикреплены непосредственно к мембране, одновременно выполняющей функции воспринимающего и упругого элементов. Устройство такого типа отличается простотой конструкции.

Отсутствие таких деталей, как передающие рычаги, крепления, увеличивает надежность преобразователя и снижает его стоимость. Однако данный тип преобразователя имеет пониженную точность и заметную температурную зависимость выходного сигнала, обусловленные разбросом параметров тензорезисторов и дополнительной нагрузкой, которую дает мембране чувствительный элемент. Такая конструкция пригодна только для измерения сравнительно высоких давлений начиная с долей мегапаскаля.

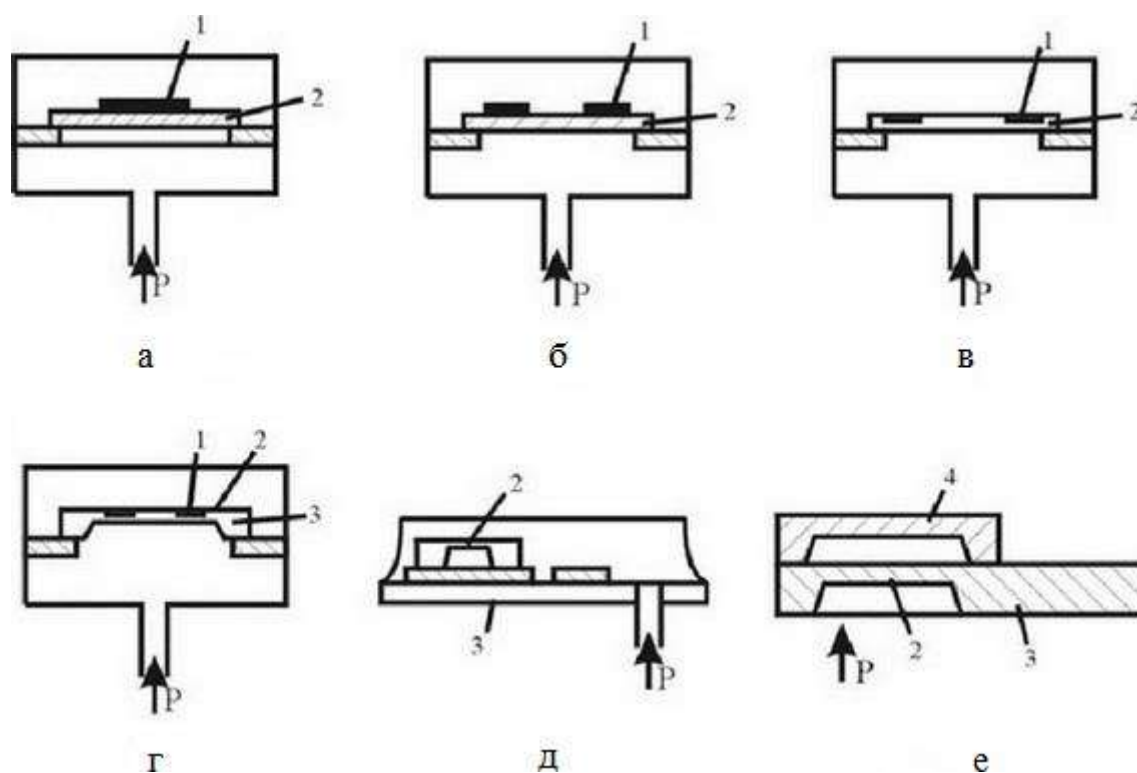


Рис. 4.5. Конструкции датчиков давления на различных этапах интеграции:

1 – тензорезистор; 2 – мембрана; 3 – основание; 4 – крышка

Этап II соответствует интеграции преобразующего элемента (тензорезистора) с мембраной. С появлением технологии пленочных микросхем стало возможным создание преобразователей, в которых на мембране напылены пленочные тензоэлементы (рис. 4.5, б). При этом был решен вопрос получения однородной мембраны. Малая масса такого тензоэлемента позволяет снять проблему дополнительной нагрузки мембраны. Такими приборами

можно измерять сравнительно низкие давления. Этот метод дает возможность повысить точность и устойчивость к механическим воздействиям.

Следующим шагом, который соответствует II этапу физико-конструктивной интеграции, было создание полностью однородной тонкой кремниевой мембраны со встроенными в нее диффузионными тензорезисторами (рис. 4.5, в). Этот шаг представляет собой современный уровень технологической интеграции и полностью соответствует специальности «микро- и нанoeлектроника». Он привел к увеличению надежности, чувствительности, точности, к уменьшению габаритов, массы и повышению стабильности при изменении температуры окружающей среды.

*Дальнейшее улучшение характеристик преобразователей сдерживается только технологией изготовления мембраны.*

Этап III физико-конструктивной интеграции соответствует идеологии плазменного селективного травления полупроводниковых материалов и является наиболее перспективным.

В нем создан полностью интегральный чувствительный элемент, представляющий собой тонкую кремниевую мембрану с изготовленными на ней диффузионными (ионно-имплантируемыми) тензорезисторами, причем мембрана обрамлена массивным основанием, представляющим с ней единый монокристалл (рис. 4.5, г). Таким образом, на этом этапе интегрируются элементы внутренней конструкции преобразователя, а именно – узел заделки и основание тонкой мембраны. Это позволило решить проблемы с точностью и надежностью на этапе производства кристалла чувствительного элемента. Групповой способ производства, на котором основана микроэлектронная технология, кардинально решает проблему уменьшения стоимости преобразователей.

Этап IV заключается в объединении в одной ИС наряду с интегральным мембранным чувствительным элементом ИС электронного обрамления (усиление, линеаризация, подстроечные элементы) (рис. 4.5, д). В результате такого подхода появилось целое семейство преобразователей с относительно низкой стоимостью.

Этап V заключается в интеграции всей внешней конструкции преобразователя (рис. 4.5, е).

*Таким образом, современному уровню развития интегральных первичных преобразователей соответствуют конструкции, выполненные в виде единого твердотельного прибора.*

Необходимо отметить, что с появлением каждого нового этапа интеграции предыдущие этапы конструкции не отмирают, а продолжают использоваться. Дальнейшая физико-конструктивная интеграция элементов преобразователя пойдет по пути усложнения конструкции за счет интеграции с АЦП и микропроцессорами.

#### 4.4.2. Классификация структур интегральных тензопреобразователей

На рис. 4.6 показана классификация известных интегральных преобразователей давления по материалу упругого элемента и материалу основания.

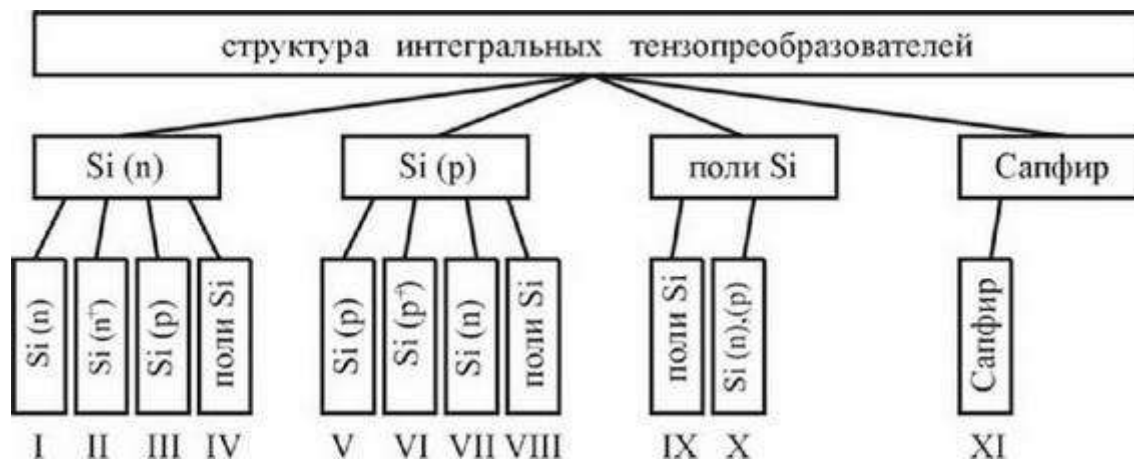


Рис. 4.6. Классификация структур интегральных преобразователей

Структура I (а также V) имеет вид, представленный на рис. 4.7, а, и отличается простотой и минимальной стоимостью исходного материала. *Недостатком является сравнительная сложность обеспечения воспроизводимости и контроля толщины упругого элемента.* Такой структурой обладает максимальное количество современных преобразователей.

Структуры II и VI отличаются более высокой стоимостью исходного материала, представляют собой пластину с подложкой с *n*-эпитаксиальным слоем (рис. 4.7, б), обеспечивают хорошую восприимчивость и простоту контроля толщины упругого элемента преобразователя за счет использования специальных видов травления. Остальные свойства такие же, как у предыдущей структуры.

Структуры III и VII аналогичны предыдущей по воспроизводимости и контролю толщины упругого элемента преобразователя (рис. 4.7, в). Тип проводимости подложки основания противоположен типу проводимости эпитаксиального слоя (упругого элемента). Это позволяет осуществить электрическую изоляцию компонентов. Эту структуру целесообразно использовать, когда на основании необходимо интегрировать электронные схемы.

Структуры IV и VIII являются альтернативными предыдущему варианту с преимуществом окисной изоляции компонентов, интегрируемых на основании (рис. 4.7, г). Обе стороны упругого элемента могут быть покрыты одинаковым окислом. Это имеет важное значение для поверхности мембраны и уменьшения температурных погрешностей преобразователей. Недостатком является сложность обеспечения воспроизводимости.

Структура IX (рис. 4.7, д) целесообразна для создания преобразователей, работающих в широком температурном диапазоне благодаря окисной изоляции термоэлементов.

Структура X (рис. 4.7, е) сочетает возможность получения хорошо контролируемой формы и толщины окружающего элемента преобразователя.

Структура XI (рис. 4.7, ж) изготовлена по технологии «кремний на сапфире» (КНС).

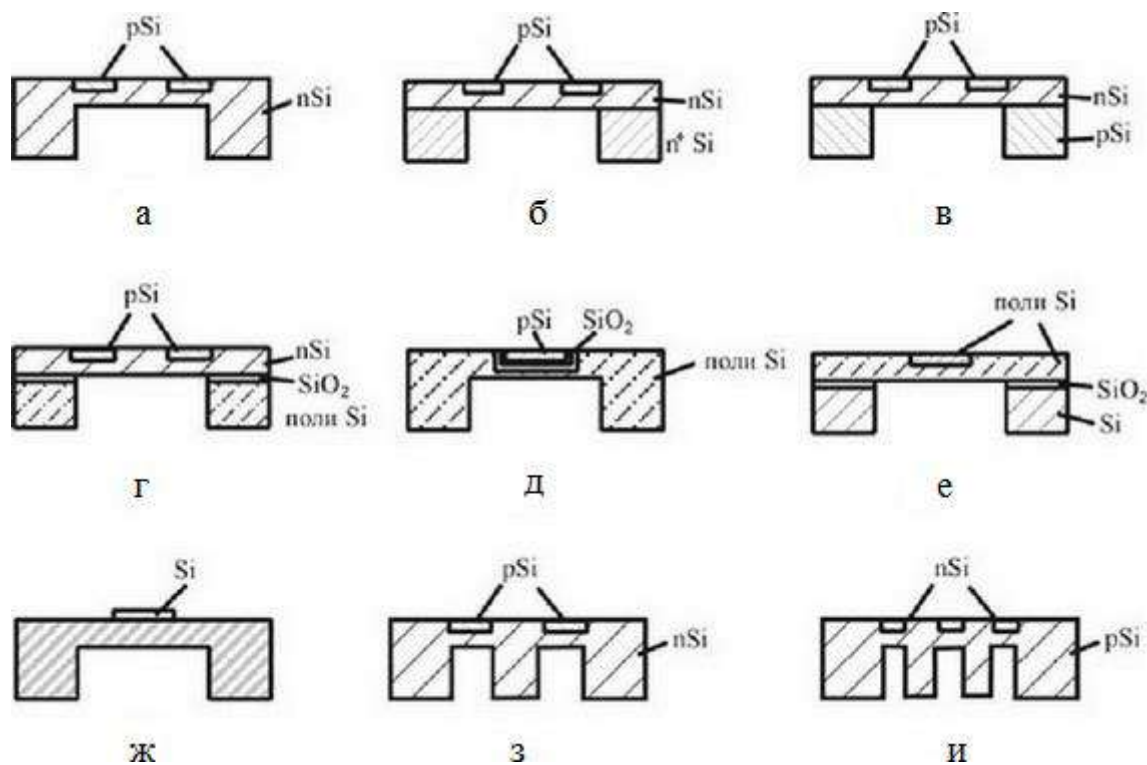


Рис. 4.7. Структуры чувствительных элементов интегральных тензопреобразователей

*Производство КНС-преобразователей целесообразно и оправдано только тогда, когда необходимо обеспечить большой температурный диапазон, работу в агрессивных средах, хорошую электрическую изоляцию от среды и повышенную радиационную стойкость.*

Для ряда задач используют структуры с профилированными мембранами (рис. 4.7, з, и).

Целью микропрофилирования мембраны является снижение нелинейности и повышение чувствительности выходного сигнала за счет создания ступенчатого профиля поверхности путем анизотропного травления поверхностного слоя мембраны. Однако при этом значительно усложняется технология изготовления датчиков и повышается стоимость.

#### 4.4.3. Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей

Технология изготовления интегральных тензопреобразователей хотя и базируется на стандартной технологии интегральных схем, однако

предполагает разработку и использование специфических технологических операций (рис. 4.8).

Первый этап – двустороннее окисление пластины (рис. 4.8, а) n-Si (100). Хорошо отработанный в технологии ИС этап термического и плазмохимического окисления имеет свои особенности – в датчиках качественный окисел должен быть получен с обеих сторон пластины, толщина окисла достигает десятков микрон для обеспечения защиты поверхности Si при глубоком микропрофилировании анизотропным травлением.

Второй этап – двустороннее совмещение и фотолитография (рис. 4.8, б), не типичен для стандартного планарного процесса (напомним, что в техпроцессе ИС совмещение производится по реперным меткам только на одной поверхности подложки и литография производится в ультрафиолетовом спектре экс понирования). В нашем случае тензочувствительные элементы изготавливают на одной стороне пластины, а микропрофилирование происходит на другой, поэтому литография должна быть двусторонней, что исключает возможность экспонирования ультрафиолетом, так как кремний не прозрачен для ультрафиолета. Поэтому в данной ситуации мы используем инфракрасное излучение в качестве экспонирующего, поскольку кремний прозрачен для ИК-спектра.

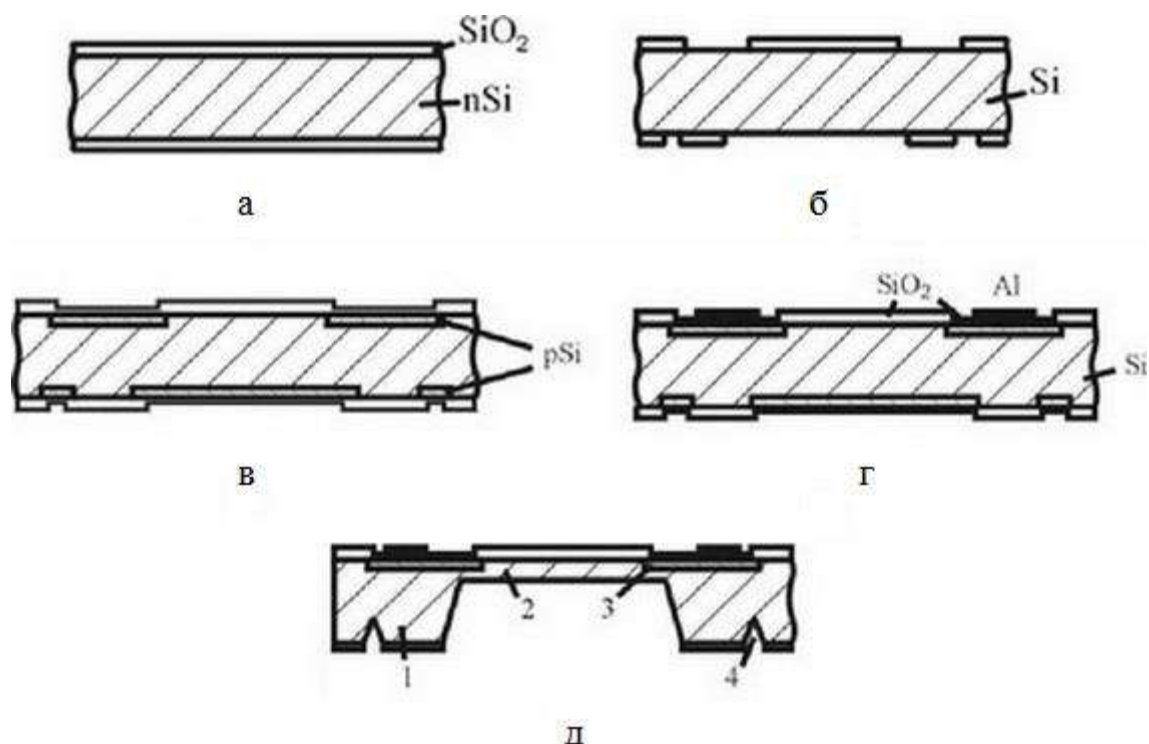


Рис. 4.8. Технологические этапы изготовления интегральных тензопреобразователей:

1 – кремниевая пластина; 2 – мембрана; 3 – тензорезисторы; 4 – канавки для разделения на отдельные чипы

Способы проведения двустороннего совмещения и фотолитографии:

1. Совмещение в ИК-свете. На одной стороне обычным способом формируют рисунок компонентов ИС, затем фоторезист наносят на другую сторону пластины и совмещение с очередным фотошаблоном проводят в ИК-свете.

2. При двусторонней фотолитографии используется специальное приспособление для одновременной экспозиции пластины с двух сторон. При этом совмещение проводят по сквозным отверстиям. С помощью локального травления создаются сквозные отверстия (метки) по периферии пластины, которые служат реперным знаком для совмещения изображений на одной и другой сторонах пластины.

Третий этап – изготовление интегральной тензосхемы (рис. 4.8, в). Стандартный планарный процесс, в котором используется диффузия (ионное легирование) бора для создания тензорезисторов, вскрытие окон под контакты, металлизация; фотолитография для создания межсоединений и контактных площадок.

Четвертый этап – микропрофилирование пластин (рис. 4.8, г). *Методы микропрофилирования пластин могут быть различные – анизотропное плазмохимическое травление, изотропное травление, травление в стоп-травителях (при применении эпитаксиальных слоев), травление, контролируемое лазером.*

Представленный технологический процесс изготовления интегральных тензопреобразователей является примерным. На каждом предприятии существуют свои технологические тонкости, связанные с особенностями технологического оборудования и имеющегося у персонала опыта.

#### **4.5. Принципы размещения тензорезисторов на мембранах полупроводниковых и интегральных тензопреобразователей давления**

*В отличие от кремниевых ИС в датчиках принципиальным является ориентация тензочувствительного элемента по линейным координатам  $X - Y$  поверхности мембраны из-за жесткой зависимости сопротивления от анизотропии (разных межатомных расстояний в разных ориентациях по поверхности кремниевой монокристаллической мембраны). С учетом этой специфики наиболее распространенными чувствительными элементами являются кристаллы кремния  $n$ -типа с круглой или прямоугольной мембраной (рис. 4.9), поверхность которых ориентирована в кристаллографической плоскости (100), а стороны (для прямоугольной мембраны) – вдоль взаимно перпендикулярных направлений семейства  $\langle 110 \rangle$ , на которых расположены тензорезисторы  $p$ -типа проводимости.*

В случае круглой мембраны тензорезистор расположен на расстоянии  $\bar{r}$  от центра мембраны.

Если материал мембраны изотропный, то радиальное и тангенциальное напряжения на поверхности мембраны не зависят от угла  $\theta$  (см. рис. 4.9). В этом случае напряжения определяются только расстоянием  $\bar{r}$  от центра мембраны.

Максимальная тензочувствительность наблюдается у тензорезисторов, расположенных у центра боковых сторон. В центре мембраны тензочувствительность равна нулю.

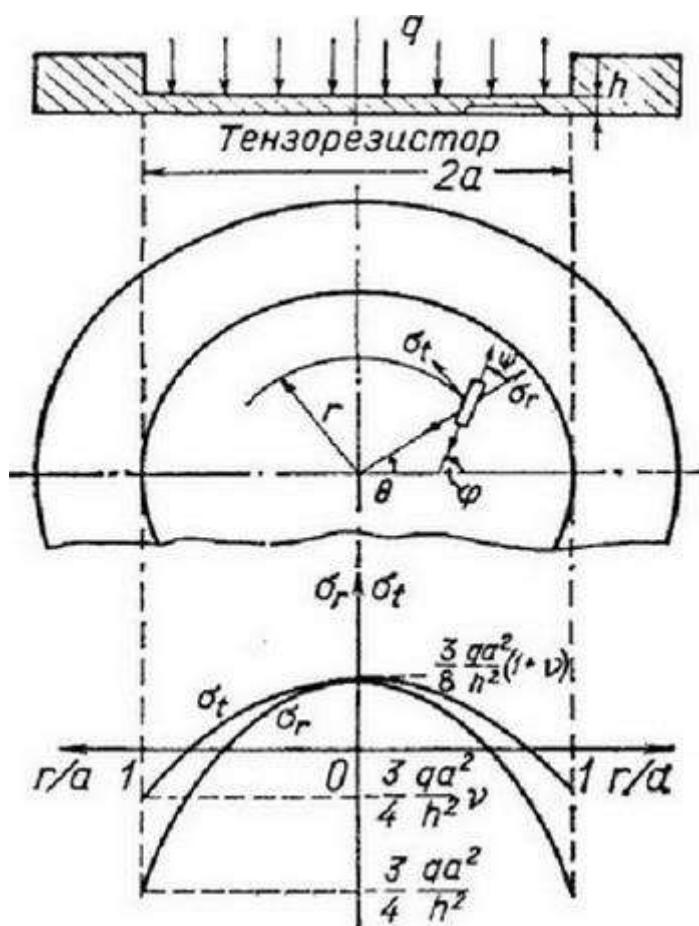


Рис. 4.9. Определение местоположения точечного тензорезистора на круглой мембране

Для прямоугольной мембраны ( $a \neq b$ ), ( $c = 1$ ) точками экстремальной чувствительности являются середины боковых сторон мембран и ее центр.

Анализ значений тензочувствительности показывает, что максимальной чувствительностью обладают тензорезисторы, расположенные на прямоугольной мембране. Однако бесконечно увеличивать соотношения сторон не имеет смысла, так как выигрыш в чувствительности при  $c > 3$  минимален и технологически изготовление таких тензопреобразователей довольно затруднено.

Тензочувствительность можно повысить не только традиционными способами размещения тензорезисторов в различных областях мембраны, но и применяя специальное микропрофилирование периметра мембраны. При этом

тензочувствительность датчиков может увеличиться на порядок по сравнению с датчиками, имеющими традиционные круглые или квадратные мембраны.



## 5. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Каждая частица нашей Вселенной находится в постоянном движении, что говорит о том, что она имеет определенную энергетику. Одна из составляющих этой энергетики является тепловой. Поэтому можно считать температуру мерой кинетической энергии колеблющихся частиц. Чем быстрее движение, тем выше температура частиц. Средняя кинетическая энергия большого количества двигающихся частиц определяет макроскопическую температуру объекта. Когда различные материалы соприкасаются, атомы и молекулы, двигающиеся в них, взаимодействуют друг с другом. Каждый колеблющийся атом ведет себя как микроскопический передатчик, посылающий электромагнитное излучение в окружающее пространство. Это позволяет осуществить передачу тепла от теплых объектов к холодным (любой поток обусловлен градиентом, в нашем случае – температур). Чем интенсивнее движение атомов, тем выше температура и тем сильнее электромагнитное излучение. Для измерения температуры используют термометры, которые либо контактируют с объектом, либо воспринимают его электромагнитное излучение и вырабатывают на выходе физический сигнал, который и является мерой температуры объекта. Повышение температуры вызывает увеличение объема объекта (*тепловое расширение*). Когда объект нагревается, его температура повышается. Под нагревом понимают передачу объекту определенного количества тепловой энергии (тепла). Тепло в объекте накапливается в виде кинетической энергии вибрации атомов (теплоемкость). У тепла нет специфических характеристик, т. е. тепло может иметь различную физическую природу. Тепло можно измерить, но при этом его невозможно различить. Тепло невозможно ограничить, оно свободно перемещается от теплых частей системы к холодным. Тепловая энергия может быть передана от объекта к объекту *теплопроводностью*, *конвекцией* и *излучением* (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Основные пути теплопередачи

Для передачи тепла теплопроводностью необходимо обеспечить контакт между двумя объектами. Термически возбужденные частицы теплого тела совершают колебательные движения и передают кинетическую энергию частицам более холодного тела, которые при этом переходят в возбужденное состояние. В результате теплый объект теряет тепло, а холодный – поглощает его.

Для передачи тепла конвекцией требуется промежуточный агент (жидкость или газ). Этот агент забирает тепло у теплого объекта, переносит его до холодного объекта и передает ему тепловую энергию. Конвекция может быть естественной (под действием силы тяжести – теплый воздух поднимается к холодной поверхности, отдавая тепло, а холодный – опускается вниз, забирая тепло у горячих поверхностей) или искусственной (выполняемой механическим путем – вентилятором). Эффективность конвективной передачи тепла определяется скоростью движения промежуточного агента, градиентом температуры, площадью поверхности объекта и тепловыми свойствами окружающей среды.

Тепловое излучение определяется кинетической энергией вибрирующей частицы, среднее значение которой связано с абсолютной температурой. Движущийся электрический заряд вызывает появление переменного электрического поля, которое приводит к образованию переменного магнитного поля. То есть вибрирующие частицы являются источником электромагнитного поля, подчиняющегося законам оптики и распространяющегося со скоростью света. Длина волны излучения связана с частотой и скоростью света в конкретной среде. Плотность потока излучения – это мощность электромагнитного потока на единицу длины волны. Температура – это результат осреднения кинетических энергий огромного массива вибрирующих частиц. Однако не все частицы вибрируют с одинаковой частотой и амплитудой. Разрешенные частоты (или длины волн) являются набором бесконечной величины. В этом спектре можно получить длину волны, в окрестностях которой происходит наибольшая мощность излучений.

В соответствии с законом Вина, чем выше температура, тем короче длина волны излучения. Частота излучений (или длина волны) определяется только температурой, а амплитуда еще зависит и от излучающей способности поверхности, которую часто называют коэффициентом излучения. Этот коэффициент является отношением потока излучения, исходящего от поверхности к потоку излучений от идеального излучателя при той же самой температуре.

Измерение температуры всегда заключается в передаче небольшой порции тепловой энергии от объекта к датчику, который должен преобразовать эту энергию в электрический сигнал. Когда контактный детектор (зонд) помещается внутрь объекта или на него, между объектом и зондом происходит передача тепла за счет теплопроводности. При этом чувствительный элемент, входящий в состав зонда, либо разогревается, либо охлаждается. То же самое происходит и при передаче тепла при помощи излучения: тепловая энергия в

виде

ИК-излучения либо поглощается датчиком, либо выделяется им в зависимости от температуры объекта и типа оптической связи. Любой датчик, независимо от его размеров, вносит возмущение в зону измерения, что приводит к возникновению ошибок при определении температуры. Это касается любых способов детектирования: и радиационных, и конвективных, и теплопроводных. Таким образом, разработчик должен всегда стремиться минимизировать погрешность измерений, применяя соответствующие конструкции датчиков и методы компенсации погрешностей.

Существует два основных метода измерения температуры: равновесный и прогнозируемый. В равновесном методе измерение температуры проводится, когда между измеряемой поверхностью и чувствительным элементом, находящимся в зонде, наступает тепловое равновесие, т. е. между датчиком и объектом измерения нет существенной разности температур. В методе прогнозирования в процессе проведения измерений тепловое равновесие не наступает, а значение текущей температуры определяется по скорости изменения температуры датчика. С момента размещения чувствительного элемента на объекте до наступления теплового равновесия между объектом и датчиком может пройти довольно много времени.

Рассмотрим источники возможных ошибок при изменении температуры контактным способом. Одна из причин возникновения ошибок заключается в том, что датчик, как правило, соединяется не только с объектом, температуру которого он измеряет, но и с другими предметами. Другая причина кроется в использовании соединительных кабелей (рис. 5.2, а).

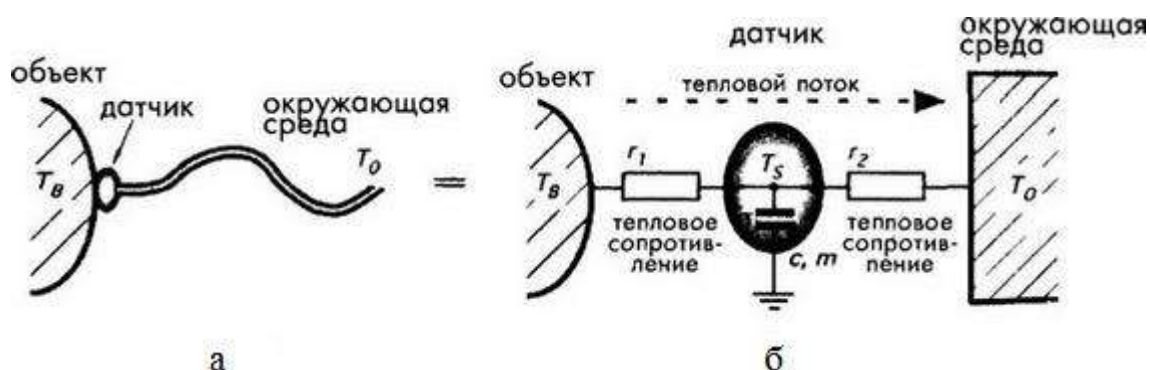


Рис. 5.2. Датчик температуры:

а – тепловые контакты с объектом и с соединительный кабелем; б – эквивалентная тепловая схема

Чувствительный элемент, подсоединяемый к объекту с температурой  $T_B$ , обладает своей собственной температурой  $T_S$ . Для проведения точных измерений необходимо достичь состояния теплового равновесия, при котором эти две температуры станут практически равными. Один конец кабеля соединяется с зондом, а другой конец подвергается действию температуры окружающей среды  $T_0$ , которая может значительно отличаться от температуры

объекта. Таким образом, соединительный кабель не только передает электрический сигнал датчика, но и часть тепла от элемента или к нему. Схема на рис. 5.2, б напоминает электрическую схему, и для расчета ее параметров также применяются законы электрических цепей, такие как Кирхгофа и Ома. Теплоемкость вещества по аналогии с электрическими цепями отображается в виде конденсатора. Считая, что все температуры уже вышли на определенный стационарный уровень, к этой системе можно применить закон сохранения энергии, из которого следует, что тепловая энергия, переданная объектом датчику, должна быть равна энергии, отданной датчиком в окружающую среду. Исходя из этого можно записать следующее уравнение:

$$\frac{T_B - T_S}{r_1} = \frac{T_B - T_0}{r_1 + r_2}. \quad (5.1)$$

Из которого можно вывести выражение для температуры датчика:

$$T_S = T_B - (T_B - T_0) \frac{r_1}{r_2} = T_B - \Delta T \frac{r_1}{r_2}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta T$  – разность температур между объектом и окружающей средой.

Подробнее рассмотрим уравнение (5.2). Анализируя его, можно сделать несколько заключений. Во-первых, температура датчика всегда отличается от температуры объекта. Исключение составляет случай, когда температуры окружающей среды и объекта равны (т. е.  $\Delta T = T_B - T_0 = 0$ ). Во-вторых, при любом  $\Delta T$  температура датчика будет приближаться к температуре объекта только в том случае, когда отношение  $r_1/r_2$  стремится к нулю. Это означает, что для снижения погрешности измерения необходимо улучшать тепловую связь между объектом и датчиком и по возможности отделять датчик от окружающей среды, что часто нелегко выполнить.

Все вышесказанное справедливо для стационарных условий. Теперь рассмотрим динамический процесс, когда температура меняется во времени. Такая ситуация происходит при изменении температуры окружающей среды или объекта, а также в момент присоединения датчика к объекту, когда его температура еще не успела стабилизироваться. При контакте чувствительного элемента с объектом между ними происходит теплообмен. Количество переданного при этом тепла определяется разностью температур элемента ( $T_S$ ) и объекта ( $T_B$ ):

$$dQ = \alpha_1 (T_B - T_S) dt, \quad (5.3)$$

где  $\alpha_1 = 1/r_1$  – теплопроводность в зоне контакта датчика и объекта.

Если удельная теплоемкость датчика равна  $c$ , а масса –  $m$ , количество поглощенного им тепла можно найти из выражения

$$dQ = mcdT. \quad (5.4)$$

Без учета тепловых потерь датчика в окружающую среду через соединительный кабель и вспомогательные структуры, т. е. предполагая, что  $r_2 = \infty$ , на основе уравнений (5.3) и (5.4) можно получить следующее дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\alpha_1(T_1 - T)dt = mcdT. \quad (5.5)$$

Определим тепловую постоянную времени как

$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1} = mcr_1, \quad (5.6)$$

тогда дифференциальное уравнение (5.5) примет вид

$$\frac{dT}{T_1 - T} = \frac{dt}{\tau_T}. \quad (5.7)$$

Решение этого уравнения можно записать как

$$T_S = T_B - \Delta T e^{-t/\tau_T}, \quad (5.8)$$

где предполагается, что первоначально датчик находится при температуре  $T_B$ .

На рис. 5.3, а показан переходный процесс установления температуры датчика, соответствующий уравнению (5.8). Постоянная времени  $\tau_T$  определяется временем, за которое температура  $T$  достигает уровня, равного 63.2 % от первоначальной разности температур  $\Delta T_0$ . Чем меньше постоянная времени, тем быстрее датчик набирает требуемую температуру.

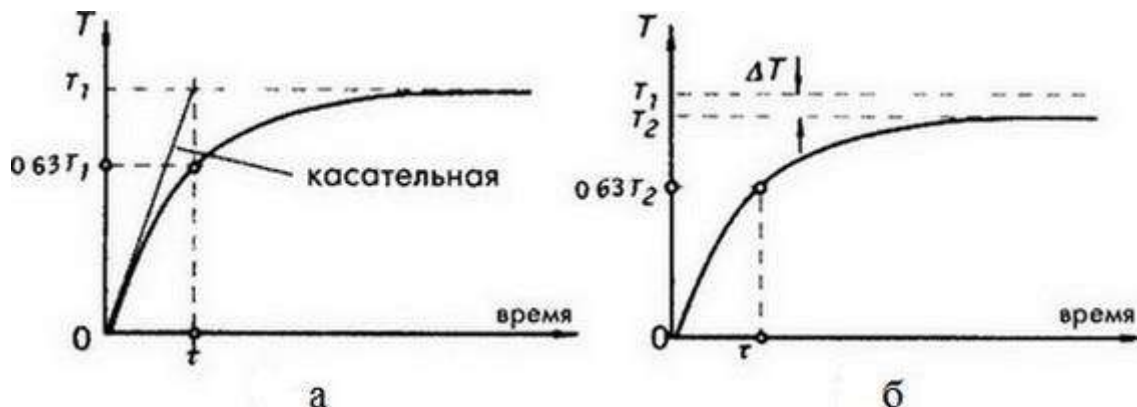


Рис. 5.3. Переходные характеристики чувствительного элемента:

- а – идеальная связь датчика с объектом (нет тепловых потерь);
- б – чувствительный элемент отдает часть своего тепла в окружающую среду

Из уравнения (5.8) следует, что при  $t \rightarrow \infty$  температура датчика становится равной температуре объекта:  $T = T_1$ . Теоретически для достижения полного теплового равновесия между объектом и датчиком требуется бесконечно большое время. Но поскольку обычно требуется проводить

измерения с заданной точностью, в большинстве случаев считают, что через интервал времени, равный  $5 \dots 10$  постоянным времени, наступает квазиравновесное состояние. Например, в момент времени  $t = 5\tau$ , температура датчика будет составлять  $0.7\%$  от  $\Delta T_0$ , а при  $t = 10\tau$ , разница между температурами уже равна  $0.005\%$ .

Теперь рассмотрим ситуацию, при которой датчик теряет часть тепла в окружающую среду, т. е.  $r_2 \neq \infty$ . В этом случае тепловая постоянная времени определяется как

$$\tau_T = \frac{mc}{\alpha_1 + \alpha_2} = mc \frac{r_1}{1 + r_1/r_2}. \quad (5.9)$$

Переходный процесс выхода температуры на режим показан на рис. 5.3, б. Отметим, что в данном случае температура датчика никогда не станет равной температуре объекта, сколько бы времени не прошло.

Типовой контактный датчик температуры состоит из следующих компонентов:

1. Чувствительного элемента: материала, реагирующего на изменение его собственной температуры. Хороший элемент обладает низкой удельной теплоемкостью, малой массой, большой теплопроводностью, высокой и прогнозируемой чувствительностью.

2. Контактных: проводящих пластинок или проводов, связывающих чувствительный элемент с внешней электронной схемой. Контакты должны обладать минимально возможными теплопроводностью и электрическим сопротивлением. Также они часто выполняют роль опорной конструкции.

3. Защитного корпуса: специальной оболочки или покрытия, физически отделяющего чувствительный элемент от окружающей среды. Хороший корпус имеет низкое тепловое сопротивление (высокую теплопроводность) и хорошие диэлектрические свойства. Он должен быть влагонепроницаемым, чтобы вода и другие факторы окружающей среды не могли сказаться на работе чувствительного элемента.

Основное отличие контактных и бесконтактных датчиков заключается в способе передачи тепла от объекта к элементу: в контактных датчиках задействован механизм теплопроводности через физический контакт, в бесконтактных тепло передается через излучение или оптическим методом.

Для улучшения быстродействия датчиков тепловых излучений толщину чувствительного элемента делают минимальной, в то время как для повышения чувствительности увеличивают его площадь поверхности.

Все датчики температуры можно разделить на два класса: абсолютные и относительные детекторы. Абсолютные датчики измеряют температуру относительно либо абсолютного нуля, либо любой другой точки на температурной шкале. Относительные датчики измеряют разность температур двух объектов, один из которых называется эталонным.

## 5.1. Терморезистивные датчики

Достоинствами терморезистивных датчиков являются высокая чувствительность, простота создания интерфейсных схем и долговременная стабильность. Такие датчики можно разделить на три группы: резистивные датчики температур, детекторы на *p-n*-переходах и термисторы.

### 5.1.1. Резистивные детекторы температуры

Этот термин обычно относится к металлическим детекторам, которые бывают проволочными и тонкопленочными. Поскольку удельное сопротивление всех металлов и большинства сплавов зависит от температуры, на их основе можно разрабатывать чувствительные элементы для измерения температуры. В соответствии с теорией электропроводности металлов, металл представляется как ионный остов (решетка), внутри которого блуждает электронный газ. Повышение температуры приводит к повышению энергии как ионного остова, так и электронного газа. Повышение энергии ионного остова (решетки) означает увеличение частоты и амплитуды колебаний каждого иона, что приводит к увеличению сопротивления среды в которой будут двигаться электроны. Исходя из того, что электрический ток есть направленное движение электронов, повышение их энергии при том же повышении температуры приводит к увеличению подвижности электронов, т. е. повышение температуры приводит к увеличению тока. Результирующая электропроводность металла определяется суммой этих противоречивых факторов. Однако фактор роста сопротивляемости среды (решетки) будет существенно превалировать над фактором увеличения электропроводности за счет увеличения подвижности электронов. В итоге металл имеет положительный температурный коэффициент электрического сопротивления. Для изготовления температурных детекторов подходят практически все металлы, но в основном для этих целей используется платина. Это объясняется воспроизводимостью ее характеристик, долговременной стабильностью и прочностью. Для измерения температур выше 600 °C применяется вольфрам. Выпускается несколько типов резистивных датчиков температуры:

1. Тонкопленочные, изготовленные из тонких слоев платины или ее сплавов, нанесенных на подходящую подложку, например на кремниевую микромембрану. Как правило, они формируются в виде меандра для получения высокого отношения длины к ширине.

2. Проволочные, в которых платиновая проволока намотана внутри керамической трубочки и прикреплена к ней при помощи высокотемпературного клея. Такая конструкция позволяет изготавливать датчики, обладающие очень высокой стабильностью.

Как правило, терморезистор имеет низкое сопротивление, поэтому подводимые провода вносят в цепь большое сопротивление. В итоге незначительное изменение сопротивления низкоомного датчика почти не

изменит общего сопротивления цепи (рис. 5.4). Результат – большая погрешность измерений. Самонагрев за счет измерительного тока дает дополнительную погрешность. В этом – существенный недостаток терморезисторов в условиях реального применения.

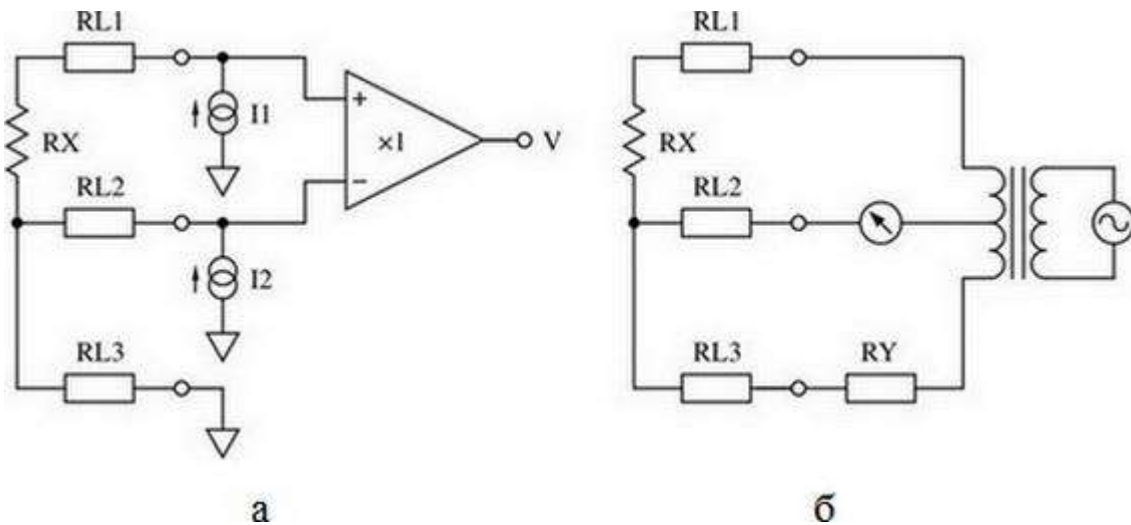


Рис. 5.4. Стандартное двухпроводное подсоединение терморезистора

Частично эту проблему можно решить четырехпроводным методом подсоединения терморезистора (рис. 5.5), когда напряжение измеряется не на входных порталах вольтметра, а непосредственно на терминалах терморезистора. При этом самонагрев устраняется, но резко уменьшается быстродействие.

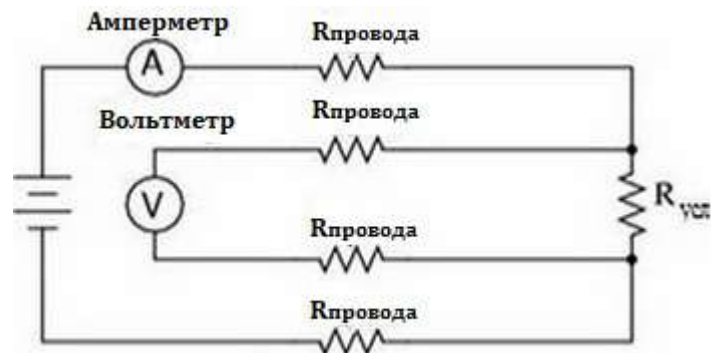


Рис. 5.5. Четырехпроводное подсоединение терморезистора

$$R_{уст} = \frac{\text{Показания вольтметра}}{\text{Показания амперметра}}.$$



### 5.1.2. Кремниевые резистивные датчики

Кремний широко используется для изготовления датчиков температуры, обладающих положительным температурным коэффициентом сопротивления. В настоящее время кремниевые резистивные датчики часто встраиваются в микроструктуры для осуществления температурной компенсации или проведения прямых измерений температуры. Также существуют дискретные кремниевые датчики. Такие датчики обладают довольно хорошей линейностью (которая может быть улучшена при помощи простых термокомпенсационных цепей) и высокой долговременной стабильностью. Температурный коэффициент кремниевых резисторов позволяет их использовать в системах, обеспечивающих безопасность нагревательных устройств: среднее превышение температуры (до 200 °С) приводит к увеличению их сопротивления, за счет чего осуществляется функция самозащиты.

Чистый кремний, как монокристаллический, так и поликремний, сам по себе обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Однако после легирования примесями *n*-типа, в определенном температурном диапазоне его температурный коэффициент становится положительным (рис. 5.6). Этот эффект объясняется снижением подвижности носителя зарядов при понижении температуры. При высоких температурах количество свободных носителей зарядов увеличивается за счет спонтанно образуемых носителей, поэтому в этом температурном диапазоне преобладают собственные полупроводниковые свойства кремния. Датчик состоит из кристалла кремния *n*-типа размером 500 × 500 × 240 мкм, металлизированного с одной стороны и с контактной площадкой с другой стороны. При такой конструкции датчика создается эффект «растягивания» сопротивления, в результате которого внутри кристалла устанавливается коническое распределение тока, значительно снижающее зависимость характеристик от производственных допусков. При больших токах и высоких температурах датчик становится чувствительным к направлению тока. Для решения этой проблемы применяется сдвоенный датчик, в котором два чувствительных элемента включаются последовательно навстречу друг другу. Такие датчики часто используются в автомобилях.

Типичная чувствительность кремниевого датчика составляет порядка 0.7 %/°С, т. е. его сопротивление меняется на 0.7 % при изменении температуры на 1 °С. Передаточную функцию датчика можно аппроксимировать полиномом второго порядка:

$$R_T = R_0[1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2], \quad (5.10)$$

где  $R_0$  и  $T_0$  – сопротивление в омах и температура в кельвинах, измеренные в эталонной точке.

Например, рабочий диапазон датчиков КТУ-81 составляет –55 ... +150 °С,  $A = 0.007874 \text{ К}^{-1}$ ,  $B = 1.874 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-2}$ .

### 5.1.3. Термисторы

Термин *термистор* образовался в результате соединения двух слов: тепловой и резистор. Это название дано металл-оксидным детекторам, имеющим форму бусинок, стержней, цилиндров, прямоугольных пластин и толстых пленок. Термисторы относятся к классу датчиков абсолютной температуры, показания которых соответствуют абсолютной температурной шкале. Все термисторы делятся на две категории: с отрицательным температурным коэффициентом (ОТК) и положительным температурным коэффициентом (ПТК) сопротивления. Для проведения прецизионных измерений используются термисторы только с ОТК.

Ом·см

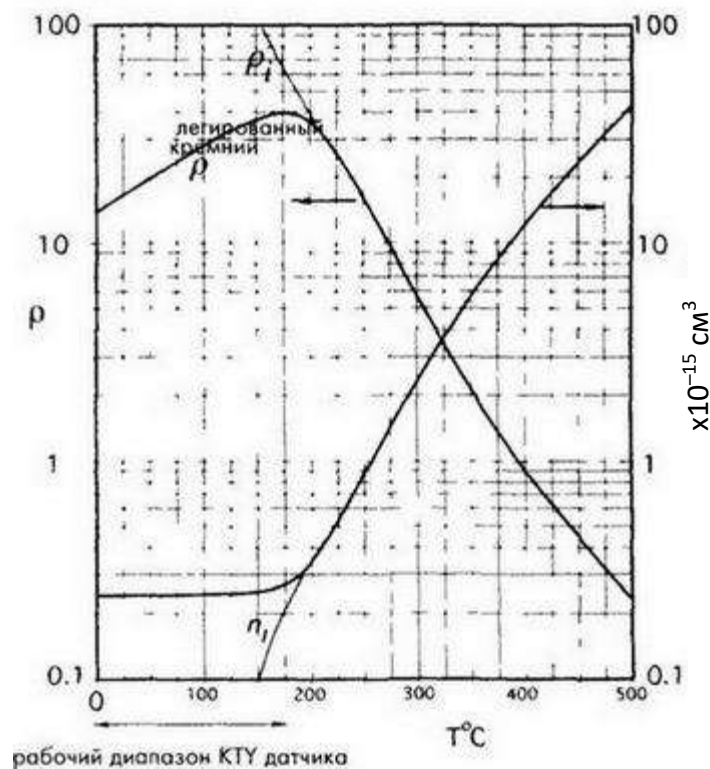


Рис. 5.6. Удельное сопротивление и количество свободных носителей зарядов в кремнии, легированном примесями  $n$ -типа

Обычные металл-оксидные термисторы обладают ОТК. Это значит, что при увеличении температуры их сопротивление падает. Сопротивление термисторов с ОТК, так же как и любых других резисторов, определяется их геометрическими размерами и удельным сопротивлением материала. Зависимость между величиной сопротивления и температурой является сильно нелинейной. Эта проблема решается линеаризацией характеристики путем последовательного или параллельного подсоединения дополнительных (линеаризующих) сопротивлений (рис. 5.7) с целью уменьшения измерительного тока. Однако это приводит к уменьшению сигнала и требует дополнительного усилительного элемента, что в свою очередь приводит к схемотехническому усложнению и удорожанию устройства в целом.

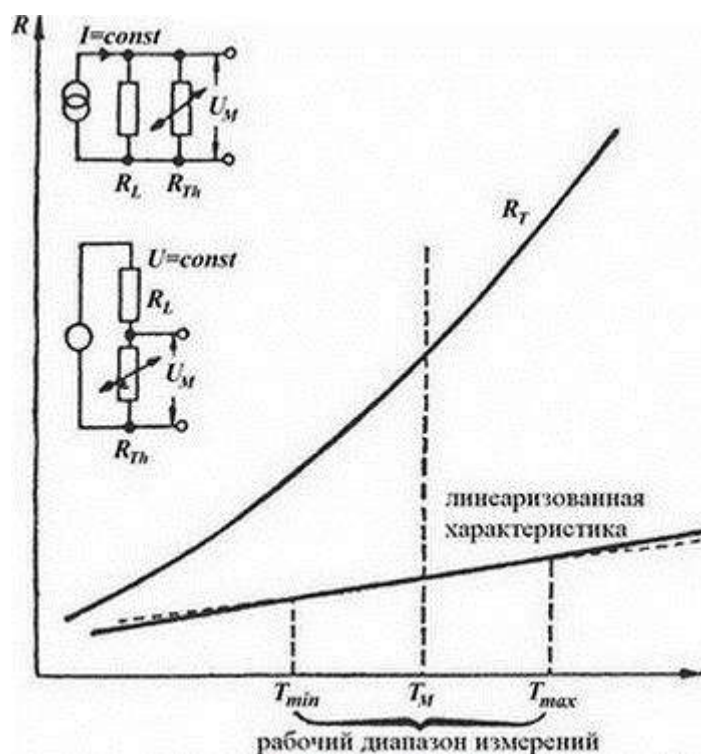


Рис. 5.7. Схема линейризации характеристики кремниевого датчика температуры

При проведении прецизионных измерений или при работе в широком температурном диапазоне нельзя напрямую использовать характеристики термисторов, приведенные в документации на них, поскольку типовые допуски на номинальные значения серийно выпускаемых изделий при температуре 25 °С составляют порядка  $\pm 20\%$ . Поэтому для достижения высокой точности измерений термисторы необходимо индивидуально калибровать в широком температурном диапазоне. Правда, существуют и прецизионные термисторы, характеристики которых в заводских условиях доводятся до требуемых методом лазерной подгонки. Этот процесс проводится под непрерывным контролем за номинальными значениями сопротивлений при заданной температуре. Однако такая процедура настройки термисторов приводит к значительному повышению их стоимости. Поэтому на практике чаще применяется метод индивидуальной калибровки термисторов или выборки по требуемым номиналам из массовой партии. В процессе калибровки измеряется сопротивление термистора при помещении его в среду с точно известной температурой (для этих целей часто применяется камера, в которую может быть залита вода, но чаще минеральное масло или специальный состав, например «Флюорент»). Если требуется многоточечная калибровка, эта процедура выполняется при разных температурах. Естественно, что качество проведенной калибровки сильно зависит от точности эталонного термометра. Для определения сопротивления термистор включается в измерительную цепь, по измерению тока в которой судят о величине сопротивления. При использовании термистора в качестве датчика абсолютной температуры предполагается, что при прохождении через него электрического тока его

собственная температура не изменится, что означает, что он не внесет в систему значительных тепловых возмущений, способных повлиять на точность измерений.

В этом случае говорят, что термистор обладает «нулевой мощностью». Увеличение температуры термистора в установившемся режиме вследствие явления саморазогрева описывается уравнением

$$\Delta T_H = r \frac{N^2 V^2}{S}, \quad (5.11)$$

где  $r$  – тепловое сопротивление между термистором и окружающей средой;

$N$  – рабочий цикл измерений (например,  $N = 0.1$  означает, что постоянное напряжение подается на термистор только на время, равное 10 % от полного времени измерений);

$V$  – приложенное постоянное напряжение;

$S$  – сопротивление термистора при измеряемой температуре.

При проведении измерений по постоянному току  $N = 1$ . Из уравнения (5.11) видно, что для выполнения условий «нулевой мощности» необходимо, чтобы:

- 1) термистор обладал высоким удельным сопротивлением;
- 2) термистор и объект измерения имели хорошую тепловую связь друг с другом (что должно снизить значение  $r$ );
- 3) измерения проводятся при небольшом постоянном напряжении, подаваемом в течение короткого интервала времени.

## 5.2. Термоэлектрические контактные датчики

Поскольку термоэлектрические контактные датчики состоят по крайней мере из двух разных проводников и двух соединений (пар) этих проводников, их часто называют термопарами. Они являются пассивными датчиками, так как сами вырабатывают напряжение в ответ на изменение температуры и не требуют для этого внешнего источника питания. Термопары относятся к классу относительных датчиков, поскольку их выходное напряжение определяется разностью температур между двумя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения. При изменении температуры при помощи термопары один ее спай служит эталоном, и его температуру необходимо определять при помощи отдельного детектора абсолютной температуры, например термистора, или его надо поместить в материал, находящийся в физическом состоянии, температура которого точно известна. В основе физического принципа действия термопар лежит термоэлектрический эффект (рис. 5.8), основные принципы которого сводятся к следующему.

Если взять проводник и один его конец поместить в холодное место, а другой – в теплое, от теплового участка к холодному будет передаваться тепловая энергия. Интенсивность теплового потока при этом пропорциональна

теплопроводности проводника. В дополнение к этому градиент температур приводит к появлению в проводнике электрического поля, обусловленного эффектом Томсона. Он заключается в поглощении или высвобождении тепла линейно пропорционально току, проходящего через однородный проводник, имеющий градиент температуры вдоль его длины. При этом тепло поглощается, если ток и тепловой поток направлены в противоположных направлениях, и выделяется, когда они имеют одинаковое направление. Индуцированное электрическое поле приводит к появлению разности потенциалов:

$$dV_a = \alpha_a \frac{dT}{dx} dx, \quad (5.12)$$

где  $\alpha_a$  – абсолютный коэффициент Зеебека материала;

$dT$  – градиент температуры на небольшом участке длиной  $dx$ .

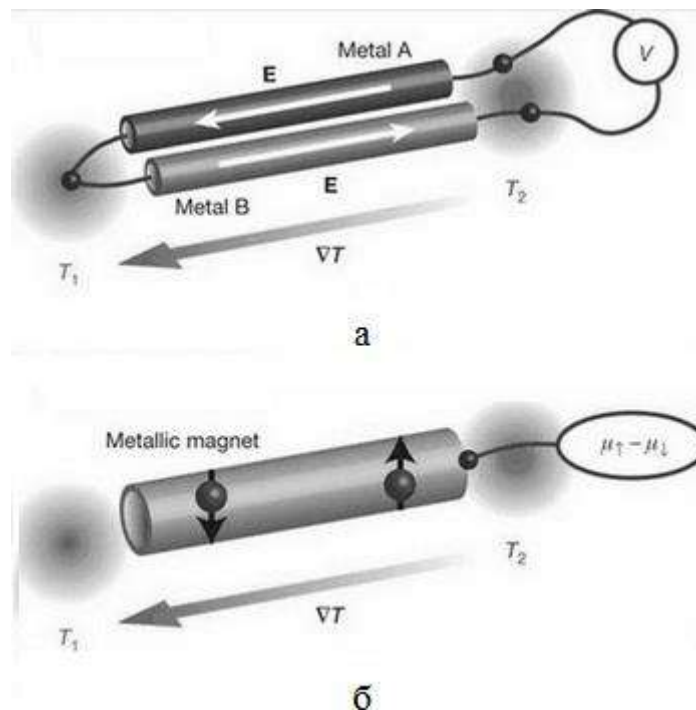


Рис. 5.8. Термопара (а) и спиновый эффект Зеебека (б)

Если материал однородный,  $\alpha_a$  не зависит от его длины и уравнение (5.12) принимает вид

$$dV_a = \alpha_a dT. \quad (5.13)$$

Уравнение (5.13) является основным математическим выражением для термоэлектрического эффекта. На рис. 5.9, б показан проводник с неравномерным распределением температуры  $T$  вдоль его длины  $x$ . Градиент температуры между произвольно расположенными точками определяет

термоЭДС между ними. Другие значения температур (например,  $T_3$ ,  $T_4$  и  $T_5$ ) не влияют на значение ЭДС между точками 1 и 2. Для измерения ЭДС вольтметр подсоединяется к проводнику, как показано на рис. 5.10, б. Это не так просто, как может показаться на первый взгляд. Для измерения термоЭДС надо соответствующим образом подключить щупы вольтметра. Однако щупы вольтметра часто изготовлены из проводников, отличающихся от исследуемого проводника. Рассмотрим простой контур для измерения термоЭДС (рис. 5.10, а). В таком контуре измеритель включается последовательно с проводником. Если контур выполнен из одинакового материала, то тока в цепи не будет, даже при неравномерной температуре вдоль его длины. Поскольку в этом случае две половины контура создадут токи равной величины, но противоположного направления, которые взаимно уничтожат друг друга. ТермоЭДС возникает в любом проводнике с неравномерной температурой, но ее часто невозможно измерить напрямую.

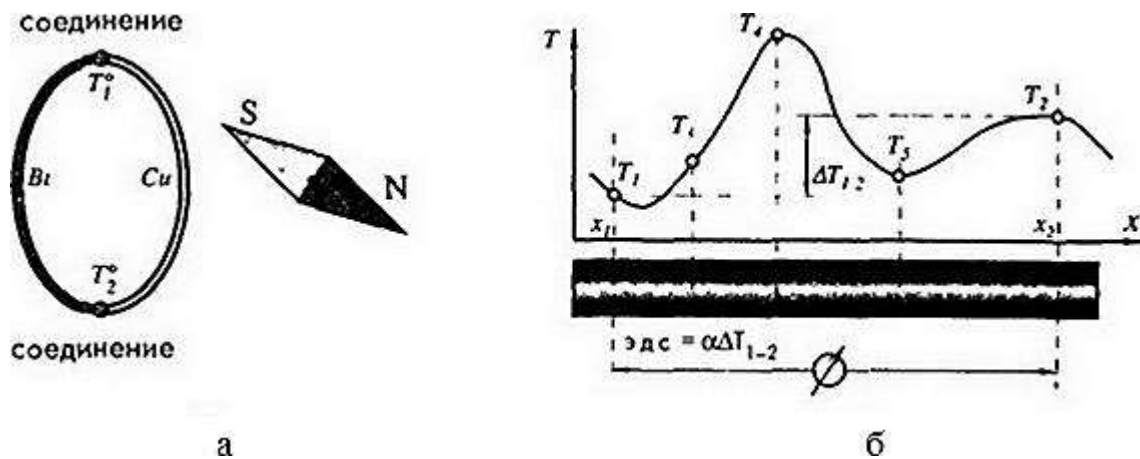


Рис. 5.9. Опыт Зеебека (а) и переменная температура вдоль проводника является причиной возникновения термоЭДС (б)

Для исследования термоэлектричества необходимо иметь контур, составленный из двух разных материалов (или из одинаковых материалов, но находящихся при различных условиях, например, один – в напряженном состоянии, а другой – нет).

Только тогда возможно определить разницу их термоэлектрических свойств. На рис. 5.10, б показан контур, состоящий из двух различных металлов, в котором возникает разность токов:  $\Delta i = i_a - i_b$ . Величина  $\Delta i$  зависит от многих факторов, включая форму и размер проводников. Если вместо тока измерять напряжение на разомкнутом проводнике, разность потенциалов будет определяться только типом материалов и их температурой и не будет зависеть ни от каких других факторов. *Индукцированная теплом разность потенциалов называется напряжением Зеебека.*

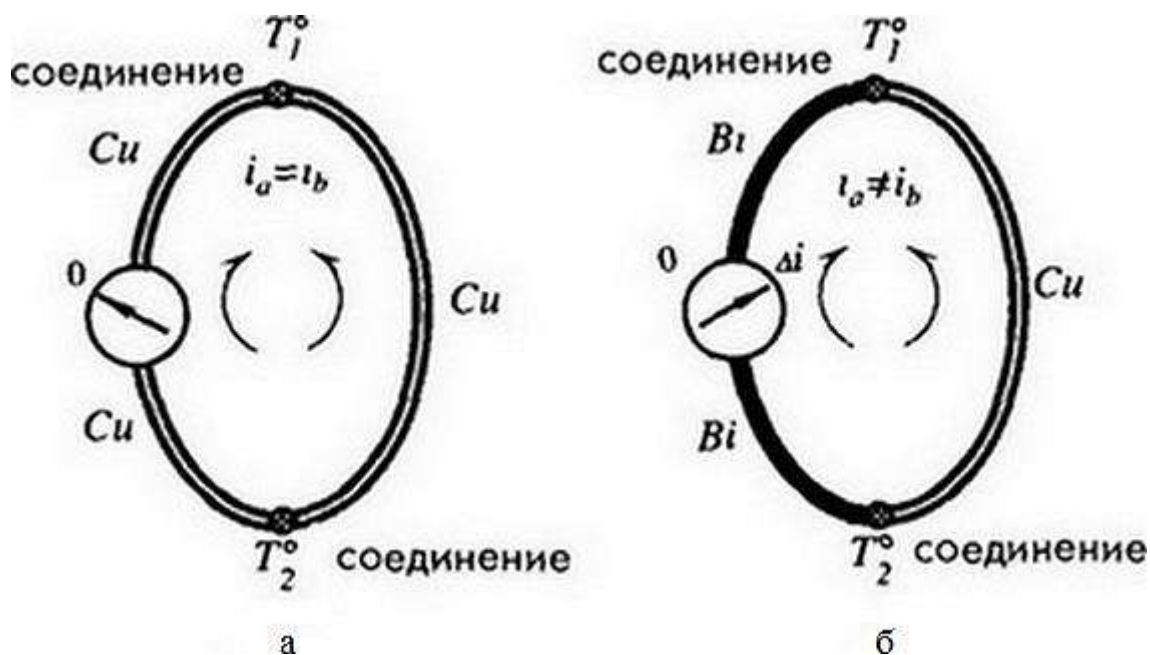


Рис. 5.10. Термоэлектрический контур:

а – соединение идентичных металлов не приводит к появлению тока при любой разности температур; б – соединение разных металлов индуцирует ток  $\Delta i$

Что происходит, когда два проводника соединяются друг с другом? Свободные электроны в металле ведут себя как идеальный газ. Кинетическая энергия электронов определяется температурой материала. Однако в разных металлах энергия и плотность свободных электронов не являются одинаковыми. Когда два разных материала, находящихся при равной температуре, соприкасаются друг с другом, свободные электроны за счет диффузии перемещаются через место соединения. Электрический потенциал материала, принявшего электроны, становится отрицательным, а материала, отдавшего электроны, – положительным. Разные концентрации электронов с двух сторон соединения формируют электрическое поле, уравнивающее процесс диффузии, в результате чего устанавливается некоторое равновесие. Если контур является замкнутым и оба соединения находятся при одинаковой температуре, электрические поля около них взаимно уничтожаются, чего не происходит, когда места соединений имеют разную температуру.

Эффект Зеебека является электрическим по своей природе. Можно утверждать, что термоэлектрические свойства проводников – это такие же объемные свойства материалов, как электро- и теплопроводность, а коэффициент  $\alpha_a$  – уникальная характеристика материала. При комбинировании двух разных материалов (А и В) всегда требуется определять напряжение Зеебека. Это можно сделать при помощи дифференциального коэффициента Зеебека:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B. \quad (5.14)$$

Тогда напряжение на соединении равно

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT. \quad (5.15)$$

Уравнение (5.15) иногда применяется для определения дифференциального коэффициента:

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT}. \quad (5.16)$$

Например, функцию напряжения от градиента температуры для термопары  $T$ -типа можно с достаточной степенью точности аппроксимировать при помощи уравнения второго порядка:

$$V_{AB} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 = -0.0543 + 4.094 \cdot 10^{-2} T + 2.874 \cdot 10^{-5} T^2. \quad (5.17)$$

Тогда выражение для дифференциального коэффициента Зеебека принимает следующий вид:

$$\alpha_T = \frac{dV_{AB}}{dT} a_1 + 2a_2 T = 4.094 \cdot 10^{-2} + 5.748 \cdot 10^{-5} T. \quad (5.18)$$

Из уравнения видно, что коэффициент является линейной функцией от температуры. Иногда он называется чувствительностью термопарного соединения. Эталонное соединение, которое, как правило, находится при более холодной температуре, называется холодным спаем, а второе соединение – горячим спаем. Коэффициент Зеебека не зависит от физической природы соединения: металлы могут быть скручены, сварены, спаяны и т. д. Имеет значение только температура спаев и свойства металлов. Эффект Зеебека является прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую.

В настоящее время эффект Зеебека применяется в интегрированных датчиках, в которых соответствующие пары материалов наносятся на поверхность полупроводниковых подложек.

Примером таких датчиков является термоэлемент для обнаружения тепловых излучений. Поскольку кремний обладает достаточно большим коэффициентом Зеебека, на его основе изготавливаются высокочувствительные термоэлектрические детекторы. Эффект Зеебека связан с температурной зависимостью энергии Ферми  $E_F$ , поэтому коэффициент Зеебека для кремния  $n$ -типа можно аппроксимировать функцией от электрического удельного сопротивления в интересующем температурном диапазоне (для датчиков при комнатной температуре):

$$\alpha_a = \frac{mk}{q} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad (5.19)$$

где  $m \approx 2.5$  и  $\rho_0 \approx 5 \cdot 10^{-6}$  Ом · м являются константами;

$k$  – постоянная Больцмана;

$q$  – электрический заряд.



При помощи легирующих добавок получают материалы с коэффициентом Зеебека порядка 0.3 ... 0.6 мВ/К.

В начале XIX века Жан Шарль Атанас Пельтье обнаружил, что при прохождении электрического тока из одного материала в другой в месте их соединения происходит либо выделение, либо поглощение тепла, что зависит от направления тока:

$$dQ_p = \pm p i dt, \quad (5.20)$$

где  $i$  – сила тока;

$t$  – время.

Коэффициент  $p$  имеет размерность напряжения и определяется термоэлектрическими свойствами материала. Следует отметить, что количество тепла не зависит от температуры других соединений.

Эффект Пельтье (рис. 5.11) – это выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока через соединение двух различных металлов. Это явление характерно и для случаев, когда ток поступает от внешних источников и когда он индуцируется в спаяе термопары из-за эффекта Зеебека.



Рис. 5.11. Эффект Пельтье

Эффект Пельтье используется в двух ситуациях: когда надо либо подвести тепло к месту соединения материалов, либо отвести его, что осуществляется изменением направления тока. Это свойство нашло свое применение в устройствах, где требуется осуществлять прецизионный контроль за температурой. Считается, что эффекты Пельтье и Зеебека имеют одинаковую природу. Однако следует хорошо понимать, что тепло Пельтье и Зеебека имеют

одинаковую природу. Однако следует хорошо понимать, что тепло Пельтье и Джоуля отличаются друг от друга. Тепло Пельтье в отличие от джоулева тепла линейно зависит от силы тока (тепло Джоуля выделяется при прохождении электрического тока любого направления через проводник, имеющий конечное сопротивление. Высвобождаемая при этом тепловая энергия пропорциональна квадрату тока:  $P = i^2/R$ , где  $R$  – сопротивление проводника). Величина и направленность тепловой энергии Пельтье не зависит от физической природы соединения двух различных материалов, а полностью определяется их объемными термоэлектрическими свойствами. Эффект Пельтье используется для построения термоэлектрических охладителей, применяемых для снижения температуры детекторов фотонов, работающих в дальнем ИК-диапазоне спектра, а также охлаждаемых зеркальных гигрометров.

Необходимо помнить, что в любом месте схемы, где соединяются два или более различных металла, имеющих разную температуру, всегда возникает термоэлектрический ток.

Для практического использования термопар необходимо знать три основных закона, устанавливающих правила их подключения. Следует подчеркнуть, что интерфейсные электронные схемы всегда должны подсоединяться к двум идентичным проводникам. Эти проводники, как правило, формируют одно из плечей термопарного контура, используемого для подключения измерительного устройства.

**Закон 1.** Явление термоэлектричества характерно только для неоднородных электрических цепей.

Из этого следует, что для получения разности потенциалов Зеебека необходимо использовать неоднородный материал. В случае однородного проводника при любом распределении температуры вдоль его длины результирующее напряжение будет всегда нулевым. Соединение двух разных проводников обеспечивает возникновение термоЭДС.

**Закон 2.** Алгебраическая сумма всех термоЭДС цепи, состоящей из любого количества термопар (соединений разных материалов), будет всегда равна нулю, если все соединения находятся при одинаковой температуре.

Это значит, что в любое плечо термоэлектрического контура можно внести дополнительный материал  $C$ , не боясь изменить результирующее напряжение  $V_1$  при условии, что оба новых соединения будут иметь одинаковую температуру. Здесь нет никаких ограничений на количество внесенных проводников, необходимо только поддерживать одинаковую температуру в местах их подключения. Из этого закона также следует, что термоэлектрические соединения могут выполняться любым способом, даже с использованием промежуточных материалов (например, припоев): сваркой, пайкой, сплавлением и т. д. При этом метод соединения не будет влиять на точность термопар. Из закона 2 вытекает правило введения дополнительных материалов: если известны термоЭДС ( $V_1$  и  $V_2$ ) двух проводников ( $B$  и  $C$ ) при их подсоединении к эталонному проводнику  $A$ , результирующее напряжение при

непосредственном контакте проводников  $B$  и  $C$  будет равно алгебраической сумме термоЭДС  $V_1$  и  $V_2$ .

**Закон 3.** Если два соединения разных материалов, находящихся при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , вырабатывают термоЭДС  $V_2$ , а при температурах  $T_2$  и  $T_3$  результирующая термоЭДС равна  $V_1$ , то при температурах  $T_1$  и  $T_3$  выходное напряжение  $V_3$  определяется суммой двух термоЭДС  $V_1$  и  $V_2$ . Этот закон иногда называется законом промежуточных температур. Он позволяет калибровать термопары в одном температурном диапазоне, а использовать в другом. Из этого закона также следует, что в термоэлектрическую цепь могут быть внесены дополнительные провода без изменения ее точностных характеристик.

На основе этих трех законов может быть построено множество практических схем, применяемых для измерения, например, средней температуры объекта, разности температур между двумя объектами, а также для включения в измерительную цепь детекторов температуры других типов для определения температуры эталонных спаев.

Основные проблемы и возможные пути их практического решения представлены на рис. 5.12–5.30.

Предположим, что у нас есть контакт из железа и константана для измерения температуры (см. рис. 5.12).

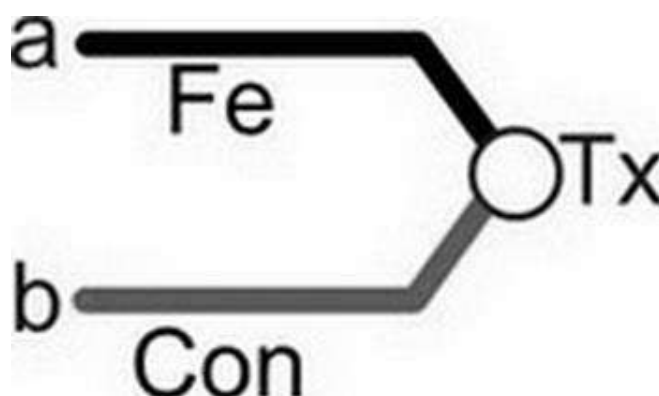


Рис. 5.12. Контакт для измерения температуры

Теоретически  $V_{ab} = f\{T_x - T_{ab}\}$ ,  $T_x$  – неизвестная температура.

Подключим вольтметр, введем соединительные провода (см. рис. 5.13). Таким образом, образуются три неравных соединения, все при неизвестных температурах.

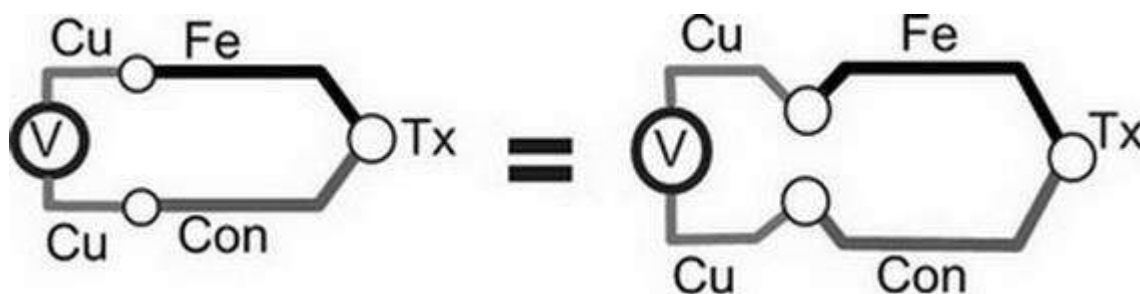


Рис. 5.13. Проблема подключения вольтметра

Проблемы:

- 1) три различные термопары;
- 2) три неизвестные температуры.

Решения:

- 1) добавить противоположную термопару;
- 2) использовать известную опорную температуру.

Добавим противоположную термопару. В результате этого получатся две одинаковые термопары: вверху и внизу кругооборота (см. рис. 5.14). Если поместить обе эти термопары на изотермическом блоке, их напряжения можно будет не учитывать в кругообороте. Тогда получившееся напряжение должно быть пропорционально различию неизвестной температуры и справочной температуры. Следовательно, если справочную температуру обратить в нуль, то получим искомую температуру.

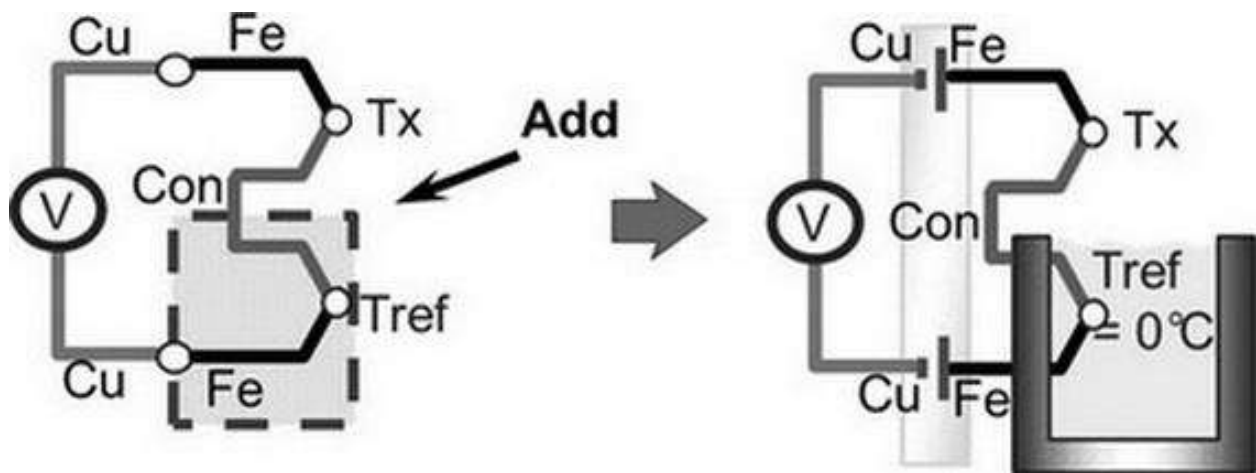


Рис. 5.14. Классический метод создания нулевой температуры (реально только для чисто лабораторных демонстрационных условий)

Температура контролируется с помощью ледяной ванны. Здесь

$$V = F\{T_x - T_{ref}\},$$

где  $T_{ref}$  – является справочной температурой.

Однако при практическом использовании требуется исключить из схемы ледяную ванну. Способ ее устранения – ввод компенсационных проводов, справочная температура которых нам известна (см. рис. 5.15).

Если мы знаем  $T_{ref}$ , мы можем вычислить  $T_x$ .

Для устранения справочной термопары необходимо продлить изотермический блок:  $V_1 - V_2 = 0$  (см. рис. 5.16).

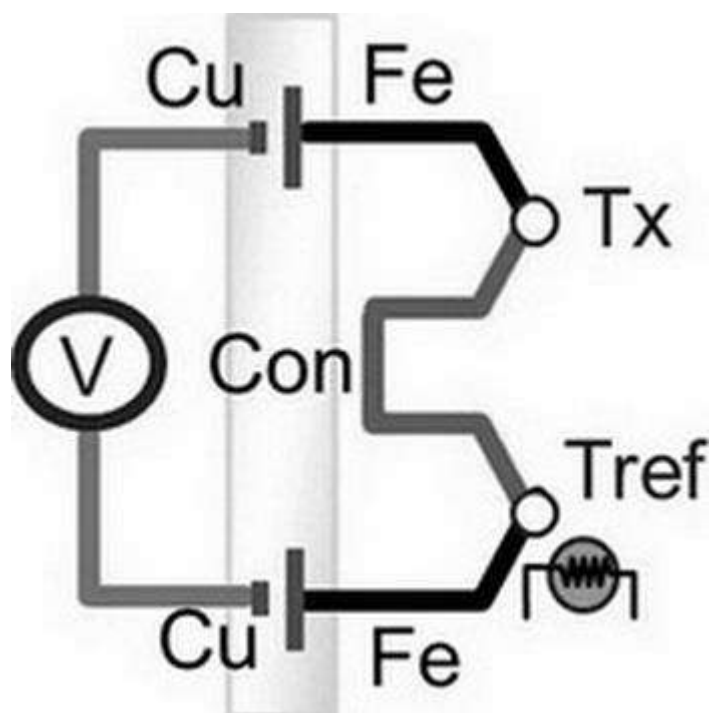


Рис. 5.15. Компенсационные провода – практический случай аналога ледяной ванны

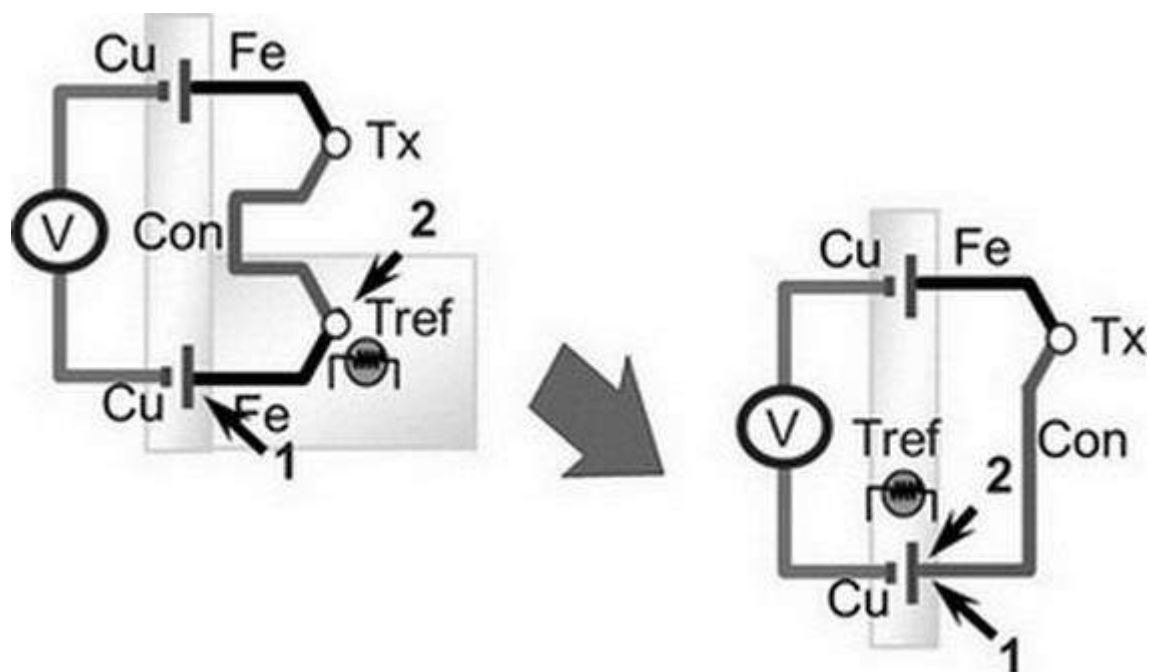


Рис. 5.16. Продление изотермического блока

Таким образом, мы можем использовать медные провода, непосредственно соединяющие вольтметр с изотермическим блоком, а также блок может быть непосредственно связан с отдельными термопарами без использования справочной термопары.

Алгоритм для измерения (см. рис. 5.17):

- 1) измеряем справочную температуру изотермического блока;
- 2) преобразуем полученную температуру в эквивалентное напряжение;
- 3) вычисляем неизвестное напряжение;
- 4) по полученному напряжению находим неизвестную температуру.

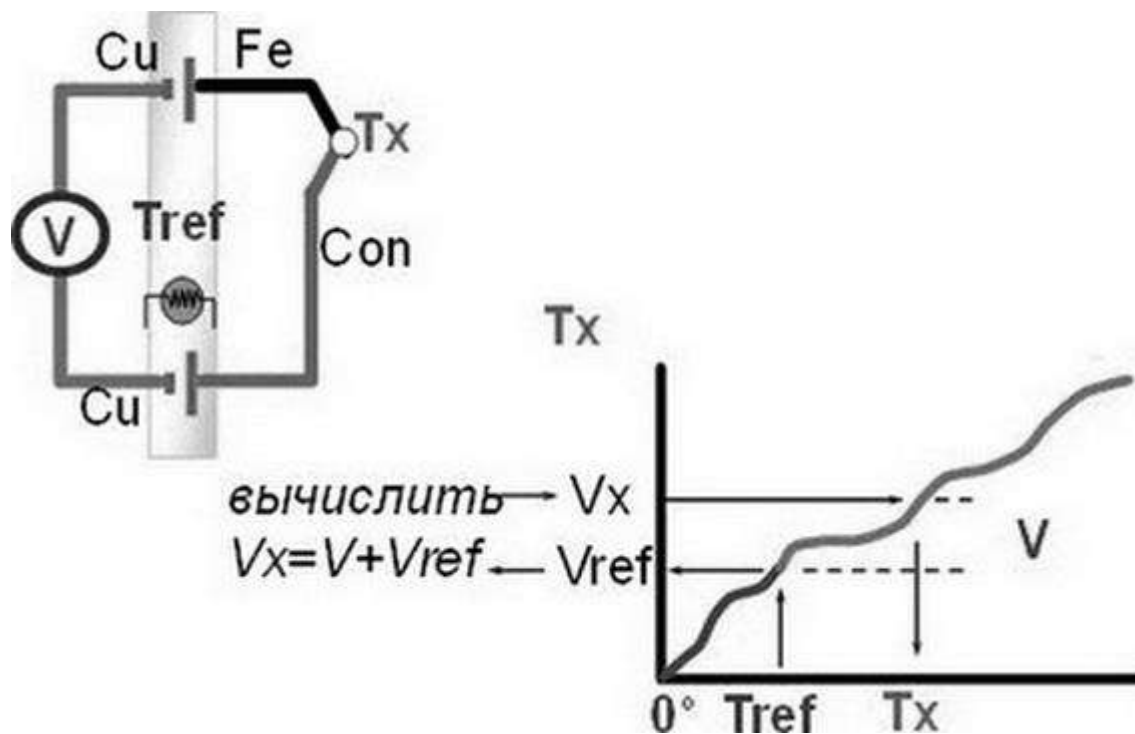


Рис. 5.17. Решение проблемы расширения диапазона измерений  
(вычислительная аппроксимация)

Иногда необходимо расширить длину провода термопары (см. рис. 5.18). У дополнительного провода кривая термопары подобна измеренной, однако здесь может быть возможность ошибки. Поэтому лучше держать этот провод при комнатной температуре.

Шум является ограничивающим фактором при измерениях термопары. Введение соединительных проводов вносит дополнительное сопротивление, что приводит к появлению шумов (см. рис. 5.19).

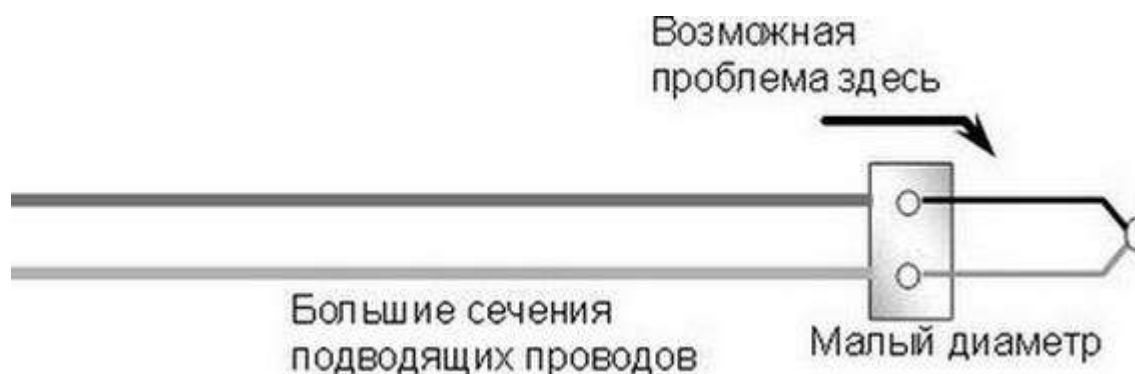


Рис. 5.18. Решение проблемы длинных проводов

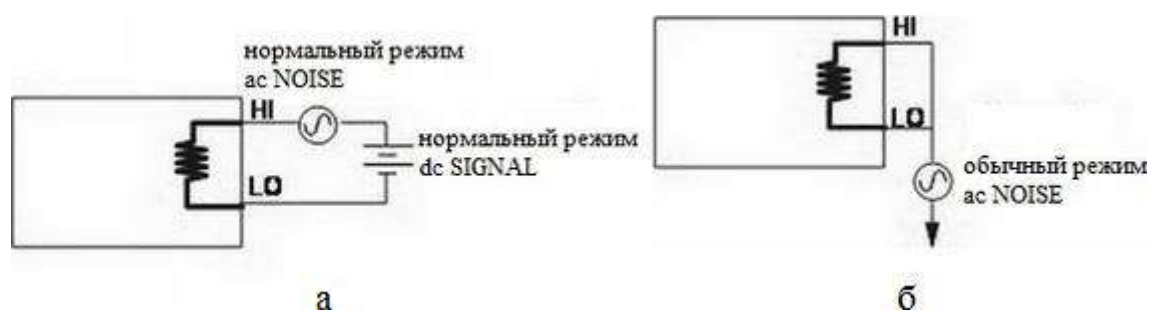


Рис. 5.19. Коммутационные провода как типичный в практике источник шума

Нормальный режим шума может быть вызван магнитным током, когда ток проходит через контур области сигнала (см. рис. 5.20). Электростатический шум может быть получен от связи статического источника с проводником или элементов вдоль проводника.

Электростатический шум: большая площадь поверхности, максимальная статическая связь.

Магнитный шум: большая площадь контура, максимальная магнитная связь, большое сопротивление свинца, небольшая утечка.

Общий текущий режим: максимальный общий режим шума.

Общий режим шума обычно создается с помощью напряжения смещения между двумя основаниями. Общий текущий режим генерируется протеканием через любое сопротивление свинца в ряду с неизвестным. Этот общий текущий режим создает падение напряжения на сопротивлении свинца, что приводит к шумовому сигналу в нормальном режиме.

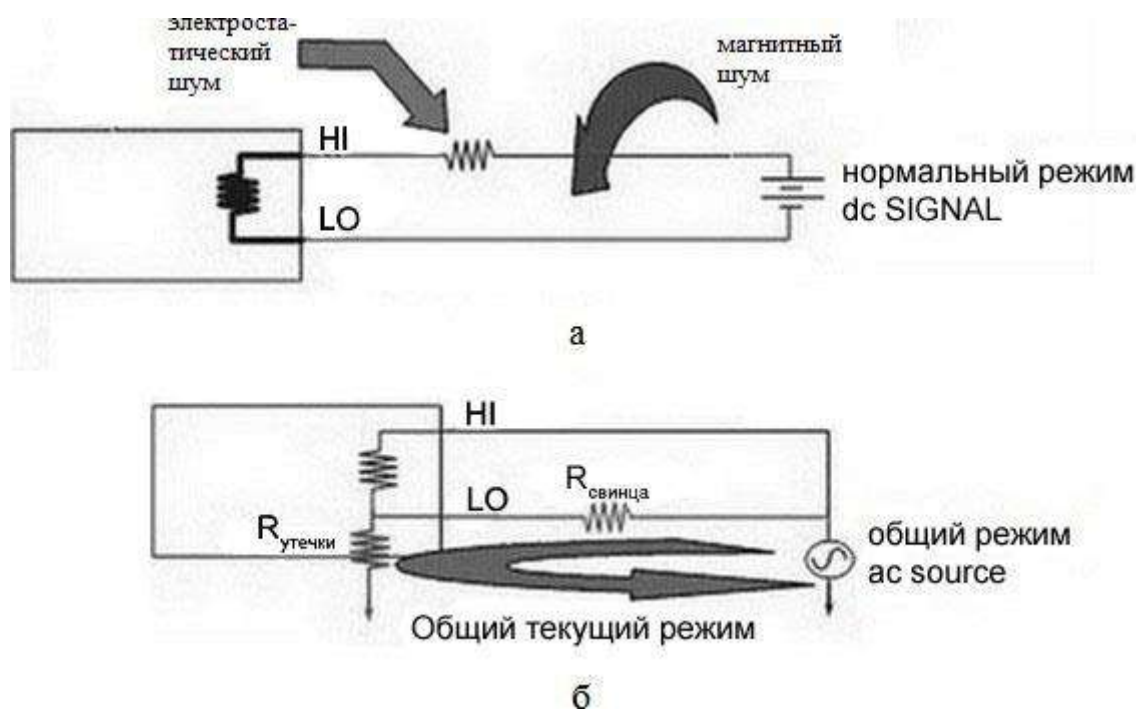


Рис. 5.20. Электронный мусор как источник шума – неизбежность в любых промышленных помещениях с электротехническими устройствами

Самый простой способ избавиться от электростатического шума – использовать экранирование (см. рис. 5.21). Кроме того, можно использовать входной фильтр на вольтметре, однако этот фильтр является причиной увеличения времени отклика на сигнал.

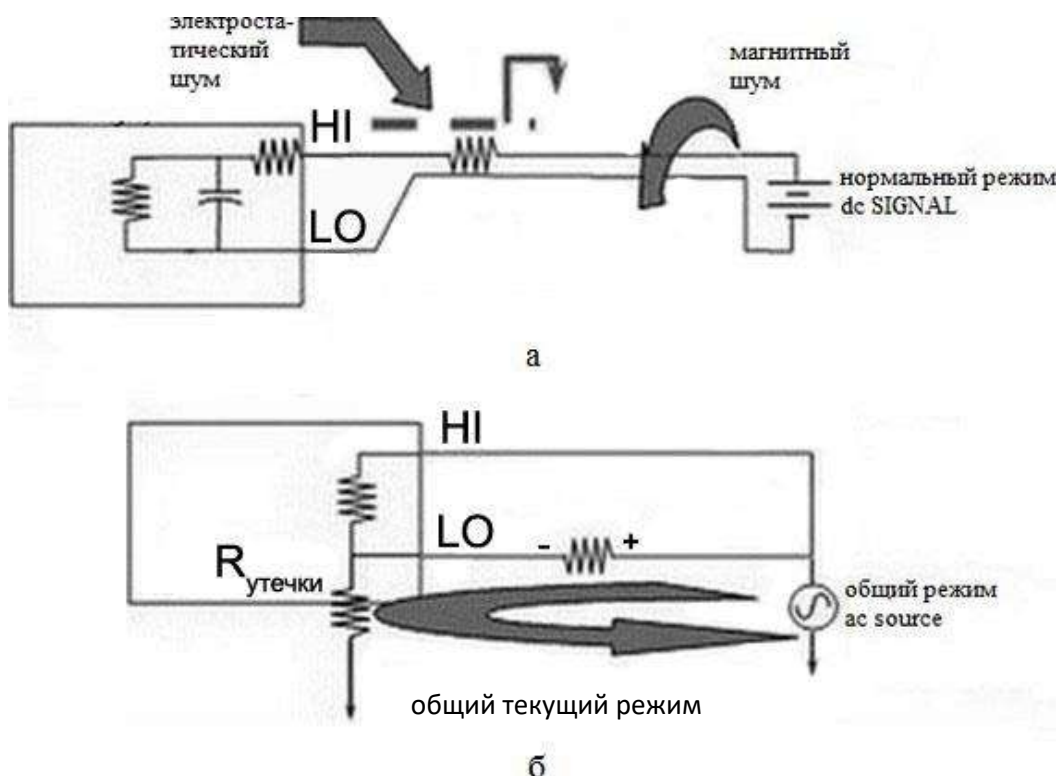


Рис. 5.21. Типовые варианты снижения влияния шумов

Магнитный шум можно уменьшить, сделав площадь петли измерительного провода очень маленькой.

Поверхностные утечки можно уменьшить, сделав сопротивление утечки из-за заземления как можно ближе к бесконечности. Другой распространенный метод заключается в использовании «охраны», которая может эффективно увеличить сопротивление утечки на несколько порядков.

Таким образом, надо уменьшать магнитную связь, сводить к минимуму площадь петли, а также перекручивать провод термопары (см. рис. 5.22). Очевидно, что удаление от сильных полей также поможет уменьшить шум.

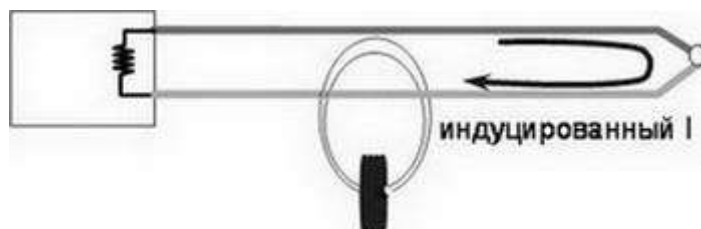


Рис. 5.22. Неправильный монтаж – неизбежный магнитный шум

Скручивание проводов (см. рис. 5.23) будет создавать равные и противоположно индукционные токи в провода термопары. Конечным



результатом является значительно минимизированная связь магнитного шума. Даже при использовании перекрученной пары нужно все равно попытаться минимизировать область и переместить провода термопары подальше от сильного магнитного поля.

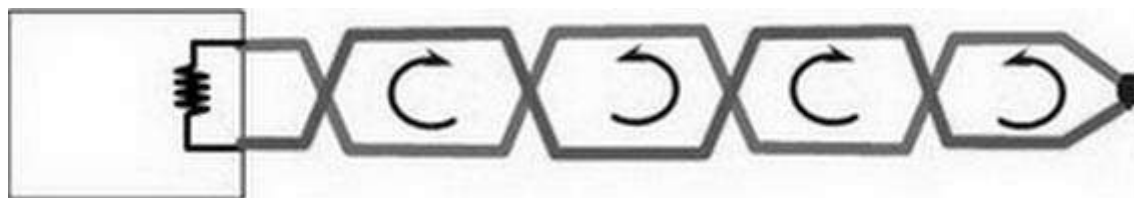


Рис. 5.23. Простые методы минимизации магнитных шумов

Электростатический шум может быть вызван емкостной связью от источника шума переменного тока, например линии электропередачи (см. рис. 5.24). Опять же, сопротивление заземления от вольтметра очень важно. Увеличение этого сопротивления уменьшает величину тока, вызванного электростатической связью.

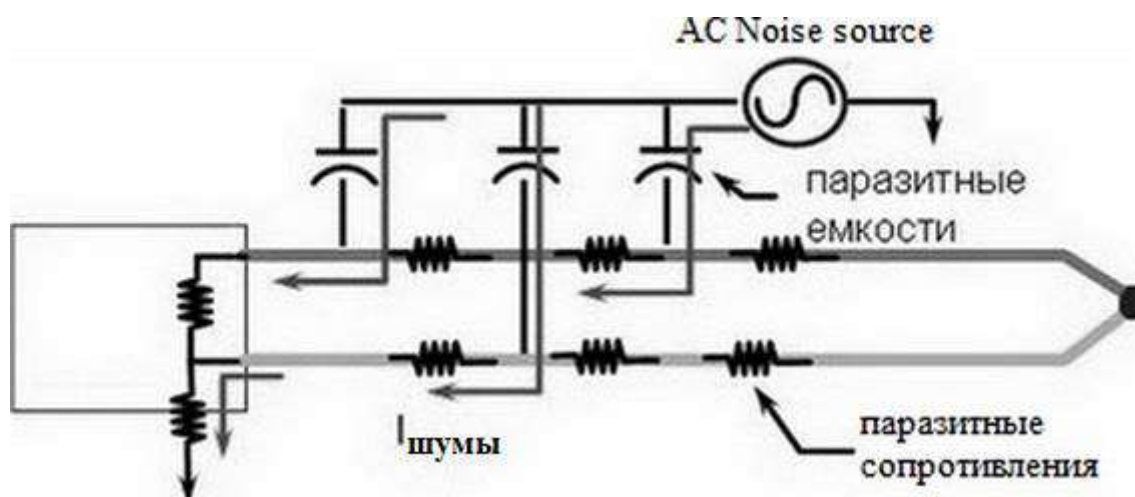


Рис. 5.24. Неграмотный монтаж – неизбежный электростатический шум

Уменьшить электростатическое взаимодействие можно с помощью экранирования (см. рис. 5.25). Только один конец экрана заземлен и электростатические шумы идут через экран, а не через измерительные провода. Экран, не подсоединенный непосредственно к наконечнику с термопарой, не устраняет шум. Для источника шума, соединенного непосредственно с концом экрана, сопротивление утечки на вольтметре должно быть максимально высоким. Это может эффективно осуществляться путем включения охраны на вольтметр и подключением защитного подсоединения к концу экрана термопары.

Как правило, необходимо измерять более одного канала температуры. Способ для измерения нескольких каналов, прикрепленных к различным типам термопар, представлен на рис. 5.26. Один термистор измеряет температуру

эталонного изотермического блока. Каждая термопара подключается последовательно к усилителю изоляции и интегрирующему АЦП. Интегрирующий преобразователь устраняет некоторые линии, связанные с шумом переменного тока, который связан с измерением термопары. Для того чтобы сохранить сопротивление утечки как можно выше, способ изоляции используется между аналоговой измерительной схемой и любой заземленной микропроцессорной или компьютерной схемой.

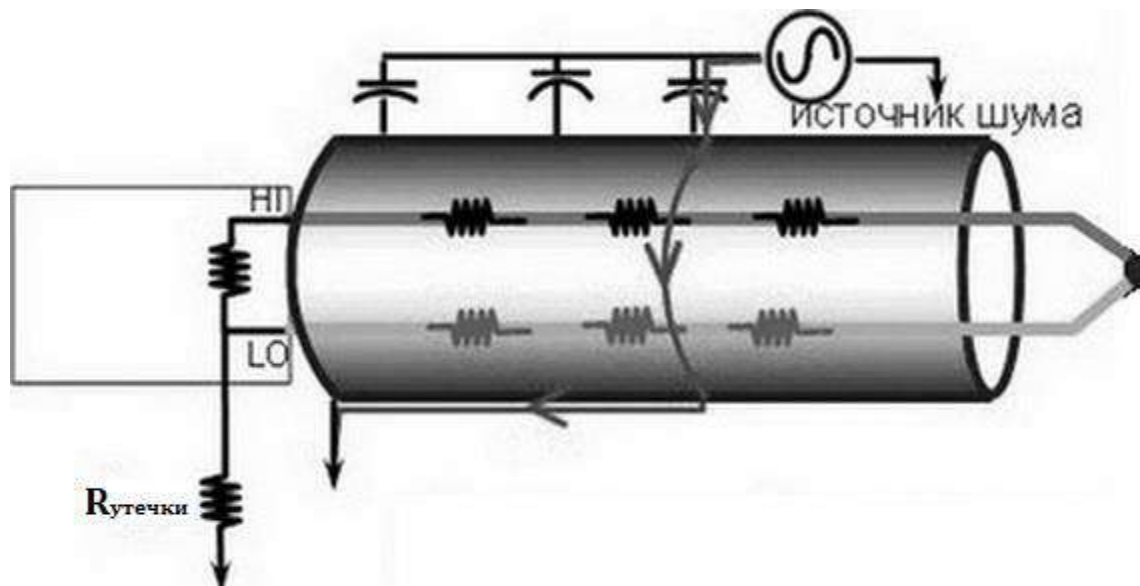


Рис. 5.25. Экранирование как простое решение минимизации электростатических шумов

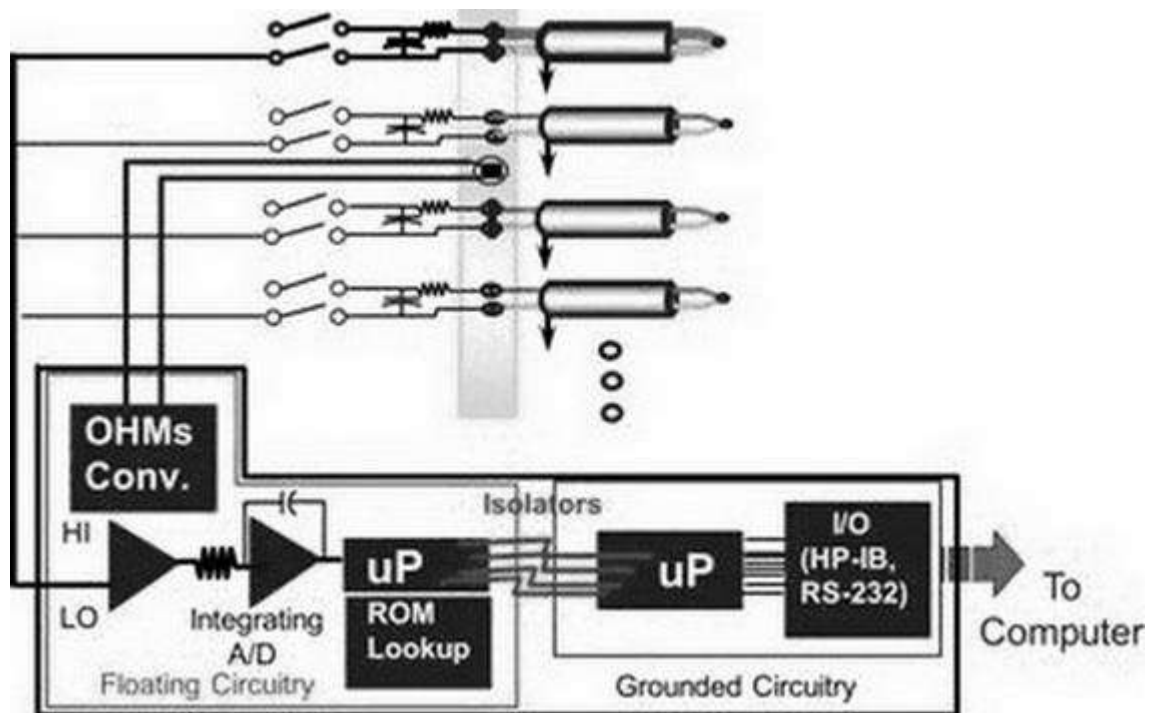


Рис. 5.26. Качественное подавление электростатических шумов

Микропроцессор использует нелинейный алгоритм для преобразования измерений в фактическую температуру для любого типа термопары. В компьютер вводятся эталонная температура и тип термопары, а затем он может выполнить преобразование. Следует также использовать хорошие методы экранирования и скручивания проводов.

Любые капли воды, которые просачиваются в рукав термопары, могут вызвать гальваническое действие, что означает большие смещения напряжения (см. рис. 5.27). С другой стороны, «горячая точка», которая приводит к тому, что провода термопары случайно соприкасаются друг с другом, или вызывает резистивную связь между проводами, может не только указывать на ошибку, но и может указывать температуру в неправильном месте на проводе термопары.

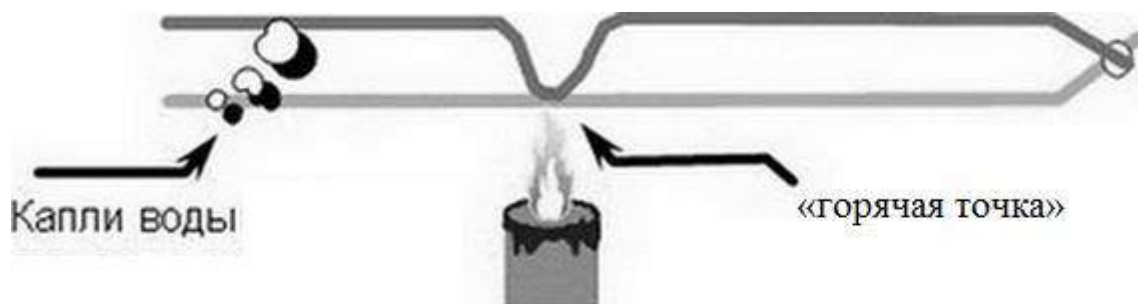


Рис. 5.27. Эксплуатационные источники погрешностей

В любом случае превышение типичного диапазона термопары может создать постоянное смещение. Например, если подвергать термопару типа *J* более чем  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ , постоянный магнитный сдвиг будет происходить внутри структуры термопары.

Настоящие термоэлементы имеют абсолютную точность, но их нужно часто калибровать и использовать дополнительные меры предосторожности.

Нужно убедиться, что термическая масса измеряемого устройства гораздо больше, чем тепловая масса датчика, используемого для измерения. Требуется время для датчика и измеряемого объекта, чтобы достичь своей конечной температуры. Необходимо использовать правильный тип датчика, например поверхностный зонд, для измерения температуры поверхности (см. рис. 5.28).



Рис. 5.28. Тепловой контакт как типичный источник погрешности

Постоянное изменение температуры может привести к упрочнению металла в термопаре и уничтожить его калибровку (см. рис. 5.29).

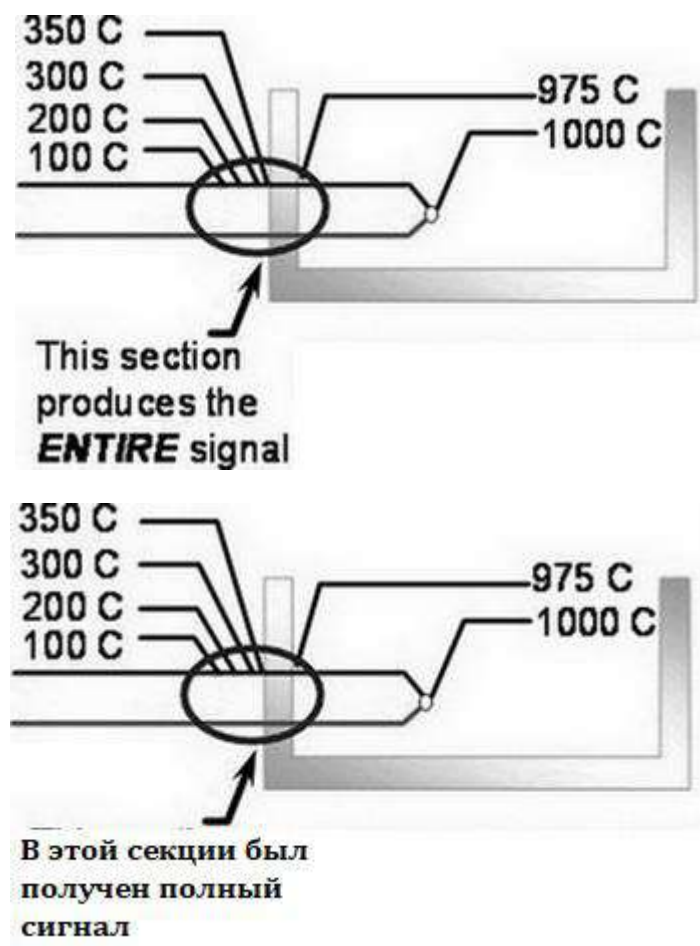


Рис. 5.29. Типичные ошибки при калибровке

Оценка использования термодатчиков в конкретной ситуации представлена на рис. 5.30.

Термопара эффективна в большинстве типов атмосфер и в широком диапазоне температур. Поскольку термопара не нуждается в пропускании через нее измерительного тока, она лишена саморазогрева, что существенно повышает стабильность измерений. Однако она имеет очень малое выходное напряжение, что увеличивает ее чувствительность к магнитному и электростатическому шумам. Она измеряет только относительную температуру, а не абсолютную температуру. Она нелинейного характера и требует либо специальные разъемы, которые построены с того же металла, что и сама термопара, или специальный «изотермический» переход.



Рис. 5.30. Оценка использования термодатчиков в конкретной ситуации

### 5.3. Полупроводниковые датчики температуры на основе *p-n*-перехода

Характеристики полупроводникового *p-n*-перехода в диодах и биполярных транзисторах довольно сильно зависят от температуры. Если прямосмещенный переход соединить с генератором постоянного тока (рис. 5.31), выходное напряжение, снимаемое с него, будет прямо пропорционально изменению его температуры. Достоинством такого датчика является его линейность, что дает возможность проводить его калибровку только по двум точкам для определения наклона прямой и ее пересечения с координатной осью (наклон прямой характеризует чувствительность детектора).

Зависимость тока от напряжения для *p-n*-перехода в диоде можно выразить в следующем виде:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right), \quad (5.21)$$

где  $I_0$  – ток насыщения, величина которого сильно зависит от температуры.

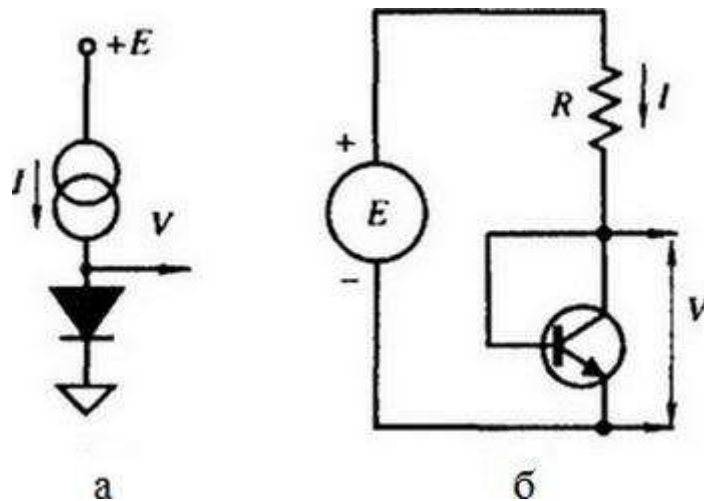


Рис. 5.31. Датчики температуры на основе прямосмещенного  $p$ - $n$ -перехода:

а – диод; б – транзистор, включенный по схеме диода

Можно показать, что зависимость напряжения на переходе от температуры имеет следующий вид:

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{2kT}{q} (\ln K - \ln I), \quad (5.22)$$

где  $E_g$  – ширина зоны запрещенных энергий для кремния при температуре абсолютного нуля (0 К);

$q$  – величина заряда электрона;

$K$  – константа, не зависящая от температуры.

Из уравнения (5.22) видно, что при работе  $p$ - $n$ -перехода в условиях постоянного тока напряжение на нем пропорционально его температуре, а наклон этой зависимости определяется следующим выражением:

$$b = \frac{dV}{dT} - \frac{2k}{q} (\ln K - \ln I). \quad (5.23)$$

Например, для кремниевого перехода, работающего при токе 10 мкА, температурная чувствительность равна  $-2.3$  мВ/°С, а при токе 1 мА, она падает до  $-2.0$  мВ/°С. Любой диод или биполярный транзистор могут быть использованы в качестве датчиков температуры. На рис. 5.31,б показана схема детектора температуры на базе транзистора, в которой вместо источника тока используется источник напряжения и резистор  $R$ . Ток, протекающий через транзистор, можно найти из выражения

$$I = \frac{E - V}{R}. \quad (5.24)$$

Рекомендуется работать при токе 100 мкА. Тогда при  $E = 5$  В и  $K = 0.6$  В сопротивление  $R = 44$  кОм. При увеличении температуры напряжение падает,

что приводит к незначительному увеличению тока. В соответствии с уравнением (5.23) это вызывает некоторое снижение чувствительности, которая выражается в появлении нелинейности. Этой нелинейностью в ряде случаев можно пренебречь, однако иногда при обработке сигналов ее приходится учитывать. Благодаря простоте и очень низкой стоимости, транзисторные (диодные) датчики температуры получили довольно широкое распространение. Детекторы температуры на основе диодов часто встраиваются в кремниевую подложку монолитных датчиков для осуществления температурной компенсации. Например, такие детекторы методом диффузии или ионного легирования формируются на мембранах кремниевых микродатчиков давления для компенсации температурной зависимости пьезорезистивных элементов.

Напряжение на транзисторах всегда пропорционально абсолютной температуре. На основе этого свойства можно реализовать недорогой, но достаточно точный датчик температуры. В этом датчике можно либо непосредственно измерять напряжение, либо предварительно преобразовать напряжение в ток, по величине которого определять температуру. Такой полупроводниковый датчик температуры построен на основе зависимости между напряжением база – эмиттер и коллекторным током биполярного транзистора.

#### 5.4. Детекторы ИК-излучения

Принцип действия детекторов ИК-излучения (основные параметры излучения представлены в табл. 5.1) основан на превращении теплового излучения в тепло с последующим преобразованием уровня тепла или теплового потока в электрический сигнал, для чего применяются традиционные методы тепловых измерений.

Таблица 5.1

Основные параметры ИК-излучения

Область	Длина волны $\lambda$ (мкм)	Волновое число $\nu$ (см <sup>-1</sup> )	Частотный диапазон, Гц
Ближняя	0.78– 2.5	12800– 4000	$3.8 \cdot 10^{14}$ – $1.2 \cdot 10^{14}$
Средняя	2.5– 50	4000– 200	$1.2 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{12}$
Далекая	50– 1000	200– 10	$6 \cdot 10^{12}$ – $30 \cdot 10^{11}$
Наиболее используемая	2.5– 15	4000– 670	$1.2 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{13}$

Этот датчик реагирует только на *изменение* температуры объекта по сравнению с температурой окружающей среды. ИК-волны излучают нагретые тела, молекулы которых движутся интенсивно. Это излучение называют тепловым. Тепло, которое мы ощущаем от солнечного света, огня,



обогревателя, теплого асфальта – все является следствием инфракрасного излучения.

#### 5.4.1. Детекторы излучений на основе термоэлементов

Термоэлементы относятся к классу пассивных ИК-детекторов. Их принцип действия аналогичен принципу термопар. Фактически термоэлемент представляет собой несколько последовательно соединенных термопар. На рис. 5.32 показана схема детектора на основе термоэлемента. Такой датчик состоит из рамы, обладающей сравнительно большой тепловой массой, на которой сформированы «холодные» спаи. Эта рама присоединена либо к термостату с известной температурой, либо к эталонному датчику температуры. На раме крепится тонкая мембрана, обладающая низкой теплоемкостью и теплопроводностью, на поверхности которой располагаются «горячие» спаи. Названия «горячих» и «холодных» спаев являются историческими, напоминающими о том, что термоэлементы произошли от термопар. На самом деле в таких детекторах места соединений редко бывают горячими или холодными.

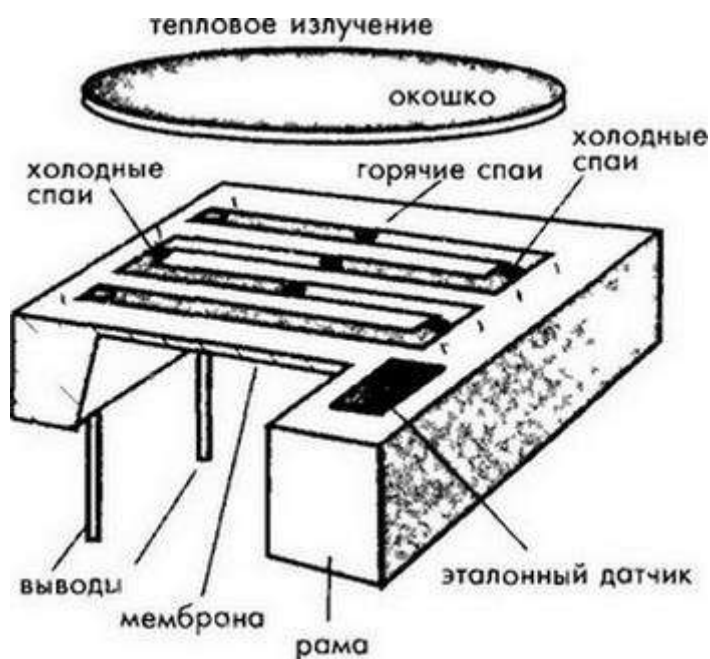


Рис. 5.32. Схема детектора на основе термоэлемента

Принцип действия датчиков на основе термоэлементов ничем не отличается от принципа любого пассивного ИК-детектора. ИК-излучение поглощается или испускается мембраной. При этом происходит изменение ее температуры. Поскольку на мембране расположены «горячие» спаи, разность температур между ними и «холодными» спаями приводит к возникновению термоэлектрического напряжения. Температура мембраны зависит от ее теплоемкости, теплопроводности и мощности ИК-излучения.



Для получения термоэлементов с высокой чувствительностью и низким уровнем шума спаи должны изготавливаться из материалов, обладающих высоким термоэлектрическим коэффициентом  $\alpha$ , низкой теплопроводностью и низким объемным удельным сопротивлением. При этом термоэлектрические коэффициенты пар соединений должны иметь противоположные знаки. К сожалению, большинство металлов, обладающих низким удельным электрическим сопротивлением (золото, медь, серебро), имеет очень низкие термоэлектрические коэффициенты. У металлов с более высоким удельным сопротивлением (висмут и сурьма) термоэлектрические коэффициенты гораздо выше, поэтому именно они используются чаще других при производстве термоэлементов. Легирование этих металлов Se и Te позволяет увеличить термоэлектрический коэффициент до 230 мкВ/К.

Методы изготовления термоэлементов со спаями из металлов могут быть разными, но все они основаны на технологии вакуумного напыления с использованием масок для формирования слоев из термоэлектрических материалов. Количество спаев варьируется от 20 до нескольких сотен. На «горячие» спаи часто наносится абсорбционный слой для улучшения поглощения ИК-излучения. Например, они могут быть зачернены при помощи органических красителей.

Термоэлементы являются устройствами, работающими на постоянном токе, выходной сигнал которых достаточно хорошо отслеживает температуру «горячего» спая. Термоэлемент можно представить в виде источника напряжения, управляемого тепловым потоком, соединенного последовательно с резистором фиксированного номинала. Датчик размещается в герметичном металлическом корпусе с прочным прозрачным окном (из кремния, германия или селенида цинка). Выходное напряжение датчика пропорционально попадающему на него излучению. Диапазон рабочих частот детектора в основном зависит от теплоемкости и теплопроводности мембраны, определяющих тепловую постоянную времени. Датчики на основе термоэлементов обладают довольно низким уровнем шума, который соответствует тепловому шуму эквивалентного сопротивления детектора (т. е. порядка 20 ... 50 кОм).

Выходной сигнал датчиков на основе термоэлементов зависит от разности температур источника теплового излучения и чувствительной поверхности. В настоящее время висмут и сурьму часто заменяют на кремний. Кремниевые термоэлементы обладают большей эффективностью и надежностью. Температурный коэффициент сопротивления и коэффициент чувствительности у кристаллического и поликристаллического кремния имеют очень большие значения, тогда как их объемные удельные сопротивления довольно низкие. Достоинство кремниевых термоэлементов – это возможность применять для их изготовления стандартные технологии производства ИС, что позволяет значительно снижать стоимость таких устройств. При помощи

легирования определенными примесями можно регулировать величину удельного сопротивления и термоэлектрического коэффициента. Однако изменение удельного сопротивления происходит гораздо быстрее, чем меняется термоэлектрический коэффициент. Поэтому для оптимизации соотношения высокая чувствительность – низкий уровень шума необходимо очень аккуратно подбирать концентрацию легирующих компонентов, что является технологически сложной задачей.

#### 5.4.2. Пироэлектрические датчики ИК-излучений

Суть пироэлектрического эффекта сводится к перераспределению зарядов при нагреве кристалла (рис. 5.33).

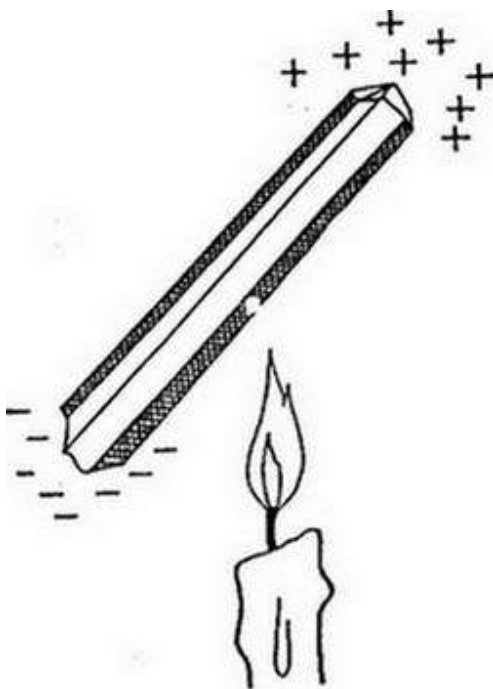


Рис. 5.33. Перераспределение зарядов в пирокристалле

Пироэлектрический эффект возможен лишь в кристаллических структурах, имеющих полярную ось и не имеющих центра симметрии. Примером такого кристалла может служить структура кристалла титаната бария (рис. 5.34).

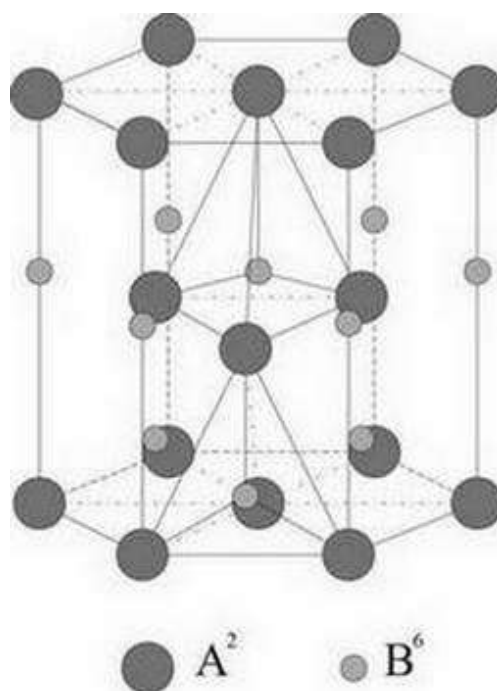


Рис. 5.34. Структура пьезоэлектрического кристалла титаната бария

Решетка титаната бария (элементарная ячейка вюрцита) представляет собой комбинацию двух тетрагональных подрешеток, вставленных друг в друга. При этом центры симметрии этих подрешеток смещены на незначительное расстояние, в результате чего формируется электрический диполь. Тетраэдров обладают элементарным дипольным моментом, так как ион *A* расположен ниже своего геометрического центра. Односторонняя направленность тетраэдров формирует по оси ячейки вюрцита электрический диполь (полярная ось). В итоге температура удлиняет эти диполи и характеризует их расположение. В результате происходит перераспределение зарядов и на поверхностях с разной температурой будут разные электрические потенциалы. То есть мы создали термоЭДС (рис. 5.35). По окончании теплового воздействия либо когда температура перестает изменяться, заряды на поверхности полярного диэлектрика постепенно нейтрализуются ионами из воздуха либо свободными зарядами проводимости.

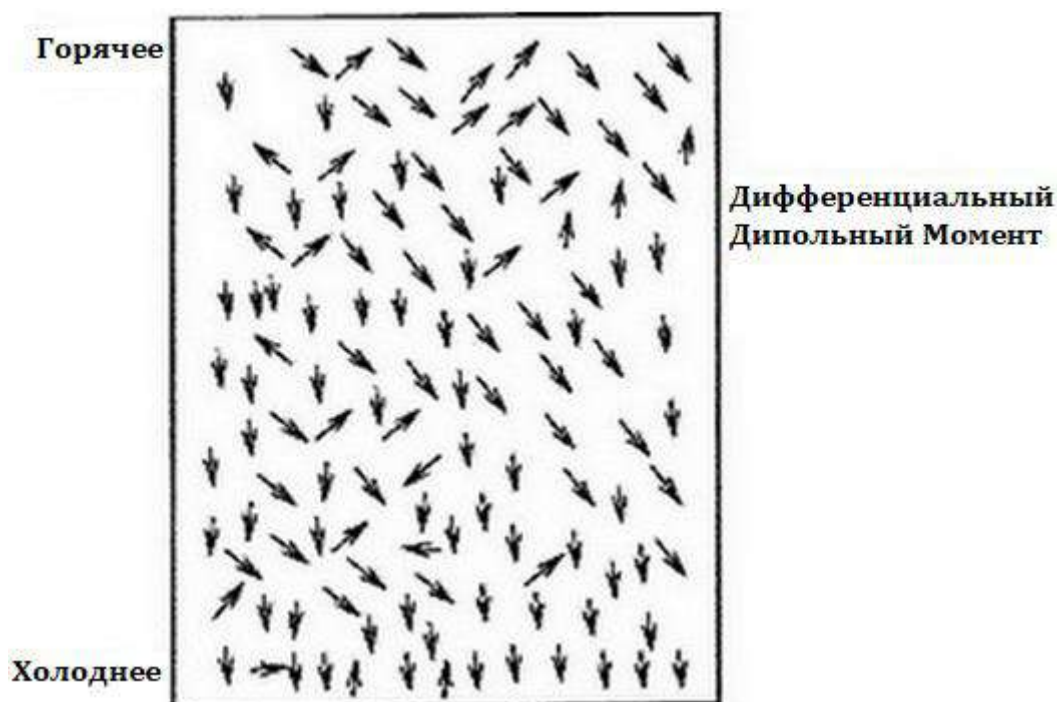


Рис. 5.35. Температурное перераспределение диполей

Кристаллические диэлектрики, обладающие пирозэффектом:

1. Линейные пирозлектрики (турмалин, вюрцит) – поляризация линейно зависит от внешнего электрического поля, ее направление не может быть изменено этим полем. Достоинства: относительно линейная зависимость поляризации от температуры, возможность использования при высоких температурах, направление диполей не меняется со временем (отсутствует эффект «старения»). Недостатки: дороговизна, сложности при задании нужного направления среза кристалла, относительно малый пирозлектрический коэффициент.

2. Сегнетоэлектрики (триглицинсульфат, сегнетова соль, ниобат лития, титанат бария) – направление поляризации может быть изменено (петля гистерезиса). Достоинства: возможность контролировать направление диполей в пространстве, высокие пирозлектрические коэффициенты (особенно вблизи точки Кюри), сравнительная дешевизна и технологичность. Недостатки: нелинейная зависимость поляризации от температуры, дрейф направленности диполей со временем (эффект «старения»).

Существуют другие диэлектрики, обладающие пирозлектрическими свойствами.

Термоэлектреты – диэлектрики, длительное время сохраняющие в объеме или на поверхности электрические заряды и создающие в окружающем пространстве электрическое поле (электреты), поляризация которых изменяется под действием температуры (сегнетоэлектрики, некоторые полимеры – поливинилденфторид, полиакрилонитрил, различные воски, смолы и т. д.). Полимерные термоэлектреты обладают достоинствами: высокая прочность, возможность создавать тонкие пленки вследствие растяжения термоэлектрета,

высокие (в некоторых случаях рекордные) значения пирокoeffициента. Недостатки: сложность при получении поляризованной структуры, сильно выраженный эффект «старения», нелинейная зависимость поляризации от температуры.

При создании специальных граничных условий в любом пьезоэлектрике можно получить линейный пирозлектрический отклик на однородное изменение температуры пьезоэлемента, т. е. получить «искусственный пирозэффект».

Для создания в пьезокристалле эффекта, подобного пирозэффекту, необходимо использовать срез ацентричного кристалла и создавать в нем условия для анизотропного ограничения деформаций (рис. 5.36).

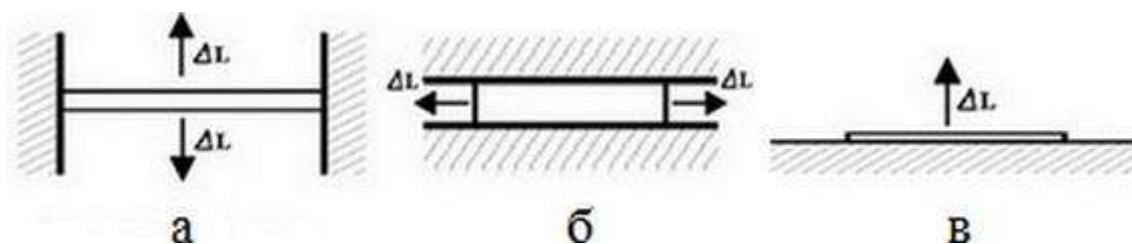


Рис. 5.36. Особенности механического воздействия для реализации искусственного пирозэффекта:

а – запрещены тангенциальные расширения; б – запрещены нормальные деформации; в – разрешены нормальные деформации, но запрещены тангенциальные деформации «планарно зажатые»

Принцип создания искусственного пирозэффекта представлен на рис. 5.37.

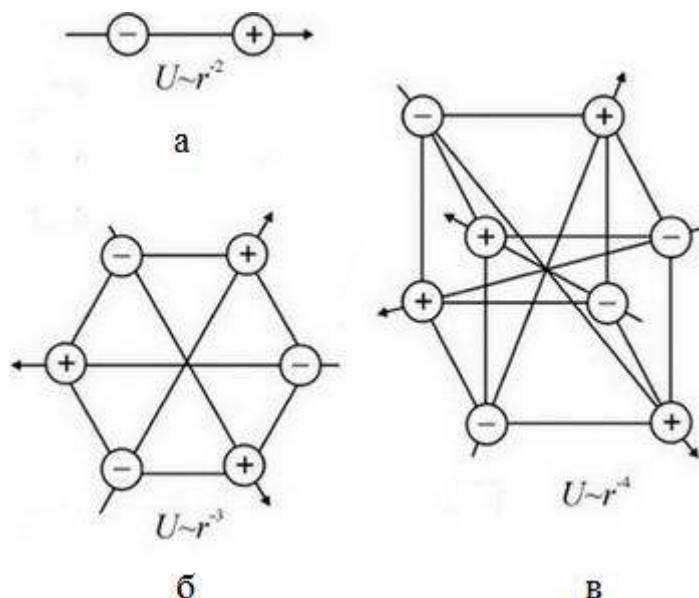


Рис. 5.37. Упрощенное представление создания собственной полярности в нецентросимметричных кристаллах:

а – одномерный мотив диполя в 10 классах полярных пьезоэлектриков; б – двумерный мотив диполя в пьезоэлектриках низшей симметрии; в – трехмерный мотив диполя в пьезоэлектриках высшей симметрии

Принцип работы пиродатчика на рассмотренных выше эффектах представлен на рис. 5.38.

Эквивалентная схема пиродатчика представлена на рис. 5.39.

Принцип расчета пирозффекта сводится к простым зависимостям:

- 1) пирокристалл – это преобразователь тепла в электричество;
- 2) дипольный момент большинства пьезоэлектриков

$$M = \mu Ah,$$

где  $\mu$  – дипольный момент единицы объема;

$h$  – толщина;

- 3) для типичных диэлектриков заряд

$$Q = \mu A;$$

- 4) дипольный момент  $\mu$  меняется с температурой;

- 5) коэффициент пьезоэлектрического заряда

$$P_Q = dP_S/dT,$$

где  $P_S$  – непосредственная поляризация;

- 6) генерируемый заряд

$$\Delta Q = P_Q A \Delta T;$$

7) разность потенциалов на обкладках создает электрическое поле, поэтому пьезоэлектрический коэффициент поля

$$P_V = dE/dT;$$

- 8) генерируемый этим полем заряд

$$\Delta Q_V = P_V h \Delta T;$$

9) соотношение между коэффициентами заряда и поля вытекает из емкости

$$Q = CV,$$

$$P_Q/P_V = dP_S/dE = \varepsilon \varepsilon_0.$$

Электрическая схема замещения пиродатчика представлена на рис. 5.40.

Пироэлектрические датчики также относятся к классу пассивных ИК-детекторов. На рис. 5.41 показана типовая конструкция твердотельного пиродатчика.

Активные структуры датчика размещаются в металлических корпусах ТО-5 или ТО-39, что обеспечивает хорошее экранирование и защиту от окружающей среды. Окошко, пропускающее излучение, обычно изготавливается из кремния (кремний пропускает ИК-лучи).

Внутреннее пространство корпуса часто заполняется сухим 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 используются нихромовые электроды, нанесенные с двух сторон пироэлектрика. Нихром обладает высокой излучающей (поглощающей) способностью, и поэтому электроды из него выполняют сразу две функции: поглощают тепловое излучение и собирают электрические заряды. При использовании таких детекторов в датчиках движения излучение воздействует через окошко на оба пироэлектрических элемента.

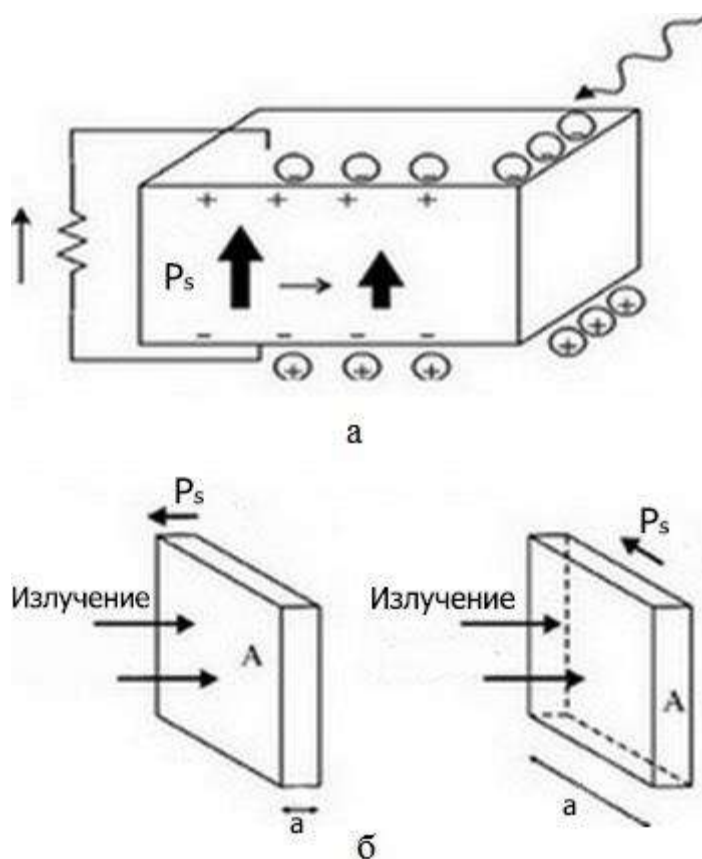


Рис. 5.38. Принцип работы пиродатчика (а) и вариации ориентации пироэлемента относительно излучения (б)

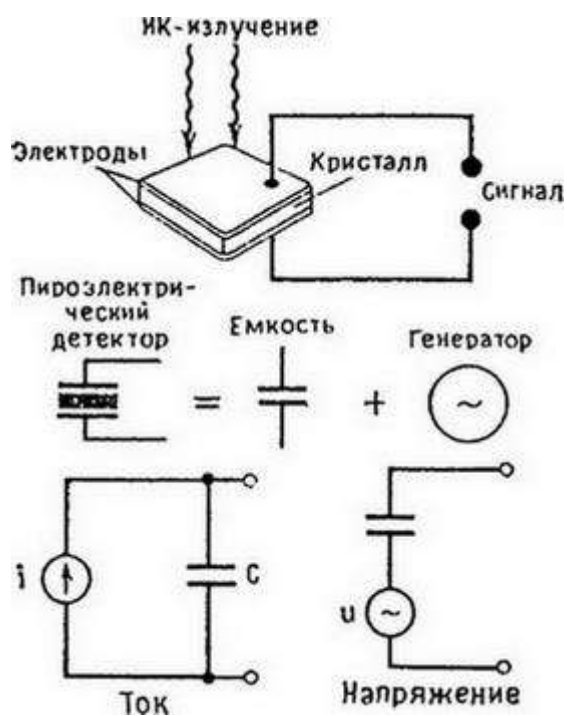


Рис. 5.39. Эквивалентная схема пиродатчика

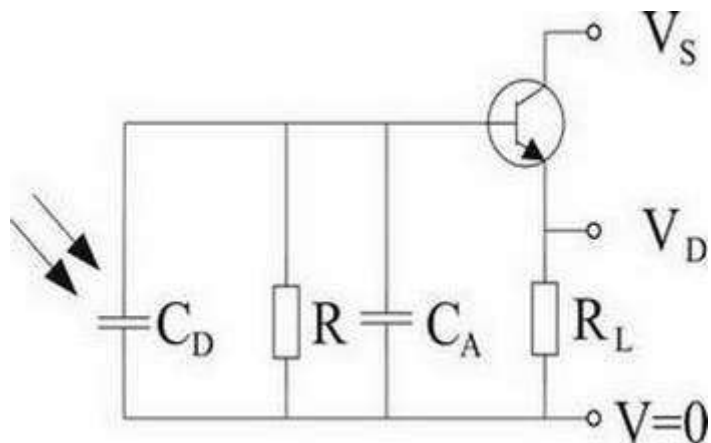


Рис. 5.40. Электрическая схема замещения пиродатчика



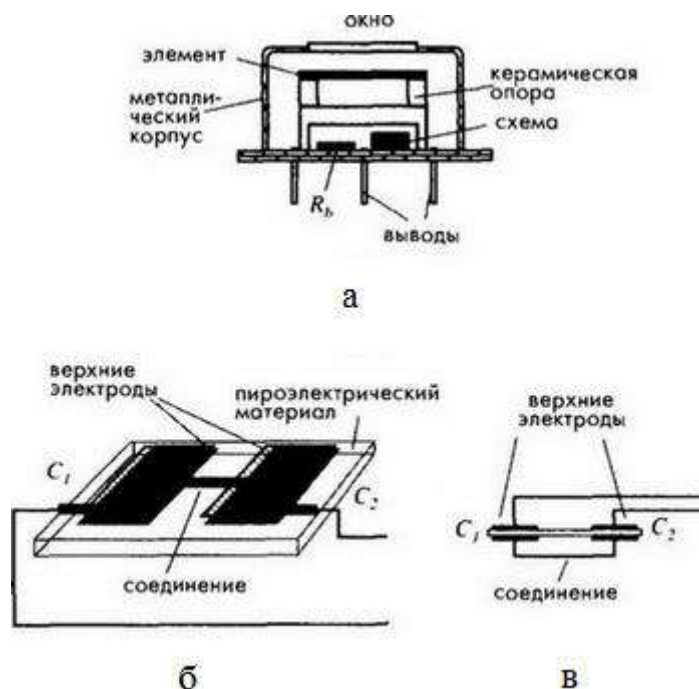


Рис. 5.41. Двойной пироэлектрический датчик:

а – конструкция датчика в металлическом корпусе; б – металлические электроды нанесены на противоположные стороны материала; в – эквивалентная схема двойного элемента

Двойной элемент часто изготавливается на одной подложке из кристаллического материала (см. рис. 5.41, б). Металлические электроды, нанесенные с двух сторон материала, формируют два последовательно соединенных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ . На рис. 5.41, 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, не покрытая электродами, в генерации полезного сигнала не участвует. Пироэлектрические детекторы очень чувствительны к механическим нагрузкам и вибрациям, что очень 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.

Пироэлектрический элемент, состоящий из кристалла пироэлектрика с двумя электродами, можно представить в виде конденсатора, включенного параллельно с резистором утечки. Величина этого резистора составляет порядка  $10^{12} \dots 10^{14}$  Ом. На практике датчик подсоединяется к схеме, в состав которой входит резистор смещения  $R_b$  и преобразователь импеданса (на рис.

5.41, а эта схема так и называется «схема»). В качестве преобразователя может использоваться либо повторитель напряжения (например, на основе полевого транзистора), либо преобразователь ток – напряжение. Повторитель напряжения

(рис. 5.41, а) преобразует высокий выходной импеданс датчика (параллельное соединение емкости  $C$  и резистора  $R_b$ ) в выходное сопротивление повторителя (в нашем примере определяемое резистором 47 кОм и межэлектродной проводимостью транзистора). Достоинствами такой схемы являются простота, невысокая стоимость и низкий уровень шума. Однако у нее есть и два серьезных недостатка. Первый недостаток – зависимость быстродействия схемы от так называемой электрической постоянной времени, которая определяется как произведение емкости датчика  $C$  и резистора смещения  $R_b$ :

$$\tau_e = CR_b. \quad (5.25)$$

Например, если двойной датчик имеет следующие характеристики:  $C = 40$  пФ,  $R_b = 50$  ГОм, его  $\tau_e = 2$  с, что соответствует частотной характеристике системы первого порядка с частотой среза на уровне 3 дБ, равной 0.08 Гц, что является очень низким значением. По этой причине повторители напряжения могут применяться только в тех случаях, когда быстродействие не является определяющим фактором, например при детектировании движения людей. Вторым недостатком схемы является большое напряжение смещения на выходном резисторе. Это напряжение зависит от типа транзистора и температуры. Таким образом, выходное напряжение определяется суммой двух напряжений: напряжения смещения, которое может достигать нескольких вольт, и переменного пироэлектрического напряжения порядка нескольких милливольт. На рис. 5.42 представлены типичные для работы с пиродатчиками преобразователи импеданса.

Преобразователь ток – напряжение является более дорогой, но также и более эффективной схемой подключения пироэлектрического детектора. Его преимущества – лучшее быстродействие и нечувствительность к емкости пироэлектрического элемента. Датчик подключается к инвертирующему входу ОУ, обладающему свойствами так называемой виртуальной земли, поэтому напряжение на этом входе является постоянным и практически равным напряжению на неинвертирующем входе, который в данном случае заземлен. Таким образом, назначение цепи ОС заключается в поддержании напряжения на датчике, равным нулю. Выходное напряжение в этом случае отслеживает электрический ток (поток зарядов), вырабатываемый датчиком. Такое включение датчика обеспечивает очень низкий уровень тока смещения ОУ (порядка 1 Па). Три основных достоинства такой схемы: быстродействие, нечувствительность к емкости датчика и низкое напряжение смещения. Однако преобразователь ток – напряжение имеет не только широкую полосу пропускания, но и обладает более высоким уровнем шума.

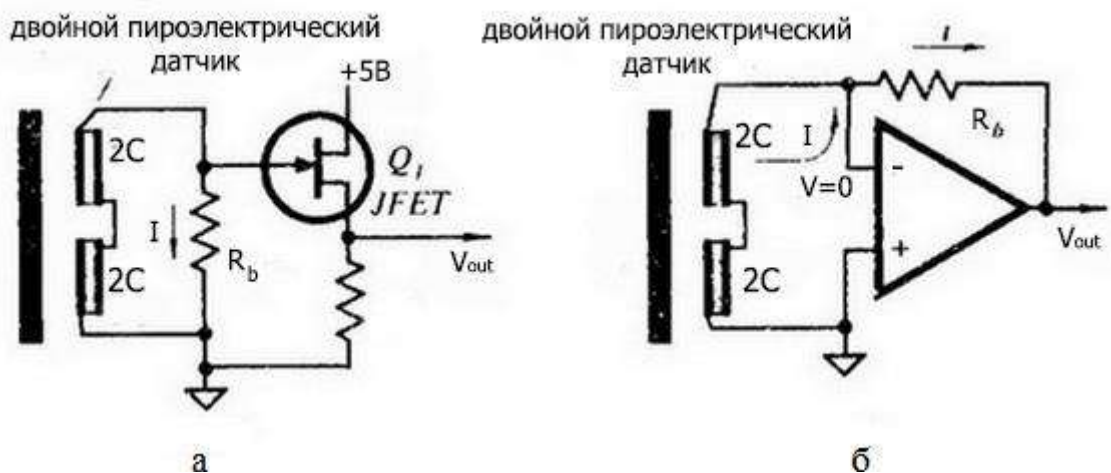


Рис. 5.42. Преобразователи импеданса для пьезоэлектрических датчиков:

а – повторитель напряжений на полевом транзисторе; б – преобразователь ток – напряжение на ОУ

На очень низких частотах обе рассмотренные схемы преобразуют пьезоэлектрический ток  $i_p$  в выходное напряжение, определяемое законом Ома. Например, если  $i_p = 10$  пА, а  $R_b = 50$  ГОм, выходное напряжение составляет 500 мВ. Обе схемы должны обеспечивать во всем температурном диапазоне низкий входной ток смещения  $I_B$ , поэтому предпочтительнее использовать КМОП-транзисторы и ОУ, поскольку их токи смещения составляют порядка 1 пА.

Выходное напряжение повторителя отслеживает напряжение на чувствительном элементе и  $R_b$ . Напряжение на чувствительном элементе в схеме с преобразователем ток – напряжение в отличие от схемы с повторителем всегда поддерживается близким к нулю, а входной импеданс этой схемы имеет очень низкое значение. Другими словами, повторитель напряжений работает как вольтметр, а преобразователь ток – напряжение – как амперметр. Поэтому выходной сигнал преобразователя  $I - V$  имеет очень резкий передний фронт, определяемый паразитной емкостью в цепи резистора  $R_b$ .

Поскольку выходной сигнал пьезоэлектрического датчика пропорционален произведению пьезоэлектрического тока на сопротивление резистора смещения, величина КСН влияет на нелинейность общей передаточной функции и датчика и интерфейсной схемы. Высокоимпедансные резисторы изготавливаются методом нанесения тонкого слоя полупроводниковых красителей на керамическую (либо из оксида алюминия) подложку, обжигания полученной структуры в печи с последующим нанесением на нее защитного покрытия. Такое гидрофобное покрытие толщиной не менее 50 мкм помогает защитить резистор от влаги, поскольку даже очень небольшое количество молекул воды способно окислить

полупроводниковый слой, что приводит к значительному повышению сопротивления и ухудшению долговременной стабильности.

В приложениях, где не требуется высокая точность измерений, например в детекторах движения, резистор смещения может быть заменен на один или два кремниевых диода с нулевым смещением, включенных навстречу друг другу.

На практике при детектировании тепловых излучений, как правило, применяются два типа пирозлектрических датчиков, рассчитанных для работы в разных условиях:

1. Быстродействующие детекторы, измеряющие излучения с высокой интенсивностью, но очень короткой длительностью лазерных импульсов (порядка нескольких наносекунд), повторяющихся с частотой порядка 1 МГц. Такие датчики, обладающие высокой линейностью, изготавливаются из монокристаллических пирозлектриков, таких как танталат лития. В состав таких детекторов обычно входят теплоотводы.

2. Чувствительные детекторы, определяющие тепловые излучения с низкой интенсивностью, но изменяющиеся со сравнительно низкой скоростью. Примеры – ИК-термометры и датчики движения. Для обеспечения высокой чувствительности такие датчики должны иметь хорошую тепловую связь с источником излучений. Для этих целей используются такие оптические устройства, как фокусирующие линзы и волноводы. При этом необходимо минимизировать передачу тепла в окружающую среду, для чего требуется очень внимательно проектировать корпуса таких детекторов. При соответствующем проектировании чувствительность данных детекторов приближается к чувствительности квантовых датчиков с криогенным охлаждением. Серийно выпускаемые пирозлектрические датчики изготавливаются на основе монокристаллов, таких как  $\text{LiTaO}_3$  и TGS, или на базе PZT-керамики. Иногда применяются и пленки из PVDF, поскольку они дают возможность реализовать датчики, обладающие высоким пространственным разрешением и хорошим быстродействием.

В итоге применение пирозлектрических датчиков в реальной схеме можно представить в соответствии с рис. 5.43.



Рис. 5.43. Реальная схема с использованием пиродатчика

Области применения пиродатчиков – энергетика (определение дефектных контактов в линиях силовых сетей), медицина (определение злокачественных опухолей, вызывающих экзотермические эффекты), военное дело (обнаружение нахождения и передвижения биологических объектов в любое время суток и при любых погодных условиях).

### 5.4.3. Болометры

Болометры – это миниатюрные резистивные детекторы температуры или термисторы, а также другие типы температурочувствительных резисторов, используемых в основном для измерения среднеквадратичных значений интенсивности электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне от среднего ИК до микроволнового диапазона. Области применения таких детекторов включают определение ИК-температуры, построение тепловых образов, измерение локальных полей при высокой мощности излучений, тестирование СВЧ-устройств. Они используются в устройствах управления лучами ВЧ-антенн, проверки мощных военных СВЧ-систем, в медицинских приборах и т. д. Принцип действия всех болометров основан на фундаментальном физическом законе, связывающем величину поглощенного электромагнитного сигнала с рассеиваемой мощностью. Резистивные детекторы выполняют следующие преобразования:

1. Электромагнитное излучение воздействует на резистор. Резистор поглощает это излучение и конвертирует его в тепло.
2. Тепло повышает температуру резистора. Она становится выше температуры окружающей среды.
3. Увеличение температуры уменьшает омическое сопротивление болометра.

Увеличение температуры соответствует мощности электромагнитного излучения. Это изменение температуры может быть измерено любым подходящим методом.

Традиционно болометры изготавливаются в виде миниатюрных термисторов, подвешенных на крошечных проводках. Другим популярным методом реализации болометров является использование технологии нанесения тонких пленок (обычно нихромовых). Во многих современных болометрах терморезистивный тонкопленочный материал наносится на микромембрану из кремния или стекла, поддерживаемую рамкой из кремния. Широкое распространение такого подхода объясняется популярностью датчиков, использующих матрицы для получения тепловых изображений объектов. В случаях, где не требуется высокая чувствительность, а стоимость не является критичным фактором, часто применяются болометры с платиновыми пленками. Платина обладает хотя и невысоким, но хорошо воспроизводимым ТКС.

Платиновая пленка толщиной 500 Å наносится на поверхность тонкой стеклянной мембраны. Для придания этому слою требуемой формы применяются фотолитографические методы. Мембрана закрепляется над полостью, вытравленной в кремниевой подложке, при помощи крошечных проводников, т. е. мембрана как бы плавает над этой V-образной полостью. Такой способ крепления помогает свести до минимума тепловую связь чувствительного элемента с подложкой. В качестве температурочувствительных элементов могут применяться резисторы на основе поликремния, германия, TaNO и т. д. При выборе материалов для болометров всегда необходимо учитывать их совместимость со стандартными КМОП-технологиями для того, чтобы была возможность выпускать монолитные устройства, включающие в себя сами детекторы и их интерфейсные схемы. Одним из приемлемых сочетаний является поликремний с нанесенными на него пленками из германия.

Слабым местом при разработке болометров всегда является обеспечение хорошей тепловой изоляции чувствительного элемента от опорной конструкции, соединительных проводов и интерфейсных схем, поскольку тепловые потери могут привести к возникновению больших погрешностей и снижению чувствительности. Одним из методов решения этой проблемы является исключение всех металлических проводников и измерение температуры болометра при помощи оптоволоконной техники. Миниатюрный болометр подвешивается на конце оптического зонда, и его температура измеряется флуоресцентнооптическим датчиком температуры, а другой аналогичный оптический датчик определяет окружающую температуру для нахождения  $\Delta T$ .

## 6. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ

Ускорение – динамическая характеристика объекта. Оно возникает только после приложения к объекту какой-либо силы (второй закон Ньютона). Перемещение объекта, его скорость и ускорение (рис. 6.1) являются взаимосвязанными физическими величинами: скорость – это первая производная от перемещения, ускорение – его вторая производная. Однако взять производную сильно зашумленного сигнала практически невозможно, поскольку это приводит к возникновению очень больших погрешностей даже при использовании очень сложных схем обработки. Поэтому скорость и ускорение объектов нельзя определять по данным, полученным при помощи детекторов перемещений, и для этого необходимо применять специальные схемы. Как правило, в низкочастотной области (в полосе частот порядка 1 Гц) довольно хорошую точность измерений обеспечивают датчики положения и перемещения объектов. В зоне средних частот (менее 1 кГц) уже предпочтительнее использовать датчики скорости. Тогда как на высоких частотах, когда перемещения соизмеримы с уровнем шума, применяются датчики ускорения.

$$g = 9.780327(1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) - 3.086 \cdot 10^{-6}h,$$

$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Скорость движения может быть либо угловой, либо линейной. Она показывает насколько быстро объект движется по прямой линии или насколько быстро он вращается. Поэтому чувствительный элемент, реагирующий на перемещение объекта, является одной из компонент многих датчиков скорости и ускорения.

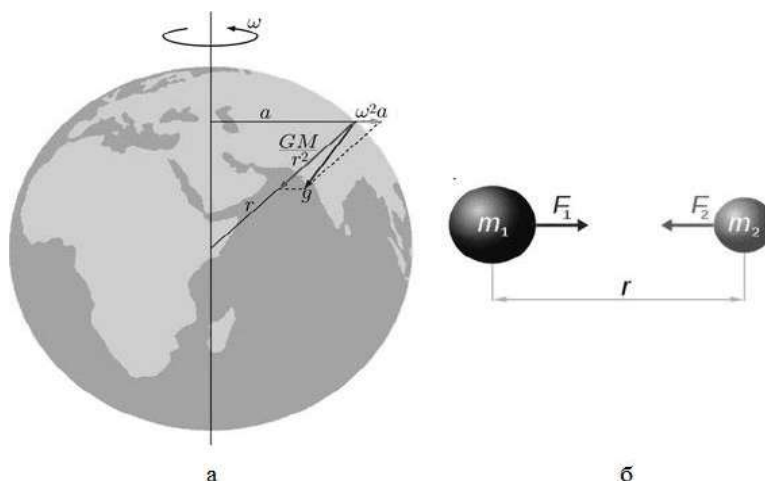


Рис. 6.1. Две компоненты ускорения свободного падения на Земле  $g$

Гравитационная компонента (в первом приближении, если считать Землю однородным шаром, равная  $GM/r^2$ ) и центробежная, равная  $\omega^2 a$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $a$  – расстояние до земной оси

### 6.1. Акселерометры

Акселерометр – это прибор, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Все акселерометры имеют три основных элемента (рис. 6.2) – инерционную массу, которая может перемещаться относительно корпуса акселерометра; пружину (торсион), которая соединяет массу с корпусом; демпфер, который рассеивает энергию и предотвращает систему пружина – масса от бесконечных колебаний. Движение инерционной массы отстает от движения корпуса. И, независимо от конструкции датчика ускорений, его основная цель заключается в детектировании перемещения этой массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому другой составной частью всех акселерометров является детектор перемещений, способный измерять микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений.

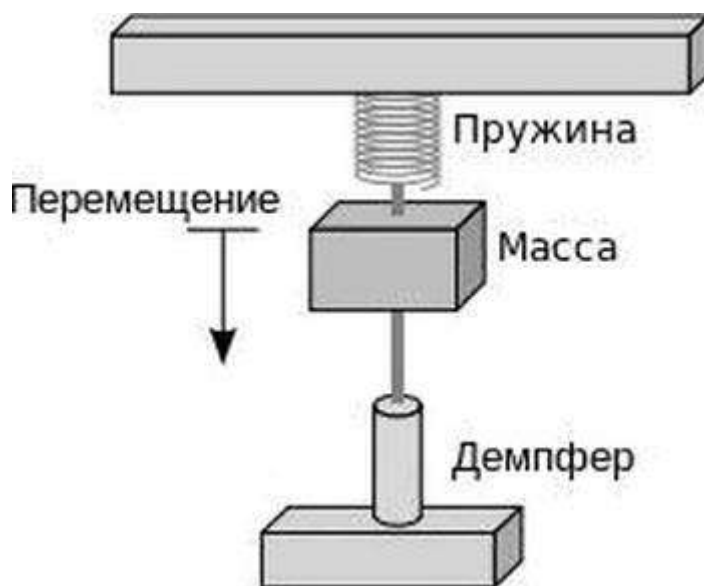


Рис. 6.2. Акселерометр

На рис. 6.3 представлена система, находящаяся в двух состояниях:

1) в состоянии равновесия:

$$F_{\text{упр}} = k\Delta x,$$

$$k\Delta x = mg;$$

2) при движении корпуса вверх:



$$k\Delta x = m(g + a),$$

$$a = \frac{k\Delta x}{m} - g.$$

Преобразование перемещений в электрический сигнал возможно несколькими методами. Наиболее востребованными являются емкостные, пьезорезистивные и пьезоэлектрические методы.

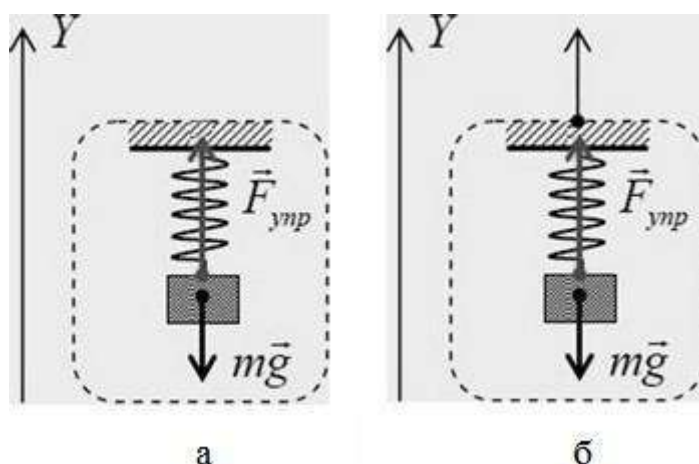


Рис. 6.3. Поведение системы инерционная масса – корпус в состоянии покоя (а) и в движении (б)

### 6.1.1. Емкостной акселерометр

Емкостной датчик ускорений состоит по крайней мере из двух пластин: стационарной, часто соединенной с корпусом, и свободно перемещающейся внутри корпуса, к которой подсоединена инерционная масса. Эти пластины формируют плоские электроды конденсатора, величина емкости которого зависит от расстояния  $d$  между ними, а значит, и от ускорения движения, испытываемого датчиком. Принципиальная схема такого акселерометра представлена на рис. 6.4.

Твердотельная реализация такого акселерометра представлена на рис. 6.5.

Максимальное перемещение, определяемое емкостным акселерометром, редко превышает 20 мкм. Следовательно, в таких датчиках всегда необходимо компенсировать дрейф различных параметров, а также подавлять всевозможные помехи. Поэтому обычно акселерометры имеют дифференциальную структуру, для чего в их состав вводится дополнительный конденсатор, емкость которого должна быть близка к емкости основного конденсатора. При этом напряжения на конденсаторы подаются со сдвигом фаз  $180^\circ$ . Тогда величина ускорения датчика будет пропорциональна разности значений емкостей конденсаторов.

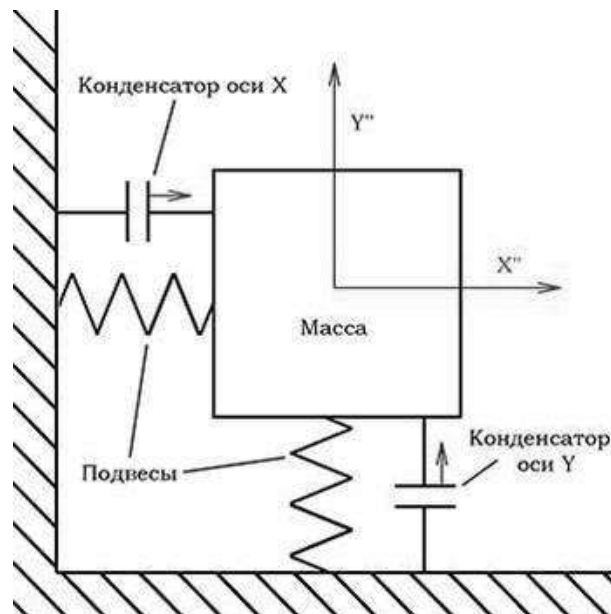


Рис. 6.4. Принципиальная схема емкостного акселерометра

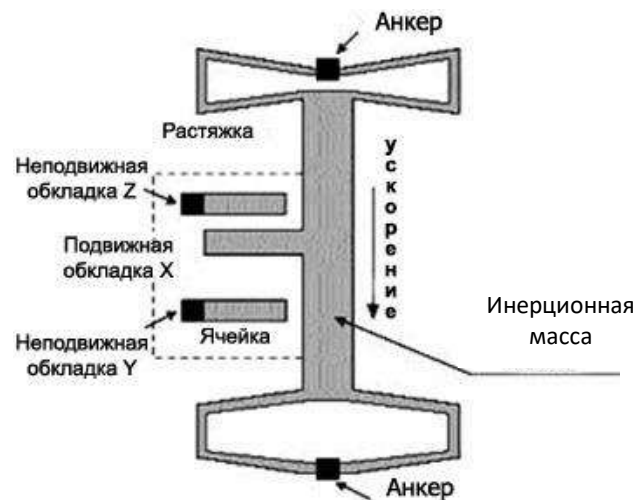


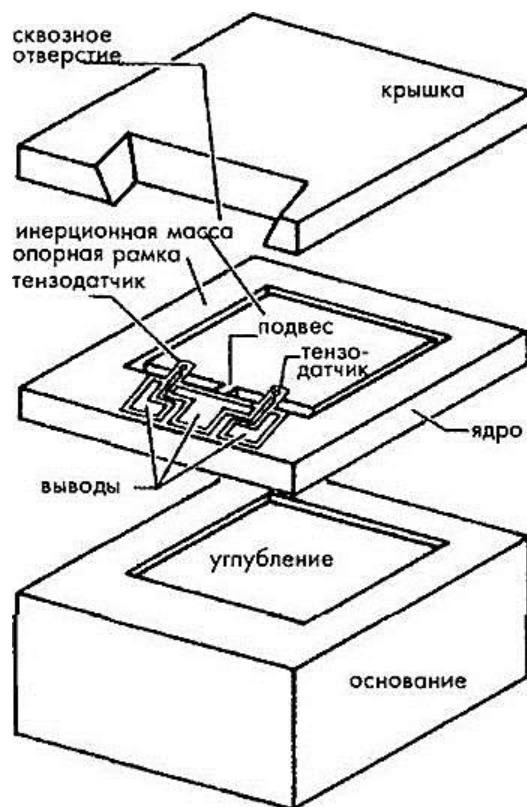
Рис. 6.5. Твердотельная реализация емкостного акселерометра

### 6.1.2. Пьезорезистивные акселерометры

Чувствительным элементом таких акселерометров является тензодатчик, измеряющий деформацию пружин, поддерживающих инерционную массу. Эта деформация пропорциональна величине и скорости перемещения массы, а значит, и ускорению. Такие устройства могут измерять ускорения в широком частотном диапазоне: 0 ... 13 кГц. При разработке соответствующей конструкции пьезорезистивные акселерометры выдерживают перегрузку, равную  $10\,000g$ . Естественно, что интервал измерений таких датчиков гораздо уже:  $\pm 1000g$  с погрешностью менее 1 %. Параметр перегрузки является критическим для многих применений. Акселерометры, реализованные из дискретных компонентов, обладающих индивидуальными температурными характеристиками, страдают от высокой температурной зависимости

выходного напряжения, что требует тщательного подбора параметров составных элементов каждого датчика. Эта проблема решается при интегральном изготовлении таких датчиков методами кремниевых микротехнологий.

На рис. 6.6 показан твердотельный акселерометр, обладающий широким динамическим диапазоном. Микродатчик состоит из трех слоев кремния. Внутренний слой (ядро) включает в себя инерционную массу и упругую подвесную конструкцию. Масса крепится внутри рамки, сформированной методом травления, на подвесе, с двух сторон которого расположены тензодатчики, детектирующие движение массы. Внешние два слоя (крышка и основание), защищают подвижные части от загрязнений. В обоих внешних слоях методами глубокого селективного изотропного химического травления сделаны углубления, позволяющие инерционной массе свободно перемещаться. У этого датчика есть несколько важных особенностей. Одна из них заключается в том, что чувствительная ось датчика лежит в плоскости подложки, тогда как в большинстве конструкций аналогичных датчиков она перпендикулярна подложке. Изготовление всех компонентов датчика на одном кремниевом кристалле позволяет реализовать надежную и прочную механическую конструкцию. Когда ускорение действует на чувствительную ось, инерционная масса поворачивается вокруг подвеса. При этом один из тензодатчиков испытывает сжатие, а второй – растяжение. Поскольку тензодатчики имеют небольшую длину, даже маленькие перемещения вызывают большие изменения сопротивления. Для балансировки мостовой схемы в том же кремниевом кристалле сформированы пять подстроечных резисторов.



### 6.1.3. Пьезоэлектрические акселерометры

Пьезоэлектрический эффект (не путать с пьезорезистивным) часто лежит в основе датчиков вибраций и ускорений. Этот эффект заключается в прямом преобразовании механической энергии в электрическую в материалах, имеющих кристаллическую структуру, включающую в себя электрические диполи.

Прямой пьезоэлектрический эффект заключается в образовании в кристаллическом материале электрических зарядов при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула  $\text{SiO}_2$ ), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например в поливинилиденфториде.

В элементарную монокристаллическую ячейку кварца входят три атома кремния и шесть атомов кислорода. Каждый атом кремния обладает четырьмя положительными зарядами, а каждая пара атомов кислорода – четырьмя отрицательными (по два на атом). Поэтому без приложения механических напряжений кварцевая ячейка является электрически нейтральной. Когда к кристаллу вдоль оси  $X$ ,  $Y$ , или  $Z$  прикладывается внешняя сила, кристаллическая решетка деформируется. Сдавливающая сила сдвигает атомы кристалла таким образом, что положительный атом кремния перемещается на одну сторону решетки, а отрицательно заряженная пара атомов кислорода – на другую. В результате чего вдоль оси наблюдается перераспределение зарядов. Если кристалл растянуть вдоль оси, то в результате деформации растяжения заряды перераспределятся вдоль оси в противоположном направлении. Эта упрощенная модель показывает, как на поверхности кристаллического материала могут образовываться электрические заряды в ответ на приложенное механическое воздействие.

Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах от среза прикрепляют электроды. Построенный таким образом пьезоэлектрический датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выравнивают заряды вдоль всей их поверхности, лишая конденсатор избирательности. Однако, если форму электродов усложнить, можно определить точное место приложения внешней силы, детектируя сигналы с конкретных электродов. Пьезоэлектрический эффект является обратимым физическим явлением. Это означает, что приложенное к кристаллу электрическое напряжение приводит к появлению механической деформации. Если разместить на кристалле несколько электродов и на одну пару из них подать напряжение, на остальных парах электродов будет накапливаться заряд, сформированный из-за возникшей деформации. Такой

прием достаточно широко применяется в разных типах пьезоэлектрических преобразователей.

Существует целый класс керамических пьезодатчиков, например из титаната цирконата свинца (PZT). Они изготавливаются по порошковой технологии (измельчение компонентов до мелкодисперсного порошка, добавление биндера (органика – целлюлоза, воск, пиццин) для формирования эластичной массы, прессование нужной формы, мягкая сушка и дальнейшее прокаливание). В процессе прокаливания, проходящего при достаточно высокой температуре, биндер испаряется, а компоненты полученной смеси вступают в реакцию друг с другом, образуя керамику.

Кристаллиты (кристаллические элементарные ячейки) могут рассматриваться как электрические диполи. В некоторых материалах, таких как кварц, эти ячейки обычно ориентированы вдоль осей кристалла, поэтому такие структуры обладают достаточно высокой чувствительностью к механическому напряжению. В других материалах диполи ориентированы произвольным образом, и для того, чтобы такие структуры проявили свои пьезоэлектрические свойства, их необходимо предварительно поляризовать. Существует несколько технологий поляризации.

Самой популярной из них считается тепловая поляризация, которая состоит из следующих этапов:

1. Кристаллический материал (керамическая или полимерная пленка), в котором диполи имеют произвольную ориентацию, медленно нагревается до температуры, не превышающей точку Кюри. Некоторые типы материалов (например, пленки из поливинилиденфторида (PVDF)) необходимо привести в напряженное состояние. Высокая температура приводит к возбуждению диполей, что помогает сравнительно легко их переориентировать в требуемом направлении.

2. Материалы помещаются в сильное электрическое поле в котором диполи выстраиваются вдоль силовых линий. При этом не происходит полного выравнивания и многие диполи отклоняются от направления поля. Однако достигается статистически преобладающая одинаковая ориентация диполей.

3. Материал охлаждается при одновременном воздействии на него электрического поля.

4. После охлаждения материала до требуемой температуры электрическое поле устраняется и процесс поляризации считается законченным. Пока поляризованный материал находится при температуре ниже температуры Кюри, он сохраняет свои поляризационные свойства, диполи поддерживают ориентацию, полученную при высокой температуре в электрическом поле.

После поляризации кристаллы становятся постоянно поляризованными, но электрически заряженными они остаются только сравнительно короткий промежуток времени. Это объясняется тем, что в окружающей среде всегда находится много заряженных ионов, а также достаточное количество свободных носителей зарядов содержится внутри самого материала, которые

могут передвигаться под действием электрического поля, и эти свободные заряды, приближаясь к соответствующим концам диполей, нейтрализуют их. Поэтому вскоре поляризованный пьезоматериал становится электрически разряженным и удерживается в этом состоянии в течение всего времени, пока находится в стационарных условиях. Однако, когда к материалу прикладывается механическое напряжение или он начинает обдуваться ветром, состояние равновесия нарушается и на поверхности пьезоэлектрика вновь появляется электрический заряд. Если механическое напряжение будет поддерживаться некоторое время, заряды в материале опять нейтрализуются за счет внутренних утечек. Таким образом, можно сделать вывод, что пьезоэлектрические сенсоры являются чувствительными только к изменениям тензоусилий, а не к их постоянному уровню. Другими словами, пьезоэлектрические датчики – это устройства переменного, а не постоянного тока.

Направленная чувствительность пьезоэлектриков зависит от температуры. Для некоторых материалов (например, кварца) чувствительность падает с ростом температуры со скоростью  $0.016\%/^{\circ}\text{C}$ . Для других пьезоэлектриков, таких как пленки PVDF, и керамики при температурах до  $40^{\circ}\text{C}$  коэффициенты уменьшаются, а при более высоких температурах – растут. В настоящее время самыми популярными материалами для изготовления пьезоэлектрических датчиков являются разные типы керамики.

Пьезоэлектрические элементы могут использоваться либо в форме монокристалла, либо в виде многослойной структуры, в которой отдельные пластины соединяются вместе при помощи электродов, размещенных между ними. Варианты пьезоэффекта в пьезоэлектрическом акселерометре представлены на рис. 6.7.

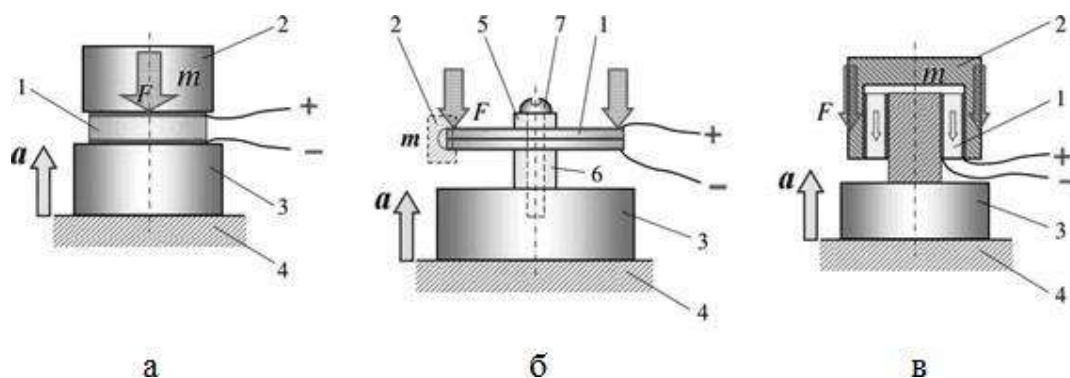


Рис. 6.7. Варианты пьезоэффекта в пьезоэлектрическом акселерометре:

- а – сжатие – растяжение (компрессионный); б – изгибный; в – сдвиговый;  
 1 – пьезоэлемент; 2 – инерционный элемент; 3 – основание; 4 – контролируемый объект;  
 5, 6 – опора; 7 – винт

Эти датчики работают в частотном диапазоне  $2\text{ Гц} \dots 5\text{ кГц}$ . Они также обладают хорошим подавлением внеосевых шумов, высокой линейностью и широким температурным диапазоном (до  $120^{\circ}\text{C}$ ). В качестве чувствительных

элементов применяются кварцевые кристаллы, вырезанные по определенной кристаллографической ориентации (индексы Миллера  $hkl$ ), титанат бария, титанат цирконат свинца (PZT) и метаниобат свинца. Кристалл располагается между кожухом и инерционной массой, на которую действует сила, пропорциональная ускорению. Микродатчики обычно реализуются из кремния.

Такой датчик имеет размер чувствительного элемента около 10 мкм. Применяется в сверхточных комбинированных датчиках ускорения. Амплитудно-частотная характеристика датчика представлена на рис. 6.8.

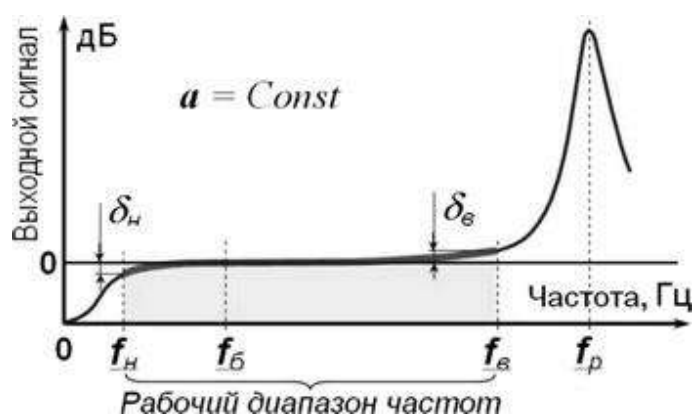


Рис. 6.8. Амплитудно-частотная характеристика пьезоэлектрического акселерометра

Поскольку кремний не обладает пьезоэлектрическими свойствами, при формировании интегрированного микродатчика на кремниевую консольную балку наносится тонкая пленка из титаната свинца. Для улучшения частотных характеристик пьезоэлектрический сигнал усиливается при помощи преобразователей заряд – напряжение или ток – напряжение, встроенных в один и тот же корпус с пьезоэлектрическим кристаллом.

#### 6.1.4. Тепловые акселерометры

Тепловой акселерометр, как и любой другой датчик ускорений, состоит из инерционной массы, подвешенной на тонкой консольной балке, расположенной рядом с теплоотводящей пластиной или между двух теплоотводящих пластин (рис. 6.9). Масса и балка изготовлены методами микротехнологий. Пространство между ними заполнено теплопроводящим газом. Масса нагревается при помощи встроенного нагревателя до заданной температуры  $T_1$ . Когда ускорения нет, между массой и теплоотводами устанавливается тепловое равновесие: количество тепла  $q_1$  и  $q_2$ , переданное пластинам через газ, пропорционально расстояниям  $M_1$  и  $M_2$ .

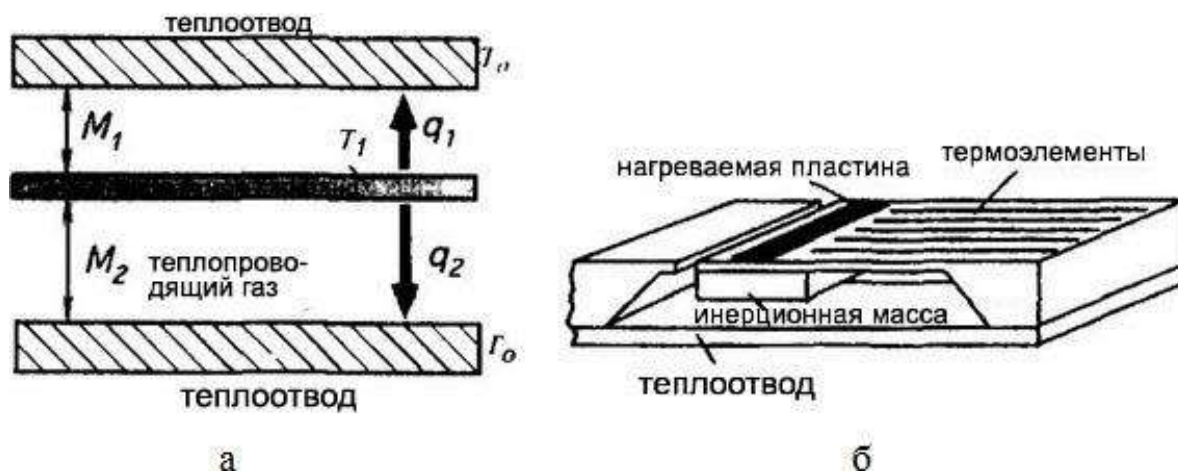


Рис. 6.9. Тепловой акселерометр:

а – поперечное сечение нагреваемой части; б – устройство датчика

Температура в любой точке консольной балки, на которой закреплена инерционная масса, зависит от расстояния между ней и опорой  $x$ , а также от величины зазоров от нее до теплоотводов.

Для измерения температуры на балке формируется детектор температуры, в качестве которого могут выступать интегрированные в балку диоды или нанесенные на ее поверхность последовательно соединенные термопары. Эта температура, преобразованная в электрический сигнал, и является мерой величины ускорения. Чувствительность тепловых акселерометров (порядка 1 % от изменения выходного сигнала, отнесенного к ускорению) несколько ниже, чем у датчиков ускорений емкостного и пьезоэлектрического типов, однако они менее подвержены влиянию температурных изменений окружающей среды, а также электромагнитных и электростатических помех.

### 6.1.5. Акселерометры с нагреваемым газом

Данный акселерометр использует в качестве инерционной массы газ. Акселерометр изготовлен на КМОП-кристалле и является двухосевым измерителем ускорений. В акселерометрах с нагреваемым газом источником внешней силы является ускорение. Такие датчики определяют внутренние изменения в процессах теплопередачи в замкнутом объеме газа. Датчик функционально эквивалентен традиционным акселерометрам с инерционной массой. В данном случае в роли инерционной массы выступает неравномерно нагретый газ. Такая инерционная масса обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной твердотельной массой. Главным достоинством является высокий уровень допустимых перегрузок (до 50 000g), что значительно повышает их надежность.

Датчик состоит из пластины, примыкающей к герметичной полости, заполненной газом. В пластине вытравлено углубление. В центре кремниевой пластины над углублением подвешен нагреватель. На пластине установлены



четыре датчика температуры; термоэлементы из алюминия и поликремния расположены на одинаковом расстоянии с четырех сторон от нагревателя (две оси). Термоэлементы определяют только градиент температур, поэтому левый и правый термоэлемент можно считать одним, где левая часть соответствует холодному спаю, а правая – горячему (принцип действия термопар). В данном случае такой термоэлемент используется вместо термопар с единственной целью – увеличить электрический выходной сигнал. Другая пара термоэлементов применяется для определения градиента температур вдоль оси.

При нулевом ускорении распределение температуры внутри полости с газом симметрично относительно источника тепла, поэтому все четыре термоэлемента детектируют одинаковую температуру, что приводит к нулевому выходному напряжению в каждой паре чувствительных элементов. Нагреватель разогревается до температуры выше температуры окружающей среды (обычно около 200 °C). Когда на газ не действуют никакие силы, температура имеет конусообразное распределение вокруг нагревателя, при этом температура левого термоэлемента  $T_1$  равна температуре  $T_2$  правого. Ускорение акселерометра в любом из направлений из-за конвекционной теплопередачи изменит температурный профиль, который станет несимметричным. Под действием ускорения теплые молекулы газа смещаются к правому термоэлементу, передавая ему часть своей энергии. В результате этого температуры, а следовательно, и выходные напряжения правого и левого термоэлементов перестанут быть равными ( $T_1 < T_2$ ). Разница температур  $\Delta T$ , а значит, и напряжение между выходами термоэлементов прямо пропорциональна ускорению. В данной конструкции существует два идентичных измерительных канала, позволяющих определять ускорение вдоль оси  $X$  и оси  $Y$ .

Такие датчики способны измерять ускорения в диапазоне  $\pm 1 \dots \pm 100g$ . Такие акселерометры могут определять и динамическое ускорение (например, вибрации), и статическое ускорение (например, ускорение свободного падения). Аналоговые выходные напряжения снимаются с чипа как в абсолютном, так и в относительном виде. Абсолютное выходное напряжение не зависит от приложенного напряжения, а относительное – пропорционально ему. Типичный шумовой порог для датчиков ниже  $10^{-3} g/Гц$ , что позволяет на очень низких частотах измерять субмиллиметровые сигналы ускорения. Быстродействие датчика, т. е. его способность детектировать быстрые изменения ускорения, зависит от его конструкции. Спад частотной характеристики для типового датчика происходит на частоте около 30 Гц. Этот диапазон может быть расширен до 160 Гц с применением компенсационных схем.

Следует отметить, что чувствительность выходного сигнала датчика меняется при изменении окружающей температуры. Для компенсации этого изменения в чип акселерометра встраивается температурный датчик (резистивный детектор температуры или кремниевый диод).

## 6.2. Гироскопы

Гироскоп является самым популярным навигационным датчиком (пожалуй, он уступает первенство только компасу). Во многих ситуациях, когда геомагнитное поле либо отсутствует (как в космосе), либо по каким-либо причинам сильно нарушено, гироскоп является необходимым устройством для определения положения движущихся объектов (транспортных средств). Гироскоп в переводе означает «хранитель направления». *Гироскоп* – устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации объекта (на котором оно установлено) относительно инерциальной системы отсчета. Простейший пример гироскопа – юла (волчок). На рис. 6.10 представлен классический гироскоп.

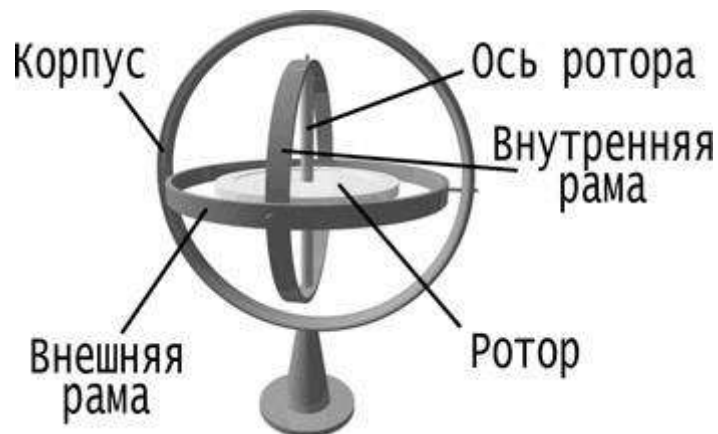


Рис. 6.10. Классический гироскоп

По принципу построения упругого подвеса все известные типы микромеханических гироскопов можно классифицировать по числу измерительных осей (однокомпонентные, двухкомпонентные), по типу подвеса (механические – контактные, неконтактные), по типу привода – обратного преобразователя (магнитоэлектрические, электромагнитные, пьезоэлектрические), по наличию обратной связи (прямые, компенсационные), по числу инерционных масс (одномассовые, многомассовые), по виду перемещения инерционных масс (LL-тип – с поступательными движениями по обеим степеням свободы, LR-тип – с вращательным движением по одной степени свободы и с поступательным, RR-тип – с вращательным движением чувствительного элемента по обеим степеням свободы). Мы сознательно привели столь подробную классификацию существующих гироскопов, чтобы показать их большое разнообразие в реальной технике, которое невозможно полностью описать в данном учебном пособии. Поэтому мы ограничимся описанием только наиболее востребованных гироскопов, которые можно изготовить микроэлектронными технологиями. Принцип действия гироскопов основан на фундаментальном законе сохранения угловых моментов: *«В произвольной замкнутой системе (в которой отсутствуют внешние силы) сумма угловых*

моментов всех ее частей относительно любой неподвижной точки пространства всегда остается постоянной».

### 6.2.1. Роторный гироскоп

Механический гироскоп состоит из массивного диска, свободно поворачивающегося вокруг основной оси вращения (рис. 6.11), которая удерживается рамкой, способной вращаться относительно одной или двух осей. Таким образом, в зависимости от количества осей вращения гироскопы имеют одну или две степени свободы. Следует отметить, что:

1) основная ось вращения свободного гироскопа не будет менять свое пространственное положение, при отсутствии внешних сил, действующих на нее;

2) при соответствующем изготовлении крутящий момент гироскопа (его выходной сигнал) пропорционален его угловой скорости движения вокруг оси, перпендикулярной основной оси вращения.

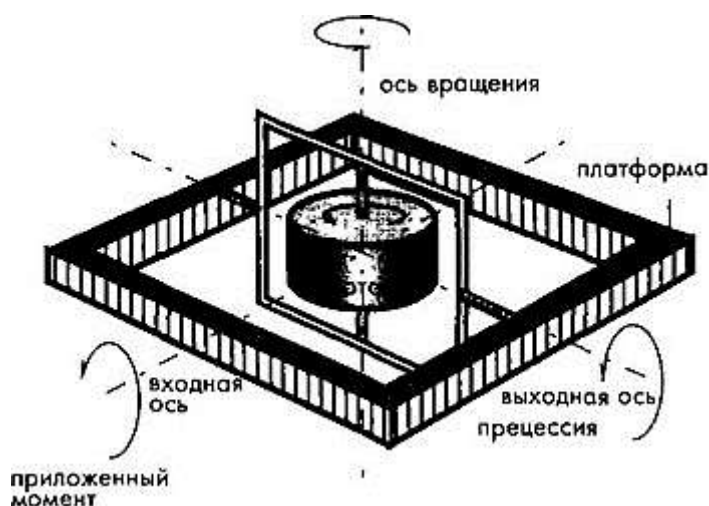


Рис. 6.11. Механический гироскоп с одной степенью свободы

При свободном вращении диска (ротора) он всегда стремится сохранить свое осевое положение. Если платформа гироскопа вращается вокруг входной оси, у гироскопа появляется крутящий момент относительно перпендикулярной (выходной) оси, заставляющий основную ось вращения поворачиваться вокруг выходной оси. Это явление называется *прецессией* гироскопа. Его можно объяснить при помощи закона Ньютона для вращательного движения: *производная во времени от углового момента количества движения относительно любой заданной оси равна сумме моментов всех сил механической системы, приложенных к данной оси*. Это означает, что когда к входной оси приложен момент  $T$  и скорость диска поддерживается постоянной, угловой момент ротора может быть изменен только путем поворота проекции оси вращения относительно входной оси. В этом случае скорость движения оси вращения относительно выходной оси будет пропорциональна приложенному моменту:

$$T = I\omega\Omega, \quad (6.1)$$

где  $I$  – момент инерции ротора гироскопа относительно оси вращения;

$\Omega$  – угловая скорость вращения вокруг выходной оси.

Для определения направления прецессии можно воспользоваться следующим правилом: прецессия всегда имеет направление, при котором направления вращения ротора и приложенного механического момента совпадают.

Точность механических гироскопов сильно зависит от воздействия внешних нежелательных сил, вызывающих дополнительные моменты вращения, что приводит к дрейфу характеристик. Источниками возникновения этих сил являются трение, несбалансированность ротора, магнитные поля и т. д. Для уменьшения сил трения стремятся избавиться от подвесной системы крепления, для чего ротор и управляющий двигатель иногда помещают в вязкую жидкость, обладающую высокой плотностью, например во фторуглерод. В этом методе требуется строго контролировать температуру жидкости. К тому же такое устройство становится повышено подверженным старению. Другой способ уменьшения трения – использование так называемой газовой опоры, это когда ось ротора удерживается газом под высоким давлением. В качестве газа может использоваться гелий, водород или просто воздух. Еще более интересным решением является поддержка ротора в вакууме при помощи электрического поля (речь идет об электростатических гироскопах). Существуют также магнитные гироскопы, в которых ротор удерживается магнитным полем. При изготовлении такие устройства охлаждаются криогенным способом до температур, при которых ротор становится сверхпроводящим. После чего при помощи внешнего магнитного поля внутри ротора формируется достаточно сильное противодействующее поле, позволяющее ротору свободно вращаться в вакууме. Такие магнитные гироскопы часто называются криогенными. Хотя гироскопы с вращающимся ротором в течение многих лет были практически единственными устройствами, применяемыми при построении навигационных устройств, их размеры в настоящее время являются сильно ограничивающим фактором. Однако принцип действия таких датчиков не позволяет реализовать их в виде миниатюрных монолитных устройств. К тому же все части традиционных механических гироскопов (рамки, подвесные конструкции, моторы и роторы) требуют высокой точности при изготовлении и сборке, что обуславливает их высокую стоимость. Наличие в датчиках таких элементов, как моторы и подвесы, приводит к тому, что вследствие их повышенного износа, гироскопы удовлетворяют объявленным характеристикам в течение только ограниченного количества рабочих часов. Поэтому и возникла потребность в разработке альтернативных устройств для определения направления и скорости движения объектов. Более перспективный метод построения гироскопов основан на применении микротехнологий, позволяющих реализовать миниатюрные

устройства, в которых вращающийся диск заменяется на вибрирующий элемент. Такой подход дает возможность использовать технологии, применяемые в электронной промышленности для налаживания серийного выпуска монолитных датчиков ускорений. Одним из таких датчиков является вибрационный гироскоп.

### 6.2.2. Вибрационные гироскопы

Гироскопы вибрационного типа имеют прочную конструкцию и могут работать в довольно суровых окружающих условиях, поэтому они нашли широкое применение в военных и аэрокосмических приборах. Вибрационные гироскопы также бывают разных типов: пьезоэлектрические, твердотельные волновые, камертонные, вибрационные роторные и осцилляционные, МЭМС-гироскопы. Но все названные вибрационные гироскопы объединяет один общий принцип работы – все они основаны на явлении ускорения Кориолиса. Кориолис показал, что при применении законов Ньютона к телам, перемещающимся внутри вращающейся рамки, в уравнениях движения необходимо учитывать силу инерции, направленную вправо от направления движения тела, при вращении рамки против часовой стрелки, и влево – при вращении по часовой стрелке. Если тело движется линейно внутри опорной рамки, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной направлению движения, в нем возникает ускорение Кориолиса. Поэтому напомним подробности об ускорении Кориолиса. Классическая формулировка – «Сила Кориолиса – одна из сил инерции, существующая в неинерциальной системе отсчета из-за вращения и законов инерции, проявляющаяся при движении в направлении под углом к оси вращения». Это ускорение прямо пропорционально скорости вращения тела относительно третьей оси, перпендикулярной плоскости, образованной двумя другими осями ( рис. 6.12).

$$F_c = 2mV\omega,$$

$$F_c = 2m[\vec{V}\vec{\omega}],$$

$$\vec{F}_c = -m\vec{a}_c = -2m[\vec{\omega}\vec{V}].$$

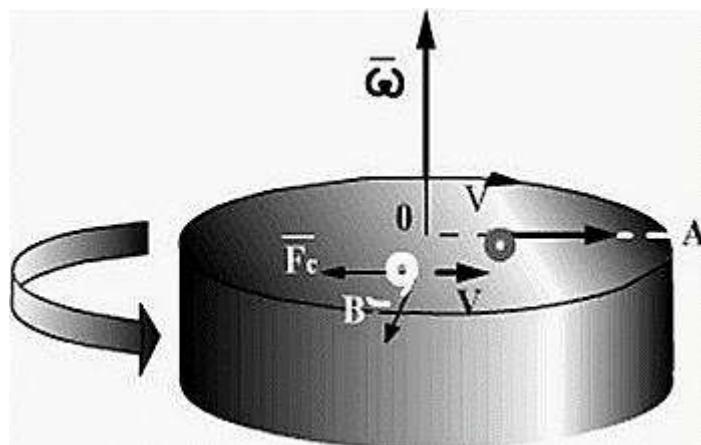


Рис. 6.12. Схема, поясняющая возникновение силы Кориолиса

Для сдвига тела вдоль вращающегося радиуса в направлении от центра требуется придавать телу ускорение – чем дальше от центра, тем больше касательная скорость вращения. Это значит, что с точки зрения вращающейся системы отсчета, некая сила будет пытаться сместить тело с радиуса (рис. 6.1) и тело будет смещаться уже по искривленной траектории.

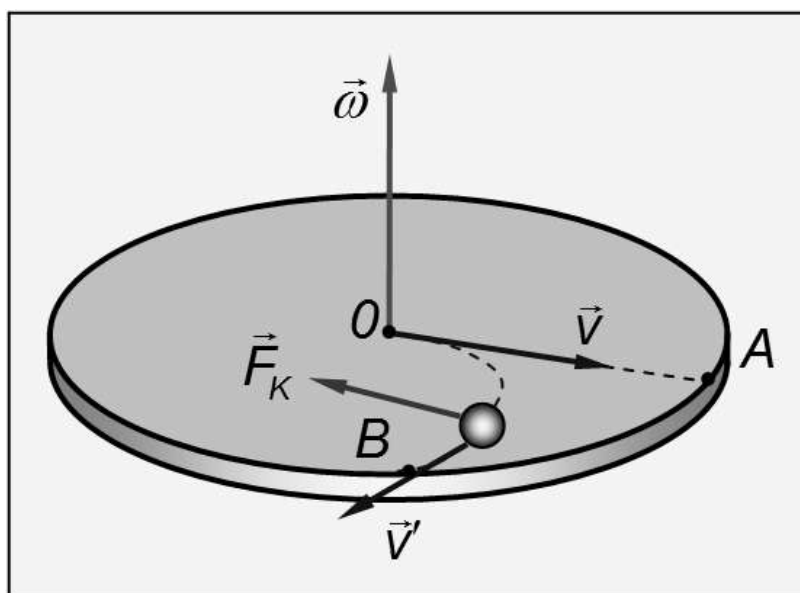


Рис. 6.13. Искривление траектории за счет силы Кориолиса

В микрогироскопах вращение заменено на вибрацию, обусловленную прямым пьезоэлектрическим эффектом. В отличие от роторных гироскопов, в которых инерционная масса вращается по кругу, в вибрационных датчиках подвешенная масса двигается линейно, совершая гармонические колебания. С помощью микроэлектронных технологий создадим пластину пьезоэлемента, подвешенную на тонких упругих торсионах к основному кремниевому кольцу, на котором размещены подводящие электросигнал первичные электроды и принимающие сигнал вибрации от пьезоэффекта приемные (вторичные) электроды (рис. 6.14).

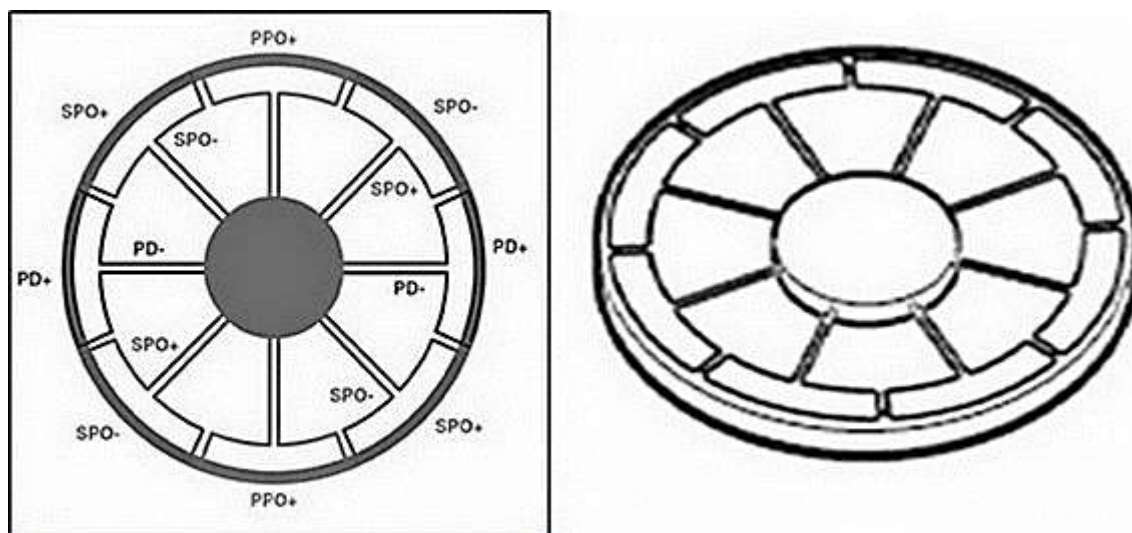


Рис. 6.14. Конфигурация пьезоэлемента с подведенными электродами:

PD, PPO – первичные подающие электросигнал электроды; SPO – вторичные снимающие преобразователи пьезосигнала

При подаче электросигнала круг пьезоэлемента превращается в эллипс за счет продольного пьезоэффекта (рис. 6.15).

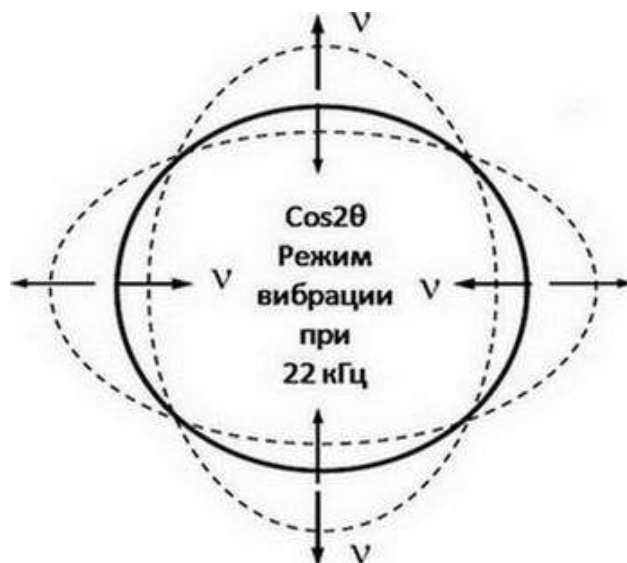


Рис. 6.15. Деформация пьезоэлемента за счет продольного пьезоэффекта

Если теперь на принимающие электросигнал электроды подавать сигнал по принципу бегущего поля (схема создания бегущего электрического поля приведена на рис. 6.16), то вершина эллипса деформированного пьезоэлемента тоже превращается в бегущую круговую волну. Таким образом, мы создали на неподвижном пьезоэлементе полный аналог вращающегося ротора электромотора (рис. 6.17).

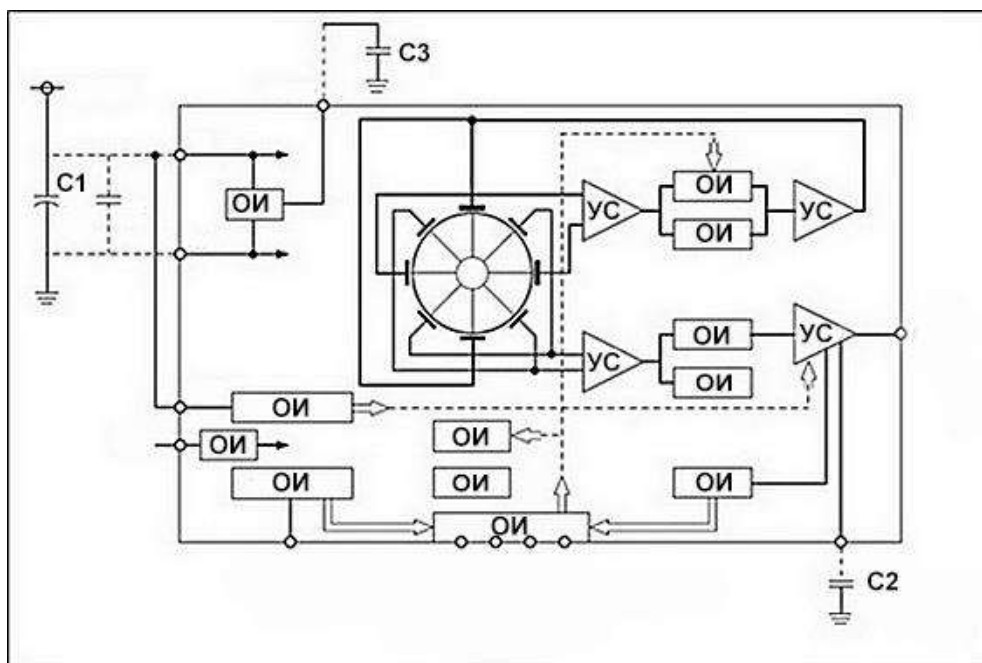


Рис. 6.16. Схема создания бегущего электрического поля и съема бегущей волны вершины эллипса за счет пьезоэффекта:

ОИ – обработка информации; УС – усилитель сигнала

Во время работы на внешнюю рамку (своеобразный «мотор») действует крутящий момент, возникающий из-за электростатических сил, появляющихся при подаче на электроды соответствующего управляющего напряжения, в результате чего она совершает колебательные движения с постоянной амплитудой. Эти вибрации передаются на внутреннюю рамку через внутренний изгибной элемент, вследствие чего инерционная масса также начинает колебаться. Если при этом гироскопический элемент будет совершать движение с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг оси, направленной перпендикулярно плоскости устройства, сила Кориолиса заставит внутреннюю рамку вибрировать относительно выходной оси с частотой, равной управляющей частоте электрического поля, и амплитудой, пропорциональной входной скорости  $\Omega$ . Максимальная разрешающая способность достигается тогда, когда управляющая частота, поданная на внешнюю рамку, совпадает с резонансной частотой внутренней рамки.





Рис. 6.17. Режим создания бегущей волны вершины эллипса за счет пьезоэффекта

Принципиальная схема вибрационного гироскопа показана на рис. 6.18.

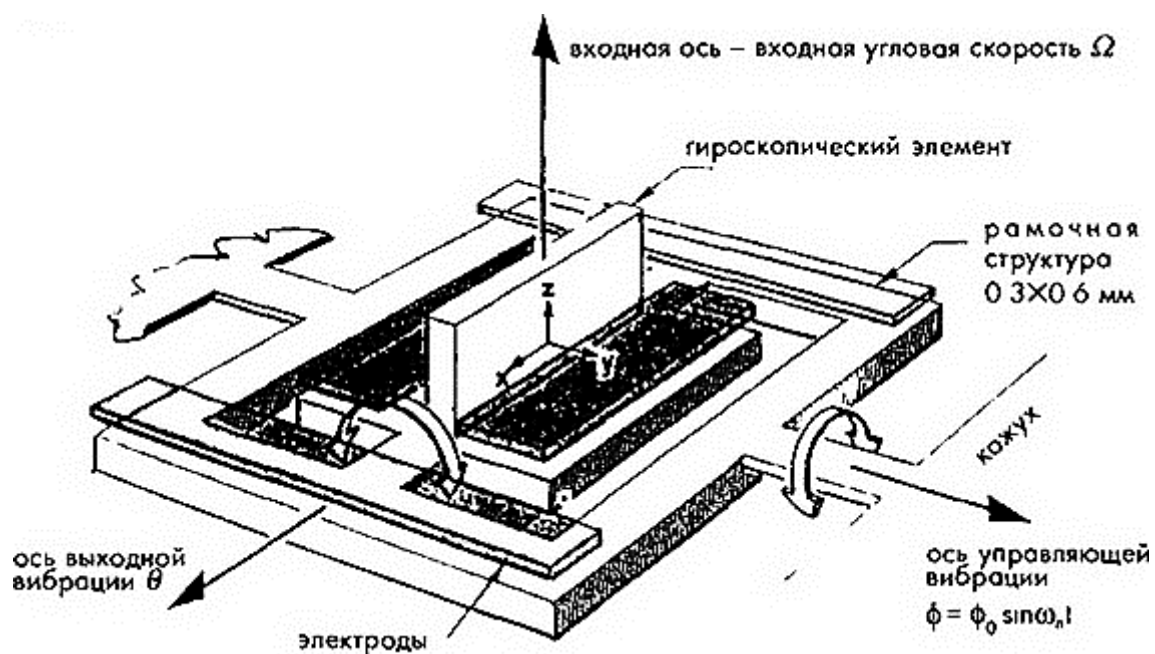


Рис. 6.18. Принципиальная схема вибрационного гироскопа

Современная реализация микрoeлектронного вибрационного гироскопа показана на рис. 6.19.

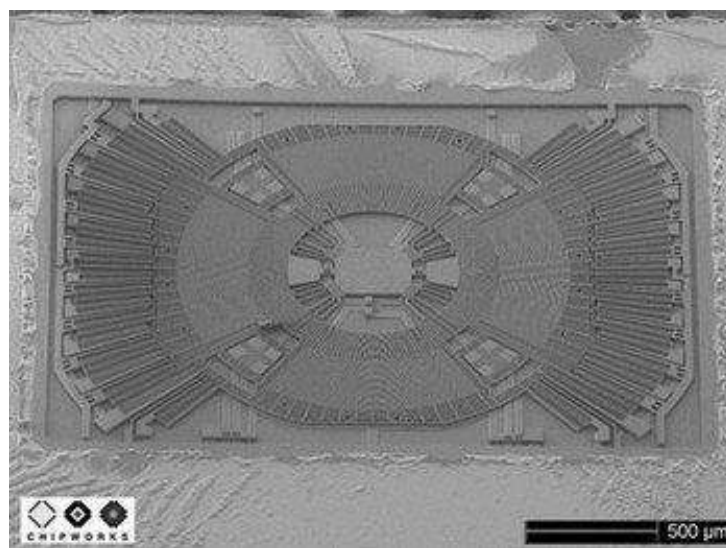


Рис. 6.19. Современный микроэлектронный вибрационный гироскоп с бегущей круговой волной

Реальные размеры топологии микроэлектронного гироскопа составляют 3 мк (рис. 6.20).

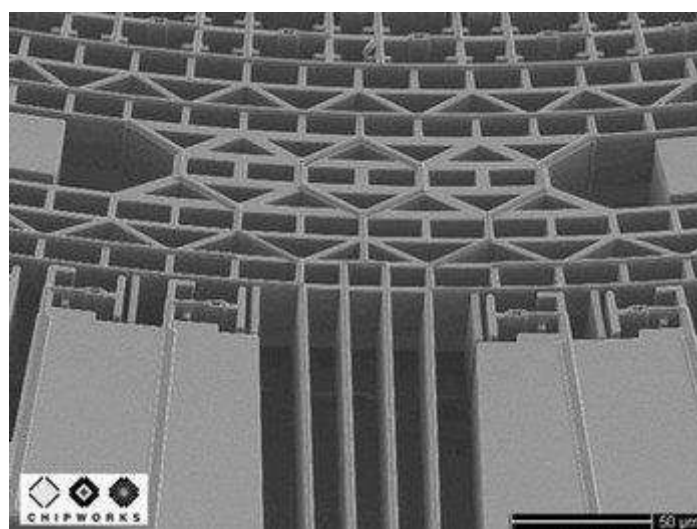


Рис. 6.20. Элемент топологии микроэлектронного гироскопа крупным планом

Кремний обладает отличными механическими свойствами. Например, кремний в кристаллическом состоянии обладает пределом прочности 7 ГПа, что выше, чем для многих видов стали. Если принять во внимание низкую плотность кремния ( $2330 \text{ кг/м}^3$ ), можно убедиться, что для своего веса кремниевые кристаллы являются очень прочным материалом. Чтобы гироскоп обладал стабильными характеристиками на протяжении всего срока службы вне зависимости от условий окружающей среды, его резонатор изготавливается из кристаллического кремния методом травления. Плоская форма вибрирующего кольца гарантирует концентрацию всей мощности колебаний внутри одной плоскости. Поэтому в данной конструкции не возникает паразитных связей между плоскостями, что гарантирует стабильность параметров колебаний в

широком температурном диапазоне. Для корректной работы резонатора подвесная конструкция должна обеспечивать ему как можно более свободное движение. Резонатор состоит из 6-миллиметрового кремниевого кольца, подвешенного на восьми радиальных гибких торсионах, прикрепленных к опорной рамке  $10 \times 10$  мм. Токоподводящие дорожки нанесены только на верхнюю поверхность устройства, а контактные площадки для подсоединения проводов расположены на внешней части опорной рамки. Кристалл методом анодного сплавления соединяется со стеклянной пластиной, при этом температурные коэффициенты пластины и кремния должны совпадать. В такой конструкции существует восемь идентичных подводящих контуров, каждый из которых состоит из контактной площадки, опорного ответвления,  $1/8$  части кольца, следующего опорного ответвления и следующей контактной площадки. Каждое опорное ответвление состоит из двух проводников, принадлежащих двум соседним контурам, и третьего вспомогательного проводника, расположенного между первыми двумя, используемого для снижения емкостной связи. Сюда же для формирования плоскости заземления подсоединена и кремниевая подложка. Резонатор возбуждается при помощи пьезопреобразователя. Сигнал возбуждения подается либо на поддерживающую структуру, либо на сам резонатор. Основная частота колебаний составляет 14.5 кГц. Поскольку положение кольца меняется по отношению к рамке, в конструкцию устройства должен входить пьезоэлектрический датчик перемещений, детектирующий движения. Вся конструкция размещается в стандартном герметичном металлическом корпусе для ИС (рис. 6.21).

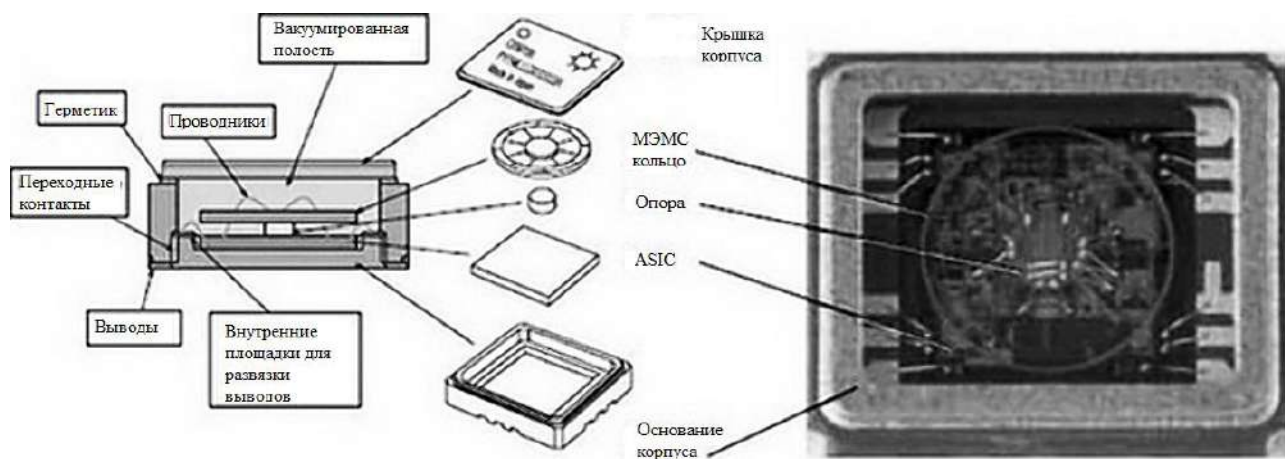


Рис. 6.21. Конструкция микроэлектронного вибрационного гироскопа

### 6.2.3. Оптические гироскопы

Многие современные датчики, используемые в системах контроля и управления, реализуются на основе эффекта Саньяка. Саньяк показал, что если разделить луч света на два (на рис. 6.22 один луч красный, второй – синий) и послать их в противоположных направлениях по замкнутому пути на

платформе, вращающейся вокруг своей оси вместе с зеркалами по периметру, то лучи света рекомбинируют и проявляют интерференционные эффекты.

Расстояния, пройденные лучами, оказываются различными, потому что фотоны во вращающемся интерферометре идут по разным траекториям. Между зеркалами каждый фотон движется по траектории, которая является прямолинейной относительно инерциальной системы и которая не зависит от вращения интерферометра. Поэтому, пока лучи идут между зеркалами, интерферометр поворачивается на некоторый угол и фотоны приходят в различные точки зеркал. То есть эффект Саньяка возникает потому, что направление движения фотонов не зависит от вращения интерферометра.

В кольцевом интерферометре когерентные лучи идут от полупрозрачного зеркала, обходят контур во встречных направлениях и затем снова приходят к полупрозрачному зеркалу. Здесь лучи также отражаются от зеркал и идут по траекториям с минимально возможными расстояниями.

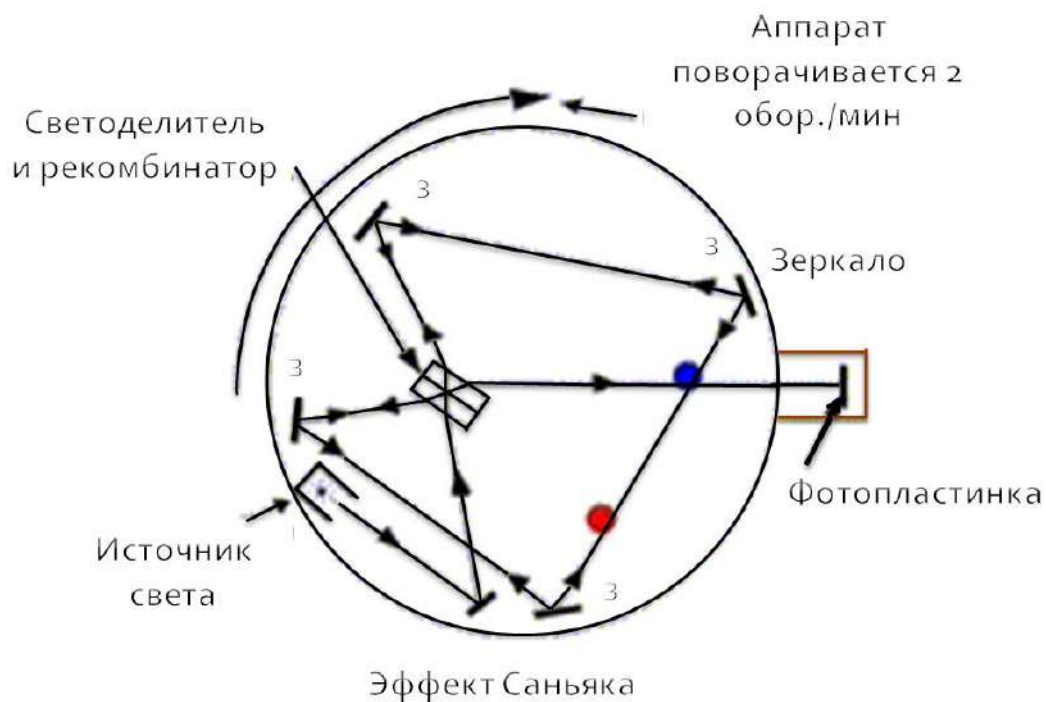


Рис. 6.22. Причина возникновения эффекта Саньяка

Исходя из полученного результата Саньяк предположил, что свет распространяется независимо от скорости своего источника. Два лазерных луча света распространяются в противоположных направлениях внутри оптического кольца радиусом  $R$ , обладающего коэффициентом преломления  $n$ . Соответственно один луч перемещается по часовой стрелке (CW), а второй – против часовой стрелки (CCW). Лучу света, чтобы сделать один оборот вокруг кольца, требуется время  $\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$ , где  $c$  – скорость света. Теперь предположим,

что кольцо вращается с угловой скоростью  $\Omega$  по часовой стрелке. В этом случае двум лучам, перемещающимся в противоположных направлениях, придется пройти разный путь. Для движущегося по часовой стрелке луча путь составит  $l_{CW} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$ , а для второго луча будет равен  $l_{CCW} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$ . Следовательно, разница между путями составит

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{nc}. \quad (6.2)$$

В кольцевом лазерном гироскопе для определения  $\Delta l$  используются свойства когерентности лазерного излучения. Для возбуждения лазерного излучения в замкнутой оптической полости вдоль длины кольца должно укладываться целое количество длин волн. Световые лучи, не удовлетворяющие этому условию, последовательно проходя оптический путь, интерферируют сами с собой. Для компенсации изменения длины пути, вызванного вращением кольца, длина волны  $\lambda$  и частота излучения  $\nu$  должны также меняться:

$$-\frac{d\nu}{\nu} = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dl}{l}. \quad (6.3)$$

Выражение (6.3) является фундаментальным уравнением, связывающим частоту, длину волны и путь излучения в кольцевом лазере. При вращении кольцевого лазера со скоростью  $\Omega$  из уравнения (6.2) вытекает, что световые волны должны растягиваться в одном направлении и сжиматься в другом; это необходимо для получения целого числа длин волн вдоль длины кольца для выполнения критерия возбуждения когерентных волн. Отсюда можно найти разность частот между световыми лучами. При смешивании двух лучей частота результирующего сигнала определяется выражением

$$F = \frac{4A\Omega}{\lambda nl}, \quad (6.4)$$

где  $A$  – площадь внутри кольца.

Когда интерферометр неподвижен, луч 1 из точки  $A$  проходит через точки  $B_0$  и  $E_0$  и приходит в точку  $A$  (рис. 6.23). Луч 2 по тем же точкам идет в обратном направлении, то есть в неподвижном интерферометре лучи идут по одинаковым траекториям и проходят одинаковые расстояния, равные сумме трех сторон треугольника  $AB_0E_0$ . Те же траектории и те же расстояния мы можем найти, построив прямую  $A_BA_E$ , соединяющую точки  $A_B$  и  $A_E$ , являющиеся зеркальными отражениями точки  $A$  в зеркалах  $B$  и  $E$ . Прямая  $A_BA_E$  пересекает зеркала  $B$  и  $E$  в тех же точках  $B_0$  и  $E_0$ , которые определяют те же самые траектории. Длина линии  $A_BA_E$  равна расстоянию, проходимому лучами 1 и 2 ( $A_BB_0 = B_0A$  и  $A_EE_0 = E_0A$ ). Длина  $A_BA_E$  в условном масштабе равна 5.194.

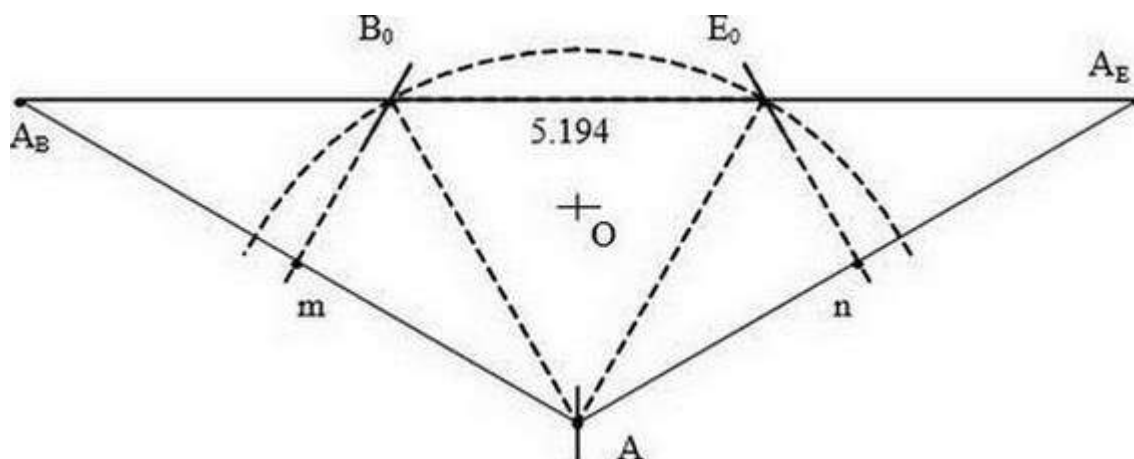


Рис. 6.23. Ход лучей в неподвижном интерферометре

При вращении интерферометра за время, пока луч 1 из неподвижной точки  $A$  идет к зеркалу  $B$ , зеркало смещается вдоль окружности радиусом  $AB_0$  и одновременно поворачивается на некоторый угол  $\beta$  (рис. 6.24 шаг по углу  $\beta$  условно принят равным  $5^\circ$ ). Точка  $B_0$  приходит в положение  $B_1$ . Зеркальное отражение точки  $A$  в зеркале  $B$  оказывается в положении  $A_B1$  (отрезок  $Am1$  перпендикулярен зеркалу  $B$  и  $m1A_B1 = Am1$ ). За время, пока луч 1 идет от зеркала  $B$  до зеркала  $E$ , интерферометр поворачивается еще на угол  $\beta$  и зеркало  $E$  оказывается в положении  $E_1$ . Зеркальное отражение точки  $A$  в зеркале  $E$  оказывается в положении  $A_E1$  (отрезок  $An1$  перпендикулярен зеркалу  $E$  и  $n1A_E1 = An1$ ). Точки пересечения прямой  $A_B1 - A_E1$  с зеркалами определяют траекторию луча 1, а длина прямой  $A_B1 - A_E1$  равна длине траектории. Длина  $A_B1 - A_E1$  равна 5.325.

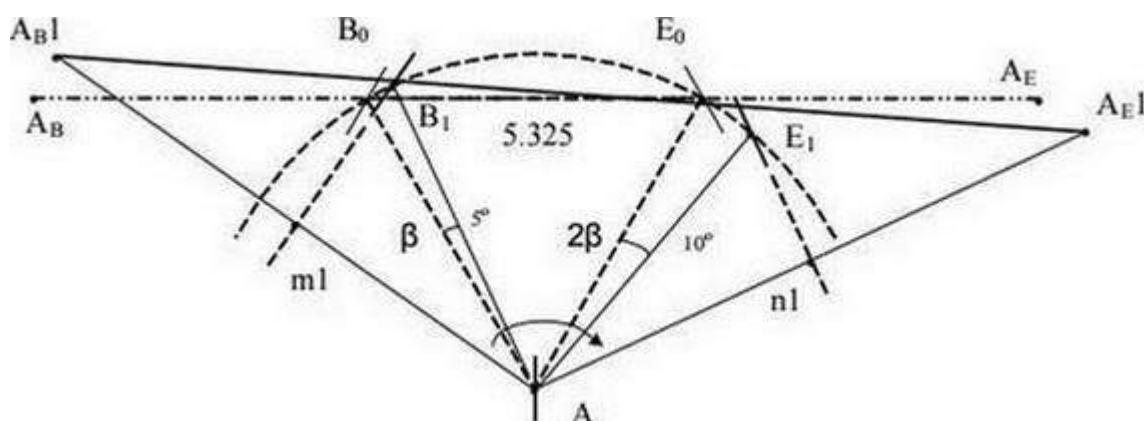


Рис. 6.24. Ход луча 1 во вращающемся интерферометре

При вращении интерферометра за время, пока луч 2 из точки  $A$  идет к зеркалу  $E$ , зеркало смещается вдоль окружности и одновременно поворачивается на угол  $\beta$  (рис. 6.25). Точка  $E_0$  приходит в положение  $E_1$ . Зеркальное отражение точки  $A$  в зеркале  $E$  оказывается в положении  $A_E2$  (отрезок  $An2$  перпендикулярен зеркалу  $E$  и  $n2A_E2 = An2$ ). За время, пока луч 2

идет от зеркала  $E$  до зеркала  $B$ , интерферометр поворачивается еще на угол  $\beta$  и зеркало  $B$  оказывается в положении  $B_2$ . Зеркальное отражение точки  $A$  в зеркале  $B$  оказывается в положении  $A_B2$  (отрезок  $Am2$  перпендикулярен зеркалу  $B$  и  $m2A_B2 = Am2$ ). Точки пересечения прямой  $A_E2 - A_B2$  с зеркалами определяют траекторию луча 2, а длина прямой  $A_E2 - A_B2$  равна длине траектории. Длина отрезка  $A_E2 - A_B2$  на рис. 6.25 равна 5.067.

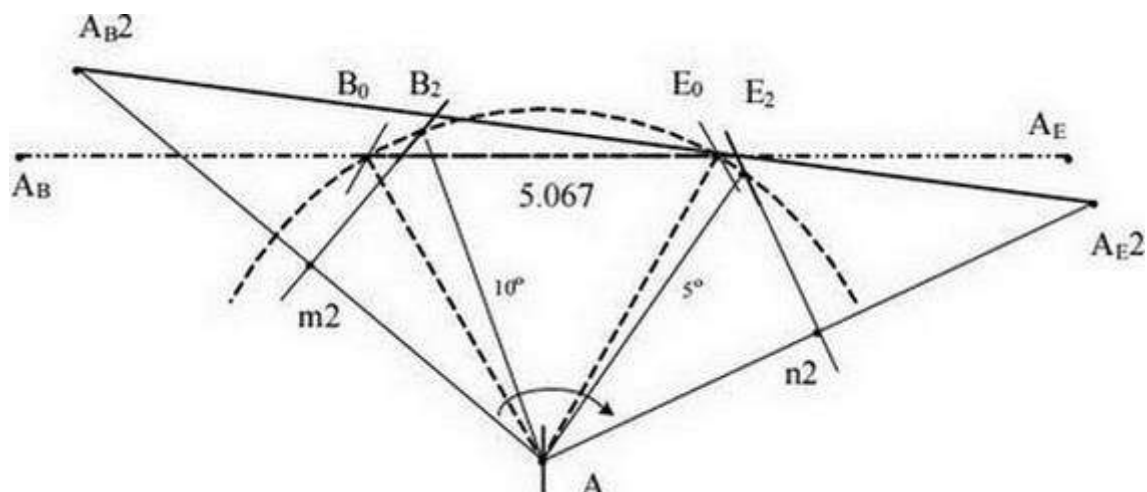


Рис. 6.25. Ход луча 2 во вращающемся интерферометре

При совмещении траекторий лучей 1 и 2 (рис. 6.26) сравнение отрезков прямых  $A_B1 - A_E1$ ,  $A_E2 - A_B2$  показывает, что луч 2 проходит меньшее расстояние и поэтому приходит к полупрозрачному зеркалу раньше, чем луч 1.

Последовательность геометрических построений показывает, что за время, пока луч 1 проходит расстояние  $A_B0$ , интерферометр поворачивается на угол  $2^\circ$  и зеркало  $B$  смещается на  $2\pi R/180 = 2\pi 5/180 = 0.1745$ , зеркало движется со скоростью  $V = 0.1745$ .

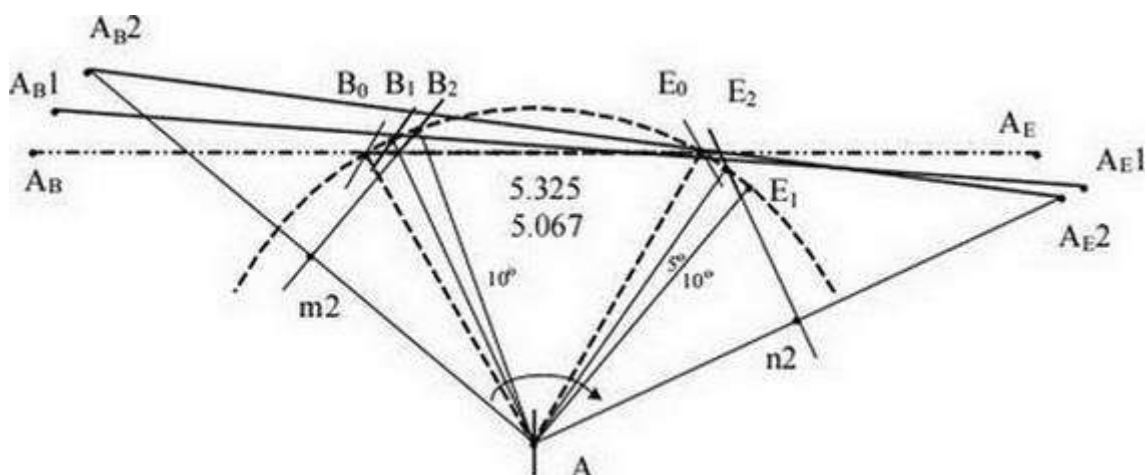


Рис. 6.26. Совмещение лучей во вращающемся интерферометре

Когда луч 1 приходит к зеркалу  $B$ , оно поворачивается на угол  $2^\circ$  и оказывается в положении  $58^\circ$  (в неподвижном интерферометре –  $60^\circ$ ).

$A_B1$  – зеркальное отражение точки  $A$  в зеркале  $B$ .

Пока луч 1 идет к зеркалу  $E$ , интерферометр поворачивается еще на  $2^\circ$  и зеркало  $E$  оказывается в положении  $64^\circ$ ,  $A_E1$  – зеркальное отражение  $A$  в зеркале  $E$ ,  $A_B1 - A_E1 = 15.15$  – расстояние, пройденное лучом 1.

То есть на выходе вращающегося кольцевого интерферометра возникает разность фаз встречных волн, которая пропорциональна угловой скорости вращения и площади интерферометра.

Помимо рассмотренных лазерных гироскопов широкое распространение получили волоконно-оптические гироскопы.

Достоинства кольцевых лазерных гироскопов: отсутствие подвижных частей; простота конструкции; короткое время запуска; высокая чувствительность; высокая линейность характеристик; низкая потребляемая мощность; высокая надежность.

Недостатки кольцевых лазерных гироскопов: нелинейность выходного сигнала при малой угловой скорости (влияние синхронизма), дрейф выходного сигнала из-за газовых потоков в лазере, изменение длины оптического пути под воздействием теплового расширения, давления и механических деформаций.

Помимо лазерных гироскопов широкое применение получили волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) (рис. 6.27). Волоконно-оптический гироскоп представляет собой интерферометр Саньяка, в котором круговой оптический контур заменен на катушку из длинного одномодового оптического волокна.

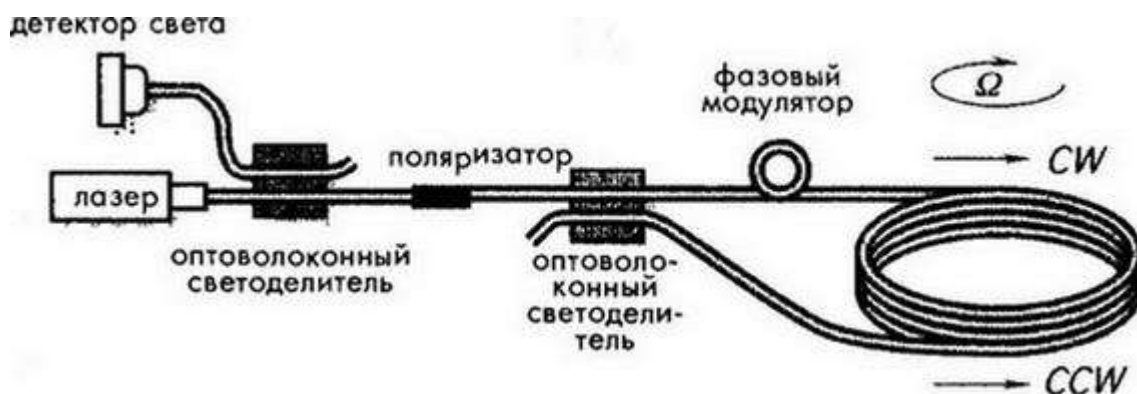


Рис. 6.27. Структура волоконно-оптического гироскопа

В волоконно-оптических гироскопах эффект Саньяка проявляется на несколько порядков сильнее из-за малых потерь в оптическом волокне и большой длины волокна. Главными элементами ВОГ являются излучатель, расщепитель луча, многовитковый замкнутый контур из одномодового диэлектрического световода с малым затуханием и фотоприемник. Луч света, направленный из лазера, проходит через светоделитель, после которого разделяется на два луча. Поляризатор предназначен для обеспечения того, чтобы оба встречно направленных луча проходили одинаковый маршрут вдоль



катушки. Оба луча, проходя через катушку, смешиваются и направляются на детектор, который регистрирует сдвиг фаз между лучами, возникающий из-за вращения катушки.

Конструкция ВОГ целиком выполняется в виде твердого тела, что облегчает эксплуатацию и повышает надежность по сравнению с лазерным. ВОГ измеряет скорость вращения, в то время как кольцевой фиксирует приращение скорости. Конфигурация ВОГ позволяет «чувствовать» реверс направления вращения. Здесь возможно измерение очень малых угловых скоростей.

Увеличение длины контура за счет применения тончайшего оптоволокна повышает точность системы в целом, так как величина невзаимного фазового сдвига пропорциональна длине волокна. В качестве фотодетекторов в большинстве ВОГ используются полупроводниковые фотодиоды, *p-i-n*-фотодиоды и лавинные фотодиоды.

Достоинства волоконно-оптического гироскопа:

- 1) конструкция ВОГ целиком выполняется в виде твердого тела, что облегчает эксплуатацию и повышает надежность;
- 2) потенциально высокая чувствительность (точность) прибора;
- 3) малые габариты и масса конструкции;
- 4) относительная простота технологии;
- 5) малое потребление энергии;
- 6) большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей;
- 7) отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников;
- 8) практически мгновенная готовность к работе;
- 9) нечувствительность к большим линейным ускорениям.

## 7. ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

### 7.1. Адсорбция на поверхности твердых тел

При помещении полупроводника в газовую среду на его поверхности происходит адсорбция, т. е. газовые молекулы ударяются о поверхность твердого тела и прилипают к ней. В таком состоянии они проводят некоторое время, затем отрываются от поверхности и возвращаются обратно в газовую среду. Это явление называется десорбцией. Таким образом, газовая молекула проводит какое-то время в адсорбированном состоянии на поверхности твердого тела, а значит, твердое тело всегда удерживает на своей поверхности некоторое количество молекул газа.

В зависимости от природы сил, удерживающих адсорбированную молекулу на поверхности адсорбента, различают физическую адсорбцию и химическую адсорбцию (хемосорбцию).

В случае физической адсорбции – это силы той же природы, что и силы, действующие между молекулами в газе (так называемые силы Ван дер Ваальса). При хемосорбции – это силы химической природы, действующие между атомами в молекуле (так называемые обменные силы).

Хемосорбция отличается от физической адсорбции рядом признаков. Прежде всего при физической адсорбции расстояние между адсорбированной частицей и поверхностью больше, чем при хемосорбции, когда адсорбированную частицу можно представлять себе вдавленной в поверхность. Во-вторых, при хемосорбции частица привязана к поверхности прочнее, чем при физической адсорбции. Наконец, при физической адсорбции скорость адсорбции тем меньше, чем выше температура, в то время как при хемосорбции скорость адсорбции чрезвычайно быстро возрастает с увеличением температуры. Если через  $dN/dt$ , где  $dN$  – число молекул, адсорбированных единицей поверхности, а  $dt$  – временной интервал, обозначить скорость адсорбции, то в случае хемосорбции

$$dN/dt = \alpha \exp(-E/kT), \quad (7.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, медленно убывающий с температурой;

$E$  – энергия активации адсорбции;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

Адсорбцию, подчиняющуюся этому закону, называют активированной адсорбцией.

Процесс адсорбции заканчивается тогда, когда количество молекул, адсорбированных на данной поверхности за данный промежуток времени, становится равным количеству молекул, десорбированных за тот же промежуток времени с той же поверхности. При этом наступает равновесие между поверхностью и газом (абсорбционное равновесие), характеризующееся определенной степенью заполнения поверхности газовыми молекулами. Эта

степень заполнения поверхности, т. е. число молекул, удерживаемых поверхностью при установившемся адсорбционном равновесии, зависит прежде всего от температуры и от давления. При заданном давлении оно уменьшается при увеличении температуры, а при заданной температуре увеличивается с увеличением давления.

Максимальное число молекул, способных удерживаться на поверхности при заданной температуре характеризует адсорбционную способность поверхности. Одна и та же поверхность обладает различной адсорбционной способностью по отношению к молекулам различного газа. Адсорбционная способность поверхности – это ее емкость по отношению к газовым молекулам. Адсорбционная способность поверхности зависит от природы и от обработки поверхности и может быть изменена путем тех или иных внешних воздействий на адсорбент. При этом поверхность чувствительна к изменению состава адсорбента, например, введение примесей внутрь адсорбента влияет на адсорбционную способность его поверхности, некоторые примеси заметно увеличивают адсорбционную способность, другие ее уменьшают. Адсорбционная способность иногда резко изменяется при освещении адсорбента. Это – так называемый фотоадсорбционный эффект.

Иногда хемосорбция бывает необратимой, это значит, что количество молекул, адсорбированных на поверхности под влиянием освещения, не уменьшается при выключении освещения. Для того чтобы их снять, необходимо повысить температуру тела.

При ударе о поверхность, т. е. в самом акте адсорбции, молекула часто раскалывается на части, так что на поверхности оказываются не сами молекулы газа, а их части. Молекулы или их части, адсорбированные на поверхности, могут соединяться друг с другом в новых комбинациях, образуя новые молекулы. Таким образом, из газа на поверхность попадают одни молекулы, а с поверхности в газ уходят другие, постепенно изменяется состав газа, происходит его химическое превращение.

Адсорбированные молекулы обладают иными свойствами, чем те же молекулы в свободном состоянии. Молекулы, не взаимодействующие друг с другом в свободном состоянии, часто вступают во взаимодействие, когда они находятся в адсорбированном состоянии. Таким образом, поверхность твердого тела является катализатором химических реакций.

### **7.1.1. Роль электронов и дырок при адсорбции**

При движении в полупроводнике электроны и дырки выходят на его поверхность, где встречаются с адсорбированными молекулами газа. При этом адсорбированные молекулы и атомы играют ту же роль, что и примесные атомы, т. е. они захватывают свободные электроны и дырки.

Подобно объемной примеси, адсорбированные атомы и молекулы могут выполнять функции акцепторов или доноров. Так, например, адсорбированные атомы или молекулы кислорода или хлора являются типичными акцепторами.

Углеводородные молекулы (например,  $C_2H_4$ ) могут служить примером доноров. В роли доноров выступают, как правило, и атомы водорода.

Адсорбированная молекула (или атом), которая захватила электрон или дырку, оказывается электрически заряженной. Чем больше в полупроводнике электронов или дырок, тем большая доля всех адсорбированных частиц будет находиться в заряженном состоянии, в результате поверхность полупроводника заряжается. При адсорбции акцепторов поверхность заряжается отрицательно, при адсорбции доноров – положительно, т. е. знак поверхностного заряда, образующегося при адсорбции, зависит от природы адсорбирующихся частиц.

Таким образом, в каждый момент времени некоторая доля адсорбированных частиц находится в заряженном состоянии (каждая адсорбированная частица за время жизни в адсорбированном состоянии определенную долю времени проводит в заряженном состоянии). Иначе говоря, всегда существует некоторая вероятность того, что нейтральная адсорбированная частица сделается заряженной, а заряженная, наоборот, нейтрализуется.

Электрон или дырка, захваченные адсорбированной частицей, нарушают характер ее связи с поверхностью – эта связь упрочняется, адсорбированная молекула в заряженном состоянии прочнее привязана к поверхности, чем в электрически нейтральном. Такой молекуле, прежде чем уйти в газовую фазу, надо передать полупроводнику ее электрон или дырку, что требует затраты некоторой энергии.

Различают два типа связи адсорбированной частицы с поверхностью, которые условно называются *слабой* и *прочной связью*. В случае слабой связи свободные электроны и дырки полупроводника не принимают участия в связи. Связь осуществляется в этом случае собственными электронами, принадлежащими адсорбированной молекуле (атому), или собственными электронами, принадлежащими атому кристаллической решетки полупроводника. Эти электроны затягиваются в большей или меньшей степени с адсорбированной частицы в решетку или с решетки на адсорбированную частицу, чем и осуществляется связь. В случае прочной связи в нее вовлекается свободный электрон или дырка полупроводника, пойманные адсорбированной частицей.

Слабая связь является электрически нейтральной, прочная – электрически заряженной. Средняя прочность связи адсорбированной частицы с поверхностью определяется относительным содержанием на поверхности слабой и прочной форм или, иначе говоря, относительной вероятностью пребывания частицы в состоянии слабой или прочной связи. От этого зависит адсорбционная способность поверхности. В свою очередь относительное содержание слабой и прочной форм определяется концентрацией свободных электронов и дырок на поверхности полупроводника. Таким образом, свободные электроны и дырки полупроводника управляют его адсорбционными свойствами.

Адсорбционная способность поверхности по отношению к акцепторным молекулам тем больше, а по отношению к донорным тем меньше, чем больше концентрация свободных электронов (или, чем меньше концентрация свободных дырок) в плоскости поверхности. Говоря о поверхности полупроводника, мы имели дело до сих пор с идеализированной картиной. Мы представляли себе эту поверхность как плоскость со строго периодической структурой. Реальная поверхность отличается от идеальной наличием нарушений ее периодической структуры. Такая поверхность содержит ступеньки, пики, атомы, выброшенные из узлов кристаллической решетки на поверхность, вакансии, и другие макро- и микродефекты структуры. Они служат местами для адсорбции газовых молекул: адсорбция происходит преимущественно на этих дефектах, которые называются *центрами адсорбции* или *адсорбционными центрами*. На таких центрах, как и на идеальной поверхности, адсорбция может идти с участием или без участия свободных электронов и дырок (прочная и слабая связь). Очевидно, природа и концентрация адсорбционных центров на поверхности зависит от «биографии» поверхности, т. е. от той обработки, которой она подвергалась.

Таким образом, дефекты поверхности, в частности поверхностные примеси, играют при адсорбции двоякую роль. С одной стороны, ими регулируется концентрация свободных электронов и дырок, которой в свою очередь регулируются адсорбционные свойства поверхности. С другой стороны, поверхностные дефекты сами по себе могут выступать в роли центров адсорбции.

### 7.1.2. Взаимодействие поверхности с объемом

Как известно, на выведение электрона из полупроводника надо затратить некоторую энергию, называемую *работой выхода* электрона. Полупроводник могут покинуть только те электроны, которые обладают достаточным для этого запасом энергии. Испускание электронов полупроводником называется эмиссией.

Такая эмиссия может быть вызвана прежде всего нагреванием полупроводника до достаточно высокой температуры. Это – *термоэлектронная эмиссия*, или так называемый *эффект Ричардсона*.

Эмиссия электронов может быть вызвана также освещением полупроводника (*фотоэлектронная эмиссия*, или *внешний фотоэлектрический эффект*). В этом случае энергия электронов увеличивается за счет энергии поглощенного света.

Бомбардируя полупроводник быстрыми частицами (ионами или электронами), можно также вызвать эмиссию электронов (*вторичная электронная эмиссия*), при этом бомбардирующие частицы передают свою энергию электронам полупроводника.

Наконец, эмиссия электронов может быть вызвана достаточно сильным внешним электрическим полем, способным извлечь электрон из полупроводника. В этом случае говорят о *холодной эмиссии*.

Работа выхода электрона в полупроводнике может измениться под влиянием адсорбции. Заряд поверхности, возникающий при адсорбции в

зависимости от знака (т. е. от природы адсорбирующегося газа), может облегчить или затруднить выход электрона из полупроводника. Если поверхность заряжена отрицательно, то работа выхода возрастает, если положительно – снижается.

Так, например, адсорбция кислорода (акцептор, отрицательное зарядение поверхности) всегда вызывает возрастание работы выхода. Адсорбция водорода (донор, положительное зарядение поверхности) приводит, наоборот, к снижению работы выхода.

*По тому, как изменяется работа выхода под влиянием адсорбции, можно судить о составе газовой фазы.* Чем больше давление газа, тем больше адсорбируется молекул на поверхности полупроводника и тем сильнее влияние газовой среды на работу выхода.

Влияние газовых молекул, адсорбированных на поверхности, проникает достаточно глубоко внутрь полупроводника. Пример этого – влияние адсорбции на проводимость полупроводника. Если при адсорбции поверхность полупроводника заряжается положительно, то вблизи поверхности увеличивается концентрация свободных электронов (создание объемного заряда). При этом увеличивается электронная проводимость приповерхностной области, что может отразиться на проводимости всего образца в целом. Если же поверхность при адсорбции заряжается отрицательно, то это приводит к обогащению приповерхностного слоя дырками, т. е. к увеличению дырочной проводимости.

Таким образом, адсорбция вызывает увеличение или уменьшение проводимости полупроводника в зависимости от того, *какой газ* (акцепторный или донорный) адсорбируется и на *каком полупроводнике* (электронном или дырочном). Так, адсорбция кислорода на окиси цинка (электронный полупроводник) всегда снижает проводимость, в то время как проводимость окиси никеля (дырочный полупроводник) в результате адсорбции кислорода всегда возрастает. Водород обычно оказывает противоположное влияние, так как газовые молекулы, адсорбированные на поверхности, действуют подобно атомам примеси, введенным внутрь кристалла: и обедняют, или обогащают полупроводник носителями заряда.

Необходимо отметить, что адсорбционная способность поверхности оказывается чувствительной не только к примесям, размещенным на поверхности, но и к тому, какие примеси и в каких концентрациях внедрены в глубину полупроводника. Вводя небольшое количество примеси в полупроводник, можно изменить во много раз адсорбционную способность его поверхности, поскольку она зависит при прочих равных условиях от концентрации свободных электронов и свободных дырок в полупроводнике. В то же время концентрация свободных электронов и дырок регулируется примесью, содержащейся в полупроводнике. Таким образом, примесь, размещенная в полупроводнике, управляет адсорбционными свойствами его поверхности через группу свободных электронов и дырок.

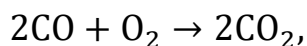
### 7.1.3. Химические реакции на поверхности полупроводников

Данному вопросу мы уделим особое внимание, так как без понимания механизма этих реакций невозможно понять принцип действия микроэлектронного газоанализатора.

Рассмотрим полупроводник, помещенный в газовую среду, представляющую собой смесь разных газов, т. е. смесь молекул различных сортов. Предположим, что в этой газовой среде протекает некая химическая реакция, в результате которой некоторые молекулы исчезают, а вместо них возникают новые молекулы. Вещества, вступающие в реакцию, называются *реагентами*, а вещество, возникающее в результате реакции, – *продуктом реакции*. Количество продукта, возникающего за единицу времени, характеризует *скорость реакции*.

Когда в среду реагирующих газов помещено твердое тело (полупроводник), газовые молекулы адсорбируются на его поверхности и вступают в реакции с другими адсорбированными молекулами или с молекулами, налетающими из газовой фазы. Таким образом, реакция переносится из газовой фазы на поверхность твердого тела. При этом скорость реакции изменяется. В некоторых случаях она увеличивается. Таким образом, полупроводник выступает в роли катализатора (ускорителя) реакции. В некоторых случаях реакция ускоряется в тысячи раз.

Так, например, реакция окисления угарного газа



в газовой фазе идет очень медленно. При внесении в эту смесь двуокиси марганца  $\text{MnO}_2$  или окиси серебра  $\text{Ag}_2\text{O}$  скорость реакции резко возрастает. Двуокись марганца и окись серебра оказываются для этой реакции катализаторами.

Относительное увеличение скорости реакции, вызываемое катализатором, характеризует так называемую *активность катализатора*. Катализатор, активный в отношении данной реакции, может оказаться неактивным по отношению к другой. Активность катализатора зависит от ряда условий. В частности, от примесей, введенных внутрь катализатора или адсорбированных на его поверхности. Некоторые примеси увеличивают активность, такие примеси называются *проторами*. В некоторых случаях примесь может затормозить каталитическую реакцию, такая примесь называется *ядом*. Активность катализатора всегда возрастает при увеличении температуры.

Во всякой молекуле отдельные атомы или отдельные группы атомов соединены друг с другом так называемыми *валентными связями*. Структурные формулы для некоторых простых молекул представлены на рис. 7.1. В молекуле воды  $\text{H}_2\text{O}$  (рис. 7.1, а) каждый из двух атомов водорода связан с атомом кислорода, т. е. каждый атом водорода одновалентен, а атом кислорода двухвалентен. То же самое имеет место в молекуле перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ , изображенной на рис. 7.1, б. В молекуле этилена  $\text{C}_2\text{H}_2$  (рис. 7.1, в) каждый атом

углерода С связан одновалентными связями с двумя атомами водорода Н и двухвалентной связью с другим атомом С, т. е. атомы С в молекуле этилена четырехвалентны. Так же обстоит дело и в молекуле  $\text{CO}_2$ , в которой атом С связан с двумя атомами кислорода О, каждый из которых двухвалентен. Некоторые атомы могут обладать *переменной валентностью*, т. е., входя в состав различных молекул, могут иметь различную валентность. Так, атом С четырехвалентен в молекуле  $\text{C}_2\text{H}_4$  или  $\text{CO}_2$ , а в молекуле  $\text{CO}$  атом С двухвалентен (рис. 7.1, д).

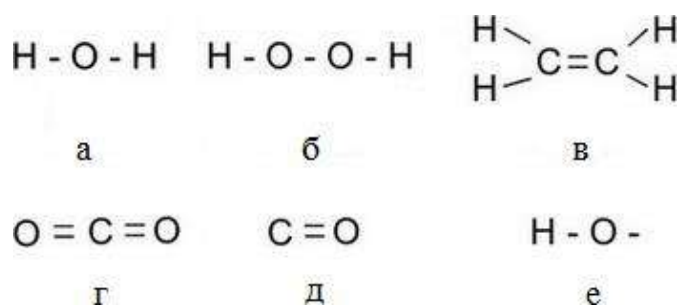


Рис. 7.1. Структурные формулы некоторых простых молекул:

а – вода  $\text{H}_2\text{O}$ ; б – перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; в – этилен  $\text{C}_2\text{H}_4$ ; г – двуокись углерода  $\text{CO}_2$ ;  
 д – окись углерода  $\text{CO}$ ; е – гидроксил  $\text{OH}$

Валентность любого атома стремится к насыщению, т. е. ненасыщенная связь всегда стремится насытиться за счет другой такой же ненасыщенной связи. В любой устойчивой молекуле все валентные связи всегда насыщены, т. е. нигде не обрываются. Если валентно-насыщенную молекулу разорвать на две части, то получим две молекулы с ненасыщенными (свободными) валентностями. Такие молекулы называются *радикалами*. Пример радикала (так называемый гидроксил  $\text{OH}$ ), получающегося в результате отрыва атома Н от молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ , изображен на рис. 7.1, е. Молекула с одной ненасыщенной валентностью (пример – гидроксил) называется *монорадикалом*, с двумя ненасыщенными валентностями – *бирадикалом*, со многими – *полирадикалом*. Очевидно, молекула, находящаяся в радикальном состоянии, всегда более реакционноспособна, т. е. с большей легкостью вступает в химическое соединение, чем валентно-насыщенная молекула. С точки зрения электронной теории катализа действие полупроводника как катализатора заключается в том, что газовые молекулы, оставаясь в газовой фазе валентно-насыщенными, садясь на поверхность полупроводника, превращаются (частично) в радикалы.

Это действие полупроводника обусловлено тем, что каждый кристалл полупроводника может рассматриваться как большая молекула (макромолекула), обладающая при этом свободными (ненасыщенными) валентностями. Таким образом, сам полупроводник представляет собой своего рода полирадикал. Этим и обусловлено с точки зрения электронной теории его



*каталитическое действие. В роли свободных (ненасыщенных) валентностей катализатора выступают свободные электроны и дырки полупроводника.*

Например, в кристалле каменной соли  $\text{NaCl}$ , состоящем из ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , свободный электрон представляет собой лишний электрон, захваченный на ион  $\text{Na}^+$  и превращающий этот ион в нейтральный атом  $\text{Na}$ . Свободная дырка – это дырка на ионе  $\text{Cl}^-$ , превращающая этот ион в нейтральный атом  $\text{Cl}$ . Ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  обладают нулевой валентностью, в то время как атомы  $\text{Na}$  и  $\text{Cl}$  – одновалентны. Таким образом, свободный электрон и свободная дырка в кристалле играют роль свободной валентности, это имеет место и в случае более сложных кристаллов.

Рассматривая свободные электроны и дырки полупроводника как свободные валентности, мы можем приписать этим свободным валентностям следующие свойства. Они не локализованы, а могут свободно блуждать по полупроводнику, встречаться с адсорбированными на поверхности газовыми молекулами, разрывая валентные связи внутри этих молекул и насыщаясь за счет этих связей, превращая таким образом валентно-насыщенные молекулы в радикалы, а радикалы, наоборот, в валентно-насыщенные образования. Рассмотрим в качестве примера каталитическую реакцию окисления  $\text{CO}$ . Представим, что на поверхности полупроводника адсорбирован атом  $\text{O}$ , находящийся в состоянии прочной связи с поверхностью, т. е. привязанный к локализованному около него электрону. Такое состояние изображено на рис. 7.2, а. Мы имеем в данном случае поверхностный радикал (или, выражаясь точнее, *ионорадикал*), на ненасыщенную валентность которого может сесть молекула  $\text{CO}$ , пришедшая из газовой фазы. При этом у атома  $\text{C}$  раскрываются две дополнительные валентности (атом  $\text{C}$  становится четырехвалентным) и мы получаем поверхностное образование, изображенное на рис. 7.2, б, также представляющее собой ионорадикал. Достаточно теперь электрону, удерживающему это образование, делокализоваться или аннигилировать с подошедшей дыркой – в газовую фазу уходит молекула  $\text{CO}_2$ , являющаяся продуктом реакции (рис. 7.2, в). Согласно рис. 7.2 эту реакцию можно рассматривать состоящей из двух стадий, из которых первая (переход 1 на рис. 7.2) идет тем быстрее, чем больше на поверхности адсорбированных атомов кислорода (чем выше концентрация на поверхности свободных электронов). Скорость второй стадии (переход 2 на рис. 7.2) тем больше, чем вероятнее аннигиляция локализованного электрона со свободной дыркой, т. е. чем больше концентрация свободных дырок. Мы видим на этом примере, что скорость реакции регулируется концентрацией свободных электронов и дырок на поверхности полупроводника.

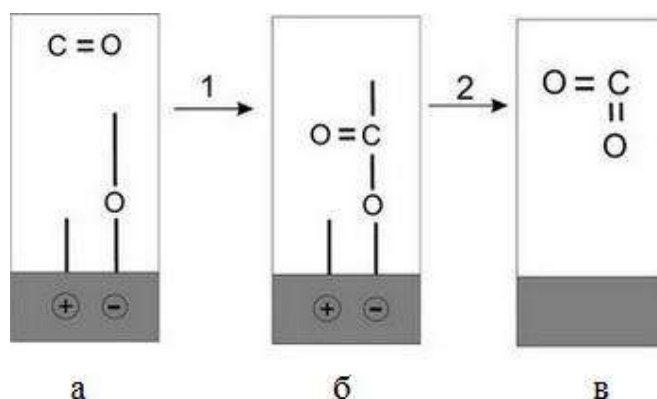


Рис. 7.2. Механизм окисления CO

Таким образом, процессы адсорбции молекул и атомов из газовой фазы на поверхности полупроводника приводят не только к изменению свойств газов, но и к изменению электрических свойств полупроводника, которые могут быть зарегистрированы измерительными приборами (изменение разности потенциалов, протекающего тока, сопротивления, емкости).

Очевидно, что анализируя изменение электрических свойств полупроводника можно делать заключение о параметрах газовой среды (состав, концентрация), т. е. конструировать полупроводниковые первичные преобразователи (или сенсоры) химического состава газов.

Сенсоры химического состава газов нашли применение в химической и электронной промышленности, машиностроении, авиационной и автомобильной технике, космонавтике, медико-биологических исследованиях и медицинской практике. Они используются в составе автономных измерительных приборов для определения концентрации газов в системах автоматического регулирования производственных процессов и оптимальной работы двигателей, автоматизированных системах управления технологическими процессами, промышленных работах, лечебно-диагностических комплексах и приборах бытового назначения.

Из большого разнообразия газовых датчиков по технологическим признакам можно выделить класс микроэлектронных, изготовление которых связано с применением технологии интегральных микросхем. Классификация таких датчиков представлена на рис. 7.3.

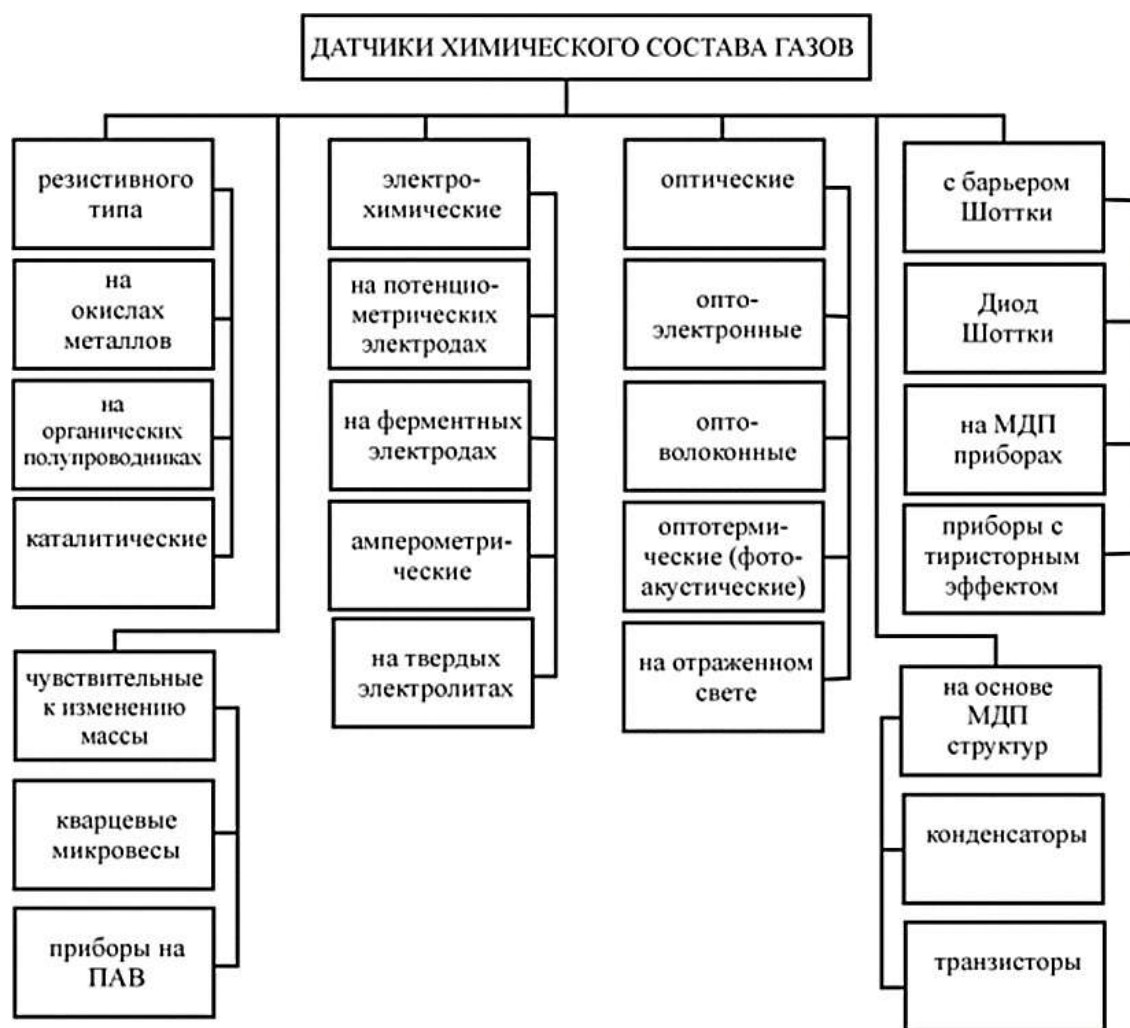


Рис. 7.3. Классификация датчиков химического состава газа в соответствии с физико-химической природой процессов, происходящих в структуре датчика

## 7.2. Датчики на основе окислов металлов

В качестве чувствительных материалов применяют  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . На поверхности этих полупроводников при хемосорбции кислорода локализуется отрицательный заряд, образованный захваченными электронами, что приводит к обеднению приповерхностной области полупроводника электронами и снижению его проводимости. Когда сорбируется другой анализируемый газ, каталитически взаимодействующий с хемосорбированным кислородом, проводимость приповерхностной области полупроводника увеличивается. Скорости этих процессов и их обратимость зависят от температуры, которая должна быть порядка нескольких сотен градусов.

Датчики изготавливаются методами тонко- и толстопленочной технологии. На изолирующую подложку (ситалл, сапфир) напыляют платиновые контакты. Сверху наносят пленку чувствительного материала в виде пасты, которую затем отжигают. На обратной стороне изолирующей подложки формируется тонкопленочный резистивный нагреватель из платины.

В зависимости от состава пленки чувствительного материала датчики реагируют на газы:  $C_2H_5OH$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ . Рабочая температура колеблется в диапазоне 273–773 К.

С помощью микроэлектронной технологии изготавливаются резистивные датчики этанола, конструкция которых представлена на рис. 7.4.

После термического окисления кремния подложки осаждением из газовой фазы наносят поликремний, имплантированный фосфором. Далее химическим осаждением из газовой фазы наносят слой  $SiO_2$  (1 мкм), а поверх него термическим распылением – тонкий слой  $SnO_x$  (100 нм). Пористый слой  $PdAu$  толщиной 2.5 нм служит для увеличения чувствительности датчика к  $C_2H_5OH$ . При введении в анализируемую среду 200 ppm  $C_2H_5OH$  сопротивление датчика уменьшается в 140 раз.

Кремниевый датчик другой конструкции, предназначенный для определения содержания  $CO$ , изготовлен по групповой технологии на пластине Si. Его

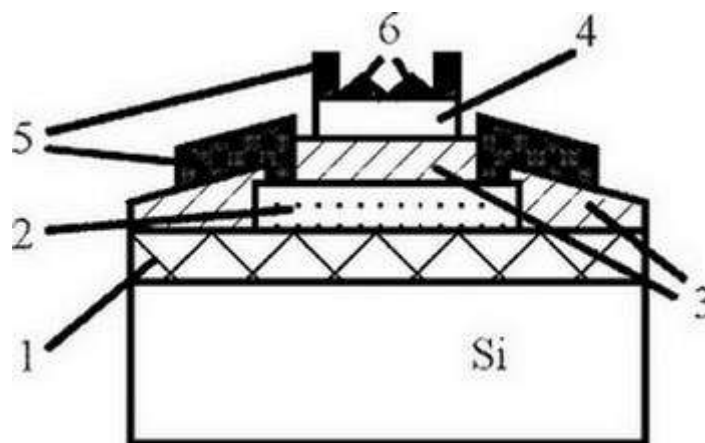


Рис. 7.4. Резистивный датчик этанола:

1 – слой  $SiO_2$  (1 мкм); 2 – поликремний; 3 – пиролитический  $SiO_2$  (1 мкм); 4 – пленка  $SnO_x$ ; 5 – контакты  $Al/Cr$ ; 6 – островки  $PdAu$

Кремниевый датчик другой конструкции, предназначенный для определения содержания  $CO$ , изготовлен по групповой технологии на пластине Si. Его структура представлена на рис. 7.5.

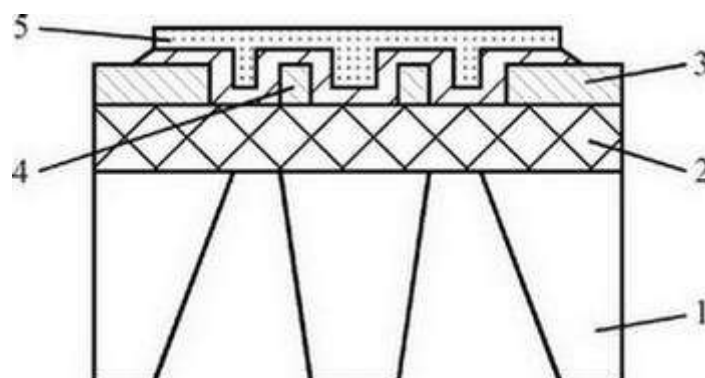


Рис. 7.5. Датчик CO:

- 1 – жесткая опора Si; 2 – пиролитический SiO<sub>2</sub>; 3 – пленки Au/Mo; 4 – изолирующий слой;  
5 – пленка SnO<sub>2</sub>

Используется анизотропное травление на всю толщину кремниевой подложки. Слои SiO<sub>2</sub> и SnO<sub>2</sub> нанесены магнетронным распылением. Время отклика датчика при введении 35000 ppm CO<sub>2</sub> составляет около 4 мин при 600 К.

### 7.3. Датчики на органических полупроводниках

В качестве чувствительных элементов используют пленки фталоцианинов, обладающие высокой термической и химической стойкостью. Эти пленки являются полупроводниками *p*-типа, большое влияние на их проводимость оказывает кислород воздуха. Проводимость пленки меняется в присутствии газов, сродство к электрону у которых больше, чем у кислорода. К ним относятся галогены и галогеносодержащие газы, а также NO<sub>2</sub>, чувствительность датчика увеличивается при легировании пленок атомами тяжелых металлов.

Для определения концентрации NH<sub>3</sub> применяют полипиррол, для смеси NO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и Cl<sub>2</sub> используют пленки тетразанулина. Для определения концентрации газообразного йода используют пленки полипарафенилиназометина.

### 7.4. Каталитические датчики

Каталитические датчики работают по принципу регистрации количества тепла, выделяющегося при протекании каталитических реакций на поверхности катализатора. В качестве термочувствительного параметра обычно используют изменение сопротивления пленки самого катализатора либо тонкой платиновой проволоки, расположенной в непосредственной близости к его поверхности.

Основная трудность заключается в точности измерения малых изменений температуры в рабочей области. В одной из конструкций в качестве датчика температуры применяют биполярный транзистор (рис. 7.6).

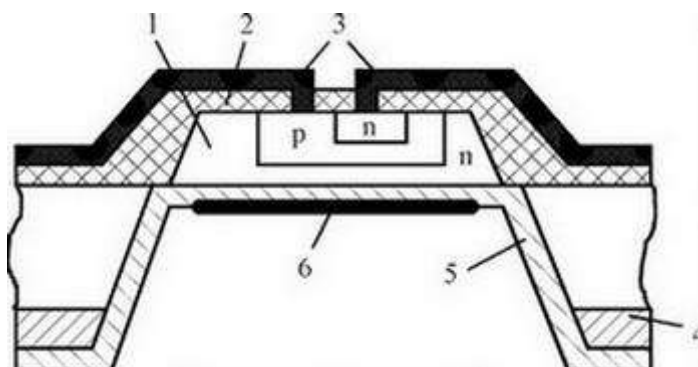


Рис. 7.6. Структура резистивного каталитического датчика водорода:

1 – мезоструктура (биполярный транзистор); 2 – пиролитический  $\text{SiO}_2$ ; 3 – алюминиевые контакты; 4 – металлическая маска ( $\text{Au/Cr}$ ); 5 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 6 – катализатор

Исходным материалом служит пластина  $n^+$ -Si с эпитаксиальным слоем  $n$ -типа толщиной 10 мкм, в которой изготавливают вертикальный биполярный транзистор. После этого формируют мезоструктуру диаметром 500 мкм. Слой  $\text{SiO}_2$  (0.5 мкм) наносят методом химического осаждения из газовой фазы при  $T = 723 \text{ K}$ , после чего выполняют металлическую разводку. Затем проводят анизотропное травление кремниевой подложки на всю толщину через маску из золота (0.2 мкм) с подслоем хрома (0.2 мкм). В заключение напыляют тонкий (0.1 мкм) слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и катализатор (пленка Pd толщиной 10–20 нм). Датчик характеризуется высокой чувствительностью к водороду.

Другой вариант каталитического датчика представлен на рис. 7.7.

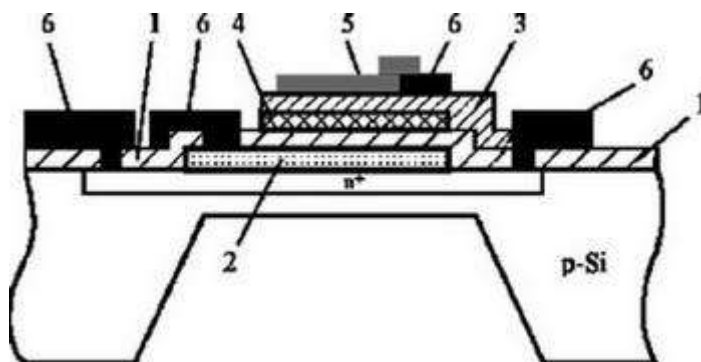


Рис. 7.7. Структура каталитического датчика окиси углерода:

1 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 2 – поликремний; 3 – пиролитический  $\text{SiO}_2$ ; 4 – слой  $\text{ZnO}$ ; 5 – катализатор; 6 – алюминиевые контакты

На пластине кремния  $p$ -типа анизотропным травлением получена мембрана толщиной 25 мкм. Датчиком температуры служит конденсатор, на верхней обкладке которого (тонкий слой платины) происходит каталитическая реакция. Нижняя обкладка конденсатора изготовлена из легированного фосфором поликремния. Между обкладками размещен слой  $\text{ZnO}$  (1 мкм). На его поверхности за счет пьезоэлектрического эффекта возникает заряд, величина которого зависит от температуры. Величина заряда регистрируется при помощи усилителя, выполненного по КМОП-технологии и расположенного на одном кристалле с датчиком.

Резистивным нагревателем служит область  $p^+$ -типа, полученная диффузией бора в кремниевую подложку. Выходной сигнал датчика достигнет максимума за 15 с при заполнении камеры чистым  $\text{CO}$  (99.99 %).

## 7.5. Электрохимические газовые датчики

В основе работы этой группы датчиков лежат закономерности протекания электрического тока через электрическую цепь, основными элементами которой являются:

- 1) металлические или полупроводниковые наноселективные электроды;
- 2) проводники второго рода (растворы электролитов, их расплавы или твердые электролиты);
- 3) границы раздела фаз между металлами (полупроводниками) и электролитами, двумя различными проводниками первого рода, двумя различными электролитами.

Разновидностью электрохимической цепи является цепь, в которой два проводника второго рода разделены мембраной.

*Датчики с ферментными электродами.* Их работа основана на ферментативных реакциях, происходящих в слое фермента, отделяющего исследуемую среду от наноселективного электрода, с помощью которого регистрируются продукты ферментативной реакции.

*Датчики с амперометрическими электродами.* Величина тока электрохимической цепи такого датчика зависит от концентрации газа в исследуемой среде, проникающего через мембрану.

Амперометрический метод лежит в основе работы газовых датчиков на твердых электролитах, которые применяются для определения содержания кислорода и окислов серы. Электролитом служит двуокись циркония с добавками.

На рис. 7.8 представлена типичная структура такого датчика, выполненного по совмещенной технологии. Подложкой служит пластина из сапфира с высоким сопротивлением (порядка  $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Электрод сравнения, который обеспечивает постоянное значение активности кислорода, изготовлен из смеси Ni/NiO или Pd/PdO и покрыт сверху защитным слоем, предотвращающим проникновение к нему исследуемой газовой смеси. Контакт последней с рабочими электродами из пористой толстой пленки платины осуществляется через специальное отверстие в защитном покрытии. Поступающий газ диффундирует через пористый рабочий электрод к границе раздела рабочий электрод – твердый электролит, где происходит реакция диссоциации кислорода. Твердый электролит представляет собой стабилизированный иттрием или кальцием тонкий слой  $\text{ZnO}_2$ . Рабочий электрод, изготовленный из кермета на основе платины ( $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Pt/MgAl}_2\text{O}_3$  и т. п.), имеет высокую стабильность и воспроизводимость характеристик. На обратной стороне сапфировой подложки формируют резистивный нагреватель из тонкой платиновой пленки. На одной сапфировой пластине размером  $76 \times 76 \text{ мм}$  может быть получено одновременно до 300 датчиков.

## 7.6. Датчики на основе МДП-структур

Исследования показали, что МДП-структуры, металлический электрод которых выполнен из переходных металлов (палладий, платина, никель), меняют свои характеристики под действием газов. При этом в МДП-конденсаторах наблюдается сдвиг вольт-фарадных характеристик вдоль оси напряжения без изменения ее формы, а в МДП-транзисторах – изменение порогового напряжения и, как следствие, сдвиг вольт-амперных характеристик. Например, при введении в среду газообразного водорода у МДП-структур с затворами из палладия на поверхности протекает каталитическая реакция диссоциации адсорбированных молекул водорода на атомы, которые затем растворяются в палладии и под действием градиента концентрации диффундируют к границе раздела  $\text{Pd} - \text{SiO}_2$ , где вследствие реакции  $\text{H} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}^-$  образуется дипольный слой, ионы располагаются на активных центрах границы раздела  $\text{Pd} - \text{SiO}_2$ , а электроны остаются в палладии. Таким образом, в диэлектрике появляется дополнительный заряд, который приводит к сдвигу вольт-фарадных характеристик, изменению напряжения плоских зон и порогового напряжения.

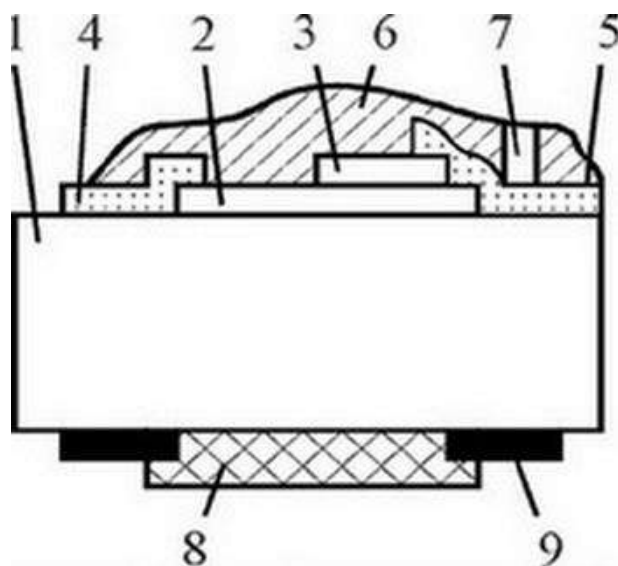


Рис. 7.8. Датчик на твердом электролите:

- 1 – сапфировая подложка; 2 – твердый электролит; 3 – электрод сравнения; 4 и 5 – рабочие электроды; 6 – защитное покрытие; 7 – отверстие для подвода исследуемого газа;  
8 – нагреватель; 9 – выводы нагревателя

Существует несколько конструкций датчиков химического состава на основе МДП-структур, некоторые из них приведены ниже.

Дифференциальный датчик водорода на МДП-транзисторе имеет вид, представленный на рис. 7.9. На одном кристалле формируются два МДП-транзистора, отличающиеся лишь материалом металлического затвора, нагреватель и датчик температуры (полупроводниковый диод).



Слой  $\text{SiO}_2$  получен термическим окислением,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (50 нм) – осаждением из газовой фазы, слои платины (50 нм) и палладия (50 нм) напыляются через металлическую маску. Чтобы обеспечить нечувствительность одного из МДП-транзисторов к изменению концентрации водорода в среде, сверху палладия нанесен слой (1 мкм) металла, не поглощающего водород (Al, Ni, Cu, Au, Ag).

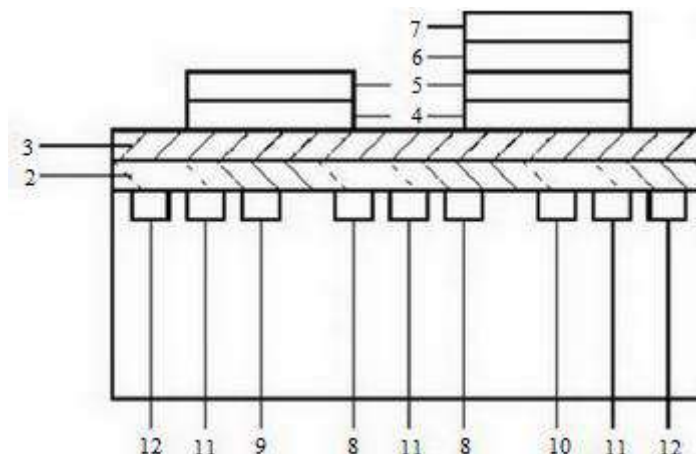


Рис. 7.9. Дифференциальный датчик водорода на МДП-транзисторе:

1 – подложка Si; 2 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 – слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 4 – платина; 5 – палладий; 6 – медь; 7 – серебро; 8 – общий исток; 9 – сток первого МДП-транзистора; 10 – сток второго МДП-транзистора; 11 – охранные кольца; 12 – нагреватель

На выходе дифференциальной схемы измеряется величина изменения порогового напряжения  $\Delta U_{\text{пор}}$ .

Другой конструкцией датчика химического состава является МДП-транзистор с сеточным (перфорированным) затвором, представленный на рис. 7.10.

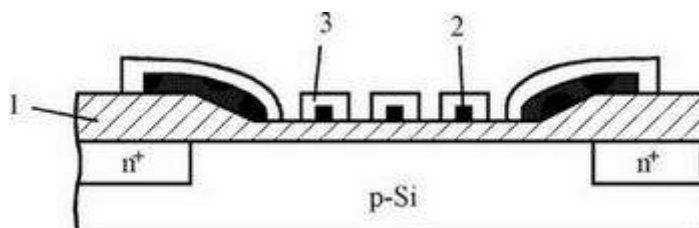


Рис. 7.10. Датчик CO на основе МДП-транзистора с сеточным затвором:

1 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 2 – слой палладия; 3 – слой PdO

Диаметр пор в палладиевой пленке 1.5–3.0 мкм. Слой окиси палладия формируется либо распылением палладия в атмосфере  $\text{Ar} + \text{O}_2$ , либо термическим окислением при температуре 473–673 К. Для уменьшения водородной чувствительности приборов на слой палладия наносят тонкий слой Al. По сравнению с датчиками CO на основе резистора  $\text{SnO}_2$  разработанные приборы

имеют в 6 раз большую чувствительность в атмосфере CO/этанол, в 7 раз – CO/бутан и в 12 раз – CO/метан, однако они имеют низкую скорость отклика (1–2 мин).

Датчики, чувствительные к  $\text{NH}_3$  и  $\text{NO}_2$ , могут быть изготовлены на основе МДП-транзистора с двухэлементным диэлектриком, верхний слой которого изготовлен из органически модифицированных силикатов. Для того чтобы обеспечить доступ исследуемого газа к слою силиката, металлический затвор должен быть либо пористым (слой золота 10 нм), либо расщепленным (рис. 7.11), либо зигзагообразным. Принцип действия датчика основан на изменении диэлектрической проницаемости силиката при адсорбции газов, следствием чего является сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора.

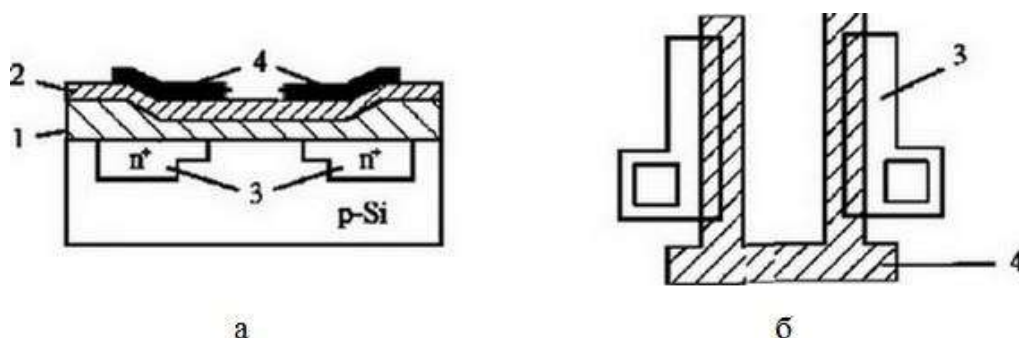


Рис. 7.11. Структура и топология МДП-транзистора с расщепленным затвором:

1 –  $\text{SiO}_2$ ; 2 – силикат; 3 – сток (исток); 4 – затвор

Если между двумя половинами расщепленного затвора МДП-транзистора поместить резистивный слой (например, полимер), то получится прибор, называемый транзистором с растеканием заряда (charge-blow transistor). Такой датчик работает в динамическом режиме. При подаче напряжения затвор – исток сначала заряжается емкость под затвором, затем емкость под резистивным слоем. Постоянная времени заряда емкости под резистивным слоем зависит от сопротивления резистивной пленки, толщины и длины резистивной части затвора, а также от диэлектрической проницаемости и толщины затворного диэлектрика. Обычно измеряют время задержки импульса тока при приложении прямоугольных импульсов между затвором и истоком. Существует конструкция газового датчика, у которого в качестве диэлектрика используется воздушный зазор (рис. 7.12). Попадая в зазор между поверхностью полупроводника и поликремниевым затвором, газ может менять либо диэлектрическую проницаемость в зазоре, либо, адсорбируясь на поверхность подложки или поликремниевого затвора, формировать дипольный слой, что приводит к изменению порогового напряжения транзистора.

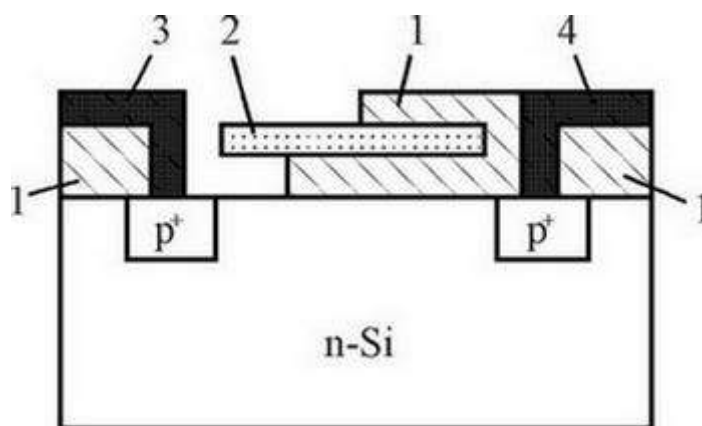


Рис. 7.12. Газовый датчик с воздушным затвором:

1 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 2 – поликремний; 3, 4 – Al контакты

Данный прибор получил название «транзистор с доступом к поверхности» (surface-accessible transistor). Толщина поликремния должна быть не менее 1 мкм. Оптимальная глубина зазора 4 мкм получается травлением затворного окисла в буферном травителе.

Главным недостатком такого прибора является низкая селективность, т. е. реагирование на суммарное количество полярных газов в зазоре.

В другом варианте газового датчика с воздушным зазором применяют перфорированный (сетчатый) платиновый затвор, который для повышения чувствительности электролитически покрывают тонким слоем металла (палладий, свинец, цинк) либо полипиролла (рис. 7.13).

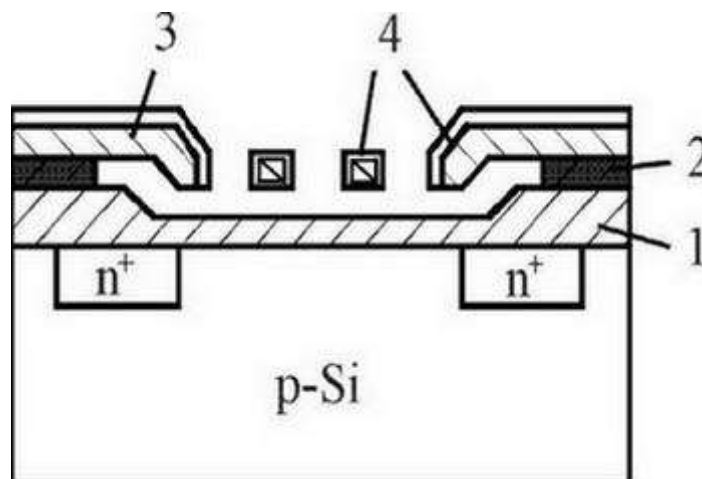


Рис. 7.13. МДП-транзистор с сетчатым затвором:

1 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 2 – подслой; 3 – платиновый затвор; 4 – чувствительное покрытие

Этот прибор называется «транзистор с подвешенным затвором» (suspended-gate transistor). Исследуемый газ проникает в полость под затвором и взаимодействует с его внутренней поверхностью, покрытой чувствительным слоем. В результате происходит изменение работы выхода материала затвора и сдвиг порогового напряжения. Такой прибор используется для регистрации паров спиртов и компаундов.

### 7.7. Газовые датчики с барьером Шоттки

Газовые датчики на основе диодов Шоттки (ДШ) с контактом из палладия появились одновременно с датчиками на основе МДП-структур. Как известно, ВАХ ДШ описывается выражениями

$$I = I_0 \left( \exp \frac{qU}{kT} - 1 \right),$$

$$I_0 = A^* \cdot T^2 \exp \left( -\frac{q\varphi_b}{kT} \right),$$

где  $I$  – прямой ток;

$I_0$  – ток насыщения;

$q$  – заряд электрона;

$U$  – напряжение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура;

$A^*$  – постоянная Ричардсона;

$\varphi_b$  – высота барьера Шоттки.

Следовательно, ток ДШ экспоненциально зависит от высоты барьера Шоттки. Этим объясняется высокая чувствительность датчиков на основе ДШ.

Водородная чувствительность газовых датчиков на основе ДШ определяется двумя механизмами:

1) диффузией атомов водорода через металлический контакт из палладия (платины, золота) с образованием на границе раздела металл – полупроводник дипольного слоя, который влияет на высоту барьера Шоттки;

2) изменением заряда поверхностных состояний на границе раздела металл – полупроводник в присутствии водорода.

Так, изменением высоты барьера Шоттки можно объяснить ВАХ ДШ при выдержке в водородосодержащей атмосфере (рис. 7.14).

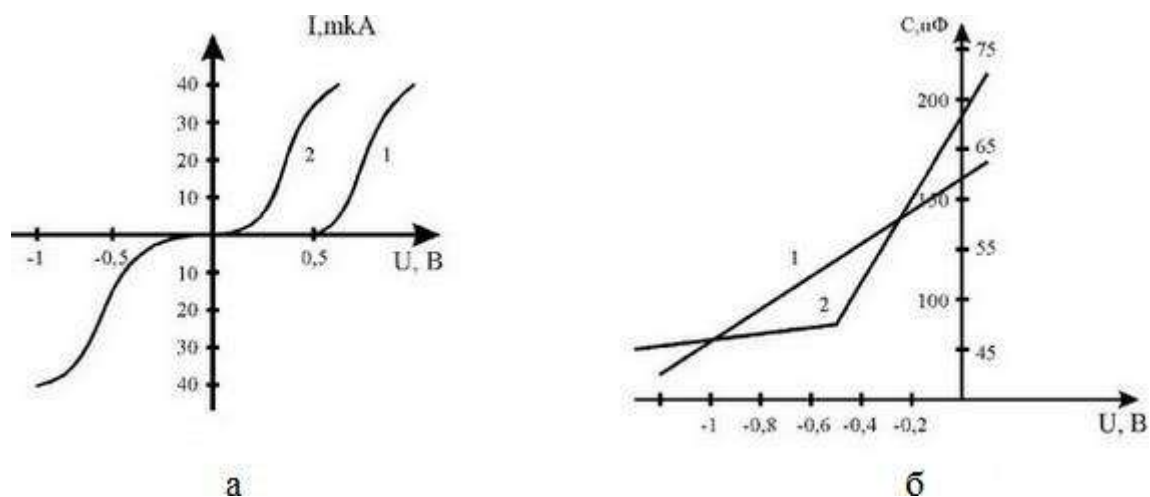


Рис. 7.14. ВАХ (а) и ВФХ ДШ (б) со структурой Pd – InP:

1 – на воздухе; 2 – в атмосфере водорода (100 ppm):  
на (б) масштаб справа соответствует кривой 1, слева – кривой 2

К настоящему времени получены газочувствительные ДШ с палладиевыми контактами на таких полупроводниках, как CdS, ZnO, TiO<sub>2</sub>, InP, GaAs. При напылении на кремний палладий вступает в химическое взаимодействие с образованием силицида палладия, при этом пропадает водородная чувствительность структуры. Для предотвращения этого явления на поверхности Si необходимо вырастить туннельно тонкий слой SiO<sub>2</sub> (2–3 нм). Полученные таким образом МДП-диоды работают как ДШ. Вместо монокристаллического кремния можно использовать гидрогенизированный аморфный ( $\alpha$ -Si:H). На стеклянную поверхность напыляют слой хрома (300 нм), который служит обратным контактом. Далее пиролитическим разложением силана наносят  $\alpha$ -Si:H  $n$ -типа (30 нм) и нелегированный  $\alpha$ -Si:H (0.6 мкм), затем напыляют палладий (8–10 нм). По ВАХ этот прибор близок к лучшим, созданным на монокристаллическом кремнии, он может детектировать водород на уровне 10 ppm в N<sub>2</sub>. Время отклика датчика составляет 15 мин при 295 К, что связано с медленной адсорбцией водорода на поверхности палладия.

Если МДП-туннельный диод дополнить еще одним  $p$ - $n$ -переходом, как показано на рис. 7.15, то получится прибор, обладающий тиристорным эффектом, т. е. переключающийся из закрытого состояния в открытое при определенном пороговом напряжении, величина которого зависит от концентрации водорода в среде.

## 7.8. Газовые датчики на основе приборов, чувствительных к изменению массы

Известно, что генераторы на основе пьезокристаллов чрезвычайно чувствительны к изменению массы электродов и посторонних частиц, адсорбированных на поверхности. Чтобы создать химические датчики на их

основе, необходимо обеспечить преимущественную адсорбцию молекул исследуемого газа на поверхность кристалла с помощью нанесения тонкого слоя адсорбирующего материала. Таким образом, при росте концентрации исследуемого газа в среде увеличивается его масса, адсорбированная на поверхности пьезокристалла, и пропорционально снижается частота пьезокристалла, а также частота выходного сигнала генератора.

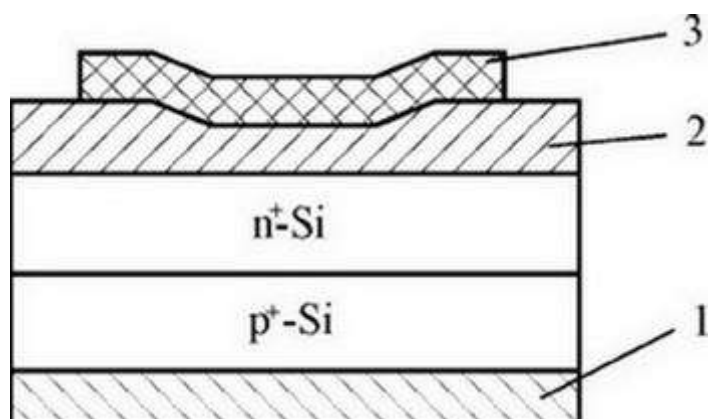


Рис. 7.15. Датчик водорода на тиристорном эффекте:

1 – омический контакт; 2 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 – слой палладия

Существуют два типа приборов, чувствительных к изменению массы. Первый из них называется кварцевыми микровесами, его структурная схема показана на рис. 7.16.

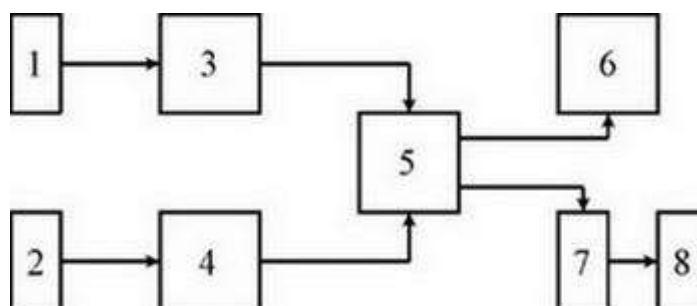


Рис. 7.16. Структурная схема кварцевых микровесов:

1, 2 – чувствительный и вспомогательный пьезокристаллы; 3, 4 – генераторы; 5 – смеситель; 6 – частотомер; 7 – преобразователь частота – напряжение; 8 – регистрационное устройство

Чувствительным элементом служит 15 МГц кристалл кварца с золотыми контактами. Имеются два однотипных пьезокристалла, один из которых является чувствительным элементом, а другой – эталоном. Изменение концентрации газа влияет на частоту сигнала на выходе генератора 3. Смеситель 5 выделяет разностную частоту, пропорциональную массе газа

адсорбированного на поверхности чувствительного элемента. Такой прибор обладает высокой селективностью и применяется для регистрации паров ртути. Недостатком датчика является необходимость регенерации (удаление паров ртути) после каждого измерения.

Второй тип прибора – датчик на ПАВ дифференциальной конфигурации (рис. 7.17). На пьезокристаллической подложке (кварц,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{ZnO/SiO}_2/\text{Si}$ ) размещены две одинаковые линии задержки на ПАВ, каждая из которых состоит из нескольких возбуждающих и детектирующих электродов. В области распространения ПАВ одной из линий задержки нанесен чувствительный слой, селективно адсорбирующий молекулы исследуемого газа, что сопровождается уменьшением скорости распространения ПАВ, а значит, и частоты колебаний генератора. Смеситель выделяет разностную частоту, пропорциональную количеству адсорбированного газа, а значит, его концентрации в среде.

Напыляя на поверхность подложки пленку палладия, получают газовые датчики водорода. Для регистрации  $\text{NO}_2$  в качестве чувствительного слоя применяют пленки фталацианидов.

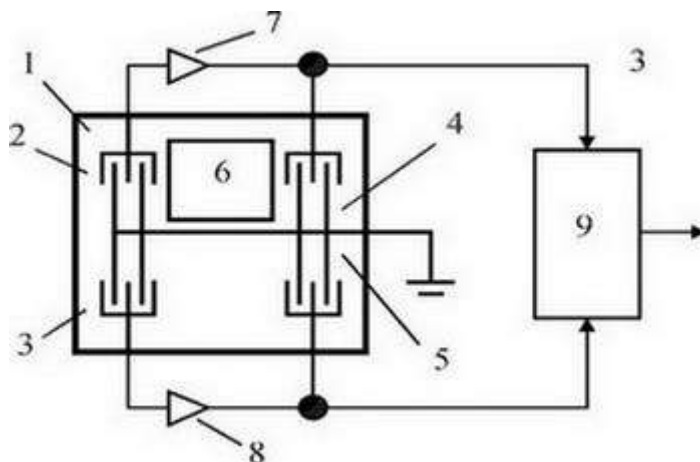


Рис. 7.17. Датчик на ПАВ:

1 – пьезокристаллическая подложка; 2, 3 – возбуждающие электроды; 4, 5 – детектирующие электроды; 6 – чувствительное покрытие; 7, 8 – усилители; 9 – смеситель

## 8. ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ

В технологии микроэлектроники широко используются процессы физико-химической обработки материалов, находящихся в контакте с газовой (эпитаксия, диффузия, окисление) и жидкой (химическое травление, анодное окисление, очистка поверхности) фазами и, в зависимости от типа технологического процесса, требования к уровню содержания влаги в среде различны. Например, при автоэпитаксии кремния наличие в технологической парогазовой смеси (ПГС) одной молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  на миллион молекул ПГС вызывает недопустимый рост дефектного поликристаллического слоя кремния.

Концентрация паров воды в фосфине  $\text{PH}_3$  при производстве ИС средней степени интеграции не должна превышать уровня 30 молекул  $\text{H}_2\text{O}$  на миллион молекул парогазовой смеси, а при производстве СБИС – одной молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  на миллион молекул. Содержание влаги внутри корпусов ИС не должно превышать 500, а на операциях сборки ИС 50 молекул  $\text{H}_2\text{O}$  на миллион молекул воздуха. Такие примеры говорят о важности прецизионных измерений влажности в производстве изделий микро- и нанoeлектроники.

### 8.1. Единицы измерения влажности

*Влага – количество воды, содержащееся в жидкости или твердом теле, которое может быть удалено без изменения химических свойств вещества.*

*Удельная влажность – это масса паров воды на единицу массы сухого газа.*

*Абсолютная влажность – это масса паров воды на единицу объема влажного воздуха, или плотность водяных паров.*

*Относительная влажность – это отношение давления паров воды в воздухе, измеренное при некоторой температуре, к максимальному давлению насыщенного пара, при той же температуре.*

*Точка росы – это температура, при которой парциальное давление водяных паров становится максимальным.*

Содержание влаги обычно измеряют в единицах абсолютной влажности, парциального давления паров воды, объемного влагосодержания, относительной влажности и температуры точки росы.

Абсолютная влажность  $C_a$  измеряется обычно в граммах на кубический метр, парциальное давление паров воды – в гектопаскалях (1 ГПа – 100 Па).

Объемное влагосодержание (или объемная концентрация паров воды)  $C_v$  определяется как отношение объема паров воды к объему ПГС и выражается в единицах ppm (т. е. количество примесных атомов на  $10^6$  атомов основного вещества).

Относительная влажность  $\Phi$  измеряется в процентах и определяется как отношение парциального давления паров воды к давлению насыщенных паров воды при данной температуре.



Температурой точки росы  $T_p$  называется такая температура (в Кельвинах), с которой начинается конденсация паров воды, содержащихся в газе, при изобарическом охлаждении.

При измерениях микроконцентраций влаги в жидкостях и газах в качестве единицы измерения объемного влагосодержания чаще всего применяют объемные проценты или единицы ppm.

## 8.2. Температурно-градиентные датчики влажности

### 8.2.1. Психрометрические датчики

Психрометрический метод предназначен для измерения относительной влажности газа (чаще всего воздуха) при значениях температур выше 273 К и основан на зависимости влажности воздуха от разности показаний сухого и влажного термометров. При этом температура влажного термометра зависит от интенсивности испарения воды с увлажненной поверхности. Между давлением и температурой существует соотношение

$$p = p' - AP(t_c - t_v), \quad (8.1)$$

где  $p$  – парциальное давление паров воды в исследуемой газовой среде при температуре сухого термометра  $t_c$ ;

$p'$  – давление насыщенных паров воды при температуре влажного термометра  $t_v$ ;

$A$  – психрометрический коэффициент, зависящий от свойств анализируемого газа и конструктивных особенностей преобразователя;

$P$  – общее давление.

В качестве термочувствительных элементов используют термопары, термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы и термодиоды.

Относительная простота и дешевизна приборов обеспечивают им достаточно широкое распространение в бытовой технике, а также при кондиционировании воздуха для создания условий вакуумной гигиены в производственных помещениях.

Метод обладает серьезными недостатками: необходимость мокрого термометра, зависимость показаний от суммарного давления газа и его состава, невозможность применения при низких температурах, которые приводят к неуклонному уменьшению доли психрометров в общем объеме выпуска приборов для измерения влажности.

### 8.2.2. Конденсационные датчики

Конденсационный метод (или метод точки росы) основан на фиксации температуры конденсации паров воды в газовой фазе. В последнее время интерес к этому методу повысился в связи с разработкой эффективных средств

охлаждения, надежных и точных способов регистрации момента выпадения конденсата и измерения температуры, а также в связи с необходимостью измерения влажности внутри малых объемов корпусов ИС.

К достоинствам метода прежде всего относятся возможность измерения влажности в широком диапазоне концентраций паров воды, температуры и давления анализируемой среды, а также градуировки датчиков по температуре, а не по влажности.

При реализации метода необходимо выполнение операций регулируемого охлаждения конденсирующей поверхности детектора с точной фиксацией момента появления слоя конденсата и одновременной регистрацией температуры конденсирующей поверхности.

Для охлаждения используются термоэлектрические холодильники (до температур  $\sim 203$  К), а также криогенные жидкости (жидкие азот, воздух, гелий).

Для измерения температуры конденсирующей поверхности детектора применяются термопары и терморезисторы.

Для определения момента образования слоя конденсата и выявления его параметров применяют способы, основанные на измерении оптических (в видимой и ИК-областях спектров) и электрических характеристик конденсата (чаще всего поверхностного сопротивления).

Для индикации слоя конденсата применяют также пьезокварцевый резонатор, включенный в схему генератора, добротность которого резко уменьшается в момент выпадения на поверхности резонатора слоя конденсата, что приводит к резкому изменению частоты генерации. Высокая чувствительность такого метода объясняется чрезвычайно высокой массовой чувствительностью кварцевого резонатора, который регистрирует изменения массы  $10^{-8} - 10^{-10}$  г.

В методе регистрации слоя конденсата с помощью фотоэлементов (фотодиодов, фоторезисторов, фототранзисторов) определение основано на сравнении интенсивности световых потоков, отраженных от чистой зеркальной конденсирующей поверхности и от поверхности со слоем конденсата.

В связи с необходимостью измерения влажности в корпусах ИС возрос интерес к методам регистрации конденсата по изменению поверхностной проводимости или межэлектродной емкости. Простейшие датчики поверхностно-конденсационного типа представляют собой подложку из окисленного кремния или другого диэлектрика, на которую нанесены два металлических электрода, чаще всего гребенчатой формы.

На практике измерение емкости производится за счет подачи сигнала возбуждения на электроды датчика. Изменение емкости датчика преобразуется в изменение напряжения, тока, частоты или ширины импульсов. Существует несколько типичных методов измерения емкости.

Первый, или «прямой», метод подразумевает заряд конденсатора от источника тока в течение определенного времени и затем измерение

напряжения на конденсаторе. Этот метод требует наличия прецизионного источника очень маленького тока и высокоимпедансного входа измерения напряжения.

Второй метод подразумевает использование измеряемой емкости в качестве времязадающей цепочки на RC-генераторе с последующим измерением постоянной времени, частоты или периода. Этот метод прост, но обычно не обеспечивает высокой точности.

Третий метод заключается в измерении импеданса конденсатора на переменном токе. Источник синусоидального сигнала подключается к конденсатору, и при этом измеряются напряжение и ток через конденсатор. Однако такая схема очень сложна и состоит из многих компонентов.

Четвертый, наиболее распространенный, метод измерения емкости прецизионного датчика с малой величиной емкости заключается в применении зарядового усилителя, который преобразует соотношение измеряемой и опорной емкостей в сигнал напряжения. Такая схема поставляется в виде специализированных микросхем и подходит для некоторых систем при больших объемах производства.

Во всех описанных методиках емкость сначала преобразуется в напряжение, которое затем преобразуется в цифровой код при помощи прецизионного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Структура двухэлектродного датчика точки росы резистивно-емкостного типа представлена на рис. 8.1.

Поверхностная проводимость такой структуры при приближении к точке росы увеличивается по закону, близкому к экспоненциальному. Образование на поверхности твердой фазы (льда) приводит к резкому уменьшению электропроводности конденсата.

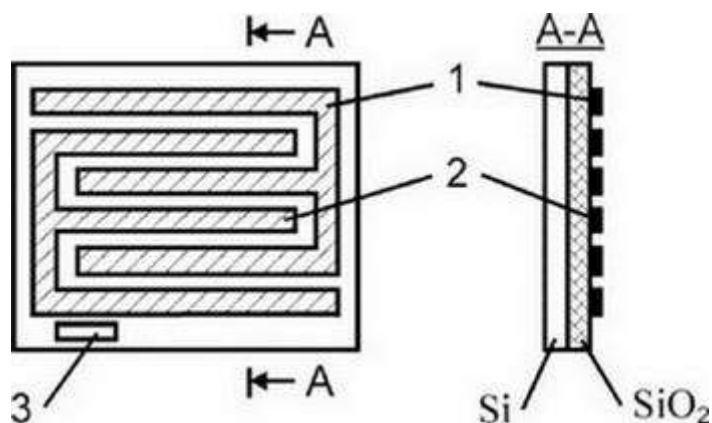


Рис. 8.1. Двухэлектродный датчик росы резистивно-емкостного типа:

1, 2 – электроды; 3 – датчик температуры

Типичная зависимость тока датчика  $I_D$  конденсационного типа при измерении влажности в объеме корпуса ИС представлена на рис. 8.2.

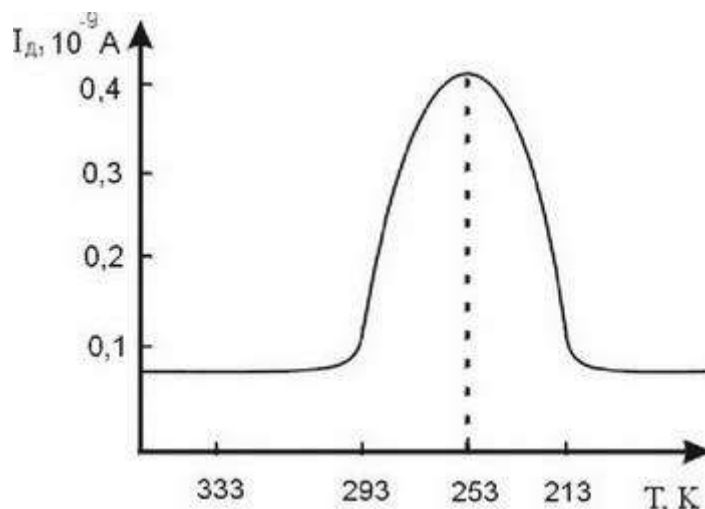


Рис. 8.2. Характеристика датчика конденсационного типа

Охлаждение корпуса ИС проводят со скоростью не более 15 К/мин.

Структура полупроводникового датчика точки росы емкостного типа (без датчика температуры) представлена на рис. 8.3.

Для получения высокой точности измерения в широком диапазоне рабочих температур требуется температурная компенсация характеристики преобразования. Компенсация особенно необходима в промышленном оборудовании для измерения влажности и точки росы. Термокомпенсацию обеспечивает встроенный платиновый терморезистор сопротивлением 1000 Ом, который расположен с обратной стороны подложки.

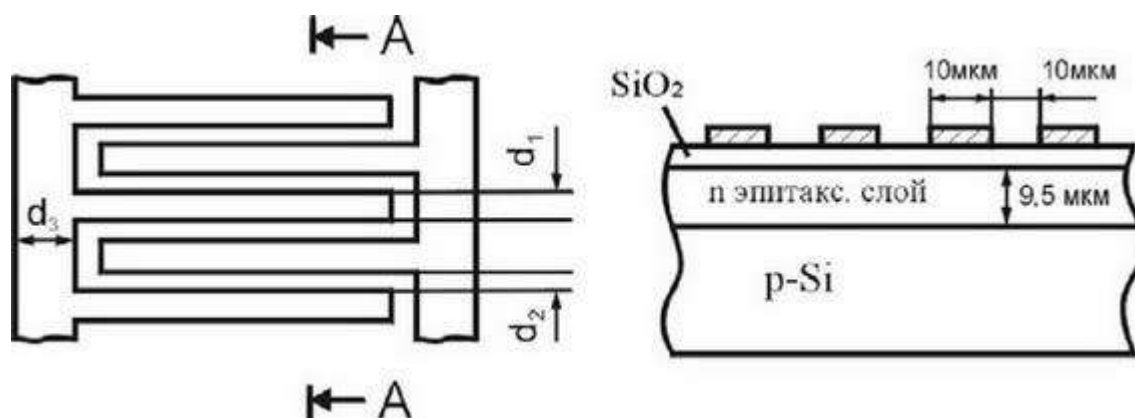


Рис. 8.3. Структура датчика точки росы емкостного типа

Датчик используется для контроля содержания влаги в корпусах ИС по изменению паразитной межэлектродной емкости структуры. При этом изменение емкости порядка 1 пФ фиксируется с помощью чувствительного емкостного моста.

В гребенчатых (Al или поли-Si) электродах расстояние  $d_3$  в несколько раз больше, чем  $d_1$  для сведения к минимуму последовательного сопротивления электродной полосы,  $d_1$  и  $d_2$  делаются как можно меньше для увеличения межэлектродной емкости.

Датчик выполнен по стандартной биполярной технологии, в качестве датчика температуры используется биполярный транзистор  $n$ - $p$ - $n$ -типа, формируемый диффузией в эпитаксиальном слое.

Межэлектродная емкость  $17.2 \pm 0.3$  пФ (85 % которой обусловлено емкостной связью через подложку, а 15 % – связью через надповерхностный слой) зависит от содержания влаги.

Для увеличения емкости между электродами разработана структура датчика МДП-типа с увеличенной плотностью компоновки, представленная на рис. 8.4.

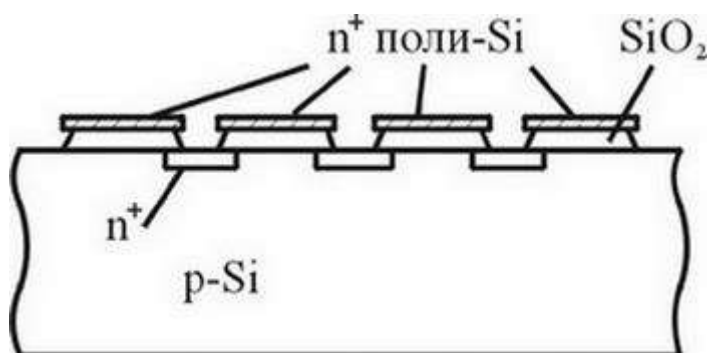


Рис. 8.4. Датчики влажности МДП-типа

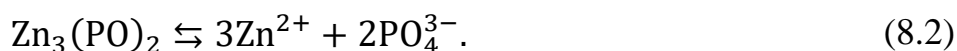
Гребенчатая структура электродов из поликремния сформирована травлением.

При одной и той же площади данный датчик имеет более высокую чувствительность по сравнению с предыдущей конструкцией за счет конденсации в углублениях между электродами.

Основным недостатком кондуктометрического способа регистрации слоя конденсата, как и конденсационного метода в целом, является зависимость показаний от степени загрязненности поверхности.

Для устранения этого недостатка поверхность конденсационной площадки между электродами покрывают тонким слоем гигроскопичной соли NaCl или малорастворимыми в воде ортофосфатами цинка, лития, кальция, свинца, железа и магния.

Конденсация влаги на поверхности таких датчиков сопровождается резким изменением сопротивления между электродами вследствие протекания реакции типа



Низкая растворимость ортофосфатов (меньше  $1 \cdot 10^{-6}$  г на 100 г воды для  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ) обеспечивает высокую стабильность датчиков. Так,

преобразователи со слоем ортофосфата цинка толщиной 10–500 мкм выдерживают длительное воздействие высокой влажности и предназначены для определения сконденсированной влаги на стеклах автомобиля.

### **8.3. Сорбционные датчики влажности**

Принцип действия датчиков этой обширной группы основан на явлении сорбции влаги из анализируемой среды. Происходящие при этом изменения физико-химических или электрофизических параметров чувствительного элемента датчика служат мерой для определения содержания влаги в среде.

В зависимости от вида и механизма сорбции можно выделить адсорбционные, абсорбционные и хемосорбционные датчики влажности.

В адсорбционных датчиках сорбция паров воды происходит на поверхности непористого сорбента или на поверхности пор пористого. В датчиках абсорбционного типа поглощение влаги осуществляется всем объемом сорбента. В хемосорбционных датчиках сорбированная вода вступает в химическую реакцию взаимодействия с материалом сорбента. В наиболее распространенных датчиках такого типа – кулонометрических – хемосорбция воды сопровождается ее разложением с помощью электролиза, сила тока которого однозначно связана с содержанием влаги в измеряемой среде.

В датчиках адсорбционного и абсорбционного типов поглощение и выделение влаги сорбентом сопровождается изменением его массы и электрофизических характеристик – электропроводности, диэлектрической проницаемости и т. д. В соответствии с этим различают датчики гравитационного типа (это прежде всего пьезосорбционные, основанные на измерении массы сорбента) и импедансные датчики, основанные на измерении полного сопротивления (или одного из его составляющих) пленки сорбента.

Среди материалов, используемых в качестве сорбентов, можно выделить неорганические – ионообразующие (гигроскопичные соли, кислоты и щелочи) и ионнеобразующие (окислы металлов), органические и смешанные.

#### **8.3.1. Кулонометрические датчики**

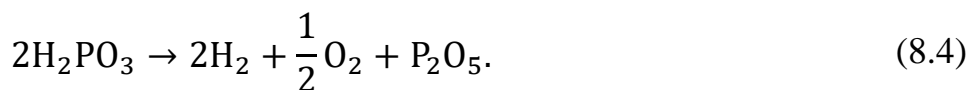
Действие кулонометрических датчиков влажности основано на непрерывном поглощении влаги пленкой гигроскопичного вещества и одновременном ее электролитическом разложении.

В качестве сорбционного покрытия обычно используют фосфорный ангидрид ( $P_2O_5$ ), обладающий очень высокой гигроскопичностью, большим удельным сопротивлением в сухом виде и хорошей электропроводностью после сорбции влаги.

В таком датчике непрерывно происходят два процесса: поглощение влаги фосфорным ангидридом с образованием фосфорной кислоты



и электролиз, сопровождающийся регенерацией фосфорного ангидрида,



Конструкцию, размеры датчика и напряжение на его электродах выбирают таким образом, чтобы влага полностью извлекалась из потока газа и проходил ее полный электролиз.

Существуют несколько конструкций кулонометрических датчиков.

В первых конструкциях платиновые спиралеобразные электроды расположены на внутренней или внешней поверхности пластмассовой или стеклянной трубки. Между электродами наносится слой сорбента  $P_2O_5$ .

Основной недостаток – низкая технологичность. Кроме того, ограничением конструкции является необходимость измерения и поддержания расхода газа через чувствительный элемент на определенном уровне (в диапазоне 20–200 см<sup>3</sup>/мин). К тому же датчики не позволяют проводить измерения при влажности более 1000–1500 ppm, так как при этом сильно возрастает ток электролиза и повышается температура датчика.

Для измерения высокого влагосодержания используют диффузионную мембрану, пропускающую лишь часть влаги из анализируемого потока.

В качестве сорбционного покрытия датчика, кроме пятиокиси фосфора, используется КОН, NaOH, метафосфат калия и кремниевая кислота.

Датчик может применяться и для измерения влажности агрессивных газов (HCl и фосгена).

Полное извлечение влаги из потока обеспечивает датчик с планарной конструкцией чувствительного элемента. Для повышения стабильности электродов применяют родиевое покрытие.

Для измерения влажности газов при нормальном и пониженном давлении рекомендуется применять датчик, изготовленный на корундовой подложке (96.6 % –  $Al_2O_3$ , 0.4 % –  $SiO_2$ ) с размерами 9 × 11 × 0.25 мм.

Гребенчатые родиевые электроды наносят методом вакуумного напыления: толщина электродов 0.1 мкм, ширина и расстояние между соседними зубцами электродов – 50 мкм, напряжение на электродах – 30 В. Характеристики датчика линейны.

Основными недостатками кулонометрических датчиков влажности с сорбционным слоем пятиокиси фосфора является низкая стойкость к воздействию среды с влажностью более 1000 ppm, невозможность измерения влажности веществ, реагирующих с  $P_2O_5$  (органических жидкостей, аммиака).

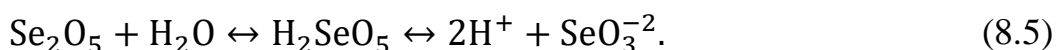
Эти недостатки устраняются при использовании датчика с сорбционным покрытием из цеолита.

### 8.3.2. Сорбционно-импедансные датчики

Действие таких датчиков влажности основано на зависимости полного сопротивления (импеданса) влагочувствительного слоя сорбента от количества сорбированной им влаги.

В качестве сорбентов первоначально использовали гигроскопичные ионообразующие соли (хлористый литий, хлористый кальций, фтористый бериллий, фтористый магний и т. д.). Общий недостаток датчиков с такими сорбентами – низкая чувствительность.

Частично этот недостаток устраняют, применяя датчики с сорбционным слоем из двуокиси селена, который взаимодействует с водой:



Наибольшее распространение получили импедансные датчики с органическими полимерными и неорганическими сорбентами на основе окислов металлов.

*Датчики с полимерной чувствительной пленкой.* Практически все органические полимерные материалы в той или иной степени изменяют свои физико-химические свойства при сорбции влаги, что позволяет использовать многие из них в датчиках влажности, в том числе кондуктометрического и емкостного типов.

Органическая полимерная пленка в таких датчиках может служить либо самостоятельным влагочувствительным агентом, либо с добавлением неорганических влагочувствительных соединений (обычно солей хлористого лития или хлористого кальция) или негигроскопичных проводящих частиц (мелкодисперсного углерода, золота, серебра и т. п.).

В качестве влагочувствительных покрытий таких датчиков могут использоваться акрилаты, полимеры метакрилата, полиакрила меди, полиэтиленимиды, гидроксилцеллюлоза, продукты полимеризации хлорсодержащих полимеров, кремнийорганические полимеры, содержащие аминогруппы. Стабильный датчик влажности можно реализовать на основе полиимидной пленки, обладающей очень высокой химической и температурной стабильностью.

Разработан интегральный датчик влажности, в котором используется пористый, проницаемый для влаги электрод, слой полиимида толщиной 0.5 мм и нижний гребенчатый электрод, напыленный на поверхность  $\text{SiO}_2$  (рис. 8.5).

В качестве влагочувствительного покрытия используется также пленка полистирола, полученная полимеризацией в ВЧ-плазме.

При изменении относительной влажности от 12 до 100 % емкость такого датчика изменяется почти в два раза, характеристика близка к линейной.



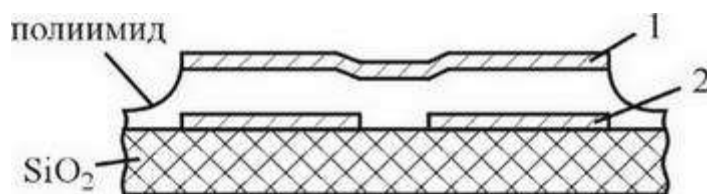


Рис. 8.5. Датчик с полимерной чувствительной пленкой:

1 – пористый электрод; 2 – нижний гребенчатый электрод

Обширную группу составляют датчики с полимерной влапочувствительной пленкой, в которую введены мелкодисперсные проводящие частицы (чаще всего углерода, поэтому датчики такого типа иногда называют «угольными»), связующим влапочувствительным веществом служит целлюлоза или ее производные, а нанесение пленки на диэлектрическую подложку (например, из поликора или керамики) осуществляют методом окунания. Абсорбция воды влапочувствительным полимером приводит к изменению его линейных размеров, что сопровождается перемещением проводящих частиц и изменением контактного сопротивления между ними.

Для увеличения стабильности и воспроизводимости характеристик «угольных» датчиков в них необходимо использовать частицы гидрофобного углерода, имеющего аморфную или графитизированную структуру. Если средняя величина частиц превышает 0.5 мкм, то пленка имеет нестабильное сопротивление.

*Недостатком большинства полимерных датчиков является наличие гистерезиса, низкая стабильность и высокая чувствительность к воздействию агрессивных сред.*

Разработан полимерный датчик влажности на основе полевого транзистора (рис. 8.6) с индуцированным  $n$ -каналом.

Площадь структуры 1.5 мм<sup>2</sup>, длина канала 12 мкм, ширина 7.3 мкм. Подзатворный диэлектрик представляет собой композицию из SiO<sub>2</sub> толщиной 50 нм и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 800 нм. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> предохраняет прибор от влияния атмосферы. Чувствительная к влаге полиимидная пленка помещена между затвором, верхний слой которого изготовлен из пленки Au толщиной 20 нм, проницаемой для воды, нижний – из тантала толщиной 300 нм. Изменение проводимости пленки полиимида под действием молекул воды меняет проводимость канала и ток стока.

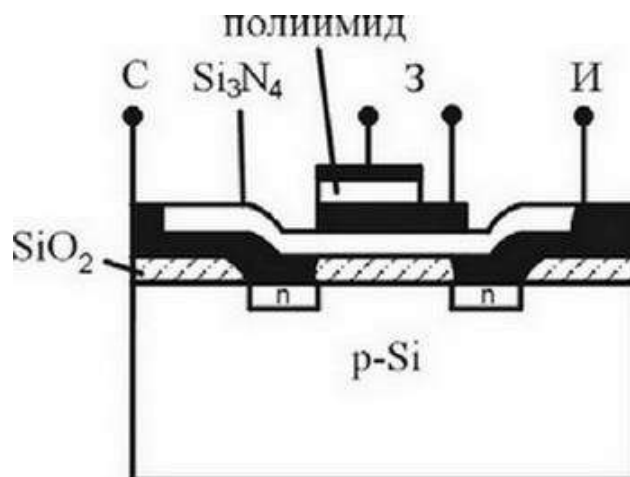


Рис. 8.6. Датчик на основе МДП-транзистора

Интересным решением являлось объединение влагочувствительной полимерной пленки с генератором на поверхностно-акустических волнах ПАВ (рис. 8.7).

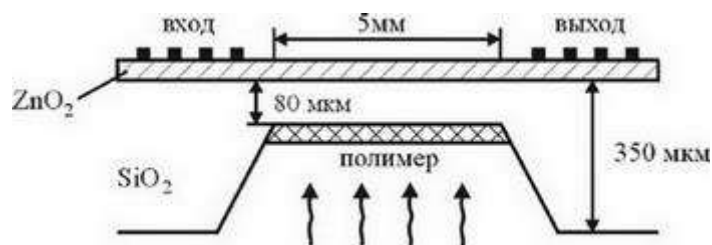


Рис. 8.7. Датчик влажности на ПАВ

На подложке из ниобата лития или кварца формируется структура генератора на ПАВ. На обратной стороне мембраны, толщина которой сравнима с длиной поверхностной волны, наносится влагочувствительная пленка. Поглощение паров воды из атмосферы приводит к изменению плотности, жесткости и толщины пленки. В результате изменяется фазовая скорость поверхностных акустических волн в тонком слое  $\text{ZnO}_2$ , нанесенном на верхнюю сторону мембраны, и, следовательно, меняется частота колебаний генератора.

В этой конструкции активная поверхность прибора защищена от паров воды и водяной конденсат не оказывает паразитного влияния на элементы конструкции и электронной схемы обработки сигнала.

*Керамические датчики.* К этой группе относятся датчики, в которых влагочувствительным веществом является пористая керамика, состоящая из одного окисла или смеси нескольких окислов. Характеристика датчика чаще всего определяется зависимостью его сопротивления от влажности, несколько реже используется емкостные типы датчиков.

Все датчики такого типа относятся к толстопленочным (толщина сорбционного покрытия обычно более 10 мкм). В качестве влагочувствительного вещества применяется керамика из окиси кобальта  $\text{CoO}$ ,

получаемая при взаимодействии порошков металлического кобальта и четырехокси кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  при температуре  $\sim 1173$  К. Порошок окиси кобальта смешивают с органическим связующим, затем наносят на подложку и подвергают термообработке при 1623–1823 К. Сопротивление датчика изменяется на шесть порядков (от  $10^{10}$  Ом до  $10^4$  Ом) при изменении относительной влажности от 30 до 100 %. Основным недостатком такого датчика является очень высокое собственное сопротивление окиси кобальта, превышающее  $10^6$ – $10^8$  Ом, при относительной влажности 30 – 40 %, что предопределяет значительные размеры датчика.

Для увеличения стабильности датчика их поверхность покрывают тонкой влагопроницаемой защитной мембраной из поливинилового спирта.

*Тонкопленочные полупроводниковые датчики.* Действие датчиков такого типа основано на изменении проводимости тонкого слоя полупроводника под действием зарядов, адсорбированных на его поверхности, или поверхности расположенного на нем диэлектрического слоя полярных молекул, в том числе молекул воды.

Первые датчики этого типа выполнены в виде диода Шоттки, образованного переходом Si (или Ge) – двуокись олова.

Контакты наносят на противоположные поверхности структуры. Недостатками датчика являются достаточно большая постоянная времени и низкая чувствительность при малых уровнях влажности.

Для увеличения чувствительности на поверхность тонкого слоя (50–80 нм) окиси олова, расположенного на диэлектрической подложке с двумя электродами, наносят слой диэлектрика толщиной 10–40 нм. Диэлектриком служит фторопласт (при определении влажности более 80 %) или полимер, полученный конденсацией в плазме тетраэтоксисилана (при определении влажности в диапазоне 0–100 %). Измерения проводят на постоянном токе, сопротивление датчика изменяется от 100 МОм до нескольких сотен килоом в диапазоне влажности 0–100 %. Для повышения точности измерений на поверхность диэлектрического слоя наносят дополнительный электрод из алюминия, при этом его площадь не должна превышать 45–50 % площади диэлектрического слоя. Подавая на электрод положительный или отрицательный потенциал можно смещать характеристику датчика в заданный диапазон и обеспечивать оптимальную чувствительность и точность измерений. В качестве полупроводника можно также использовать окиси цинка, марганца, меди, никеля, титана, кадмия, железа, серебра. *Полупроводниковые датчики влажности обладают высокой чувствительностью, однако они имеют и серьезные недостатки, главным из которых является значительная временная нестабильность характеристик, обусловленных изменением поверхностных свойств сорбционных покрытий и электродов.*

*Эта проблема может быть решена путем использования в качестве влагочувствительного элемента пленки окиси алюминия, полученного*

анодированием поверхности чистого алюминия. В настоящее время датчики влажности такого типа нашли наибольшее распространение, что объясняется их высокими метрологическими характеристиками, технологичностью и достаточно низкой стоимостью.

Датчик состоит из алюминиевой подложки, на которой методом электрохимического окисления сформирован анодный окисел. Вторым электродом служит тонкий влагопроницаемый слой металла (чаще всего золота, реже алюминия, серебра, палладия или платины). Первоначально в качестве подложки использовали алюминиевые стержни или пластины, затем – алюминиевую фольгу, сейчас применяют тонкие ( $\sim 1$  мкм) слои напыленного алюминия.

Характеристики алюминиево-оксидных датчиков в основном определяются свойствами анодных пленок окиси алюминия, которые в свою очередь сильно зависят от состава электролита и режимов анодирования.

Упрощенная модель строения анодного окисла алюминия предполагает, что он состоит из совокупности плотно упакованных элементарных ячеек мицел, каждая из которых обладает адсорбционной активностью за счет наличия гидроксильных групп на ее поверхности (рис. 8.8).

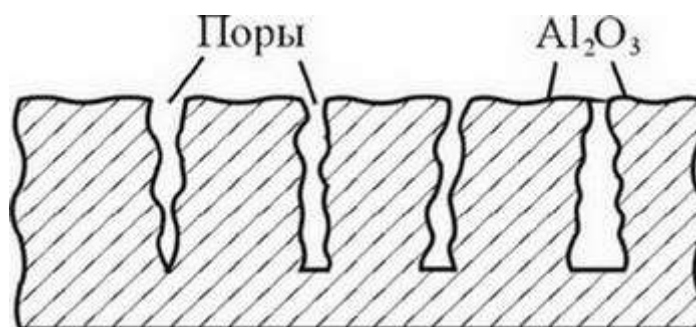


Рис. 8.8. Схема строения мицел

Толщина пленки окиси алюминия влияет на чувствительность датчика и определяет его динамические характеристики. Датчики с толщиной окисной пленки  $\sim 1.5$ – $2.5$  мкм позволяют измерять влажность в пределах от 20 до 100 %. Недостатком датчиков такого типа является высокая чувствительность к перегрузкам по влажности.

Дальнейший шаг в этом направлении – полный переход на групповую технологию микроэлектроники. При этом датчик (рис. 8.9) формируется на термически окисленной Si подложке, после напыления Al электрохимическим окислением получают пленку пористого  $Al_2O_3$  толщиной менее 0.25 мкм. Затем наносят верхний влагопроницаемый золотой электрод толщиной 10–50 нм и дополнительный слой золота на поверхность контактной площадки для обеспечения более надежного контакта.

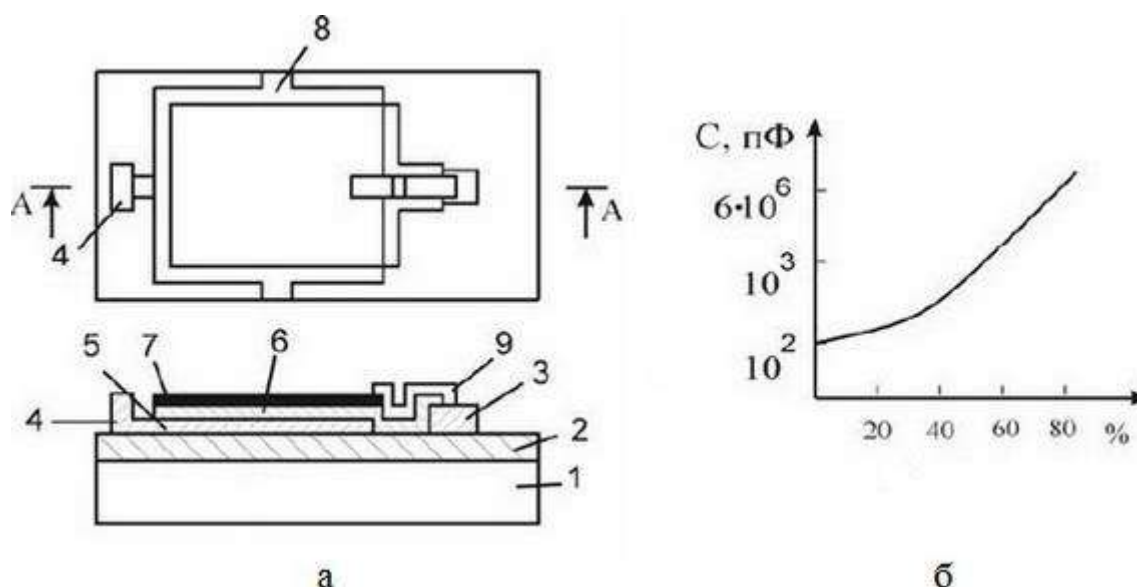


Рис. 8.9. Конструкция алюминиево-оксидного датчика влажности (а) и зависимость его емкости от влажности (б):

1 – кремниевая подложка; 2 –  $\text{SiO}_2$ ; 3, 4 – контактные площадки; 5 – нижний Al электрод; 6 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 7 – влагопроницаемый Au электрод; 8 – дорожка для соединения с другими датчиками на подложке; 9 – дополнительная металлизация для контактной площадки

Датчики такого типа под названием Aquatax серийно выпускаются фирмой Panametrics. На их базе реализованы приборы для измерения влажности газов и органических жидкостей. Одна из последних моделей анализаторов влаги фирмы SystemI снабжена микропроцессором и позволяет проводить измерения в диапазоне от 0.001 до 200 000 ppm одновременно по шести каналам. Зонды с датчиками могут быть удалены от прибора на расстояние до 600 м. Постоянная времени датчика не превышает 1 мин.

В более позднем варианте датчика (рис. 8.10), кроме влапочувствительной структуры на основе пористой окиси алюминия толщиной менее 0.25 мкм, имеются термостабилизирующий нагреватель из нихрома и датчик температуры.

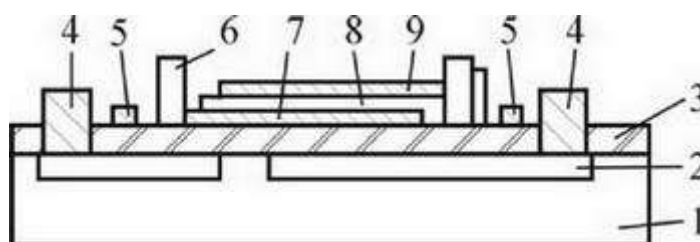


Рис. 8.10. Конструкция алюминиево-оксидного датчика влажности AquataxII:

1 – кремниевая подложка *n*-типа; 2 – диффузионные области *p*-типа; 3 – слой  $\text{SiO}_2$ ; 4 – контакты к области *p*-типа; 5 – нагреватель (нихром); 6 – контактные площадки датчика влажности; 7 – нижний Al электрод; 8 – анодная пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 9 – верхний золотой электрод

Датчиком температуры могут служить сформированный на периферии кристалла дополнительный резистор из никеля или платины или (как показано на рис. 8.10) *p-n*-переход. За счет нагревания до температуры 323 К исключается деградация характеристик датчика при воздействии повышенной влажности 95–100 %. Потребляемая на нагрев мощность не превышает 500 мВт. Малые размеры ( $2.54 \times 2.54$  мм или  $1.52 \times 1.52$  мм) и высокая чувствительность позволяют использовать датчики такого типа для измерения содержания влаги внутри малых объемов корпусов ИС.

*Алюминиево-оксидные датчики считаются наиболее пригодными для измерения влажности природного газа при нормальных условиях и повышенных давлениях.*

*Датчики с сорбционным слоем двуокиси кремния.* Применение в качестве влагочувствительного вещества пористой двуокиси кремния позволило максимально использовать при изготовлении датчиков технологию микроэлектроники.

Получение двуокиси кремния при производстве датчиков влажности осуществляется электрохимическим окислением в растворах электролитов, так как при этом получается слой  $\text{SiO}_2$  с высокой пористостью.

Такой датчик может быть изготовлен в едином технологическом цикле с БИС и размещен с ней на одном кристалле. Полное сопротивление датчика изменяется от  $170 \cdot 10^{10}$  Ом в сухом азоте до  $1 \cdot 10^{10}$  Ом при влажности 100 %.

### 8.3.3. Пьезосорбционные датчики

Использование для измерения присоединенной массы пьезокварцевых резонаторов, позволяющих регистрировать величины сорбции на уровне  $10^{-9} - 10^{-12} \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$ , позволило реализовать пьезосорбционные датчики влажности, обладающие высокими чувствительностью и точностью измерений. В датчиках такого типа при сорбции влаги происходит изменение массы сорбента, нанесенного на поверхность пьезокварцевого резонатора, что приводит к изменению частоты его колебаний на величину

$$\Delta f = - \frac{f_0^2}{N \cdot \rho_N \cdot S} \Delta m, \quad (8.6)$$

где  $f_0$  – резонансная частота кварцевого резонатора;

$N = 1770$  кГц · мм – постоянная;

$\rho_N$  – плотность пьезокварца ( $\sim 2.65$  г/см<sup>3</sup>);

$S$  – площадь пьезоэлемента;

$\Delta m$  – изменение массы сорбента.

Таким образом, при прочих равных условиях величина выходного сигнала пьезосорбционного чувствительного элемента влажности определяется сорбционной активностью применяемого сорбента.

В качестве влагочувствительного покрытия, толщина которого обычно не превышает 1–2 мкм, применяются гигроскопичные соли лития и кальция ( $\text{LiCl}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ), фториды кальция, магния, натрия, бария,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , пленки пористого стекла, окиси кремния, органические полимерные материалы. Порог чувствительности пьезосорбционного анализатора влажности одной из последних моделей составляет 0.02 ppm, полный диапазон измерения влажности от 0 до 20.000 ppm. При переходе от среды с более высокой влажностью к более сухой быстродействие пьезосорбционных датчиков влажности невелико. Для устранения этого недостатка используют принудительную десорбцию влаги путем обдува пьезосорбционного чувствительного элемента влажности потоком осушенного газа или за счет повышения температуры.

## 9. ДАТЧИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Датчиками изображения называются устройства, преобразующие фотоны в электрическое напряжение, а затем в цифровые данные (рис. 9.1). Датчики изображения используются в самых различных электронных системах – от любительской цифровой камеры до промышленных, научных и военных приборов регистрации фото- и видеоинформации.



Рис. 9.1. Техническая идеология датчика изображения

Различают два вида основных датчиков изображения: передающая телевизионная трубка и твердотельные датчики изображения.

Передающая телевизионная трубка – общее название класса электронно-лучевых устройств, преобразующих движущееся изображение в телевизионный видеосигнал. Она является главной составляющей частью телевизионных передающих камер и видеокамер, использовавшаяся до появления полупроводниковых светочувствительных матриц.

Твердотельный датчик изображения (матрица или светочувствительная матрица) – специализированная аналоговая или цифроаналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных элементов (фотодиодов), основанных на внешнем или внутреннем фотоэффекте.

Мы уделим внимание в первую очередь твердотельным датчикам, изготавливаемым по стандартным микроэлектронным техпроцессам.

### 9.1. Физические основы принципов работы полупроводниковых датчиков изображения

Фотоэффект (фотоэлектрический эффект) – испускание электронов веществом под действием света или любого другого электромагнитного излучения. В конденсированных (твердых и жидких) веществах выделяют внешний и внутренний фотоэффекты.

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте,



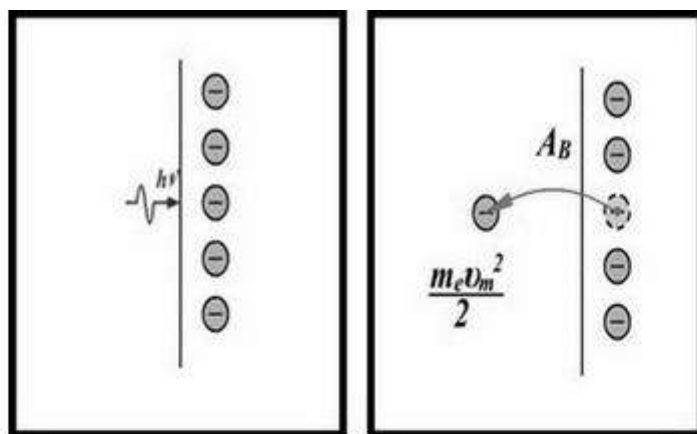
называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется фототоком.

Энергия падающего фотона  $h\nu$  преобразуется в работу выхода  $A_v$ , необходимую для «вырывания» электронов из вещества, а также на сообщенную кинетическую энергию электрона  $m_e V_m^2/2$ , где  $V_m$  и  $m_e$  – скорость и масса электрона (рис. 9.2).

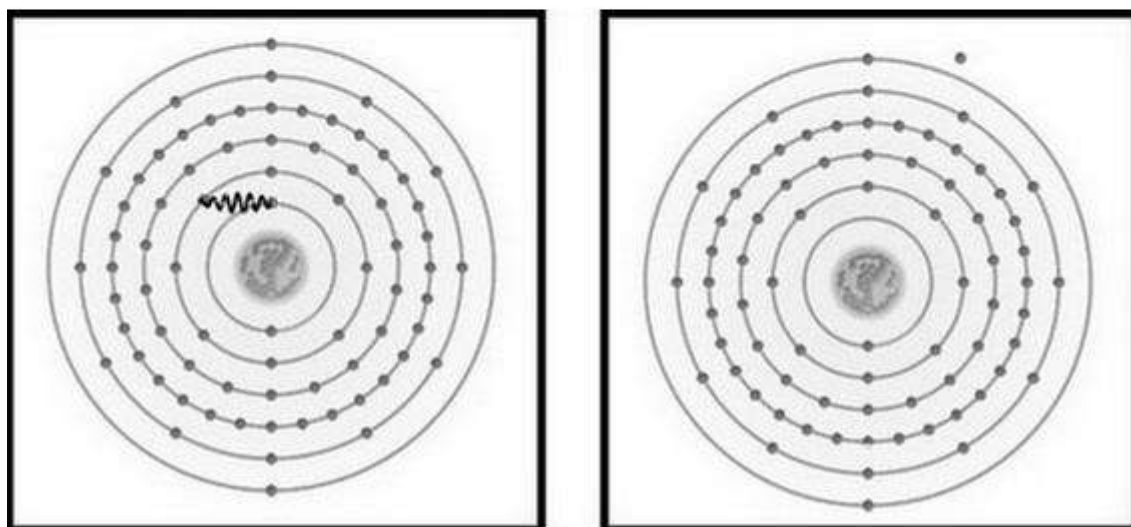
Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта (рис. 9.3).

Фотопроводимость – явление изменения электропроводности вещества при поглощении электромагнитного излучения (видимое, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское).

Фотопроводимость свойственна полупроводникам. Электропроводность полупроводников ограничена нехваткой носителей заряда. При поглощении фотона электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости. Как следствие, образуется пара носителей заряда: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Оба носителя заряда при приложении к полупроводнику напряжения создают электрический ток. При возбуждении фотопроводимости в собственном полупроводнике энергия фотона должна превышать ширину запрещенной зоны. В полупроводнике с примесями поглощение фотона может сопровождаться переходом из расположенного в запрещенной зоне уровня (донорного, или акцепторного), что позволяет увеличить длину волны (уменьшить энергию) света, который вызывает фотопроводимость. Это обстоятельство особенно важно для детектирования инфракрасного излучения. Условием высокой фотопроводимости является также большой показатель поглощения света, который реализуется в прямозонных полупроводниках.



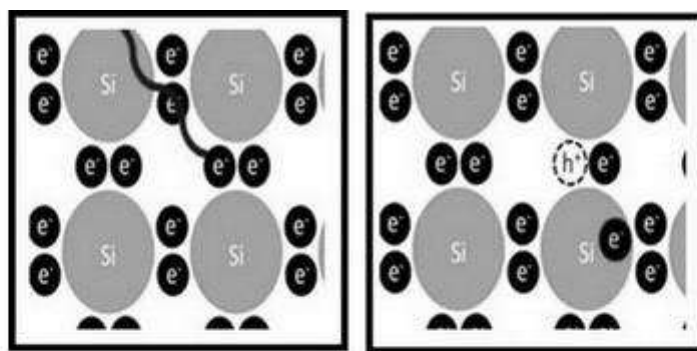
а



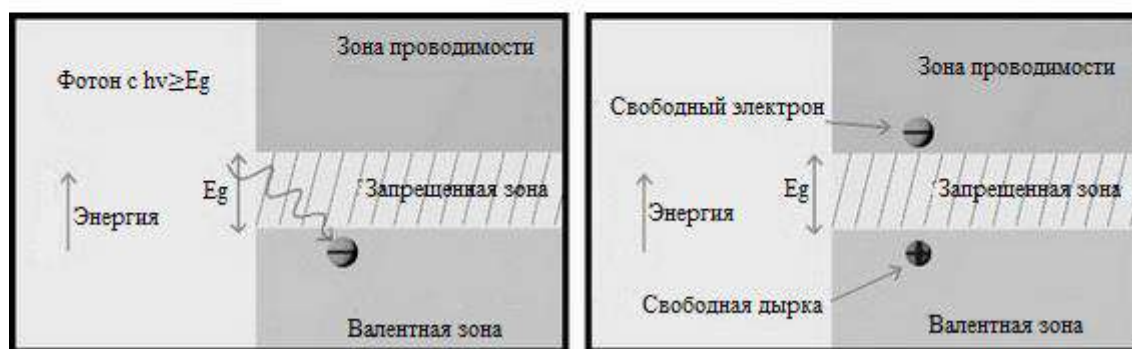
б

Рис. 9.2. Внешний фотоэффект:

а – «энергетическая» модель; б – «атомная» модель



а



б

Рис. 9.3. Внутренний фотоэффект:

а – «атомная» модель; б – «энергетическая» модель

## 9.2. Составляющие элементы датчиков изображения

### 9.2.1. Пиксель

Датчик изображения состоит из набора пикселей, которые представляют собой светочувствительные элементы. Обычно пиксели располагаются в узлах пересечения строк и столбцов в предполагаемой координатной сетке. Структура пикселей зависит от типа датчика, но принцип их работы везде одинаков. Светочувствительная область пикселей, преобразовывающая полученные кванты света в электроны, называется фотодетектором. Электроны фотодетектора накапливаются в так называемом зарядовом колодце или потенциальной яме. Величина заряда зависит от интенсивности света, падающего на поверхность фотодетектора. Соответственно, зарядовый колодец содержит некоторую часть информации об исходном изображении в виде электрического заряда. Зарядовый колодец создается с помощью введения примесей в процессе производства датчика. Например, пиксель может обладать *p*-МОП колодцем на *n*-МОП подложке. Чем меньшее количество примесей используется, тем больше разница потенциалов. Строение пикселей КМОП- и ПЗС-матриц примерно одинаковое. Различия между данными типами матриц проявляются уже после того, как фотоны преобразуются в электроны.

### 9.2.2. Фотодиод

Фотодиод – приемник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счет процессов в  $p$ - $n$ -переходе (рис. 9.4).

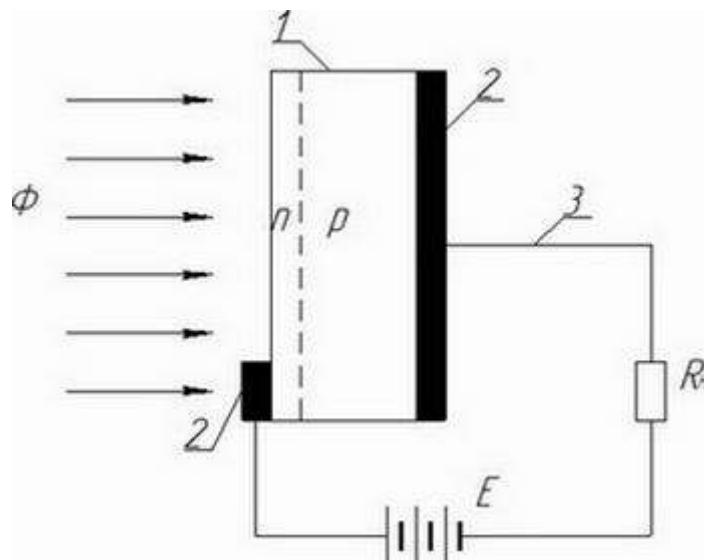


Рис. 9.4. Структурная схема фотодиода:

1 – кристалл полупроводника; 2 – контакты; 3 – выводы;  $\Phi$  – поток электромагнитного излучения;  $E$  – источник постоянного тока;  $R_n$  – нагрузка

При воздействии квантов излучения в базе происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе  $p$ - $n$ -перехода. Ширина базы ( $n$ -область) делается такой, чтобы дырки не успевали рекомбинировать до перехода в  $p$ -область. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей – дрейфовым током. Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем  $p$ - $n$ -перехода и емкостью  $p$ - $n$ -перехода.

### 9.2.3. ПЗС-структура

ПЗС – прибор с зарядовой связью (рис. 9.5). Ключевым его элементом является простейшая МОП-структура («металл – оксид – полупроводник») – слоистая структура, состоящая из металлического слоя и слоя полупроводника, разделенного тонкой прослойкой изолятора, обычно оксида кремния (рис. 9.5). Полупроводник при этом выбирается такой, в котором главными носителями заряда являются не электроны, а дырки, т. е. полупроводник  $p$ -типа. К металлическому контакту (затвору) подходит электрод, и на него может подаваться нужное напряжение.

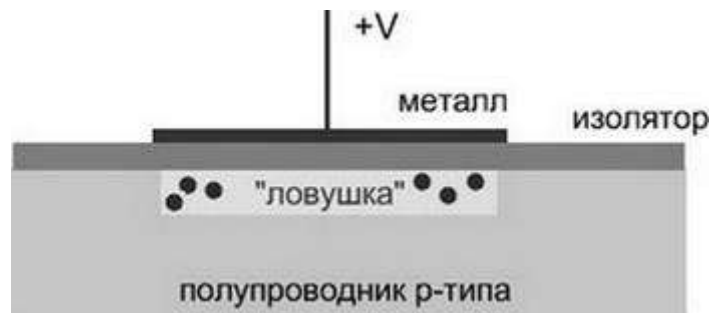


Рис. 9.5. ПЗС-структура

Роль «бита» в таком устройстве должно играть облако электронов. Однако хранить его в полупроводнике *p*-типа просто так не получится: дырки тут же набегут и поглотят все свободные электроны (рекомбинация). Поэтому требуется создать небольшую область, в которой дырок будет очень мало, и одновременно сделать так, чтоб электроны никуда из этой области не разбежались. Оба этих требования удовлетворяются, если на затвор подать положительный потенциал. Под действием возникшего электрического поля дырки из-за своего положительного заряда уйдут из небольшой зоны, расположенной прямо под электродом, а электроны – наоборот, будут в ней «сидеть» и никуда не уходить. Образуется «ловушка для электронов», которая и хранит информацию. Если в ловушке есть электроны – в ячейке записана единица, если нет – нуль.

Пусть у нас есть ряд из МОП-структур – это одномерная ПЗС-матрица. К каждой ячейке памяти подходят электроды; кроме того, имеются и вспомогательные, не информационные МОП-структуры, разделяющие ячейки памяти. При хранении информации на информационных ячейках подано нужное напряжение, а на вспомогательных – нет. Затем разом на все соседние ячейки – скажем, справа – тоже подается нужное напряжение, и в результате каждая «ловушка для электронов» расширяется на две ячейки. Следующим шагом напряжение с исходных ячеек снимается, «ловушка для электронов» снова сжимается, но при этом она уже переместилась на шаг вправо и все электроны перетекают за ней. Таким образом, информация во всех ячейках памяти синхронно сдвинулась вправо. Так продолжается цикл за циклом, а на выходе из этой «линейки» стоит одно-единственное считывающее устройство, которое просто воспринимает проходящий на него заряд и выдает обычный цифровой электрический сигнал.

### 9.3. Виды полупроводниковых датчиков изображения и их основные функции

#### 9.3.1. Основные функции полупроводниковых датчиков изображения

Сегодня, несмотря на все разнообразие технологических деталей, в большинстве цифровых камер используются либо ПЗС, либо КМОП-датчики. Основным отличием между ними является способ переноса электронов в

матрице, а также возможность КМОП реализовывать дополнительные функции непосредственно на кристалле. Интересно, что первоначально ни КМОП, ни ПЗС не имели никакого отношения к считыванию изображения. Оба устройства были созданы для хранения информации и представляли собой твердотельную память.

Таким образом, любой датчик изображения выполняет пять основных функций – поглощает кванты света, преобразует их в электрический заряд, накапливает электрический заряд, передает заряд и преобразует его в напряжение. Оба типа датчиков – КМОП и ПЗС – реализуют все эти пять функций. Первые три функции выполняются датчиками одинаково. Основное отличие датчиков КМОП и ПЗС состоит в технологии передачи заряда и в способе преобразования заряда в напряжение.

### 9.3.2. Устройство ПЗС-матрицы

Прибор с зарядовой связью – полупроводниковый прибор, представляющий собой матрицу или линейку изолированных от подложки затворов (МДП-структур), под которыми может происходить перенос к стоку информационных пакетов неосновных носителей заряда, либо инжектированных из истока, либо возникших в подложке из-за поглощения оптического излучения.

Остановимся на основных принципах организации работы данного прибора. С помощью подачи соответствующего потенциала на электрод в материале образуются потенциальные ямы, которые и хранят заряд – информацию о полученном изображении (рис. 9.6). Под электродом с положительным зарядом соответственно будут храниться электроны, которые не рекомбинируют в связи с отсутствием дырок в обедненной области. Задавая тактовую последовательность импульсов на электродах, мы можем переносить эти пакеты информации и затем считывать.

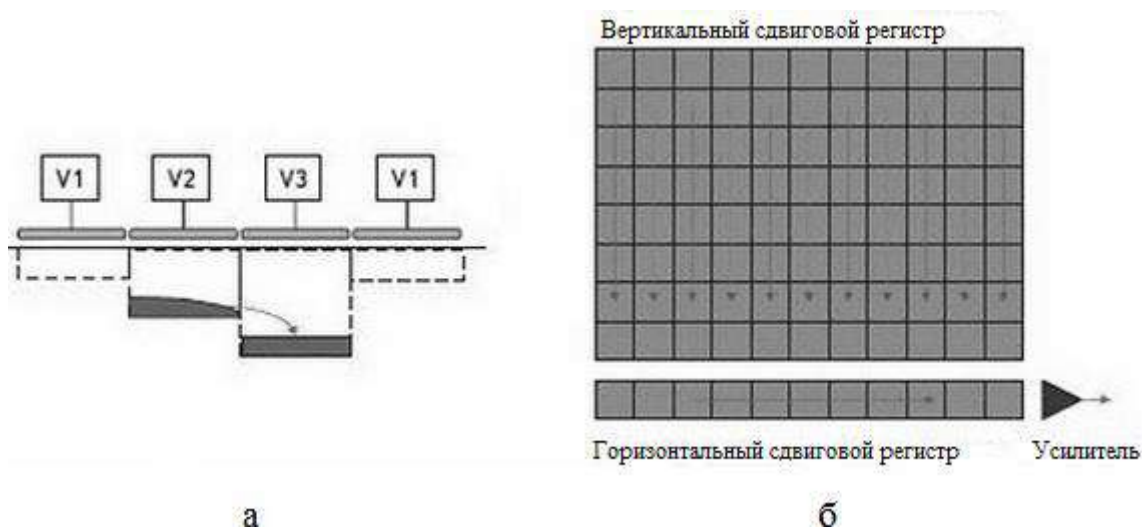


Рис. 9.6. Принцип работы ПЗС-структуры

Отметим отдельно одну из ключевых особенностей ПЗС-матриц – наличие электронного затвора, с помощью которого можно влиять на время экспозиции. Затвор отмеряет время, в течение которого свет воздействует на сенсор (выдержку). Электронный затвор в отличие от механического невозможно потрогать руками, но благодаря его наличию появляется возможность регулировки динамического диапазона, кроме того, время его выдержки может быть ультракоротким.

Прибор с зарядовой связью обеспечивает очень высокое качество изображения. Заметим, что результат совместной работы других компонентов камеры – оптики объектива, АЦП, процессора обработки изображения – также существенно влияет на качество получаемой цифровой фотографии. Прибор с зарядовой связью получил свое название по способу передачи заряда между зарядовыми колодцами и вывода заряда из матрицы. Заряды сдвигаются от одного горизонтального ряда пикселей к последующему горизонтальному ряду, сверху вниз построчно. Такая параллельная архитектура с вертикальными сдвиговыми регистрами используется для передачи зарядов. Заряды перемещаются «в связке». Когда перемещается одна из строчек зарядов, на освободившееся место передвигаются все заряды из строчки выше. Последняя строчка в самой нижней позиции представляет собой горизонтальный сдвиговый регистр. В этой строчке все заряды последовательно покидают датчик, при этом освобождается место для новой «связки» зарядов. Перед тем как покинуть ПЗС-датчик, заряд каждого пикселя усиливается и на выходе генерируется аналоговый сигнал с различным напряжением. Далее этот сигнал пересылается на отдельный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На выходе АЦП формируется последовательность двоичных данных, представляющих строчку изображения, полученного датчиком. В отличие от оперативной памяти компьютера, где логическая память единица либо ноль представлены наличием или отсутствием заряда, заряд на ПЗС сохраняется в аналоговом виде до тех пор, пока не преобразуется АЦП. В связи с тем что ПЗС передает только электрический заряд, используя процесс зарядовой связи, который обладает низким сопротивлением и меньше подвержен помехам от других электронных компонентов, результирующий сигнал, как правило, содержит меньше шумов по сравнению с сигналом КМОП-датчиков. Тем не менее передача заряда не обладает 100%-й эффективностью. Часть электронов теряется на пути между зарядовым колодцем (рис. 9.7) и выходом датчика. Эффективность переноса заряда является одной из важнейших характеристик ПЗС-датчика.

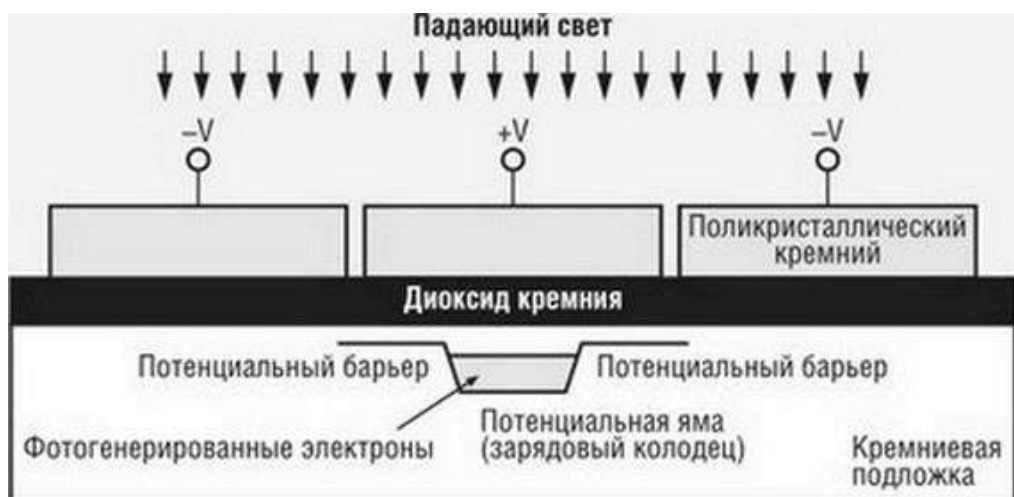


Рис. 9.7. Зарядовый «колодец»

### 9.3.3. Устройство КМОП-матрицы

Рассмотрим принцип действия КМОП-матриц. На рис. 9.8 приведена архитектура сенсора. Не трудно заметить, что сенсор содержит помимо самой оптической матрицы дополнительные блоки, например: АЦП (аналогово-цифровой преобразователь), логические устройства, интерфейс и др.

Наличие у каждого пикселя своего собственного усилителя является очень существенным отличием от ПЗС-датчиков, которые не обладают такой возможностью интеграции. Кроме этого, с помощью простой ХУ-адресации можно считывать информацию не со всей структуры, а с определенной ее части или вообще отдельной области.

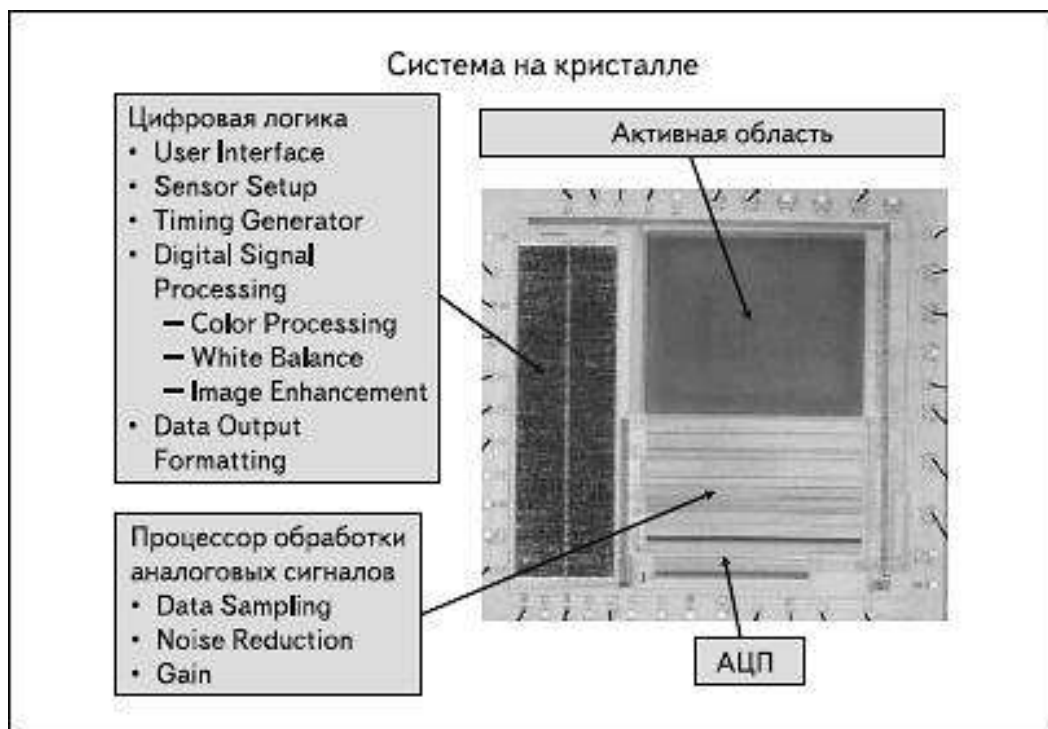


Рис. 9.8. Архитектура КМОП-матрицы



Полупроводниковая КМОП-матрица (рис. 9.9) снабжена системой микролинз, каждая из которых располагается непосредственно над пикселем и фокусирует падающий свет на фотодетектор. С целью предотвращения попадания этого излучения на подложку, что может сгенерировать дополнительные заряды и привести к нежелательным наводкам, подложка защищена специальным непрозрачным металлическим слоем.

КМОП-матрица – светочувствительная матрица, выполненная на основе КМОП-технологии.

КМОП (комплементарная структура металл – оксид – полупроводник) – технология построения электронных схем. В более общем случае – КМДП (со структурой металл – диэлектрик – полупроводник). В технологии КМОП используются полевые транзисторы с изолированным затвором с каналами разной проводимости. Отличительной особенностью схем КМОП по сравнению с би-полярными технологиями является очень малое энергопотребление в статическом режиме (в большинстве случаев можно считать, что энергия потребляется только во время переключения состояний). Отличительной особенностью структуры КМОП по сравнению с другими МОП-структурами (*n*-МОП,

*p*-МОП) является наличие как *n*-, так и *p*-канальных полевых транзисторов; как следствие, КМОП-схемы обладают более высокой скоростью действия и меньшим энергопотреблением, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки.

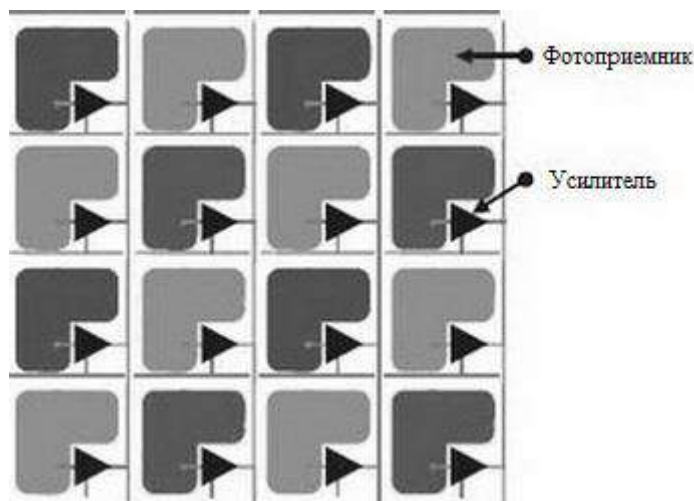


Рис. 9.9. КМОП-матрица

В КМОП-матрицах, эквивалентная схема ячейки которой показана на рис. 9.10, используются полевые транзисторы с изолированным затвором и каналами разной проводимости.

Принцип работы: до съемки подается сигнал сброса; в процессе экспозиции происходит накопление заряда фотодиодом; в процессе считывания происходит выборка значения напряжения на конденсаторе.

## 9.4. Особенности конструкций полупроводниковых датчиков изображения

### 9.4.1. Получение цветного изображения

Сам по себе пиксель фотоматрицы является «черно-белым». Для того чтобы матрица давала цветное изображение, применяются специальные технические приемы. Различают следующие методы получения цветного изображения: трехматричные системы, матрицы с мозаичными фильтрами и матрицы с полноцветными пикселями.

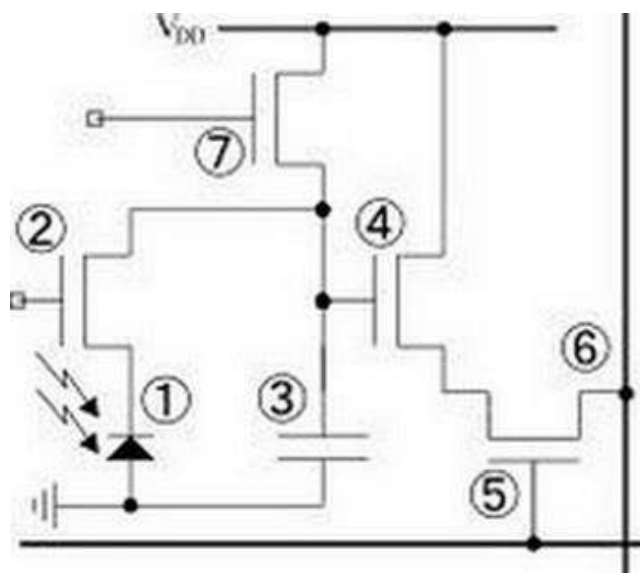


Рис. 9.10. Эквивалентная схема ячейки КМОП-матрицы:

1 – светочувствительный элемент (фотодиод); 2 – затвор; 3 – конденсатор, сохраняющий заряд с диода; 4 – усилитель; 5 – шина выбора строки; 6 – вертикальная шина, передающая сигнал процессору; 7 – сигнал сброса

### 9.4.2. Трехматричные системы

Поступающий в камеру свет, попадая на пару дихроидных призм, делится на три основных цвета: красный, зеленый и синий (рис. 9.11). Каждый из этих пучков направляется на отдельную матрицу. Свет от съемочного объектива попадает на цветоделительную дихроичную призму, разделяющую его на три составляющих потока, направляемых к разным граням призмы. Излучение с самой короткой длиной волны избирательно отражается от дихроичного покрытия  $F1$ , пропускающего остальной свет дальше. Так синяя составляющая света направляется к нижней выходной грани. Затем поверхностью с покрытием  $F2$  отделяется длинноволновая – красная часть спектра, попадающая к верхней выходной грани. Оставшийся свет, прошедший через все покрытия, соответствует зеленой части спектра и попадает к задней выходной грани призмы. Таким образом, получаются три монохромных действительных изображения объекта съемки. Красный и синий свет претерпевает

двукратное отражение, в результате чего получаются прямые (незеркальные) изображения этих цветов. Каждое из этих цветоделенных изображений попадает на отдельную матрицу, видеосигнал с которых после обработки добавляется к общему. В результате сложения сигналов с трех матриц получается полный цветной телевизионный сигнал.

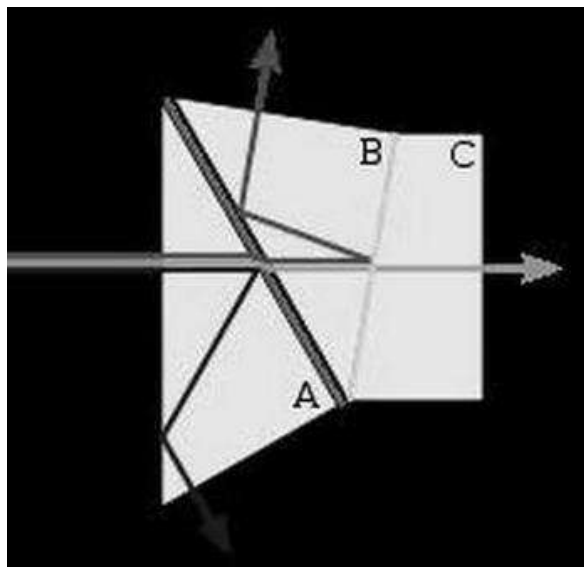


Рис. 9.11. Получение цветного изображения дихоричной призмой

#### 9.4.3. Матрицы с мозаичными фильтрами

Во всех таких матрицах пиксели расположены в одной плоскости и каждый пиксель накрыт светофильтром некоего цвета. Недостающая цветовая информация восстанавливается путем интерполяции. Пример такого фильтра – фильтр Байера, исторически самый ранний.

Фильтр Байера (шаблон Байера) – это двумерный массив цветных фильтров, которыми накрыты фотодиоды фотоматриц. Используется для получения цветного изображения в матрицах цифровых фотоаппаратов, видеокамер и сканеров. Фильтр Байера состоит из 25 % красных элементов, 25 % синих и 50 % зеленых элементов, расположенных как показано на рис. 9.12.

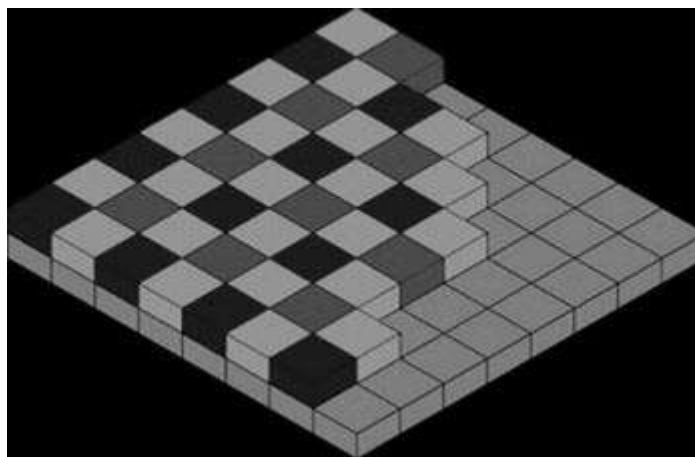


Рис. 9.12. Фильтр Байера

Вследствие использования фильтров каждый фотоприемник воспринимает лишь  $1/3$  цветовой информации участка изображения, а  $2/3$  отсекается фильтром. Для получения остальных цветовых компонентов используются значения из соседних ячеек. Недостающие компоненты цвета рассчитываются процессором камеры на основании данных из соседних ячеек в результате интерполяции. Таким образом, в формировании конечного значения цветного пикселя участвует девять или более фотодиодов матрицы.

Преимущества матрицы с мозаичными фильтрами перед трехматричными системами:

- 1) компактность;
- 2) технологичность, возможность производства интегральной микросхемы со всей прилегающей к ней оптической частью (фильтр Байера, микролинзы, low-pass-фильтр) как единого целого;
- 3) отсутствие проблем сведения цветов и механической юстировки;
- 4) возможность применения в зеркальных аппаратах;
- 5) возможность применения объектива с малым задним вершинным расстоянием, что существенно уменьшает габариты камеры и упрощает оптическую схему при сохранении характеристик.

Однако цветопередача таких матриц в наибольшей степени определяется свойствами кремния как такового, и произвольный выбор красителя для фильтрации компонентов невозможен.

К сожалению, в многослойных матрицах разделение цветов оказывается далеко не полным. Часть фотонов поглощается в «чужой» области. В результате, цветовая информация оказывается неполной, насыщенность цвета при прямом использовании RGB-сигналов с сенсора как значений пикселя изображения дает малоконтрастную ненасыщенную картинку. Для компенсации этого эффекта требуется вводить агрессивный алгоритм восстановления цветового оттенка. Именно вынужденный подъем насыщенности вносит основной вклад в увеличение итогового шума матрицы.

Недостатки систем с мозаикой цветных фильтров:

- 1) необходимость восстанавливать часть цветовой информации приводит к потере пространственного разрешения в цветных деталях;
- 2) процедура восстановления порождает эффект цветного муара и цветные артефакты;
- 3) для снижения эффекта цветного муара применяется фильтр нижних частот (low-pass), дополнительно размывающий изображение до его попадания на матрицу; это приводит к дополнительному снижению разрешающей способности системы в целом и снижению микроконтраста;
- 4) снижение резкости в алгоритме и на low-pass-фильтре делает необходимым применение алгоритмов повышения резкости.

#### 9.4.4. Матрицы с полноцветными пикселями

Матрицы с полноцветными пикселями – серия фотоматриц, в которой цветоделение на аддитивные цвета RGB проводится послойно, по толщине полупроводникового материала, с использованием физических свойств кремния (рис. 9.13).



Рис. 9.13. Принцип получения цветного изображения в матрицах с полноцветными пикселями

Особенностью этих матриц является то, что фотодиоды, формирующие цветной элемент изображения, расположены друг над другом, образуя «колонку», перпендикулярную поверхности матрицы. Поскольку коэффициент поглощения света в кремнии в оптическом диапазоне монотонно зависит от длины волны, то синяя часть спектра поглощается преимущественно верхним слоем (толщина 0.4 мкм), зеленая – средним (толщина 2 мкм) и красная – нижним слоем (более 2 мкм), разделенными *p-n*-переходами и имеющими отдельные выходы сигнала. Такая компоновка позволяет получить полную информацию по трем цветовым каналам в одной точке.

Достоинства матриц – более четкое изображение, поскольку не требуется процедуры интерполяции недостающих компонентов в каждом пикселе, не требуется постановки перед матрицей размывающего фильтра (обязательного компонента байеровских матриц, он же Anti-aliasing filter) для решения проблемы цветового муара – явления, характерного для мозаичных матриц.

У матриц потенциально лучшие шумовые характеристики, что теоретически позволяет улучшить соотношение сигнал/шум благодаря отсутствию поглощающих  $2/3$  светового потока цветных фильтров. Но из-за поглощения светового потока верхними слоями и необходимости восстанавливать насыщенность цвета дополнительной обработкой выигрыш в чувствительности оказывается невелик.

Еще одно интересное свойство таких матриц – изменяемый размер эффективного пикселя. Малый размер позволяет делать снимки высокого разрешения. Большой – дает возможность снимать при слабом освещении. Объединение пикселей в системы  $1 \times 1$ ,  $4 \times 4$ ,  $1 \times 2$  и т. д. производится в динамическом режиме.

К недостаткам рассматриваемых матриц можно отнести недостаточную точность цветопередачи и невозможность ее радикального улучшения, так как в наибольшей степени она определяется свойствами кремния как такового, и произвольный выбор красителя для компонентов невозможен. Также к ним относится относительно высокий уровень цифрового шума. К сожалению, разделение цветов оказывается далеко не полным. Часть фотонов поглощается в «чужой» области. В результате цветовая информация оказывается неполной, насыщенность цвета при прямом использовании RGB-сигналов с сенсора как значений пикселя изображения дает малоконтрастную ненасыщенную картинку. Для компенсации этого эффекта требуется вводить агрессивный алгоритм восстановления цветового оттенка. Именно вынужденный подъем насыщенности вносит основной вклад в увеличение итогового шума матрицы.

## 9.5. Микролинзы

В случае использования фотопленки галоиды серебра, нанесенные на ее полимерную основу, всегда реагируют на свет, независимо от угла падения света. Пиксели матрицы светочувствительны только в области прямого или близкого к прямому углу падения света, где зарядовая емкость пикселя максимальна. Для коррекции угла падения света и увеличения светочувствительности над каждым пикселем матрицы устанавливается

выпуклая миниатюрная линза  
(рис. 9.14).



Рис. 3.14. Микролинзы

Микролинзы создаются нанесением резистивного материала на матрицу по сетке расположения пикселей. Затем сетка протравливается. При нагревании остатки материала оплавливаются и принимают куполообразную форму. Форма и характеристики микролинз зависят от толщины и свойств используемого резистивного материала. Заметим, что микролинзы используются во многих, но не во всех датчиках изображения. Преимущество применения микролинз заключается в том, что при большой угловой чувствительности датчика можно использовать более компактную и соответственно более дешевую оптическую систему объектива.

Буферные регистры сдвига «съедают» значительную часть площади матрицы, в результате каждому пикселю достается лишь 30 % светочувствительной области от его общей поверхности, в то время как у пикселя полнокадровой матрицы эта область составляет 70 %. Именно поэтому в большинстве современных ПЗС-матриц поверх каждого пикселя располагается микролинза (рис. 9.15). Такое простейшее оптическое устройство покрывает большую часть площади ПЗС-элемента и собирает всю падающую на эту часть долю фотонов в концентрированный световой поток, который в свою очередь направлен на довольно компактную светочувствительную область пикселя.

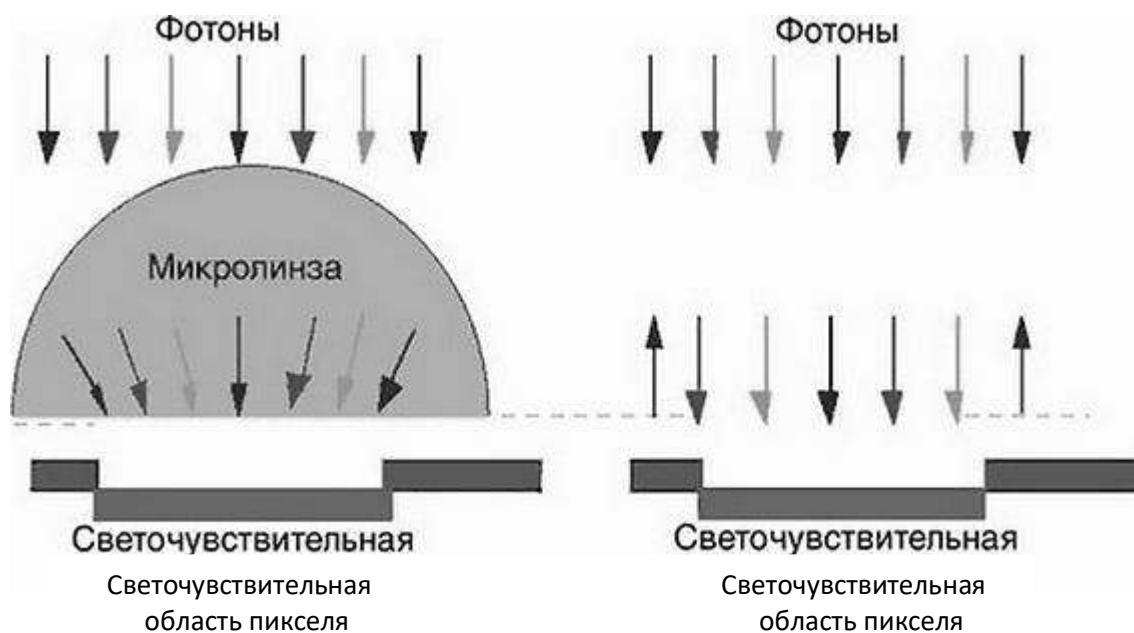


Рис. 9.15. Увеличение микролинзой светочувствительной области пикселя

Поскольку с помощью микролинз удастся гораздо эффективнее регистрировать падающий на сенсор световой поток, со временем этими устройствами стали снабжать не только системы с буферизацией столбцов, но и полнокадровые матрицы. Впрочем, микролинзы тоже нельзя назвать «решением без недостатков».

Являясь оптическим устройством, микролинзы в той или иной мере искажают регистрируемое изображение, чаще всего это выражается в потере четкости у мельчайших деталей кадра – их края становятся слегка размытыми. С другой стороны, такое нерезкое изображение отнюдь не всегда нежелательно – в ряде случаев изображение, формируемое объективом, содержит линии, размер и частота размещения которых близки к габаритам ПЗС-элемента и межпиксельному расстоянию матрицы. В этом случае в кадре зачастую наблюдается ступенчатость (aliasing) – назначение пикселю определенного цвета, вне зависимости от того, закрыт ли он деталью изображения целиком или только его часть. В итоге линии объекта на снимке получаются рваными с зубчатыми краями. Для решения этой проблемы в камерах с матрицами без микролинз используется дорогостоящий фильтр защиты от наложения спектров (anti-aliasing filter), а сенсор с микролинзами в таком фильтре не нуждается. Впрочем, в любом случае за это приходится расплачиваться некоторым снижением разрешающей способности сенсора.

## 9.6. Датчики изображения с обратной засветкой

В классической схеме ПЗС-элемента, при которой используются электроды из поликристаллического кремния, чувствительность ограничена по причине частичного рассеивания света поверхностью электрода. Поэтому при съемке в особых условиях, требующих повышенной чувствительности в синей



и ультрафиолетовой областях спектра, применяются матрицы с обратной засветкой (back-illuminated matrix). В сенсорах такого типа регистрируемый свет падает на подложку, а чтобы обеспечить требуемый внутренний фотоэффект подложка шлифовалась до толщины 10–15 мкм. Данная стадия обработки сильно увеличивала стоимость матрицы, кроме того, устройства получались очень хрупкими и требовали повышенной осторожности при сборке и эксплуатации.

Очевидно, что при использовании светофильтров, ослабляющих световой поток, все дорогостоящие операции по увеличению чувствительности теряют смысл, поэтому матрицы с обратной засветкой применяются по большей части в астрономической фотографии (рис. 9.16).

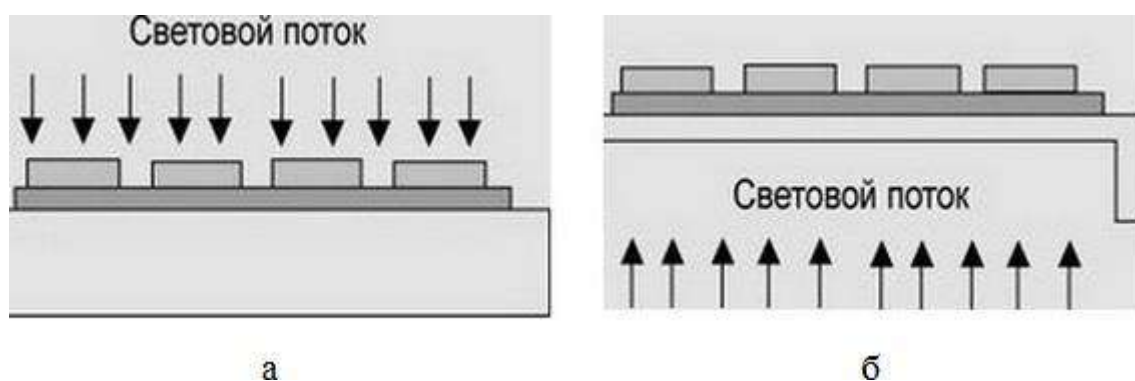


Рис. 9.16. Матрица с «классической» (а) и «обратной» (б) засветкой

## 9.7. Организация переноса кадра в ПЗС-матрицах

ПЗС-матрицы по организации переноса информации подразделяются на полнокадровые, с переносом кадра, чересстрочные.

### 9.7.1. Полнокадровая матрица

Данный тип сенсора является наиболее простым с конструктивной точки зрения и именуется полнокадровой ПЗС-матрицей. Помимо микросхем «обвязки», такой тип матриц нуждается также в механическом затворе, перекрывающем световой поток после окончания экспонирования. До полного закрытия затвора считывание зарядов начинать нельзя – при рабочем цикле параллельного регистра сдвига к фототоку каждого из его пикселей добавятся лишние электроны, вызванные попаданием фотонов на открытую поверхность ПЗС-матрицы. Данное явление называется «размазыванием» заряда в полнокадровой матрице.

Таким образом, скорость считывания кадра в такой схеме ограничена скоростью работы как параллельного, так и последовательного регистров сдвига. Также очевидно, что необходимо перекрывать световой поток, идущий с объектива, до завершения процесса считывания, поэтому интервал между экспонированием тоже зависит от скорости считывания.

### 9.7.2. Матрицы с буферизацией кадра

Существует усовершенствованный вариант полнокадровой матрицы, в которой заряды параллельного регистра не поступают построчно на вход последовательного, а «складируются» в буферном параллельном регистре. Данный регистр расположен под основным параллельным регистром сдвига, фототоки построчно перемещаются в буферный регистр и уже из него поступают на вход последовательного регистра сдвига. Поверхность буферного регистра покрыта непрозрачной (чаще металлической) панелью, а вся система получила название матрицы с буферизацией кадра. В данной схеме потенциальные ямы основного параллельного регистра сдвига «опорожняются» заметно быстрее, так как при переносе строк в буфер нет необходимости для каждой строки ожидать полный цикл последовательного регистра. Поэтому интервал между экспонированием сокращается, правда при этом также падает скорость считывания – строке приходится «путешествовать» на вдвое большее расстояние. Таким образом, интервал между экспонированием сокращается только для двух кадров, хотя стоимость устройства за счет буферного регистра заметно возрастает. Однако наиболее заметным недостатком матриц с буферизацией кадра является удлинившийся «маршрут» фототоков, который негативно сказывается на сохранности их величин. И в любом случае между кадрами должен срабатывать механический затвор, так что о непрерывном видеосигнале говорить не приходится.

### 9.7.3. Матрицы с буферизацией столбцов

Специально для видеотехники был разработан новый тип матриц, в котором интервал между экспонированием был минимизирован не для пары кадров, а для непрерывного потока. Разумеется, для обеспечения этой непрерывности пришлось предусмотреть отказ от механического затвора.

Фактически данная схема, получившая наименование матрицы с буферизацией столбцов, в чем-то сходна с системами с буферизацией кадра – в ней также используется буферный параллельный регистр сдвига, ПЗС-элементы которого скрыты под непрозрачным покрытием. Однако буфер этот не располагается единым блоком под основным параллельным регистром – его столбцы «перетасованы» между столбцами основного регистра. В результате рядом с каждым столбцом основного регистра находится столбец буфера, а сразу же после экспонирования фототоки перемещаются не «сверху вниз», а «слева направо» (или «справа налево») и всего за один рабочий цикл попадают в буферный регистр, целиком и полностью освобождая потенциальные ямы для следующего экспонирования.

Попавшие в буферный регистр заряды в обычном порядке считываются через последовательный регистр сдвига, т. е. «сверху вниз». Поскольку сброс фототоков в буферный регистр происходит всего за один цикл, даже при

отсутствии механического затвора не наблюдается ничего похожего на «размазывание» заряда в полнокадровой матрице. А вот время экспонирования для каждого кадра в большинстве случаев по продолжительности соответствует интервалу, затрачиваемому на полное считывание буферного параллельного регистра. Благодаря всему этому появляется возможность создать видеосигнал с высокой частотой кадров – не менее 30 кадров секунду.

## **9.8. Преимущество и недостатки КМОП- перед ПЗС-матрицами**

Основное преимущество КМОП-технологии – низкое энергопотребление в статическом состоянии. Это позволяет применять такие матрицы в составе энергонезависимых устройств, например в датчиках движения и системах наблюдения, находящихся большую часть времени в режиме «сна» или «ожидания события».

Важным преимуществом КМОП-матрицы является единство технологии с остальными, цифровыми элементами аппаратуры. Это приводит к возможности объединения на одном кристалле аналоговой, цифровой и обрабатывающей части (КМОП-технология, являясь в первую очередь процессорной технологией, подразумевает не только «захват» света, но и процесс преобразования, обработки, очистки сигналов не только собственно-захваченных, но и сторонних компонентов РЭА), что послужило основой для миниатюризации камер для самого разного оборудования и снижения их стоимости ввиду отказа от дополнительных процессорных микросхем.

С помощью механизма произвольного доступа можно выполнять считывание выбранных групп пикселей. Данная операция получила название кадрированного считывания (англ. windowing readout). Кадрирование позволяет уменьшить размер захваченного изображения и потенциально увеличить скорость считывания по сравнению с ПЗС-сенсорами, поскольку в последних для дальнейшей обработки необходимо выгрузить всю информацию. Появляется возможность применять одну и ту же матрицу в принципиально различных режимах. В частности, быстро считывая только малую часть пикселей, можно обеспечить качественный режим живого просмотра изображения на встроенном в аппарат экране с относительно малым числом пикселей. Можно отсканировать только часть кадра и применить ее для отображения на весь экран. Тем самым получить возможность качественной ручной фокусировки. Есть возможность вести репортажную скоростную съемку с меньшим размером кадра и разрешением.

В дополнение к усилителю внутри пикселя усилительные схемы могут быть размещены в любом месте по цепи прохождения сигнала. Это позволяет создавать усилительные каскады и повышать чувствительность в условиях плохого освещения. Возможность изменения коэффициента усиления для каждого цвета улучшает, в частности, балансировку белого.

Еще одно преимущество – дешевизна производства в сравнении с ПЗС-матрицами, особенно при больших размерах матриц.

К недостаткам КМОП следует отнести следующее. Фотодиод ячейки занимает существенно меньшую площадь элемента матрицы по сравнению с ПЗС-матрицей с полнокадровым переносом. Поэтому ранние матрицы КМОП имели существенно более низкую светочувствительность, чем ПЗС. Но в 2007 году компания Sony выпустила на рынок новую линейку видео- и фотокамер с КМОП-матрицами нового поколения с технологией Exmor, которая ранее применялась только для КМОП-матриц в специфических оптических устройствах, таких как электронные телескопы. В этих матрицах электронная «обвязка» пикселя, препятствующая попаданию фотонов на светочувствительный элемент, была перемещена из верхнего в нижний слой матрицы, что позволило увеличить как физический размер пикселя при тех же геометрических размерах матрицы, так и доступность элементов свету, что соответственно увеличило светочувствительность каждого пикселя и матрицы в целом. Матрицы КМОП впервые сравнились с ПЗС-матрицами по светочувствительности, но оказались более энергосберегающими и лишенными главного недостатка ПЗС-технологии – «боязни» точечного света. В 2009 году компания Sony улучшила КМОП-матрицы с технологией EXMOR, применив к ним технологию «Backlight illumination» («освещение с задней стороны»). Идея технологии проста и полностью соответствует названию.

Фотодиод ячейки матрицы имеет сравнительно малый размер, величина же получаемого выходного напряжения зависит не только от параметров самого фотодиода, но и от свойств каждого элемента пикселя. Таким образом, у каждого пикселя матрицы оказывается своя собственная характеристическая кривая, и возникает проблема разброса светочувствительности и коэффициента контраста пикселей матрицы. В результате чего первые произведенные КМОП-матрицы имели сравнительно низкое разрешение и высокий уровень так называемого «структурного шума» (pattern noise).

Наличие на матрице большого по сравнению с фотодиодом объема электронных элементов создает дополнительный нагрев устройства в процессе считывания и приводит к возрастанию теплового шума.

## 10. ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спонтанные излучения некоторых веществ не всегда имеют электромагнитную природу. Речь идет о ядерном излучении, испускаемом ядрами атомов некоторых материалов, которое бывает двух типов: в виде заряженных частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$  и протонов) и в виде частиц, не имеющих заряда, называемых нейтронами. Часть этих частиц являются сложными, например, частицы, представляющие собой ядра атомов гелия, состоящих из двух нейтронов и двух протонов, другие частицы, такие как  $\beta$ -частицы, устроены гораздо проще ( $\beta$ -частица – это либо электрон, либо позитрон). Рентгеновское и  $\gamma$ -излучения относятся к электромагнитным излучениям ядерного типа. В свою очередь, рентгеновское излучение в зависимости от длины волны делится на жесткое, мягкое и ультрамягкое. Ядерное излучение часто называется ионизационным. Это название возникло из-за того, что при прохождении элементарных частиц через различные среды, поглощающие их энергию, возникают новые ионы, фотоны или свободные радикалы.

Радиоактивное излучение возникает в результате распада изотопов некоторых веществ. Это могут быть изотопы как тяжелых металлов (урана, плутония, цезия и др.), так и легких веществ (углерода, фосфора, азота, кислорода и др.). Основные виды излучений представлены на рис. 10.1.

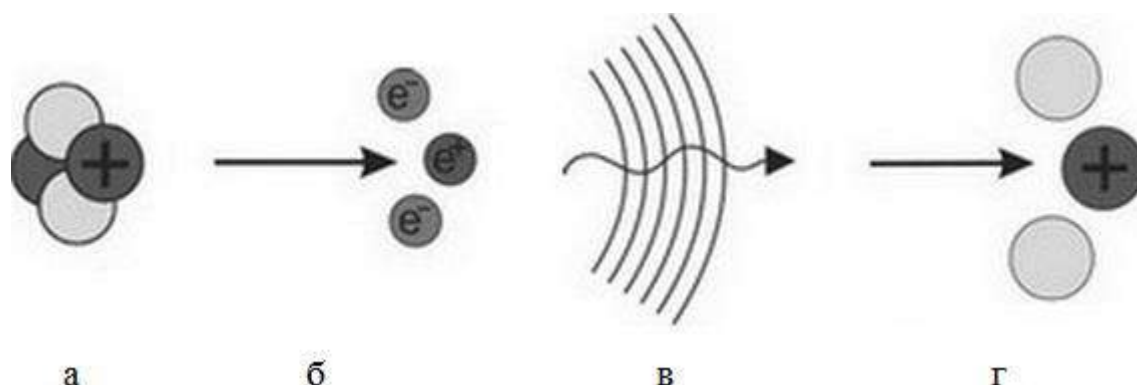


Рис. 10.1. Основные виды излучений:

а –  $\alpha$ -излучение; б –  $\beta$ -излучение; в –  $\gamma$ -излучение; г – поток нейтронов и протонов

$\alpha$ -частицы (рис. 10.2) обладают очень сильной ионизирующей способностью и очень слабой проникающей, кроме высокоэнергетических частиц с энергией более нескольких десятков мегаэлектронвольт.

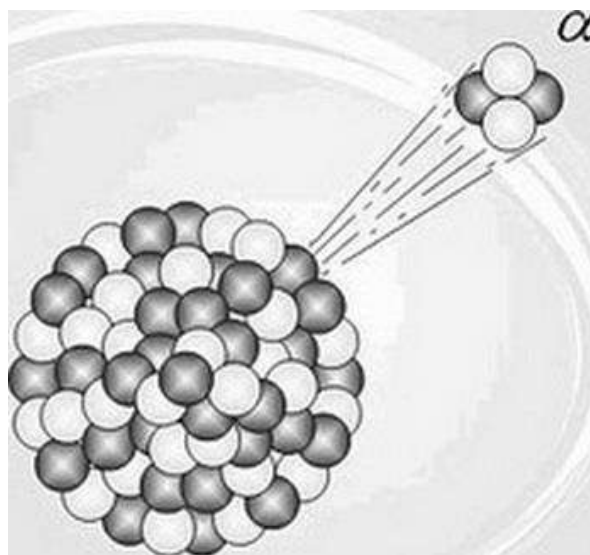


Рис. 10.2.  $\alpha$ -частицы

Таким образом, опасность для человека при внешнем облучении могут представлять частицы с энергиями 10 МэВ и выше, достаточными для преодоления омертвевшего рогового слоя кожного покрова.

$\beta$ -частицы (рис. 10.3) обладают обычно более слабой ионизирующей способностью, чем  $\alpha$ -частицы, но зато на порядок более сильной проникающей.

$\beta$ -лучи под действием электрического и магнитного полей отклоняются от прямолинейного направления. Скорость частиц в  $\beta$ -лучах близка к скорости света.  $\beta$ -лучи способны ионизировать газы, вызывать химические реакции, люминесценцию, действовать на фотопластинки.

$\gamma$ -излучение ( $\gamma$ -лучи) (рис. 10.4) обладает ярко выраженными корпускулярными и слабо выраженными волновыми свойствами. Обладает самым широким диапазоном энергий фотонов, а также является самым проникающим излучением.

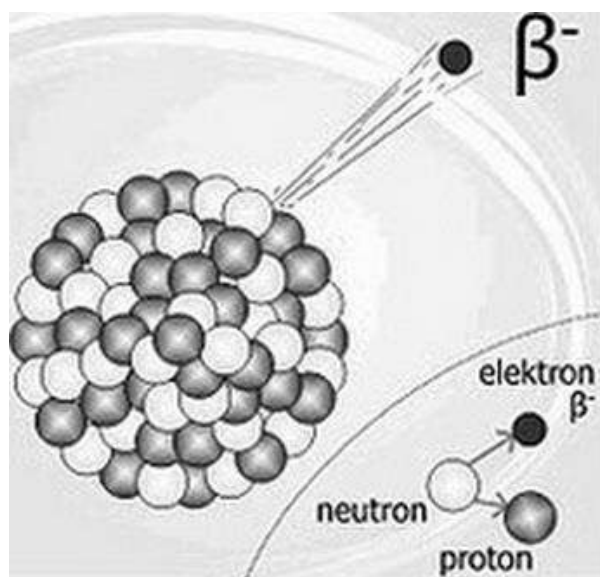


Рис. 10.3.  $\beta$ -частицы

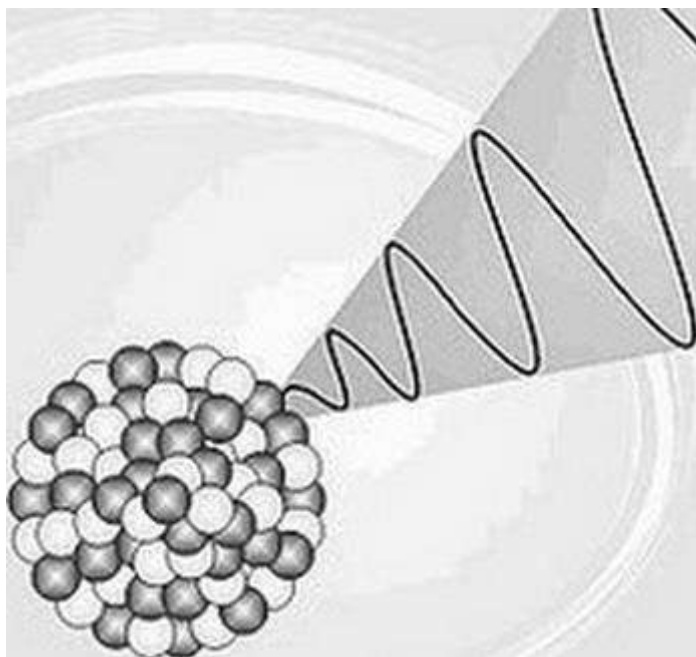


Рис. 10.4.  $\gamma$ -излучение ( $\gamma$ -лучи)

$\gamma$ -излучение вызывает ионизацию вещества. При прохождении через вещество может вызвать в нем фотоэффект, комптон-эффект, эффект образования пар и ядерный фотоэффект (при энергиях более нескольких десятков мегаэлектронвольт).

Вероятность прохождения рассмотренных излучений показана на рис. 10.5.

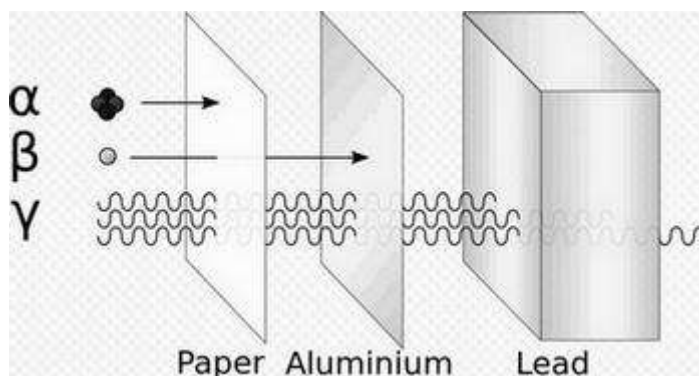


Рис. 10.5. Вероятность прохождения  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений через различные препятствия

Протонное излучение — основная составная часть космического излучения. В земных условиях в ускорителях заряженных частиц получают протоны различных энергий. Протоны высоких энергий, преодолевающие кулоновское отталкивание, попадают в ядро и вызывают различные ядерные реакции, в результате которых образуются вторичные излучения — нейтронное,  $\gamma$ -излучение и др.

Основным источником нейтронов различных энергий служит ядерный реактор. Так как нейтроны не несут электрического заряда, ионизация осуществляется за счет вторичных ядерных частиц (протоны и др.), образующихся в результате ядерных реакций. В зависимости от энергии нейтроны разделяются на медленные с энергией до 100 кэВ и быстрые с энергией до 10 МэВ. Благодаря отсутствию электрического заряда нейтроны проходят в веществе значительные расстояния. Некоторые элементы, существующие в природе, являются нестабильными. Такие элементы при своем медленном разложении испускают часть своих ядер. Это явление называется *радиоактивностью*. В дополнение к естественным радиоактивным веществам были получены искусственные. Ядра таких веществ вырабатываются в ядерных реакторах и являются очень нестабильными элементами. Вне зависимости от источника происхождения и возраста радиоактивных материалов они разлагаются по одному и тому же математическому закону, определяющему связь между количеством нераспавшихся ядер  $N$  и числом ядер  $dN$ , распадающихся за короткий интервал времени  $dt$ . Было показано экспериментально, что

$$dN = -\lambda N dt, \quad (10.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент распада данного вещества.

Из уравнения (10.1) можно найти, что  $\lambda$  – это доля ядер, распадающихся за единицу времени:

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}. \quad (10.2)$$

В системе СИ единицей измерения радиоактивности является беккерель, равный активности радионуклида, распадающегося со скоростью одно спонтанное превращение в секунду. Таким образом, беккерель выражается в единицах времени:  $1 \text{ Бк} = 1/\text{с}$ . Доза поглощения измеряется в греях. Один грей соответствует дозе поглощения, при которой энергия на единицу массы, полученная веществом за счет ионизационного излучения, равна 1 Дж/кг. При определении дозы облучения, полученной от воздействия рентгеновских и радиоактивных излучений, используют единицу Кл/кг, равную дозе облучения, приведшей к возникновению в 1 кг сухого воздуха заряда в 1 Кл. В системе СИ единица Кл/кг заменила старую единицу, называемую рентген.

Принцип работы датчиков радиоактивных излучений определяется способом взаимодействия исследуемых частиц с материалом самого детектора.

Существуют три основных типа детекторов радиоактивных излучений: сцинтилляционные счетчики, газовые и полупроводниковые детекторы. Также в соответствии с принципом действия все детекторы можно разделить на две группы: детекторы столкновений и дозиметры. Первые определяют наличие радиоактивных частиц, в то время как вторые измеряют мощность излучений.



Поэтому существует еще одна классификация детекторов радиоактивных излучений: качественные и количественные.

### 10.1. Сцинтилляционные детекторы

Принцип действия этой группы детекторов основан на способности некоторых материалов преобразовывать ядерное излучение в свет. Поэтому на основе сцинтилляционного материала и оптического детектора фотонов можно реализовать датчик радиоактивных излучений. Однако следует отметить, что, несмотря на высокую эффективность преобразований, интенсивность полученного в результате облучения материала света всегда очень мала. Поэтому в состав таких датчиков для усиления сигнала до требуемого уровня обычно входит фотоумножитель. Идеальный сцинтилляционный материал должен обладать следующими свойствами:

- 1) он должен эффективно преобразовывать кинетическую энергию заряженных частиц в детектируемый свет;
- 2) это преобразование должно быть линейным, это значит, что интенсивность полученного света должна быть в широком динамическом диапазоне пропорциональна входной мощности излучений;
- 3) для обеспечения высокого быстродействия детектора время после свечения материала должно быть коротким;
- 4) коэффициент преломления материала должен быть близок к коэффициенту стекла, что необходимо для эффективного оптического согласования сцинтилляционной камеры с трубкой фотоумножителя.

В сцинтилляционных детекторах в основном используются три типа материалов: неорганические кристаллы галоидных соединений щелочей (самым популярным является иодид натрия), органические растворы, в которых радиоактивное вещество смешивается с жидким сцинтиллятором, и органические кристаллы (например, антрацен), пластифицированные небольшим количеством других материалов. Неорганические материалы обладают не только большей чувствительностью, но и большим временем послесвечения, что не дает возможности реализовать на их основе быстродействующие детекторы. Органические материалы лишены этого недостатка, но их чувствительность, как правило, гораздо ниже.

Одним из главных недостатков сцинтилляционных счетчиков является их низкое разрешение по энергии излучения. Эффективность сцинтилляционных преобразователей является не очень высокой. Для образования одного регистрируемого носителя (фотоэлектрона) необходима энергия более 1000 эВ. При этом количество носителей, созданных за время взаимодействия излучения с материалом, редко превышает несколько тысяч. Например, разрешение по энергии для сцинтилляторов на основе иодида натрия при детектировании  $\gamma$ -излучения мощностью 0.662 МэВ ограничено 6 %, что в основном определяется статистическими флуктуациями фотоэлектронов. Единственным методом снижения данного статистического ограничения является увеличение

количества регистрируемых носителей, приходящихся на одну радиоактивную частицу.

На рис. 10.6 показана упрощенная схема сцинтилляционного детектора, соединенного с фотоумножителем. Сцинтилляционная камера прикреплена к передней стенке фотоумножителя, в которую встроен фотокатод, на который подается нулевой потенциал (потенциал земли). Внутри трубки фотоумножителя установлено множество специальных выпуклых пластин, называемых динодами, расположение которых друг относительно друга напоминает форму жалюзи. Каждый динод подсоединен к источнику положительного напряжения. Чем дальше динод расположен от фотокатода, тем выше его потенциал. Последним элементом трубки фотоумножителя является анод, на который подан максимальный положительный потенциал, иногда достигающий нескольких тысяч вольт. Все компоненты фотоумножителя находятся внутри стеклянной вакуумной трубки, там же могут располагаться и некоторые дополнительные элементы, такие как фокусирующие электроды, экраны и т. д.

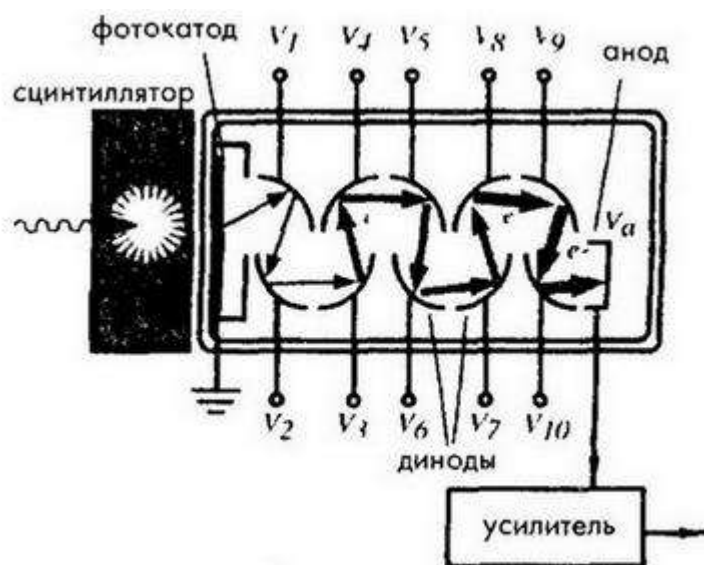


Рис. 10.6. Сцинтилляционный детектор с фотоумножителем

Фотоумножитель фактически является умножителем электронов, поскольку внутри его трубки нет никаких фотонов, а есть только электроны. Рассмотрим следующий пример. Считаем, что  $\gamma$ -частицы обладают кинетической энергией 0.5 МэВ. При их воздействии на сцинтилляционный кристалл образуются свободные фотоны. Эффективность сцинтиллятора на основе кристалла иодида натрия с примесью таллия составляет 13 %. Значит, в видимый свет преобразуется энергия, равная  $0.5 \cdot 0.13 = 0.065$  МэВ = 65 кэВ. Поскольку средняя энергия излучения видимого диапазона спектра составляет порядка 4 эВ, то, очевидно, что на одну  $\gamma$ -частицу приходится около 15 000

фотонов. Это слишком мало для регистрации обычным фотодетектором, поэтому здесь необходимо использовать фотоумножитель. Из 15 000 фотонов, как правило, только 10 000 достигают фотокатода, функция которого заключается в преобразовании фотонов в малоэнергетичные электроны. Поскольку эффективность фотокатода составляет 20 %, он вырабатывает порядка 2000 электронов на одну  $\gamma$ -частицу. Трубка фотоумножителя является линейным устройством, и ее коэффициент усиления почти не зависит от количества размноженных электронов.

Поскольку на все диоды поданы положительные потенциалы, электроны, покинувшие фотокатод, притягиваются первым диодом. При столкновении этих электронов с поверхностью диода освобождаются несколько новых электронов, улетающих навстречу второму диоду и т. д. То есть начинается лавинное образование свободных заряженных частиц. Таким образом, процесс фотоумножения электронов происходит именно на диодах. Коэффициент умножения обычно составляет порядка  $10^6$ . В результате до анода доходит порядка  $2 \cdot 10^9$  электронов, создающих довольно большой электрический ток, регистрируемый соответствующими электронными схемами. Коэффициент усиления фотоумножителя определяется как

$$G = \alpha \delta^N, \quad (10.3)$$

где  $\alpha$  – доля электронов, собранных фотоумножителем;

$\delta$  – эффективность материала диодов (т. е. число освобождаемых электронов на одно столкновение);

$N$  – количество диодов.

Величина  $\delta$  обычно лежит в пределах 5 ... 55. Коэффициент усиления зависит от приложенного напряжения, поскольку  $\delta$  является почти линейной функцией от напряжения между диодами.

В настоящее время используются несколько видоизмененные фотоумножители (ФУ), получившие название канальных (КФУ), в которых устранены практически все недостатки традиционных ФУ. Вместо сложной диодной системы в КФУ используется извилистый тонкий полупроводниковый канал. При прохождении этого канала электроны ударяются о его стенки, и при каждом таком столкновении с поверхности стенок канала выбиваются вторичные электроны. Поскольку количество электронов все время возрастает, этот процесс носит лавинообразный характер. Коэффициент усиления такого КФУ бывает более  $10^9$ . Результирующий ток снимается с анода. КФУ часто изготавливаются герметичными и имеют более прочную конструкцию по сравнению с хрупкими традиционными ФУ. Влияние магнитных полей на такие детекторы незначительно.

Достоинство КФУ – низкий уровень фонового шума. Под термином фоновый шум подразумевается уровень выходного сигнала при отсутствии падающего света. В традиционных ФУ составляющая фонового шума, возникающего в диодной системе, имеет довольно большое значение. В КФУ

фоновый шум возникает в основном из-за теплового излучения фотокатода. Поскольку КФУ изготавливаются в виде монолитных конструкций, в них не возникает эффекта накапливания заряда, характерного для обычных ФУ. Поэтому КФУ являются очень стабильными устройствами, которым не свойственны внезапные всплески выходного сигнала. При этом благодаря отсутствию шума, характерного для динодов, легко отделить электронный шум от полезного сигнала. Все это ведет к высокой долговременной стабильности устройства.

## **10.2. Ионизационные детекторы**

Детекторы этого класса основаны на способности некоторых газов и твердых тел вырабатывать ионные пары при воздействии на них ионизирующего излучения. Далее положительные и отрицательные ионы при помощи электростатического поля отделяются друг от друга и их количество измеряется.

Ионизация появляется при прохождении заряженных частиц на большой скорости сквозь атомы вещества. Возникающие при этом электромагнитные силы отрывают электроны от атомов, формируя при этом пары ионов. Примечательно, что при этом одна радиоактивная частица, пока не кончится ее энергия, способна создать сразу несколько ионных пар. Незаряженные частицы (такие как нейтроны) при столкновении с ядрами также формируют пары ионов.

### **10.2.1. Ионизационные камеры**

Такие детекторы являются наиболее ранними и широко распространенными датчиками ионизирующих излучений. Радиоактивные частицы при прохождении через камеру вызывают ионизацию и возбуждение молекул газа. Для запуска процесса ионизации частица должна обладать энергией как минимум равной энергии ионизации молекул газа. Для большинства используемых в детекторах газов энергия ионизации составляет порядка 10–20 эВ. Однако существуют и другие механизмы, при которых попадающие внутрь камеры частицы теряют свою энергию при прохождении через газ не на его ионизацию, т. е. на отделение электронов от атомов, а например, на перемещение электронов на более высокий энергетический уровень. Поэтому средняя энергия, которую теряет частица на образование одной электронной пары ( $W$ -энергия), всегда выше энергии ионизации газа. Величина ( $W$ -энергии определяются типом газа), видом излучения и его энергией

В присутствии электрического поля перемещение положительных и отрицательных ионов приведет к возникновению электрического тока. В заданном объеме скорость образования ионных пар является постоянной. Для этого скорость образования ионных пар должна уравниваться скоростью либо их распада вследствие рекомбинации, либо выхода за пределы объема за счет процессов диффузии и миграции. При незначительном уровне

рекомбинации и эффективном сборе всех зарядов в системе устанавливается стационарный ток, являющийся точной мерой скорости образования ионных пар. В объеме газа, расположенном между двумя электродами, создается электрическое поле. В отсутствие процесса ионизации через полученную электрическую цепь ток не течет, поскольку между электродами находится неэлектропроводная среда. Радиоактивные частицы, попадая внутрь камеры, приводят к образованию положительных и отрицательных ионов, которые под действием электрического поля направляются к соответствующим электродам, что вызывает появление в цепи электрического тока. При относительно низких значениях приложенного напряжения ионы рекомбинируют довольно сильно, поэтому выходной ток пропорционален напряжению. При увеличении разности потенциалов число рекомбинаций уменьшается до тех пор, пока все ионы не станут долетать до электродов, после чего ток перестает зависеть от напряжения, хотя его величина будет по-прежнему определяться интенсивностью излучения. Эта зона называется зоной насыщения. Именно эта зона является областью нормальной работы ионизационной камеры.

### **10.2.2. Пропорциональные камеры**

Пропорциональные камеры, заполненные газом, относятся к детекторам, работающим в импульсном режиме, принцип действия которых основан на умножении электронов в газе. Поэтому такие камеры также называются пропорциональными счетчиками. Благодаря эффекту фотоумножения выходной сигнал пропорционального детектора намного превышает сигнал обычной ионизационной камеры. Такие счетчики в основном используются при детектировании и спектроскопии мягкого рентгеновского излучения, а также для обнаружения нейтронов. В отличие от ионизационных камер пропорциональные счетчики работают при высоких напряжениях, значительно ускоряющих электроны, возникающие в результате столкновений. Поскольку эти электроны после ускорения обладают достаточно большой энергией, они могут вовлечь в процесс ионизации нейтральные молекулы газов, создавая при этом дополнительные ионные пары. Следовательно, процесс ионизации носит лавинный характер, что приводит к резкому возрастанию тока через электроды. Такая ионизация называется лавиной Таунсенда. В пропорциональном счетчике лавинообразный процесс заканчивается, как только электрон достигает анода. Поскольку в таком детекторе электрон должен достичь уровня ионизации газа, существует пороговое напряжение, после которого начинается этот лавинообразный процесс. Для газов, используемых в пропорциональных счетчиках, при атмосферном давлении этот пороговый уровень составляет порядка  $10^6$  В/м.

При очень низких напряжениях поле не может помешать рекомбинации ионных пар. По достижении уровня насыщения все ионы достигают электродов. При дальнейшем увеличении напряжения происходит явление фотоумножения.

До некоторого уровня напряжения процесс умножения фотоэлектронов будет линейным, а количество собранных зарядов пропорциональным количеству исходных ионных пар. Если приложенное напряжение продолжать увеличивать, из-за медленной скорости положительных ионов линейность процесса фотоумножения нарушится.

### 10.2.3. Счетчики Гейгера – Мюллера

Счетчик Гейгера – Мюллера был изобретен в 1928 году и до сих пор применяется очень широко, что объясняется его низкой стоимостью и простотой в эксплуатации. Эти счетчики отличаются от остальных ионизационных камер использованием гораздо более высоких напряжений возбуждения. В рабочей области счетчиков амплитуда выходных импульсов не зависит от энергии ионизирующего излучения, а является только функцией приложенного напряжения. Такие детекторы, как правило, изготавливаются в форме трубки, в центре которой расположена проволочка, выполняющая роль анода. Трубка заполняется инертным газом, таким как гелий или аргон, в который часто добавляются дополнительные компоненты, действующие как гасящие реагенты для предотвращения повторного запуска счетчика в процессе детектирования. Типовой лавинный процесс запускается одним первичным электроном. При этом создается большое количество вторичных ионов, а также много молекул газа переходят в возбужденное состояние. В течение нескольких наносекунд эти молекулы возвращаются в свое исходное состояние, выпуская лишнюю энергию в виде УФ-излучения. Эти испущенные фотоны играют важную роль в цепных реакциях, происходящих в счетчике Гейгера – Мюллера. При поглощении фотонов поверхностью катода или молекулами газа происходит высвобождение электронов, летящих навстречу аноду, которые при этом запускают новые лавинные процессы. Быстрое распространение цепных реакций ведет к возникновению лавинных процессов по всему объему трубки. Вторичные ионы формируют цилиндрическую область, окружающую анод, в которой запускаются все новые и новые лавинные процессы.

Такая цепная реакция продолжается до некоторого момента времени, определяемого количеством лавинных процессов и независимого от энергии частицы-инициатора. Поэтому импульсы тока на выходе счетчика Гейгера – Мюллера имеют всегда одинаковую амплитуду. Следовательно, счетчики Гейгера – Мюллера являются качественными, а не количественными детекторами радиоактивных излучений.

В счетчиках Гейгера – Мюллера одна частица, обладающая достаточной энергией, может создать около  $10^9 - 10^{10}$  ионных пар. Поскольку одна ионная пара, сформированная в трубке счетчика, способна вызвать полный разряд детектора Гейгера, считается, что эффективность счетчика Гейгера – Мюллера может быть равной 100 %. Однако счетчики Гейгера – Мюллера редко используются для детектирования нейтронов, поскольку при этом они обладают низкой эффективностью. Эффективность счетчиков Гейгера – Мюллера при

детектировании  $\gamma$ -излучений повышается при применении трубок, стенки катода внутри которых изготовлены из материала с большим атомным номером. Например, для детектирования  $\gamma$ -частиц часто используются катоды из висмута ( $Z = 83$ ) в комбинации с газами, также имеющими большие атомные номера, такими как ксенон и криптон. Эффективность счета таких детекторов достигает 100 % при энергиях фотонов ниже 10 кэВ.

#### **10.2.4. Полупроводниковые детекторы радиоактивности**

Наилучшей разрешающей способностью среди современных детекторов радиационных излучений обладают полупроводниковые датчики. В полупроводниковых материалах основными носителями информации являются пары электрон – дырка, создаваемые вдоль траектории полета заряженной частицы через детектор. Заряженная частица может быть либо первичным излучением, либо вторичной частицей. Пары электрон – дырка в некотором отношении являются аналогами ионных пар в газовых детекторах. Когда к полупроводниковому материалу приложено электрическое поле, созданные носители зарядов начинают перемещаться в определенных направлениях, что означает возникновение электрического тока. Датчики, построенные на этом принципе, называются твердотельными или полупроводниковыми диодными детекторами. Принцип действия таких детекторов аналогичен принципу полупроводниковых детекторов светового излучения. Он базируется на перемещении электронов с одного энергетического уровня на другой при получении или потере энергии.

При прохождении заряженной частицы сквозь полупроводник по пути ее следования возникает много пар электрон – дырка. Процесс образования пар может быть как прямым, так и косвенным, при котором частица участвует в формировании электронов высоких энергий, постепенно теряющих свою энергию на создание новых пар электрон – дырка. Интересно отметить, что вне зависимости от механизма формирования пар электрон – дырка на создание одной пары первичная заряженная частица затрачивает одинаковую среднюю энергию, которую часто по аналогии с газоразрядными детекторами называют «энергией ионизации». Основное достоинство полупроводниковых детекторов заключается в очень малой величине этой энергии. Ее значение для кремния и германия составляет порядка 3 эВ, тогда как в газовых детекторах энергия, необходимая для создания ионной пары, равна 30 эВ.

Поэтому при одной и той же мощности исходного излучения в полупроводниковых детекторах возникнет в 10 раз большее количество носителей зарядов. Для получения твердотельного детектора в полупроводниковом материале необходимо сформировать по крайней мере два электрода. В процессе детектирования выводы этих электродов подсоединяются к источнику напряжения, обеспечивающему протекание в цепи электрического тока. Однако на практике материалы из чистого кремния или германия не используются, что связано с довольно большими токами

утечек, вызванных относительно низким удельным сопротивлением этих полупроводников (например, для кремния оно составляет около  $50 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ ). При приложении к электродам такого детектора внешнего напряжения в цепи может возникнуть ток, в 3...5 раз превышающий величину тока, индуцированного излучением. Поэтому детекторы этого типа реализуются на основе  $p$ - $n$ -переходов с обратным смещением, что позволяет значительно снизить токи утечек. Фактически детектор является полупроводниковым диодом, проводящим ток (имеющим низкое удельное сопротивление) при подключении анода ( $p$ -зоны перехода) к положительному выводу источника питания, а катода ( $n$ -зоны) – к отрицательному выводу. При обратном подключении ток через диод практически не течет (т. е. он обладает высоким удельным сопротивлением). При сильном обратном смещении диода (значительно превышающем допуски производителя) происходит его пробой, что приводит к резкому увеличению тока утечки; это вызывает катастрофическое ухудшение рабочих характеристик детектора или даже выход его из строя.

В настоящее время выпускаются кремниевые диоды нескольких конфигураций: диоды с диффузионным переходом, диоды с поверхностным запирающим слоем, ионно-имплантированные детекторы, детекторы с эпитаксиальным слоем и др. Первые два указанных типа детекторов широко применяются при детектировании  $\beta$ -частиц и других слабопроникающих излучений. Хорошие полупроводниковые детекторы радиоактивных излучений должны обеспечивать:

- 1) отличную передачу заряда;
- 2) линейность между мощностью излучения и количеством пар электрон – дырка;
- 3) отсутствие свободных носителей зарядов (низкий ток утечки);
- 4) генерацию максимального числа пар электрон – дырка на единицу излучения;
- 5) высокую эффективность детектирования;
- 6) хорошее быстродействие;
- 7) большую зону сбора зарядов;
- 8) низкую стоимость.

Во время эксплуатации полупроводниковых детекторов необходимо учитывать следующие их особенности: наличие зоны нечувствительности и возможность радиационного повреждения устройства. При попадании в детектор тяжелые заряженные частицы или другие слабопроникающие излучения могут потерять значительную часть своей энергии еще до того, как они достигнут чувствительной зоны датчика. Энергия теряется на металлическом электроде, а также в довольно толстом слое кремния, расположенном непосредственно под электродом. Самый простой и распространенный способ борьбы с этим явлением заключается в изменении угла попадания излучения в детектор.



Любое превышение эксплуатационных режимов может привести к разрушению решетки кристаллической структуры из-за явлений пробоя, связанных с прохождением через кристалл измеряемых излучений. Такие повреждения сравнительно редко встречаются при работе с легкими ионизирующими излучениями ( $\beta$ -частицы), однако при исследовании тяжелых частиц они могут стать серьезной проблемой. Например, длительное воздействие на детектор компонентов ядерного синтеза приведет к значительному росту тока утечки, а следовательно, и сильному ухудшению разрешающей способности датчика. При серьезных радиационных повреждениях в спектре исследуемых моноэнергетических частиц могут появиться дополнительные пики.

Диоды с диффузионным переходом и диоды с поверхностным запирающим слоем не подходят для детектирования проникающего излучения. Причина этого заключается в узкой активной зоне таких детекторов, которая редко превышает 2...3 мм, что недостаточно для проведения, например, электронно-лучевой спектроскопии. Для работы с проникающими видами излучений необходимо применять полупроводниковые детекторы с дрейфующими ионами. В таких детекторах формируется дополнительный толстый слой со сбалансированным количеством примесей, добавляющих полупроводниковому материалу свойства того или иного типа проводимости ( $p$  или  $n$ ). Цель легирования – получение полупроводника, которому не присущи свойства никакого типа проводимости. Однако на практике идеальный  $p$ - $n$ -баланс достичь никогда не удастся. Проводимость материалов из чистого кремния и германия чаще бывает  $p$ -типа. Поэтому для получения сбалансированного материала в него необходимо ввести атомы доноров. В качестве донора чаще всего используется литий, атомы которого методом диффузии вводятся в кристалл  $p$ -типа. При этом количество введенных атомов лития намного превышает число исходных акцепторов, что соответствует созданию рядом с чувствительной поверхностью зоны проводимости  $n$ -типа. После этого температура повышается и на переход подается напряжение обратного смещения. Это приводит к тому, что литий начинает медленно дрейфовать в сторону зоны  $p$ -проводимости. Таким образом, достигается нейтрализация исходной проводимости кристалла. Этот процесс может длиться в течение нескольких недель. Для последующего поддержания полученного баланса детектор должен храниться при низкой температуре, например, для германия эта температура равна 77 К. Поскольку кремний обладает очень низкой подвижностью ионов, детекторы, реализованные на его основе, могут храниться и работать при комнатной температуре. Однако атомный номер кремния (14) намного ниже атомного номера германия (32), что означает его более низкую эффективность при детектировании  $\gamma$ -лучей, поэтому кремниевые детекторы редко используются в  $\gamma$ -спектроскопии.

Несмотря на популярность кремниевых и германиевых детекторов, они являются далеко неидеальными с определенных точек зрения. Например, для

снижения токов утечек германиевые детекторы должны работать при криогенных температурах; а кремниевые детекторы в свою очередь не эффективны при обнаружении  $\gamma$ -излучений. Существуют и другие полупроводниковые материалы, которые могут использоваться для детектирования радиоактивных излучений при комнатной температуре. Среди них CdTe, HgI<sub>2</sub>, GaAs, Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> и GaSe. Самым популярным полупроводником для изготовления детекторов радиоактивных излучений в настоящее время является теллурид кадмия. Он обладает довольно высоким атомным номером (48 и 52), а также относительно большой шириной зоны запрещенных энергий (1.47 эВ), поэтому детекторы на его основе могут работать при комнатной температуре. Современная технология позволяет выращивать кристаллы CdTe очень высокой чистоты, из которых изготавливаются детекторы с PIN-переходом. Для компенсации излишка акцепторов здесь также может использоваться метод введения сбалансированных примесей; в данном случае роль донора выполняет хлор. Выпускаемые в настоящее время CdTe-детекторы имеют диаметр 1 ... 50 мм и работают при температурах до 50 °С без значительного увеличения шума. Существуют два типа CdTe-детекторов: с легированием хлором и без него. Второй тип имеет высокое объемное удельное сопротивление (до  $10^{10}$  Ом · см), однако его разрешающая способность невелика. Разрешение детекторов с легированием гораздо выше, но их удельное сопротивление, к сожалению, ниже ( $10^8$  Ом · см), что ведет к увеличению тока утечки. К тому же они склоны к поляризации, что может существенно ухудшить их рабочие характеристики.

В твердотельных детекторах также возможно добиться эффекта фотоумножения, как в газовых датчиках. Аналог пропорционального счетчика, называемый *лавинным детектором*, применяется для мониторинга излучений низких энергий. Коэффициент усиления таких детекторов обычно лежит в диапазоне нескольких сотен. Для получения такого усилительного эффекта внутри полупроводникового материала создается сильное электрическое поле.

#### **10.2.5. Принципы работы, материалы и конструкции полупроводниковых детекторов радиоактивного излучения**

В основе большинства методов детектирования в полупроводниках лежит один принцип: в материале создается электрическое поле, в котором созданные радиоактивным излучением свободные носители заряда перемещаются в определенном направлении, что означает возникновение электрического тока (рис. 10.7)

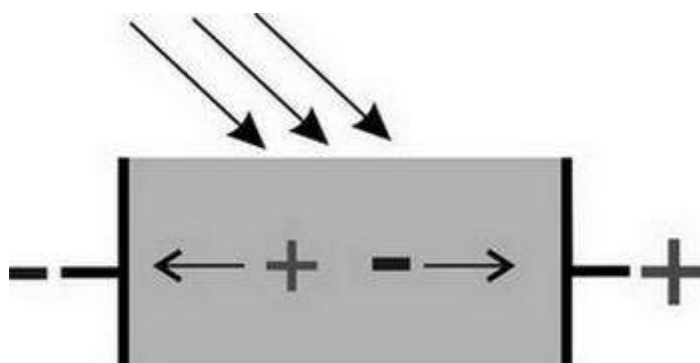


Рис. 10.7. Ток, обусловленный радиоактивным облучением

На практике используются в основном диоды с обратным смещением, так как в чистом материале ток собственной проводимости превышает индуцированный излучением в несколько раз, а обратное смещение диода позволяет значительно увеличить сопротивление  $p$ - $n$ -перехода и снизить фоновый ток. Чувствительной областью в диоде является обедненная область. При прохождении частиц через нее в цепи возникает ток (рис. 10.8).

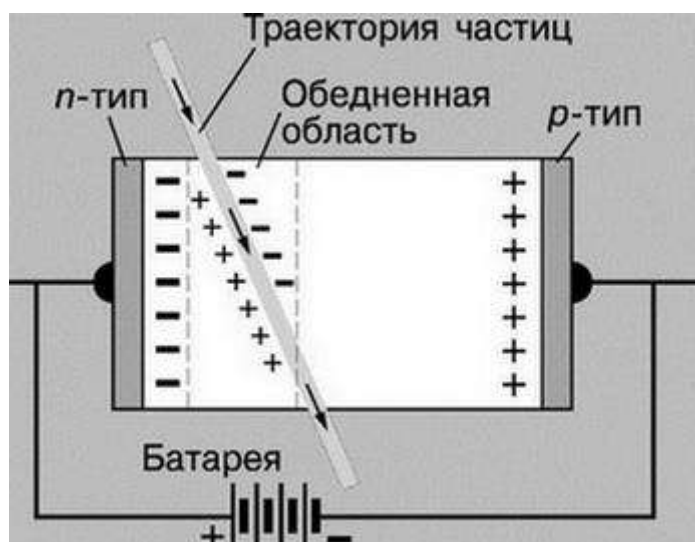


Рис. 10.8. Образование обедненной области

Полупроводниковые детекторы радиоактивных излучений обеспечивают отличную передачу заряда, линейность между мощностью излучения и количеством пар электрон – дырка, низкий ток утечки, генерацию максимального числа пар электрон – дырка на единицу излучения, высокую эффективность детектирования, достаточно хорошее быстродействие, большую зону сбора зарядов, низкую стоимость.

Полупроводниковые детекторы (ППД) на основе теллурида кадмия, сульфида кадмия и йодида ртути считаются перспективными для регистрации  $\gamma$ -излучения в изотопных приборах технологического контроля. Основные параметры перспективных материалов представлены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

### Основные характеристики перспективных полупроводниковых материалов

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Подвижность, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$		Время жизни, с	
		электрон	дырка	электрон	дырка
Si	1.12	1900	480	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Ge	0.67	3800	1800	$10^{-3}$	$10^{-3}$
CdTe	1.47	1050	100	$10^{-6}$	$8-10^{-7}$
HgI <sub>2</sub>	2.13	94	4	$10^{-6}$	$5-10^{-7}$
CdS	2.41	300	15	$10^{-3}$	$10^{-8}$

Поверхностно-барьерные детекторы (рис. 10.9) используются для спектрометрии и регистрации короткопробежных частиц (осколков деления, тяжелых ионов). Если на поверхность ПБД нанести тонкий слой водородсодержащего вещества), то такую систему можно использовать для регистрации и спектрометрии нейтронов в первом случае по протонам отдачи, возникающим при упругом рассеянии нейтронов на водороде, во втором – по заряженным частицам – продуктам ядерной реакции: тритию и гелию. Достоинства: тонкий нечувствительный слой, не нуждается в охлаждении, высокая радиационная стойкость. Недостатки: поверхность кристалла чувствительна к загрязнениям и свету, невысокое энергетическое разрешение.

Для обнаружения  $\gamma$ -излучения используются *p-i-n*-диоды (рис. 10.10). Для компенсации *p*-проводимости в Si или Ge применяется легирование литием. В CdTe вместо Li используется Cl. *p-i-n*-диоды на основе теллурида кадмия более популярны, так как материал обладает большим суммарным атомным номером и большой шириной запрещенной зоны. Поэтому эти детекторы могут работать при комнатной температуре. Существуют два типа CdTe-детекторов: с легированием хлором и без него. Во втором случае удельное сопротивление выше, но ниже разрешающая способность. В первом – наоборот, что приводит к большим токам утечки и к способности к поляризации. Достоинства: отличное энергетическое разрешение, высокая эффективность. Кремниевый диод может храниться и работать при комнатной температуре и является хорошим детектором для низкоэнергетического  $\gamma$ -излучения ( $< 150$  кэВ), рентгеновского

и  $\beta$ -излучений, но эффективность его невысока. Германиевый диод должен постоянно содержаться при криогенных температурах. Благодаря цилиндрическим (коаксиальным) *p-i-n*-диодам (рис. 10.11) на основе особо чистого германия был реализован объем рабочей области до  $150 \text{ см}^3$ . Они используются для регистрации  $\gamma$ -излучения с энергией  $\gamma$ -квантов до 10 МэВ. Достоинства: отличное энергетическое разрешение, эффективен для  $\gamma$ -

излучения, может храниться при комнатной температуре, но во время работы должен охлаждаться до криогенных температур.



Рис. 10.9. Поверхностно-барьерный детектор



Рис. 10.10. Диффузионно-дрейфовый  $p-i-n$ -диод

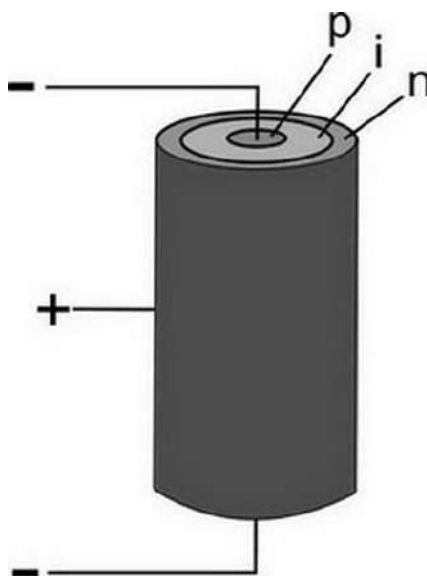


Рис. 10.11. Коаксиальный  $p-i-n$ -диод

В радиационных германиевых детекторах (рис. 10.12) чувствительная область создается в результате компенсации доноров в исходном материале акцепторными уровнями радиационных дефектов, возникающих под действием  $\gamma$ -излучения в кристалле германия  $n$ -типа. Не требуют охлаждения во время хранения из-за стабильности дефектов при комнатной температуре, но энергетическое разрешение ниже, чем у дрейфовых. Чувствительная область по толщине максимум 0.2–0.3 см.

В процессе эксплуатации радиационных датчиков ввиду взаимодействия чувствительных элементов с жестким излучением они, естественно, деградируют и теряют свои эксплуатационные характеристики. В результате

облучения изменяется сопротивление материала, что, в свою очередь, вызывает искажения электрических полей, увеличиваются токи утечки и вероятности захвата в ловушки и рекомбинации. Нарушения в общем случае создаются неравномерно по чувствительному объему, поэтому ухудшается разрешение и появляются дополнительные пики в амплитудном распределении импульсов, что является одним из признаков существенных повреждений. Кроме того, растет время сбора заряда.

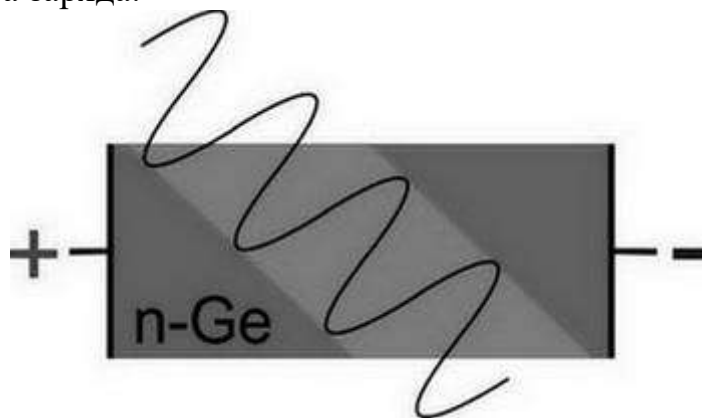


Рис. 10.12. Радиационный германиевый детектор

Для детекторов с *p-i-n*-переходом одним из последствий облучения является уменьшение глубины обедненного слоя.

Колебания чувствительности детекторов в столь широких пределах связаны в первую очередь со свойствами монокристалла, из которого был изготовлен ППД, в частности со степенью его легирования.

Рассмотрим основные физические варианты деградации чувствительных элементов.

Упругое рассеяние (рис. 10.13) обуславливается нейтронным облучением. Оно является основной причиной повреждения ППД при энергиях нейтронов более 100 эВ.

Суть неупругого рассеяния показана на рис. 10.14.

При ударах электронов с энергиями около 200 кэВ (для кремния) и 400 кэВ (для германия) происходит смещение атакованного атома решетки материала чувствительного слоя датчика (рис. 10.15).

Вероятность создания одного дефекта в слое кремния толщиной 0.1 см для  $\gamma$ -кванта с энергией 3 МэВ составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  (рис. 10.16).

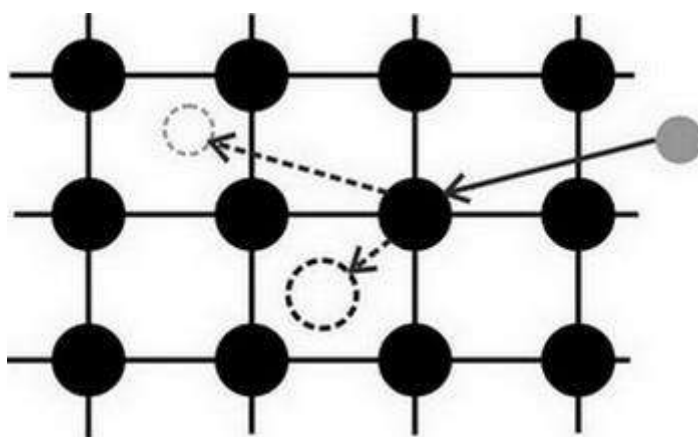


Рис. 10.13. Упругое рассеяние

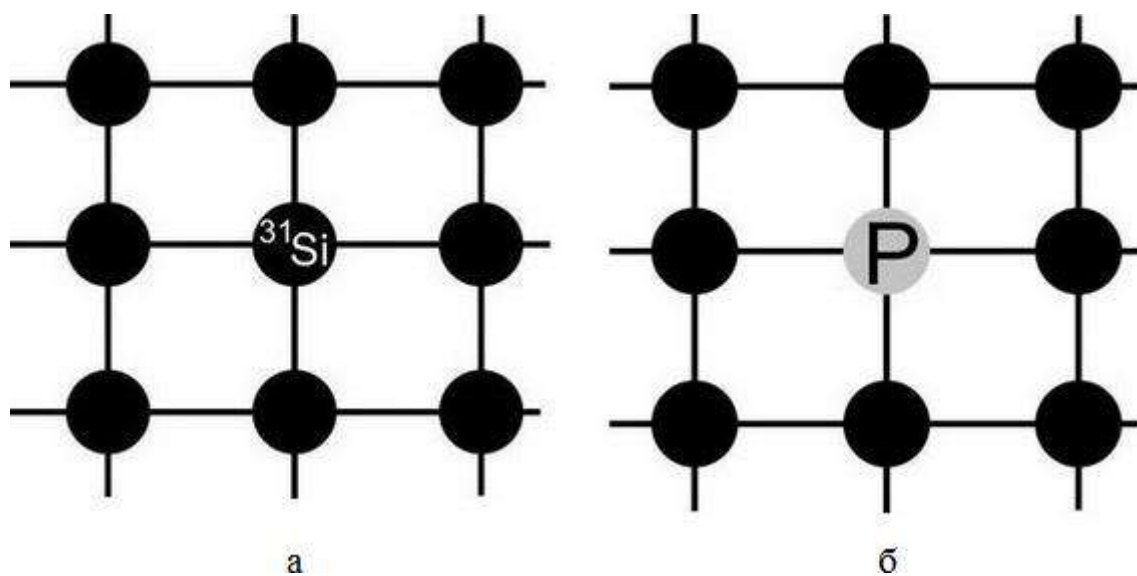


Рис. 10.14. Неупругое рассеяние

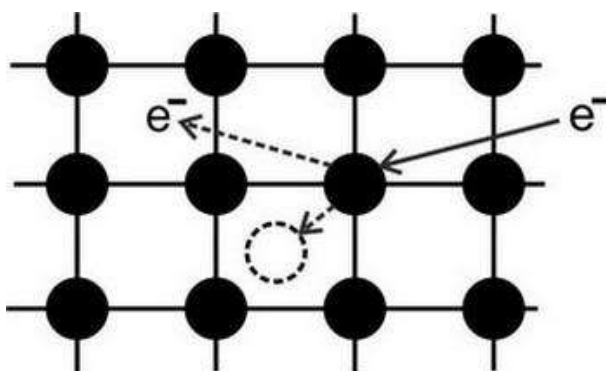


Рис. 10.15. Повреждение электронами

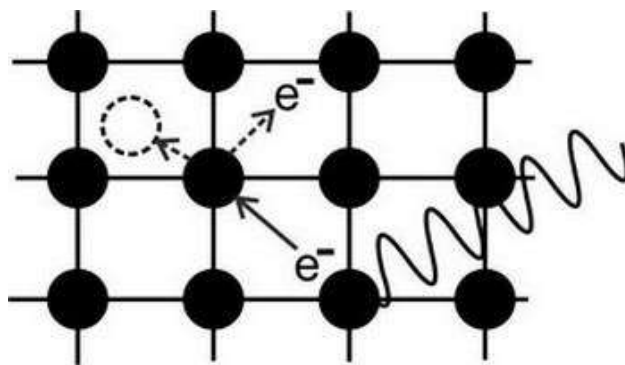


Рис. 10.16. Повреждение  $\gamma$ -лучами

В кремнии, например, полное число дефектов, создаваемых протоном с энергией 10 МэВ, пропорционально его энергии и приблизительно равно 200 пар. Естественно, что эти дефекты располагаются вдоль трека протона. Аналогично можно численно оценить число дефектов, созданных  $\alpha$ -частицей. Труднее рассчитать повреждения, производимые осколками деления и тяжелыми ионами, поскольку в этом случае возможны как прямые столкновения с атомами решетки, так и передача ей энергии на большие расстояния (кулоновским полем заряженной частицы). При бомбардировке такими частицами смещаются почти все атомы, расположенные на пути частицы, образуя сильно разупорядоченный объем, называемый *клином смещения* (рис. 10.17).

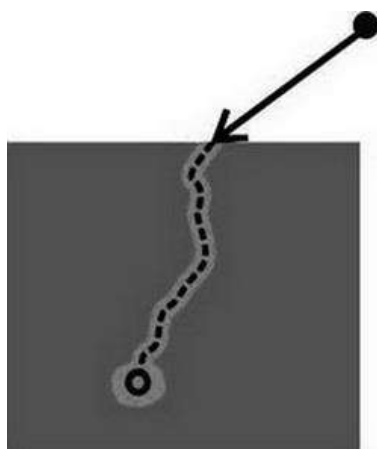


Рис. 10.17. Клин смещения



## 11. АКТЮАТОРЫ

С практической точки зрения сам датчик (первичный преобразователь) не является абсолютным комплексным решением проблемы, так как он дает только информационный сигнал, который может быть использован не только для принятия решения, но и для реализации конкретного действия (процесса). Например, датчик, отрабатывающий условия освещенности, дает сигнал, когда требуется включить освещение для комфортного и безопасного движения автотранспорта, и требует элемент, который реализует включение необходимого освещения, т. е. самый обычный включатель/выключатель. Этот чисто механический (а в нашем случае – микромеханический) элемент называется актюатором. Актюаторы в микроэлектронике могут быть в виде мембраны, балки изгиба, балки кручения, микрошестеренок, микрофрикционных и т. д.

Микросистема предполагает интеграцию ряда различных технологий (МЭМС, КМОП, оптической, гидравлической и т. д.) в одном модуле. Например, технологии изготовления МЭМС -устройств для СВЧ-применений (катушки индуктивности, варакторы, коммутаторы, резонаторы) подразумевают традиционные технологические циклы изготовления интегральных схем, адаптированные для создания трехмерных механических структур (это, например, объемная микрообработка, поверхностная микрообработка и оригинальная, так называемая технология LIGA).

Кремниевая объемная микрообработка (она характерна именно для микросенсоров, в частности для актюаторов) включает технологию глубинного объемного травления (рис. 11.1).

При таком процессе объемная структура формируется в полости внутри подложки благодаря ее анизотропным свойствам, т. е. различной скорости травления кристалла в зависимости от кристаллографической ориентации.

Объемную структуру можно получить и методом наращивания, когда несколько подложек соединяются (безо всякого клея) методом диффузионной сварки (одновременного воздействия поперечного давления, продольного ультразвукового воздействия и инфракрасного нагрева), в результате чего между соединяемыми поверхностями слоев создаются мощные связи на атомарном уровне. Главным условием реализации данного процесса является химико-механическая полировка контактируемых поверхностей. На сегодняшний день в реальной практике только химико-механическая обработка обеспечивает максимальную зеркальность (минимальный микропрофиль) поверхности – главное условие для электростатического взаимодействия атомов.

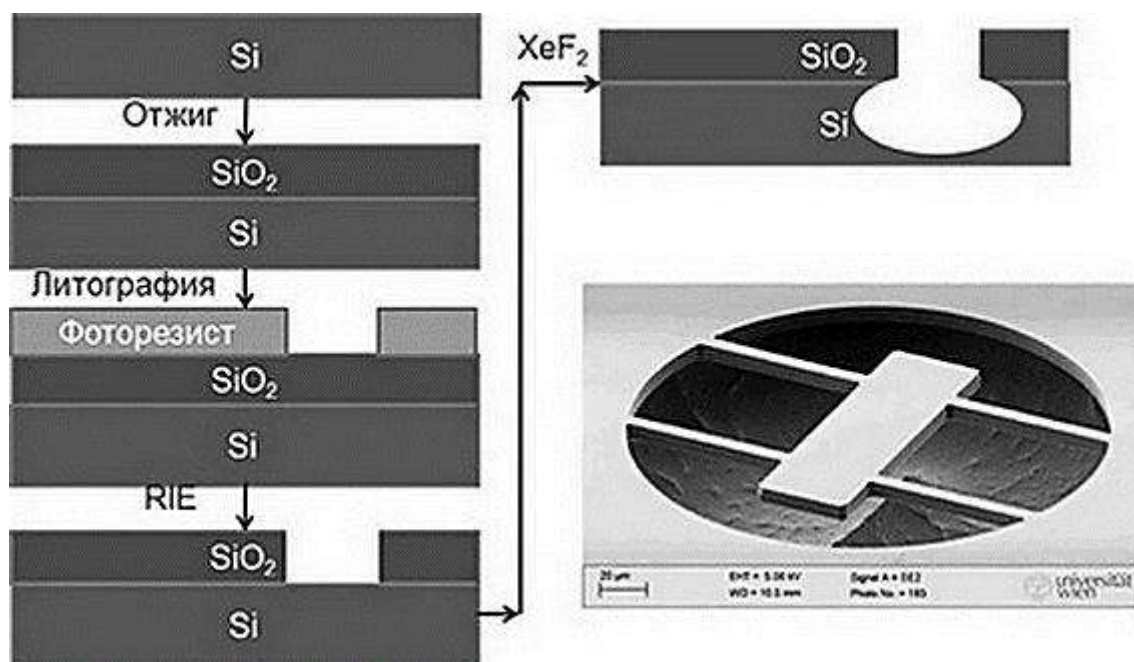


Рис. 11.1. Химическая объемная микрообработка

При поверхностной микромеханической обработке трехмерная структура образуется за счет последовательного наложения основных тонких пленок и удаления вспомогательных слоев в соответствии с требуемой топологией. Преимущество данной технологии – возможность многократного удаления растворением вспомогательных слоев без повреждения взаимосвязей базовых слоев. А главная ее особенность состоит в том, что она совместима с полупроводниковой технологией, позволяющей создать микроминиатюрные детали (гидравлические и пневмоклапаны, струйные сопла принтера, пружины для подвески головки винчестера, микроинструменты (скальпели и пинцеты для работы с объектами микронных размеров), микромашины (моторы, насосы, турбины микронных размеров), микророботы, микродатчики и другие исполнительные устройства).

Нестандартным для производства интегральных микросхем, но востребованным для актюаторов сенсорных устройств является LIGA-процесс.

LIGA (одна из немногих немецких аббревиатур в микроэлектронике) расшифровывается как Lithography (литография), Galvanik Abformung (гальваническое заполнение).

Принцип LIGA-процесса показан на рис. 11.2 и 11.3. Существенным отличием от обычной в микроэлектронике ультрафиолетовой литографии являются два фактора: использование очень толстого фоторезиста на основе ПММА (полиметилметаакрила) и мощное синхротронное  $\gamma$ -излучение вместо слабого ультрафиолетового.

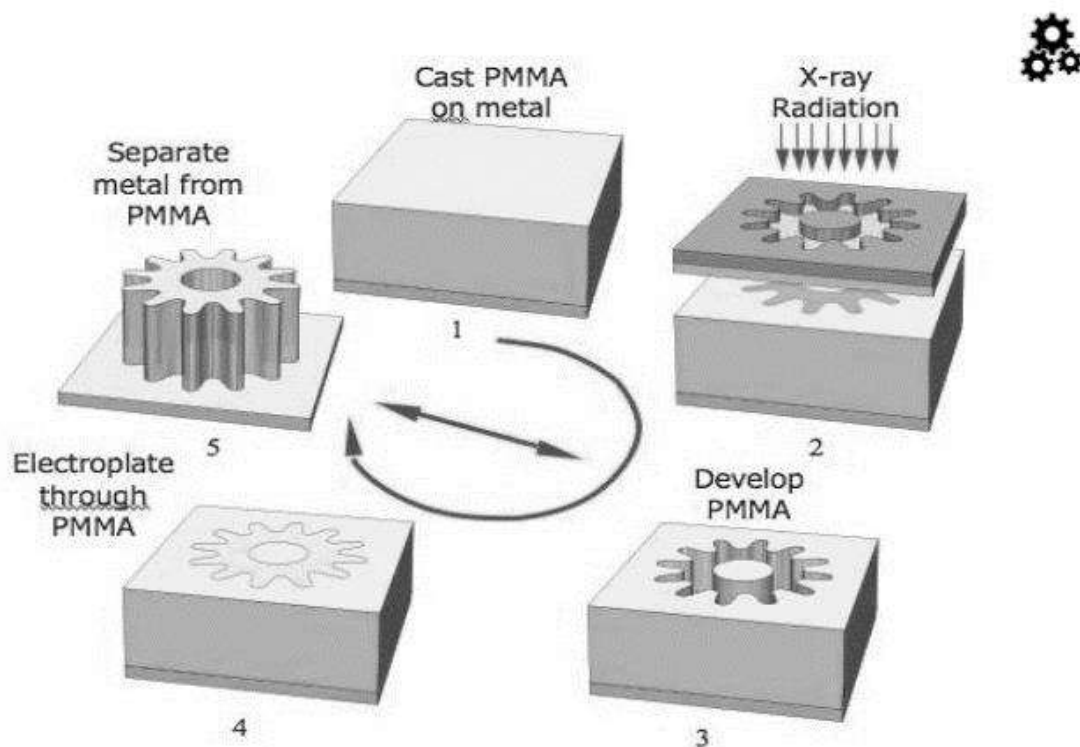


Рис. 11.2. LIGA-процесс, основные этапы

Актюаторы, как правило, имеют микронные толщины (1–500 мкм), т. е. являются высокопрофильными трехмерными структурами. Поэтому для их получения требуется очень толстый фоторезист. В свою очередь экспонирование толстого резиста требует большой мощности экспонирующего излучения. При этом излучение должно быть с минимальной расходимостью (дивергенцией), чтобы обеспечить требуемую разрешающую способность. Это реализуется

γ-излучением синхротрона (с энергией более 1 ГэВ). Глубина проникновения такого излучения может достигать нескольких миллиметров. Это обуславливает высокую эффективность экспонирования при малых временных затратах. Считается, что данная технология обеспечивает наилучшее отношение воспроизводимой ширины канала к его длине (так называемое аспектное отношение). Наиболее перспективными методами считаются пьезоэлектрический и гидравлический, хотя и другие имеют большое значение. Электростатическая активация применяется примерно в одной трети микроактюаторов, и это, вероятно, наиболее общий и хорошо разработанный метод; главные его недостатки – износ и слипание. Магнитные микроактюаторы обычно требуют относительно большого электрического тока, также на микроскопическом уровне. При использовании электростатических методов активации получаемый выходной сигнал на относительную единицу размерности лучше, чем при использовании магнитных методов. Иными словами, при одном и том же размере электростатическое устройство выдает несколько лучший выходной сигнал. Тепловые микроактюаторы тоже

потребляют относительно много электрической энергии; главный их недостаток состоит в том, что генерируемое тепло приходится рассеивать.

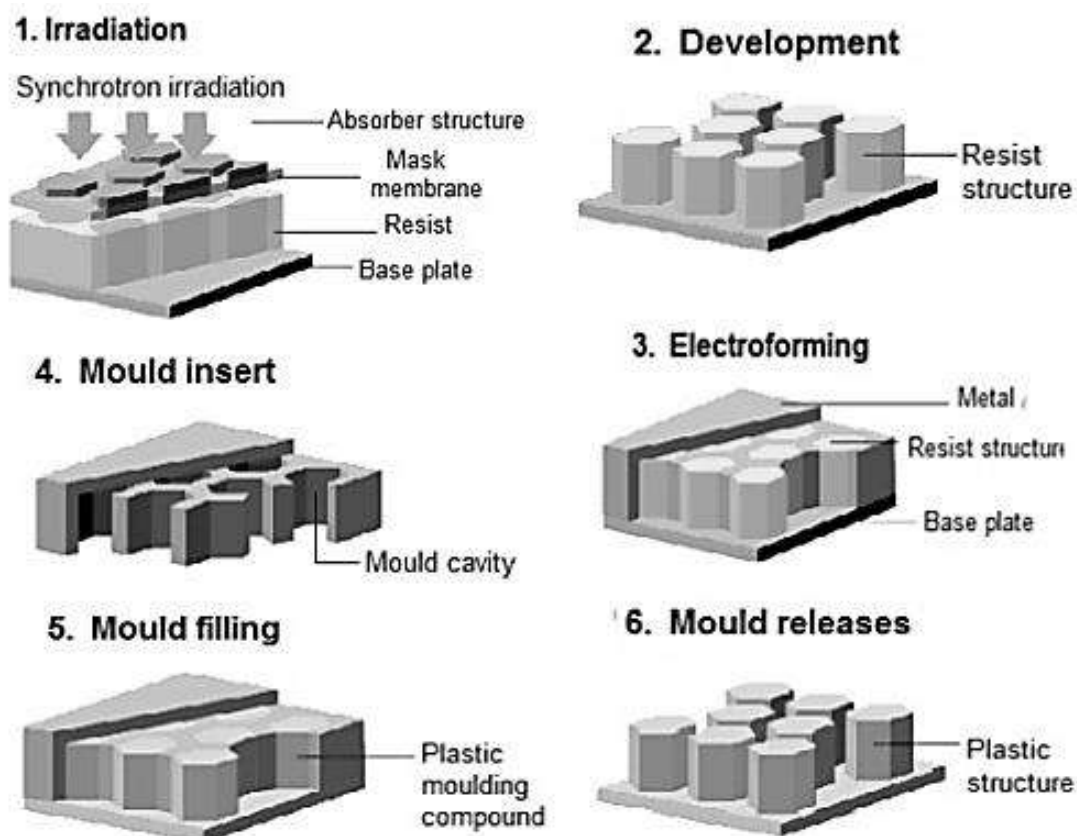


Рис. 11.3. LIGA-процесс. Особенности создания металлических форм и их заполнения пластиком

Для оценки микроактюаторов используют такие критерии качества, как линейность, точность, погрешность, повторяемость, разрешение, гистерезис, пороговое значение, люфт, шум, сдвиг, несущая способность, амплитуда, чувствительность, скорость, переходная характеристика, масштабируемость, выход по энергии.

На рис. 11.4 представлена электромеханическая память, так как после касания пластинки контакта происходит «залипание» и для разрыва контакта необходима дополнительная энергия. Таким образом, возможно создать память типа ПЗУ, в которую что-либо записать можно лишь однажды. Для перезаписи над пластинкой достаточно поставить дополнительный электрод, приложив к которому потенциал можно разомкнуть контакт. Действующие прототипы были созданы по КМОП-технологии с учетом проектных норм 0.35 мкм, однако такие ячейки памяти можно создавать при соблюдении проектных норм 45 нм. К преимуществам нового типа памяти следует отнести и то, что ток в режиме ожидания отсутствует, а для записи требуется затратить механическую энергию величиной всего 25 пкДж. Устройство остается работоспособным даже при высоких температурах, при этом количество циклов записи-перезаписи может достигать 20 млн. Этот прототип

микроэлектромеханической системы МЭМС способен записать на площади размером с почтовую марку информацию, примерно эквивалентную емкости 25 DVD-дисков.

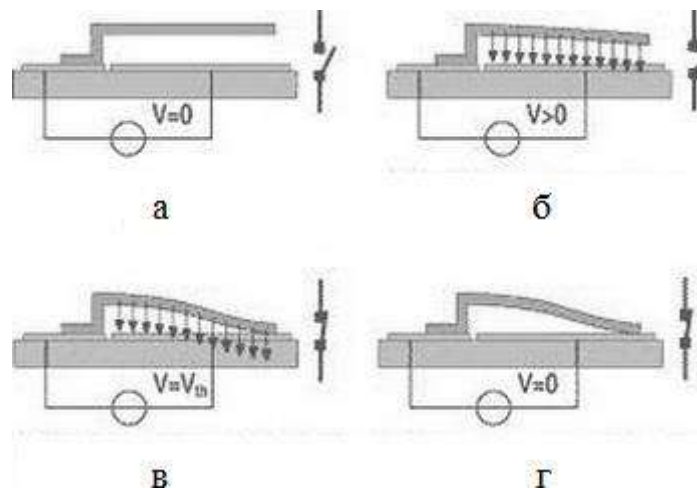


Рис. 11.4. Микромеханический кантилевер (переключатель):

а – кантилевер разомкнут; б – увеличение действует на кантилевер; в – при достижении порогового напряжения контакт замыкается; г – при снятии напряжения контакт остается замкнут

### 11.1. Интегральные микрозеркала с электростатической активацией

Интегральные микрозеркала (рис. 11.5) 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).

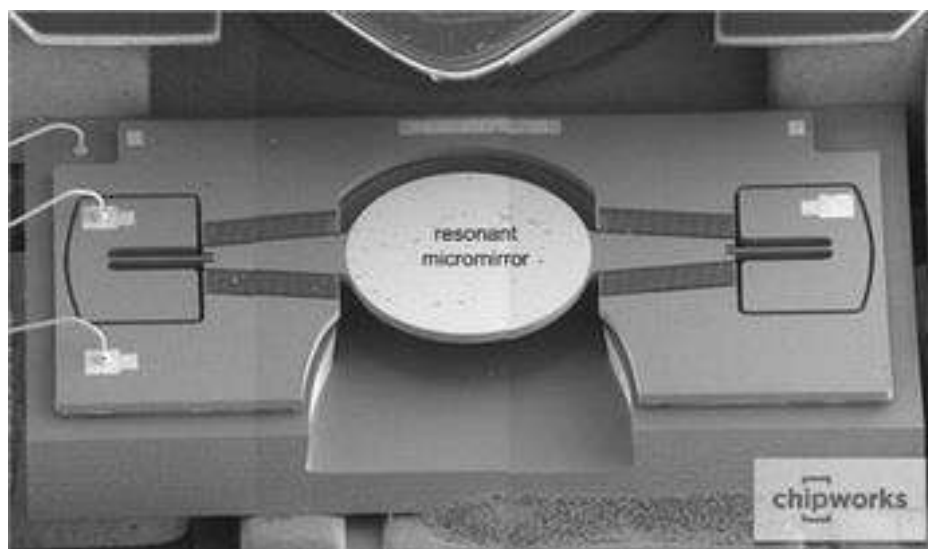


Рис. 11.5. Интегральное микрозеркало

Для отклонения микрозеркала используются два электростатических актюатора, создаваемых структурой микрозеркала и двумя электродами,

расположенными под ним. Структуру микрзеркала заземляют и на отклоняющие электроды попеременно подают напряжение. Между структурой микрзеркала и отклоняющими электродами возникает электростатическая сила, которая отклоняет микрзеркало то в одну, то в другую сторону. Движение микрзеркала осуществляется за счет кручения торсионных балок. Возможно также движение микрзеркала реализовать за счет изгиба упругой консольной балки (рис. 11.6).

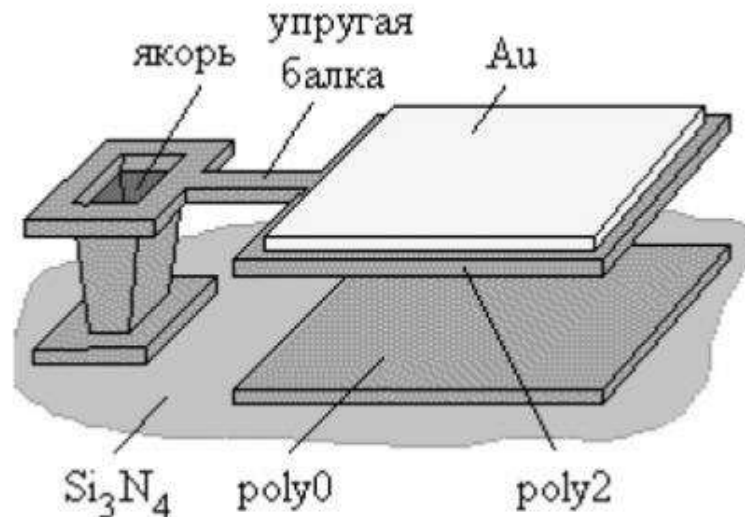


Рис. 11.6. Микрзеркало на изгибной упругой консольной балке

Электростатическая сила  $F_{ai}$ , возникающая между отклоняющим электродом и структурой микрзеркала, определяется выражением

$$F_{ai} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L_{ai} \cdot W_{ai}}{d^2} U_{ai}^2, \quad (11.1)$$

где  $L_{ai}$ ,  $W_{ai}$  – длина и ширина части отклоняющего электрода, расположенного под микрзеркалом;

$i = 1, 2$  в зависимости от электрода в структуре;

$U_{ai}$  – отклоняющее напряжение.

Под действием силы  $F_{ai}$  структура микрзеркала притягивается к отклоняющемуся электроду. По закону Гука силе  $F_{ai}$  действующей на микрзеркало, будет противодействовать сила упругости  $F_{упр}$ , равная по модулю электростатической силе и противоположная по направлению. Под действием электростатической силы  $F_{ai}$  пластины крепления будут изгибаться по окружностям. 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. При подаче отклоняющего напряжения на подвижный

электрод относительно неподвижного на упругий подвес начинает действовать крутящий момент силы (рис. 11.7).

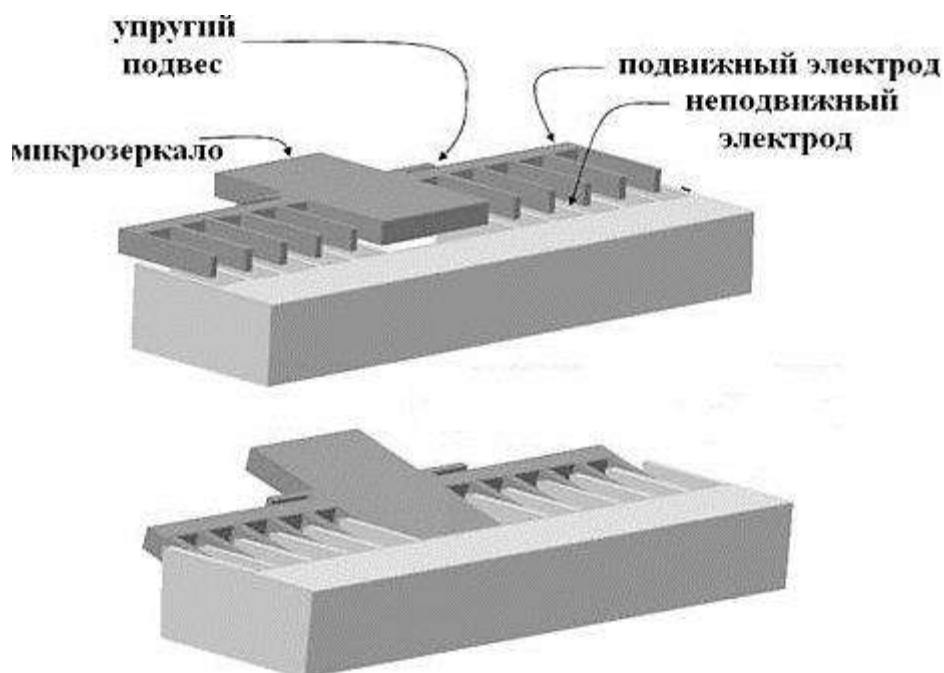


Рис. 11.7. Перемещение зеркала под действием крутящего напряжения

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. 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.

## 11.2. Волоконно-оптические переключатели

Переключатель состоит из трехмерного подвижного микрозеркала и четырех направляющих оптоволоконных рельсов (рис. 11.8).

Зеркало состоит из покрытой золотом поликремниевой пластины, закрепленной на скользящей пластине. Отражающая способность зеркала при таком исполнении оценена в 93 %. Критическим моментом является выравнивание волокон относительно зеркала и друг друга. Системы скоростного управления лучом делятся на две категории: сканирующие микрозеркала и устройства управления лучом в режиме дифракции. Изготавливаются микрозеркала, имеющие большие значения угла отклонения лазерного луча – свыше 28 оптических градусов. Эти зеркала работают на частоте резонанса и не могут обеспечить такое значение отклонения на других



частотах. В устройствах режима дифракции используется зеркальная матрица, где каждый элемент может передавать луч перпендикулярно плоскости этой матрицы, для того чтобы сдвинуть фазу приходящего света. Такое устройство способно управлять лучом гелий-неонового лазера на ширину свыше шести дифракционных порядков при общем отражении  $\pm 2.5$  оптических градусов. Благодаря этому такие устройства могут обеспечить большую экономию энергии по сравнению с радиочастотными аналогами (благодаря плотно сфокусированным лучам). Появляется возможность послать слабые сигналы на многокилометровые расстояния с большим отношением сигнал/шум.

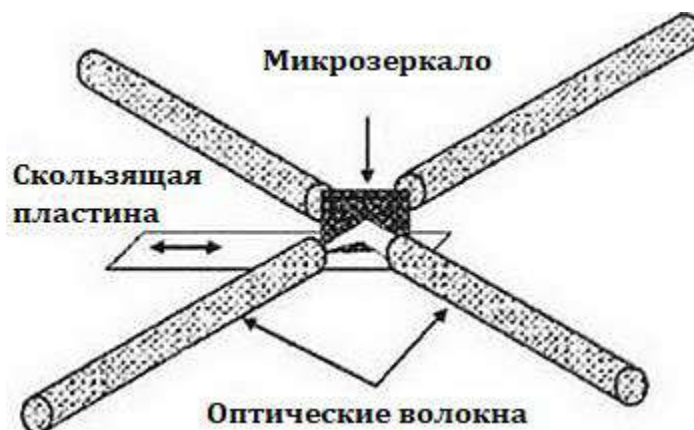


Рис. 11.8.Схематическое изображение обводного волоконно-оптического переключателя

Само устройство управления лучом (рис. 11.9) состоит из двух больших пластин ( $500 \times 500 \times 4.25$  мкм), соединенных в слоеную структуру слоя из поликремния толщиной 2 мкм, слоя из поликремния толщиной 1.5 мкм и слоя оксида между ними толщиной 0.75 мкм. В этом приборе золото не используется в качестве отражающего покрытия по причине большого остаточного растягивающего напряжения. Панель с правой стороны – поддерживающая структура, которая вращается вокруг оси на петлях в плоскости подложки. Панель с левой стороны – само зеркало, прикрепленное к поддерживающей структуре двумя крутящими (торсионными) пружинами U-образной формы. Подвешенная структура приводится в движение через элемент сцепки. Этот элемент используется, чтобы перенаправить силу, прикладываемую актюатором, на  $90^\circ$  и обеспечить большее расстояние перемещения, чем это могли бы сделать только актюаторы. Перенаправляющий силу элемент сцепки такой конструкции способен отклонить зеркало более чем на  $45^\circ$ . Каждая ось приводится в движение с помощью 16 параллельных термических актюаторов. Термические актюаторы выбираются благодаря их высокой надежности и большой статической силе, которую они обеспечивают. Тесты показали, что актюаторы способны перемещать зеркало с частотой более чем 200 Гц.



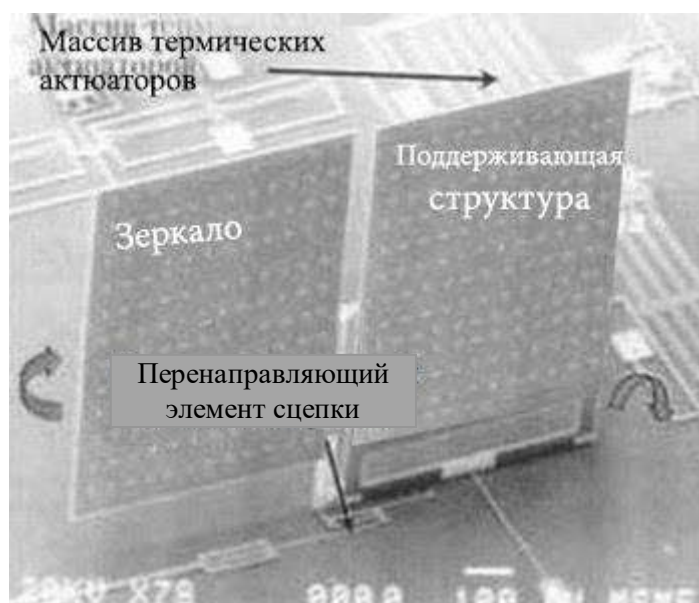


Рис. 11.9. Устройство управления лучом с двумя степенями свободы

Другим типом устройства управления лучом является микромеханический угловой кубический отражатель, который осуществляет цифровую передачу данных модулированием интенсивности отраженного света (рис. 11.10).

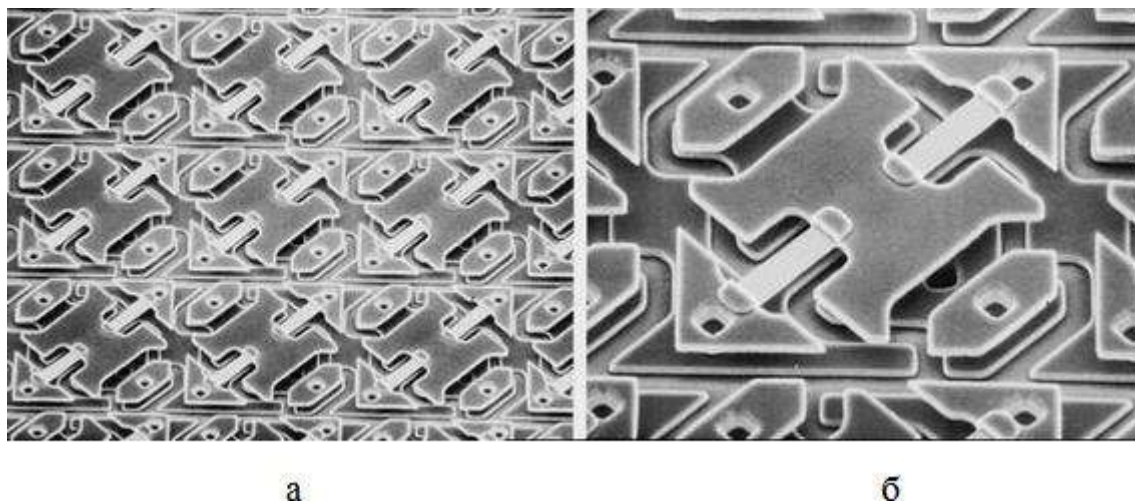


Рис. 11.10. Схематическое изображение углового кубического отражателя

Световой луч, падающий в определенную активную область на внутренней стороне трехстороннего ортогонального угла, отражается обратно вдоль оси, возвращаясь к источнику. Если ортогональность углов куба нарушена, свет не будет отражен обратно к источнику. Таким образом,

интенсивность отраженного света можно модулировать маленькими передвижениями одной или более сторон куба. Каждый угол куба выполнен четырьмя поликремниевыми поднятыми с поверхности подложки пластинами, прикрепленными к подложке кремниевыми микропетлями, и длинной пластиной, поддерживаемой с каждой стороны торсионными длинной 100–200 мкм. Две повернутые пластины образуют правильный угол, а оставшиеся две пластины служат в качестве поддерживающих и котирующих элементов для отражателя. Длинная поддерживаемая пластина функционирует как интегральный отклоняющий актюатор. Эта пластина отклоняется за счет электростатики, таким образом, модулируя отраженную интенсивность. Под этой пластиной находятся два электрода: стопорный электрод конца пластины и приводной электрод.

### 11.3. Матрицы микрозеркал на кремниевом чипе



Зеркало покоится на сравнительно массивной площадке, которая прикреплена к более тонкой и более гибкой, чем прочие детали системы, полоске, натянутой между опорами (рис. 11.12). В двух других углах основания, не занятых опорами, расположены электроды, которые за счет

кулоновской силы могут притягивать один из краев зеркала. Таким образом, зеркало может наклоняться в одну и в другую сторону с небольшим углом.

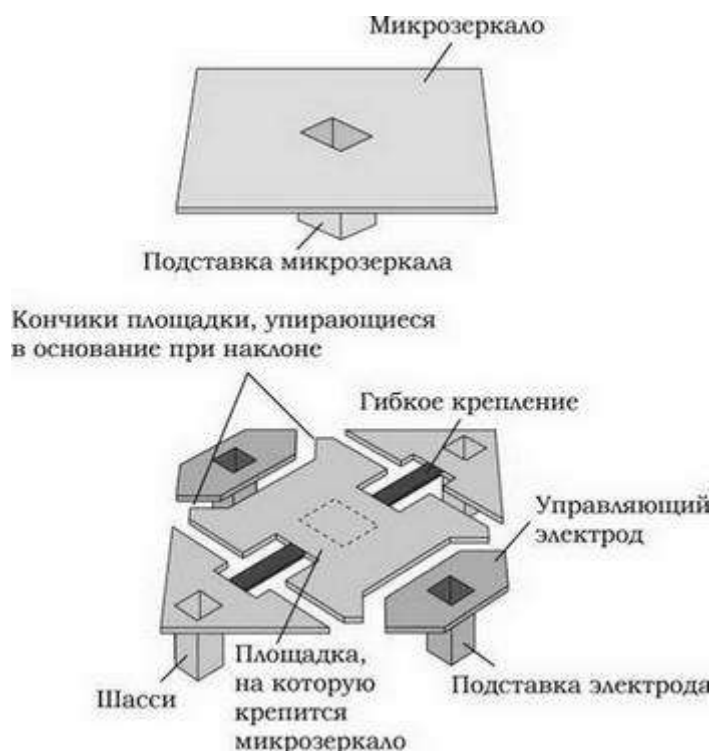


Рис. 11.12. Составляющие единичного чипа

В одном из этих двух положений микрозеркало отражает попадающий на него свет в сторону линзы и далее на экран. В другом положении – направляет световой поток в сторону, на теплоотвод. В первом случае на экране получается белая точка, во втором – черная (рис. 11.13). В результате сложного действия всей матрицы создается картинка, состоящая из двух цветов: черного и белого. К чистым черному и белому можно добавить градации серого. Поскольку полупрозрачность, в отличие от ЖК-матриц, здесь использовать нельзя, свет приходится отмерять механически. Для этого микрозеркало «мигает» с большой частотой. Эти «подмигивания» способны обеспечить до 1024 градаций серого. Для добавления к изображению цветовой составляющей используется колесо с несколькими секторами, каждый из которых представляет собой светофильтр (рис. 11.14 и 11.15).

Принцип формирования светового потока микрозеркалом чипа приведен на рис. 11.16.

Компоновка системы передачи изображения на DMD-матрице показана на рис. 11.17.

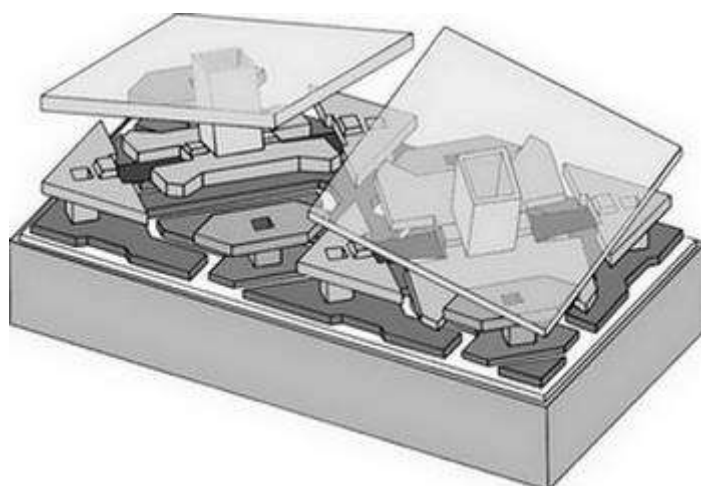


Рис. 11.13. Принцип работы ячейки (сдвоенного чипа)

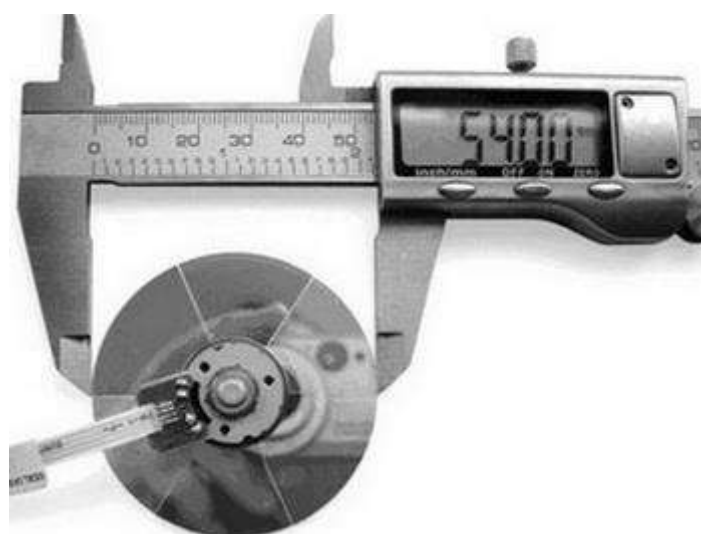


Рис. 11.14. Элемент формирования цветовой составляющей (светофильтр)

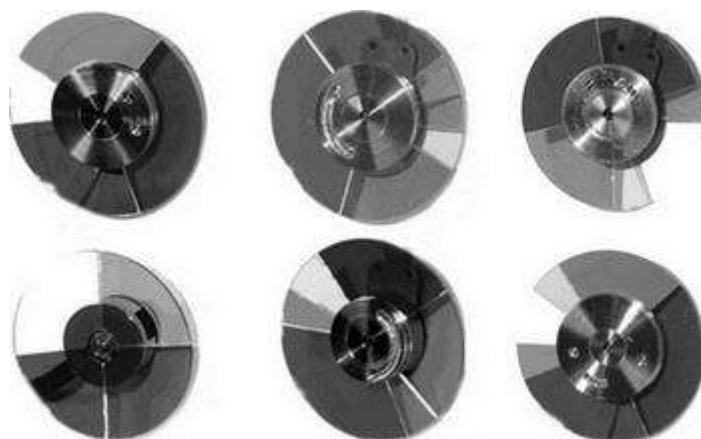


Рис. 11.15. Светофильтр в динамике

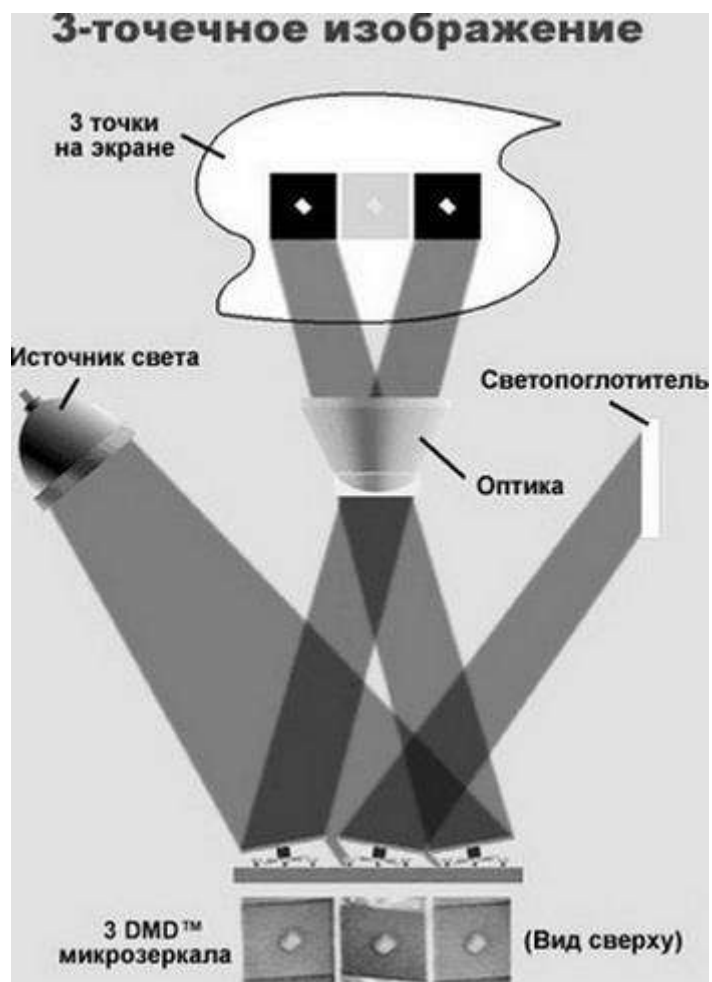


Рис. 11.16. Принцип формирования светового потока микрозеркалом чипа

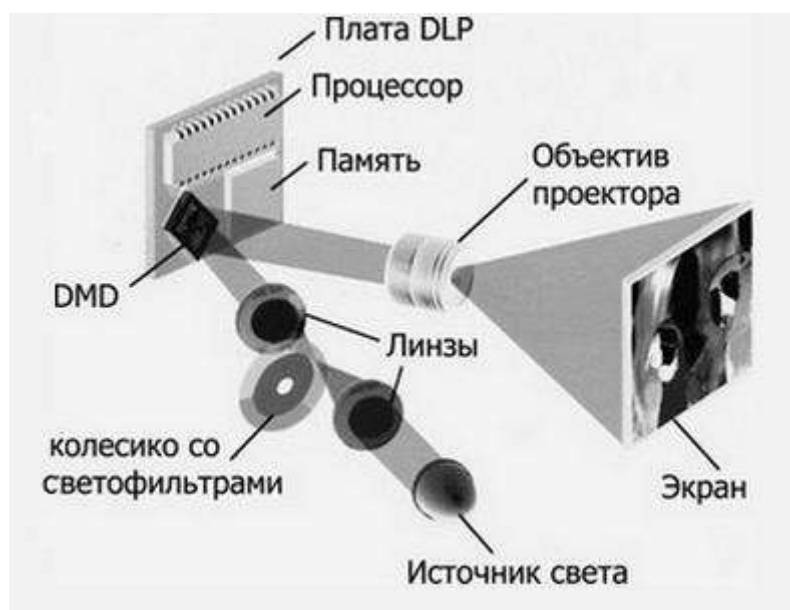


Рис. 11.17. Компоновка системы передачи изображения на DMD-матрице

Пояснение работы микрозеркала в системе на примере проектора приведено на рис. 11.18. От источника света сигнал проходит через цветной светофильтр (зеленый, красный, синий, бесцветный) и попадает на матрицу микрозеркал. Оттуда свет идет либо на объектив, либо на поглощение.

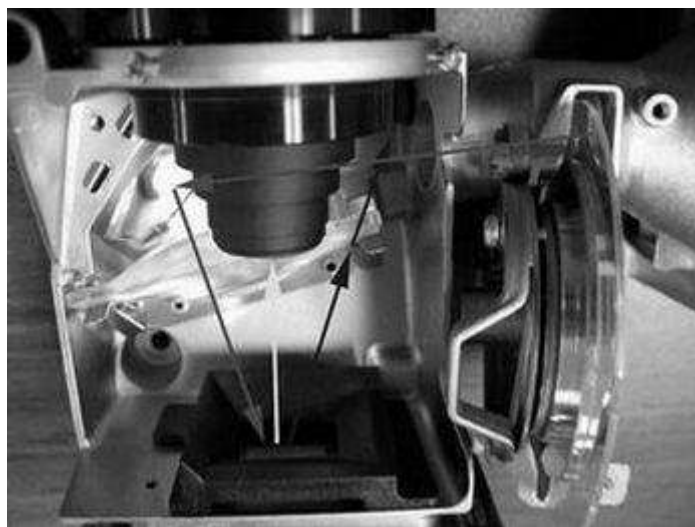


Рис. 11.18. Прохождение световых лучей в системе передачи изображения

## 12. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В МИКРОСЕНСОРИКЕ

В настоящее время большинство микросенсоров изготавливается на базе элементарных полупроводников (кремний, германий), сложных бинарных и тройных полупроводниковых соединений ( $\text{PbS}$ ,  $\text{PbSe}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{CdHgTe}$ ). Эти материалы стали уже стандартными для микроэлектронных технологий и они имеют достаточно хорошую перспективу. Однако, несмотря на ряд достоинств (низкая себестоимость изготовления, простота конструкции сенсоров, отработанность базовых технологических процессов получения технологических слоев) по чувствительности, завышенной потребляемой мощности, быстродействию, необходимости дополнительного подогрева и т. д., данные материалы уже не всегда удовлетворяют требованиям заказчика. В частности, чувствительность таких датчиков ограничена флуктуациями, обусловленными тепловым движением зарядов и дефектов, в результате чего присутствует высокий уровень шума. Поэтому актуальным является поиск новых материалов. Работы ведутся по трем направлениям – поиск новых неорганических материалов, разработка сенсоров на основе органических чувствительных слоев, разработка сенсоров на базе биологических пленок и структур. Ввиду специфики подготовки сегодняшних специалистов по микро- и нанoeлектронике (отсутствие базовых знаний по органической химии и биологии) для нас наиболее интересной и реально доступной перспективной областью является изучение неорганического графена в качестве чувствительного слоя датчика.

### 12.1. Графен и его структурные особенности

Графен представляет собой двумерную структуру, составленную из атомов углерода, которые расположены в узлах кристаллической решетки типа «пчелиные соты» и соединены друг с другом ковалентными связями (рис. 12.1). Наиболее распространенная форма углерода – графит – может рассматриваться как стопка листов графена, относительно слабо связанных между собой силами Ван-дер-Ваальса (рис. 12.2).

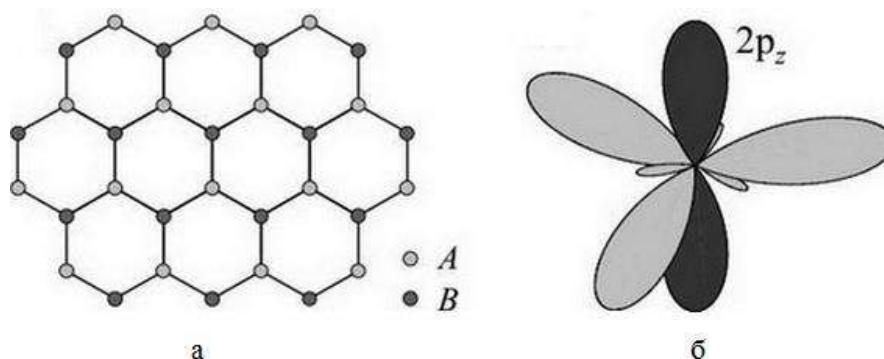


Рис. 12.1. Кристаллическая решетка графена

типа «пчелиные соты» (а) как совокупность треугольных подрешеток  $A$  и  $B$  и три  $sp^2$ -гибридизованные орбитали атома углерода, формирующие направленные под углами  $120^\circ$  ковалентные связи с соседними атомами, и перпендикулярная им  $2p_z$ -орбиталь (б)

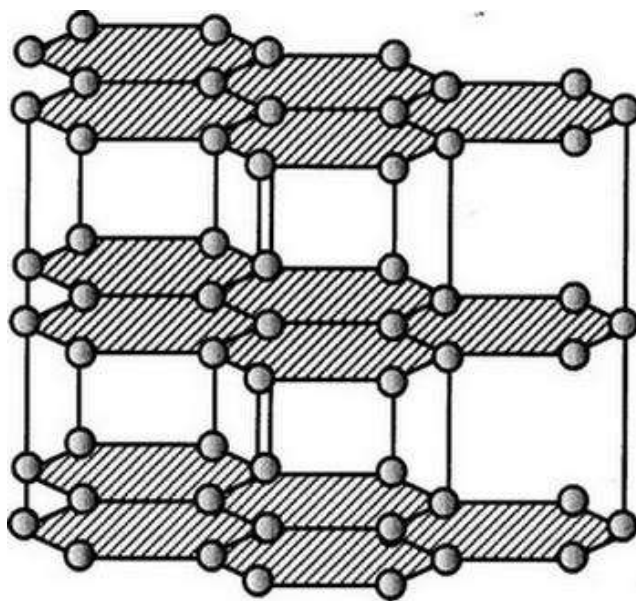


Рис. 12.2. Структура графита

Каждый атом углерода имеет три ковалентные связи с тремя соседними, а четвертая связь Ван-дер-Ваальса слишком длинная и слабо связывает слои графита между собой. Зонная структура графена представлена на рис. 12.3.

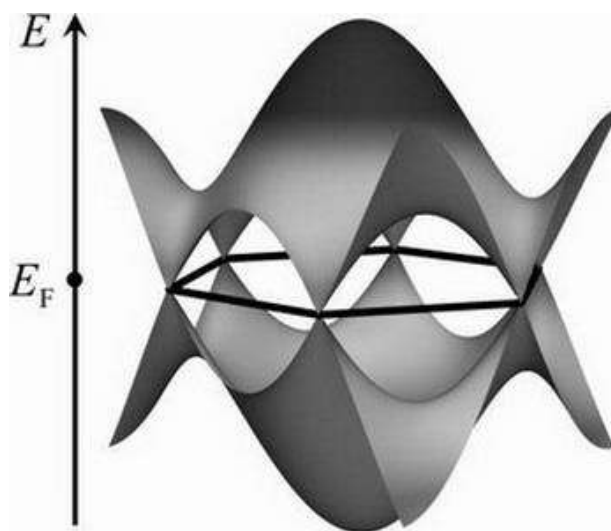


Рис. 12.3. Зонная структура графена: валентная зона и зона проводимости касаются в углах первой зоны Бриллюэна, имеющей форму шестиугольника. Уровень Ферми  $E_F$  химически чистого графена находится в точках касания зон

Широко известные углеродные наноструктуры – нанотрубки и фуллерены можно рассматривать как свернутый в трубку лист графена или соответственно как замощение сферы решеткой графена. Таким образом, графен как ключевая квазидвумерная углеродная наноструктура с точки зрения



классификации является основой трехмерного графита, квазиодномерных нанотрубок и квазиульмерных фуллеренов (рис. 12.4). На рис. 12.5 показаны кристаллические структуры аллотропных форм углерода. На рис. 12.6 представлена электронная структура графена.

Изучение свойств графита и углеродных наноструктур всегда начинается с рассмотрения их элементарного блока – изолированного листа графена.

Каждый атом углерода в графене окружен тремя ближайшими соседями и обладает четырьмя валентными электронами, три из которых образуют  $sp^2$ -гибридизованные орбитали, расположенные в одной плоскости под углами  $120^\circ$  и формирующие ковалентные связи с соседними атомами (рис. 12.1, б). Четвертый электрон, представленный ориентированной перпендикулярно этой плоскости  $2p_z$ -орбиталью, отвечает за низкоэнергетические электронные свойства графена. Квазиимпульс электрона, находящегося в поле кристаллической решетки графена, заключен в пределах первой зоны Бриллюэна, которая имеет форму шестиугольника.

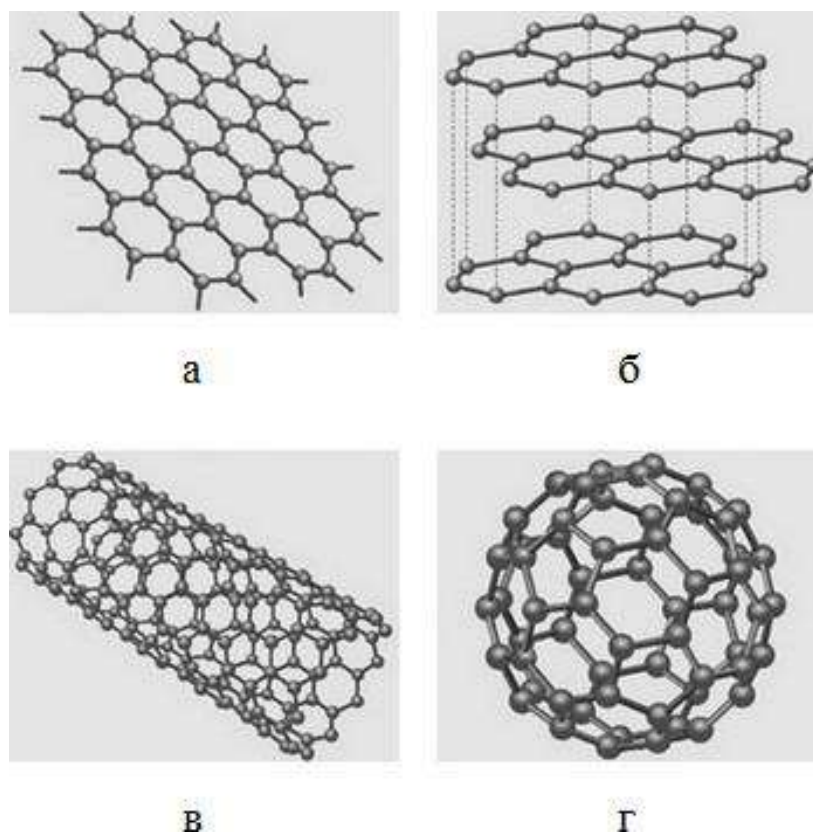


Рис. 12.4. Графен как ключевая квазидвумерная углеродная наноструктура

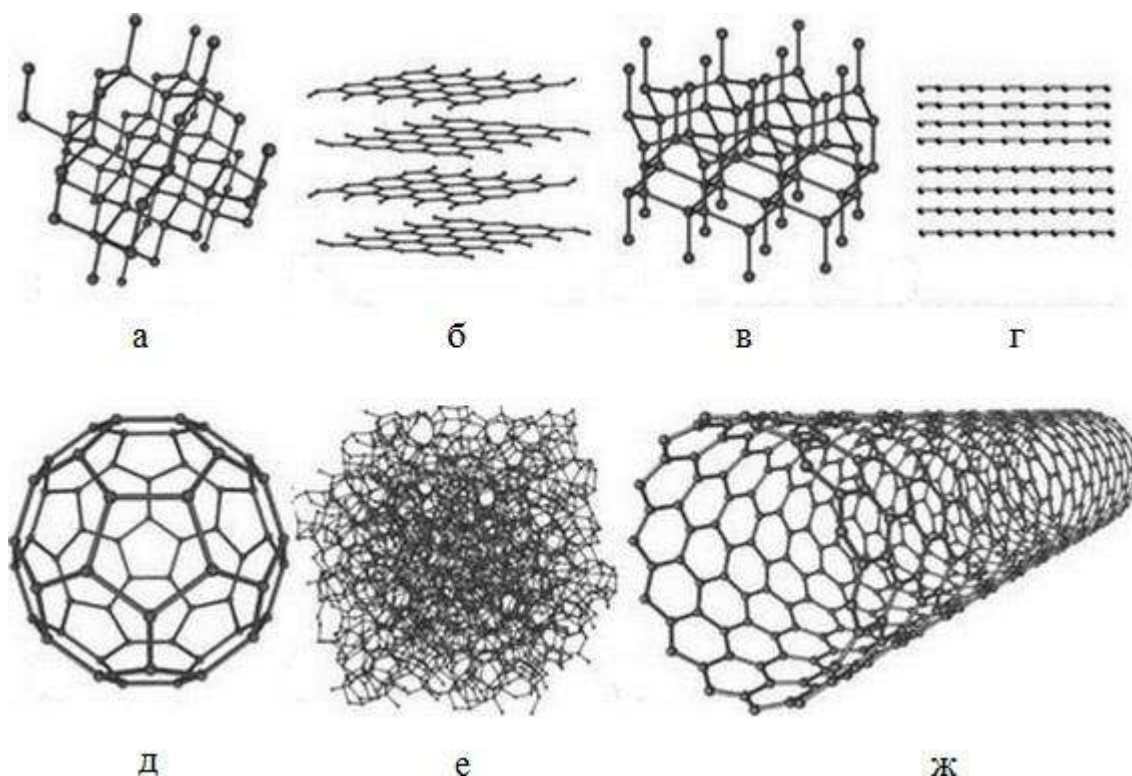


Рис. 12.5. Кристаллические структуры аллотропных модификаций углерода:

а – алмаз; б – графит; в – гексагональный алмаз; г – карбин; д – фуллерен; е – аморфный углерод; ж – одностенная углеродная трубка

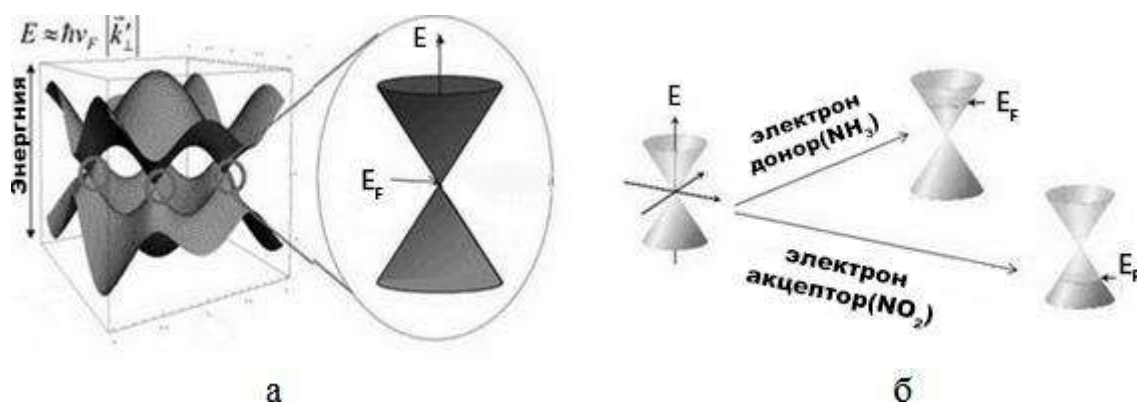


Рис. 12.6. Электронная структура графена

В простом приближении сильной связи с учетом взаимодействия ближайших соседей считается, что углы первой зоны Бриллюэна графена являются точками, в которых происходит касание валентной зоны и зоны проводимости  $2p_z$ -электрона и вблизи которых дисперсия электронов является линейной. Уровень Ферми химически чистого графена находится в точке касания зон, в связи с чем графен может быть назван квазидвумерным полупроводником с нулевой щелью.

Поскольку кристаллическая решетка графена не является решеткой Бравэ, но может рассматриваться как совокупность двух взаимопроникающих треугольных подрешеток (рис. 12.1, а), то эффективная волновая функция электрона в графене может быть представлена двумя огибающими блоховских волн, построенных на этих подрешетках. Особенность зонной структуры графена, кардинально отличающая его от обычных металлов и полупроводников, заключается в том, что эффективное уравнение для огибающих вблизи  $K$  и  $K_0$  имеет вид двумерного аналога релятивистского уравнения Дирака – Вейля для частиц с нулевой массой, роль скорости света играет фермиевская скорость  $v_F \approx 10^6$  м/с.

По своим электронным свойствам он является полупроводником с нулевой запрещенной зоной. Закон дисперсии для электронов и дырок  $\varepsilon(p) = \pm v_0 p$  линеен, как у безмассовых релятивистских частиц, а роль скорости света играет скорость Ферми  $v_0 \approx 10^8$  см/с. За счет эффекта поля может создаваться как электронная, так и дырочная проводимость. Графен отличается высокой подвижностью носителей заряда ( $\sim 10\,000$  см<sup>2</sup>/(В·с)), в отсутствие заряженных примесей ожидается до  $200\,000$  см<sup>2</sup>/(В·с), подвижность от температуры зависит слабо, что дает возможность создавать на его основе высокочастотные транзисторы с рекордными для своих размеров частотами отсечки.

Причины использования графена в качестве сверхчувствительного материала: наибольшее соотношение объема к поверхности; материал двумерный; взаимодействия на поверхности, а не в объеме; молекулы газа присоединяются к поверхностным связям; низкое соотношение сигнала к шуму; локальная концентрация менее одного заряда электрона при комнатной температуре.

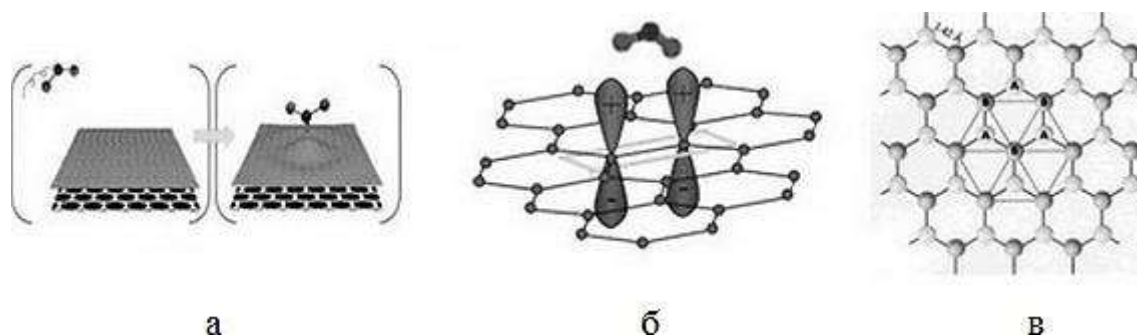


Рис. 12.7. Причины использования графена в качестве чувствительного материала

Высокочастотные графеновые транзисторы могут расширить возможности, к примеру, скоростных сенсоров и интерфейсов передачи данных, радаров, найти применение в медицинской визуализации, спектроскопии и множестве других областей.

Потенциальная область применения транзисторов на основе графена ограничена из-за отсутствия в этом материале запрещенной зоны. Большой ток утечки в закрытом состоянии не позволяет использовать графеновые

транзисторы в цифровой электронике, налагающей жесткие ограничения на энергопотребление элементов. Современные кремниевые транзисторы имеют отношение токов во включенном и выключенном состояниях порядка  $10^6$ ; в графене данное значение на пять порядков меньше.

Высокая подвижность носителей в графене позволяет надеяться на завоевание ниши в аналоговой электронике, где невозможность блокирования тока не является принципиальным ограничивающим фактором. При этом положительную роль может играть еще одна особенность графеновых транзисторов, а именно амбиполярный характер проводимости в канале (способность изменять тип проводимости в зависимости от смещения на затворе). Амбиполярность вместе с неразрывной и квадратичной в окрестности точки электронейтральности передаточной характеристикой расширяет возможности схемотехнического проектирования (схемы умножения частоты, двухпозиционная фазовая манипуляция, смешивание сигналов на основе одного графенового транзистора).

Наиболее интересной особенностью графена является то, что до  $\sim 1$  эВ электронная дисперсия энергии коническая, как будто два перевернутых конуса (проводимости и валентной зоны) касаются друг друга в точке, называемой точкой Дирака. После имплантации примеси электроны и дырки движутся через слой со скоростью  $V_F \sim 10^6$  м/с, и эта скорость не зависит от энергии, как если бы электроны и дырки были безмассовыми частицами и античастицами, которые движутся с постоянной скоростью.

На данный момент существует несколько методов получения пленок графена: механическое отслаивание, химическое отслаивание, химическое отслаивание и восстановление оксида графена, химическое осаждение из газовой фазы (стандартный CVD-процесс из метановой фазы), термическое разложение карбида кремния в вакууме. Последний метод считается одним из перспективных для промышленного производства, поскольку пленки графена могут быть получены на всей поверхности подложки. Важным является также то, что пленка графена в этом случае является продолжением структуры подложки, за счет чего достигается высокая адгезия к карбиду кремния.

## 12.2. Газоанализаторы на основе графена

Наноматериалы более предпочтительны по сравнению с другими материалами для зондирования газа благодаря своим уникальным свойствам, таким как *чрезвычайно высокое отношение поверхности к объему*. Данное свойство может потенциально привести к новым датчикам с исключительной производительностью при одновременном снижении размера устройства и свести к минимуму потребление энергии. Кроме того, перенос электронов через графен обладает высокой чувствительностью к адсорбированным молекулам благодаря двумерной структуре графена, что делает каждый атом углерода атомом поверхности. Принимая во внимание эти свойства, графен может быть использован в качестве перспективного газочувствительного материала.

Механически отслоившийся графен (перенос по методу скотча) может потенциально обнаружить газообразные частицы, вплоть до одного молекулярного уровня. Механизм обнаружения газа путем зондирования графена, как правило, приписывается адсорбции/десорбции газообразных молекул (которые выступают в качестве доноров электронов или акцепторов) на поверхности графена. Это приводит к изменениям в проводимости графена. Структура газового сенсора представлена на рис. 12.8.

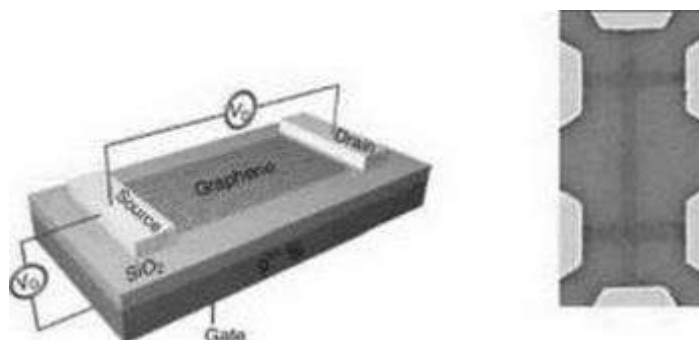


Рис. 12.8. Структура газового сенсора на графене

В данном сенсоре реализован полевой транзистор (FET) с использованием метода механического отслаивания графена и электронно-лучевой литографии. Основные характеристики сенсора представлены на рис. 12.9.

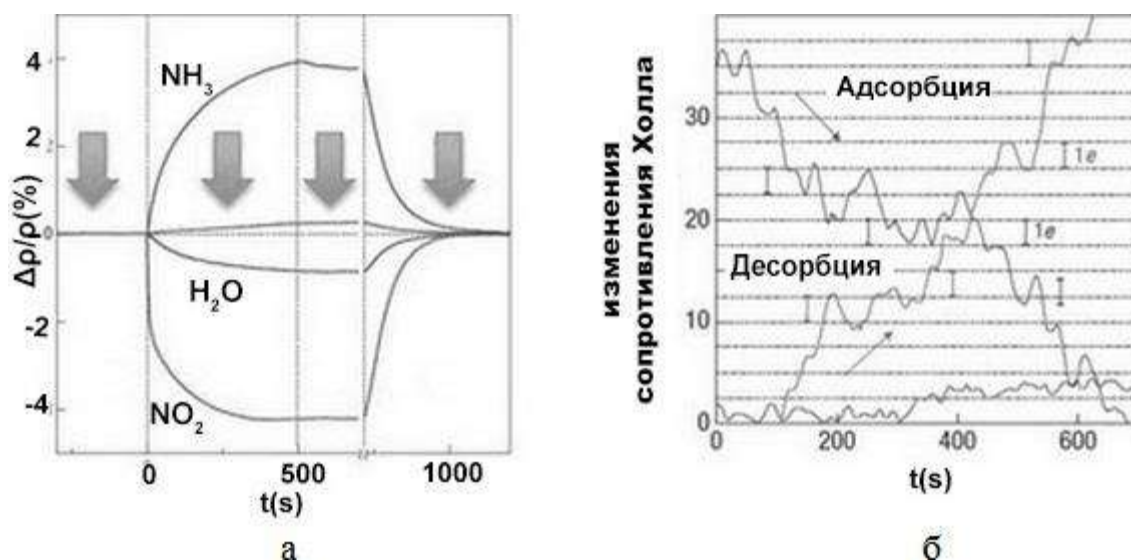


Рис. 12.9. Основные характеристики газового сенсора на графене:

а – изменение сопротивления при воздействии; б – изменения сопротивления Холла при адсорбции 1 промилле  $\text{NO}_2$  и его десорбции в вакууме при  $50\text{ }^\circ\text{C}$

Газовые сенсоры на графене показали высокую чувствительность на ряд практически важных аналитов ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Механизм работы



селективной чувствительности сенсора на различные аналиты показан на рис. 12.10.

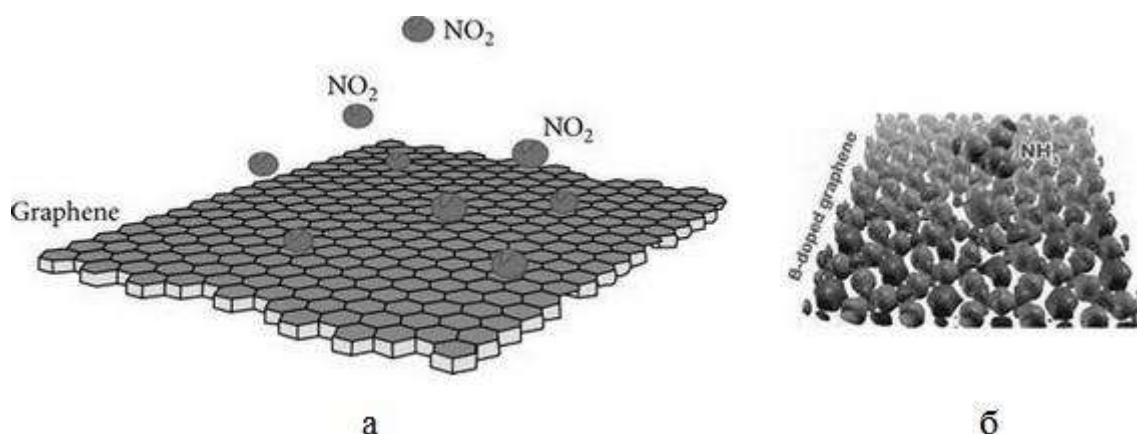


Рис. 12.10. Механизм работы селективной чувствительности сенсора на различные аналиты

### 12.2.1. Газочувствительность пленок графена на полуизолирующем SiC к $\text{NO}_2$ и парам $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

Технология создания графена на карбиде кремния сводится к термическому разложению карбида кремния в вакууме. Оптимальный режим получения пленок – двухчасовой отжиг в вакууме при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  и 20-минутный отжиг при  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $10^{-3}$  Па. Меандр резистора – типичный топологический рисунок графена на полуизолирующем карбиде кремния. Графен создается CVD-методом из метановой фазы до отжига защитной пленки оксида алюминия. Контакты к полученным пленкам получают напылением  $\text{Cr} - \text{Cu} - \text{Cr}$  в едином вакуумном цикле.

После каждой серии напуска газа сенсоры нагреваются для десорбции газов с поверхности графена, затем охлаждаются до  $25\text{ }^\circ\text{C}$  для возврата к начальному номиналу сопротивления.

На рис. 12.11 показаны результаты чувствительности к  $\text{NO}_2$ . Высокая чувствительности сенсора обусловлена его высокой химической активностью. Время отклика для  $\text{NO}_2$  составило 60 с, время восстановления – 130 с.

На рис. 12.12 показаны результаты чувствительности к парам  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  при концентрации 100 ppm. Время отклика и время восстановления оказалось одинаковым и равным 100 с, а чувствительность составила 4.5 %.

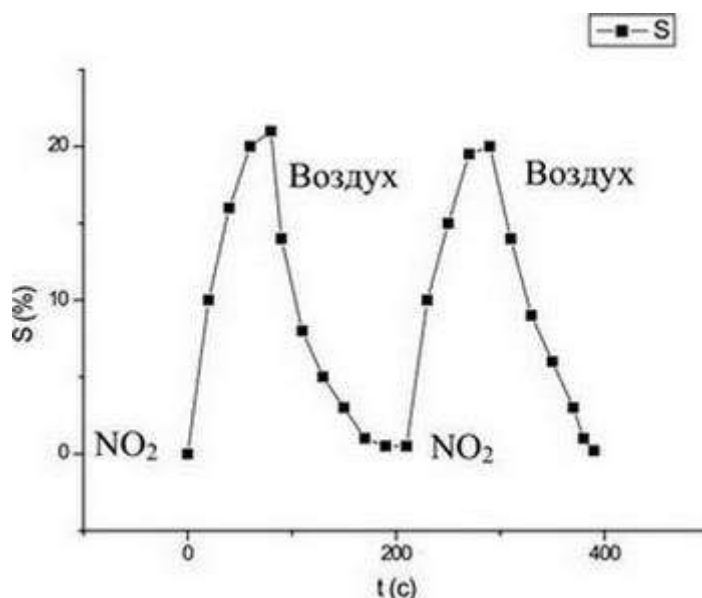


Рис. 12.11. Чувствительность к  $\text{NO}_2$  при концентрации 50 ppm

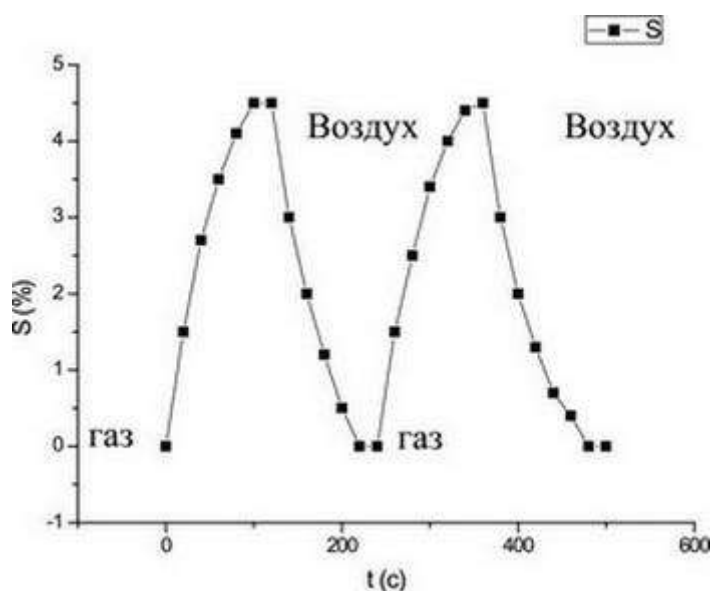


Рис. 12.12. Чувствительность к парам  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  при концентрации 100 ppm

Для десорбции молекул газа необходимо осуществлять нагрев пленок графена. Температура нагрева прямо пропорциональна энергии связи молекул газа с пленкой.

На рис. 12.13 показаны результаты зависимости процесса десорбции от температуры. Экспериментально установлено, что для  $\text{NO}_2$  десорбция начинает происходить при температуре 60 °C, с ростом температуры уменьшается время восстановления, которое достигает своего минимума при температуре 110 °C и при дальнейшем росте температуры не изменяется. Для паров  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  десорбция начинается при температуре 40 °C, время восстановления достигает минимума при 90 °C и не изменяется при дальнейшем увеличении температуры.

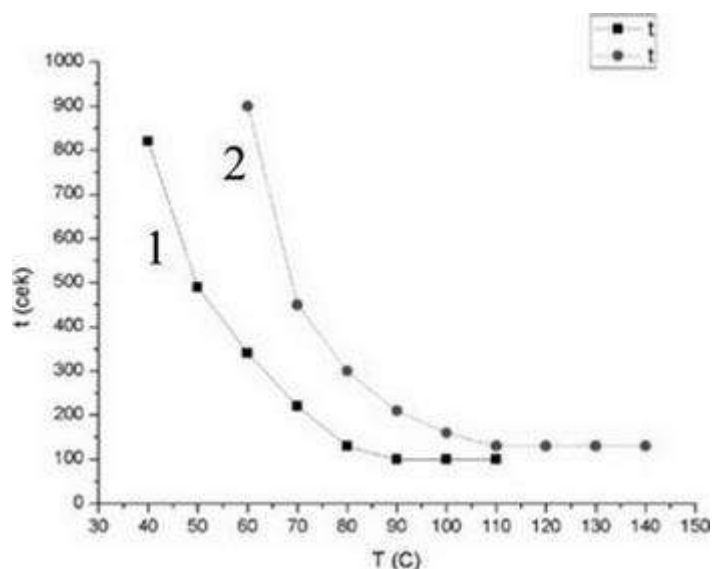


Рис. 12.13. Время восстановления при разных температурах:

1 – для паров  $C_2H_5OH$ ; 2 – для  $NO_2$

Полученные значения времен отклика и восстановления для исследованных газов позволяют сделать вывод, что графен является одним из перспективных материалов для газочувствительных сенсоров.

### 12.2.2. Датчики на основе взаимодействия графена с аналитами

Дефекты графеновых листов имеют важное значение для зондирования газа. Результаты исследований указывают на то, что дефектный графен сильно взаимодействует с  $CO$ ,  $NO$  или  $NO_2$ , но слабо с  $NH_3$ . Легированный азотом (N-легированный) графен показывает сильное связывание с  $NO_2$ . Легированный бором (B-легированный) графен проявляет повышенное взаимодействие с  $NO$ ,  $NO_2$  и  $NH_3$  (табл. 12.1).



Таблица 12.1

Зависимость энергии адсорбции ( $E_{ad}$ ) от вида графена. *P*-нелегированный бездефектный графен, *B*-легированный бором графен, *N*-легированный азотом графен, *D*-дефектный графен

System	$E_{ad}$	$d(\text{\AA})$	$Q(e)^a$
CO on <i>P</i> -graphene	−0.12	3.02	−0.01
NO on <i>P</i> -graphene	−0.30	2.43	0.04
NO <sub>2</sub> on <i>P</i> -graphene	−0.48	1.73	−0.19
NO <sub>3</sub> on <i>P</i> -graphene	−0.11	2.85	0.02
CO on <i>B</i> -graphene	−0.14	2.97	−0.02
NO on <i>B</i> -graphene	−1.07	1.99	0.15
NO <sub>2</sub> on <i>B</i> -graphene	−1.37	1.67	−0.34
NO <sub>3</sub> on <i>B</i> -graphene	−0.50	1.66	0.40
CO on <i>N</i> -graphene	−0.14	3.15	0
NO on <i>N</i> -graphene	−0.40	2.32	0.01
NO <sub>2</sub> on <i>N</i> -graphene	−0.98	2.87	−0.55
NO <sub>3</sub> on <i>N</i> -graphene	−0.12	2.86	0.04
CO on <i>D</i> -graphene	−2.33	1.33	0.26
NO on <i>D</i> -graphene	−3.04	1.34	−0.29
NO <sub>2</sub> on <i>D</i> -graphene	−3.04	1.42	−0.38
NO <sub>3</sub> on <i>D</i> -graphene	−0.24	2.61	0.02

## **13. ДАТЧИКИ В ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ**

Ввиду того что мы рассматриваем только микроэлектронные сенсоры, изготавливаемые по базовым микроэлектронным технологиям, нам необходимо рассмотреть основные датчики, которые обеспечивают качество и серийность промышленного технологического процесса конечного продукта – микроэлектронного сенсора.

Конструктивно любой микроэлектронный сенсор, как и любая интегральная схема, состоит из технологических слоев (эпитаксиального, легированного, диэлектрического, проводящего (или резистивного), а для оптических сенсоров дополнительно светопроводящего (или светоотражательного) слоя). В серийном производстве микроэлектронных сенсоров основной технологией получения технологического слоя (пленки, покрытия) является вакуумная и вакуумно-плазменная технологии.

Вакуумная среда необходима для получения незагрязненных газовой атмосферой сверхчистых тонкопленочных слоев с гарантированными техническими параметрами – для контроля такой вакуумной среды требуются датчики технологического глубокого и сверхглубокого вакуума. Получение контролируемых по составу и структуре пленок требует создания низкотемпературной плазмы. Это означает, что среда должна иметь определенный газовый состав с небольшой концентрацией плазмообразующего газа. Для контроля такой среды требуются датчики низкого вакуума (форвакуума). Универсальный датчик, измеряющий вакуум от сверхглубокого до форвакуума, теоретически возможен, но его реализация окажется экономически нецелесообразной. Поэтому в практике мы используем специализированные вакуумные датчики, работающие на разных физических принципах.

При нанесении технологического слоя мы должны получить его строго определенной толщины. При этом контроль толщины должен проводиться не по факту полученной пленки, а непосредственно в процессе ее создания. То есть мы должны мгновенно остановить процесс нанесения пленки при достижении требуемой толщины.

Исходя из этих соображений рассмотрим основные вакуумные датчики и датчики определения толщины микроэлектронных слоев.

### **13.1. Вакуумные датчики**

#### **13.1.1. Классификация датчиков и методы измерения вакуума**

Диапазон давлений в современных вакуумных установках охватывает 15 порядков от  $10^5$  до  $10^{-10}$  Па (от 760 до  $10^{-12}$  мм рт.ст.). Поэтому не существует универсального метода измерения, обладающего достаточной чувствительностью во всем диапазоне. Рассмотрим только наиболее

востребованные датчики в вакуумной технике, используемой в технологии тонкопленочных покрытий (микроэлектроника, оптика).

В табл. 13.1 приведен диапазон работы различных датчиков вакуума.

Таблица 13.1

Диапазоны работы различных датчиков

Сверхвысокий вакуум менее 10 <sup>-5</sup> Па							Высокий вакуум 10 <sup>-1</sup> – 10 <sup>-5</sup> Па				Средний вакуум 10 <sup>2</sup> – 10 <sup>-1</sup> Па			Низкий вакуум 10 <sup>5</sup> – 10 <sup>2</sup> Па		
														Диафрагмен ные		
											Термопарные					
									Пирани							
				Ионизационный с горячим катодом												
				Ионизационный с холодным катодом												
					Холодный катод					Термопарный						
				Широкодиапазонный с горячим катодом					Конвекционные							
				Широкозонный с горячим катодом												
								Емкостной (баратрон)								
	«Голый» горячий катод							Емкостной								
Па	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>

Выбор датчика для конкретной вакуумной технологической установки задается рядом факторов, включая рабочий диапазон датчика, воспроизводимость показаний, точность измерений, прочность конструкции, наличие химически активных газов, чувствительность к магнитным и электрическим полям.

*Выбор датчиков для «промежуточного» вакуума.* Задача измерения «промежуточного» вакуума широко распространена. Практически все применения, относящиеся к данной группе можно разделить следующим образом: наблюдение за процессом откачки вакуумных камер от атмосферного давления до заданного вакуума, измерение квазипостоянного давления в установках.

*Наблюдение за процессом откачки.* В этом случае часто используют термопарные датчики и датчики Пирани. В области среднего вакуума применение датчиков данного типа полностью удовлетворяет обычным требованиям. Для высоковакуумных применений эти датчики используют для

контроля старта высоковакуумного насоса. В сравнении с датчиками Пирани преимуществом термопарных датчиков является их низкая стоимость, а недостатком – предел измеряемого давления.

*Измерение постоянного давления.* Ряд применений требует начальной откачки до базового давления, после чего объем камеры заполняется газом до требуемого технологическим процессом давления. Для обеспечения необходимых для подобных применений воспроизводимости и точности применяют емкостные датчики вакуума (баратроны). Они характеризуются высокой точностью, и при этом их показания не зависят от характеристик остаточных газов. Типовая точность этих датчиков составляет от 0.1 до 1.5 %.

Датчики среднего вакуума часто используют также для контроля предварительного вакуума в процессе работы или для начальной откачки высоковакуумных насосов. В этих применениях измерения носят индикативный характер, диапазон давлений составляет  $10^{-1}$ – $10^0$  Па. Недорогой термопарный датчик обычно удовлетворяет характерным для подобных применений требованиям.

*Выбор высоковакуумного датчика.* Обычно выбор высоковакуумного датчика заключается в выборе между датчиком с холодным катодом и датчиком с горячей нитью накала.

*Датчики с холодным катодом.* Датчики с холодным катодом стали популярной альтернативой для датчиков с горячей нитью, которые были разработаны и выпущены в коммерческое обращение около 50 лет назад. Датчики с холодным катодом с успехом применяются в промышленных вакуумных установках при давлениях от  $10^{-0}$  до  $10^{-6}$  Па. Поскольку нить накала у этих датчиков отсутствует, возможность выхода датчика из строя при перегорании нити исключена. Также исключена вероятность газовыделения, связанного с высокой температурой нити накала. Важнейшим для большинства применений преимуществом датчиков с холодным катодом является высокая надежность корпуса. К сравнительным недостаткам датчиков с холодным катодом относятся меньшая точность и менее надежный старт в условиях высокого вакуума.

*Датчики с горячей нитью.* Эти датчики отличаются более высокой точностью, поэтому их зачастую используют для контроля параметров давления при проведении технологических процессов, где важно точное и воспроизводимое значение давления. При выборе датчика с горячей нитью необходимо учитывать следующие моменты – материал нити и корпус датчика. С точки зрения совместимости материала датчика с атмосферой рабочего объема необходимо, например, учитывать, что нити из иридия, покрытого ториумом, которые используются для большинства применений, могут загрязняться при контакте с углеводородами, присутствующими в объеме камеры, и оказывать нежелательное влияние на специфические процессы, такие как, например, ионная имплантация. Преимуществом иридиевых катодов перед

вольфрамовыми является их более высокая устойчивость к перегоранию в случаях внезапного прорыва атмосферы.

Применение бескорпусных датчиков предпочтительно при измерении давлений ниже  $10^{-8}$  Па. Такие датчики имеют преимущество перед обычными стандартными датчиками Bayard-Alpert в стеклянном корпусе. Применение бескорпусных датчиков исключает опасность повреждения корпуса, снижает газоотделение.

### 13.1.2. Тепловые датчики

Принцип работы тепловых датчиков основан на измерении давления по теплопроводности газа. Этот тип измерителей вакуума был разработан первым. В конструкцию самого простого датчика входит нагреваемый элемент. Измерение вакуума заключается в определении количества тепла, теряемого нагреваемым элементом, которое зависит от давления. Нагревательный элемент нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока. Тепловые датчики в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и датчики сопротивления (Пирани). Чтобы понять принцип их работы, обратимся к первым модификациям таких датчиков (рис. 13.1).

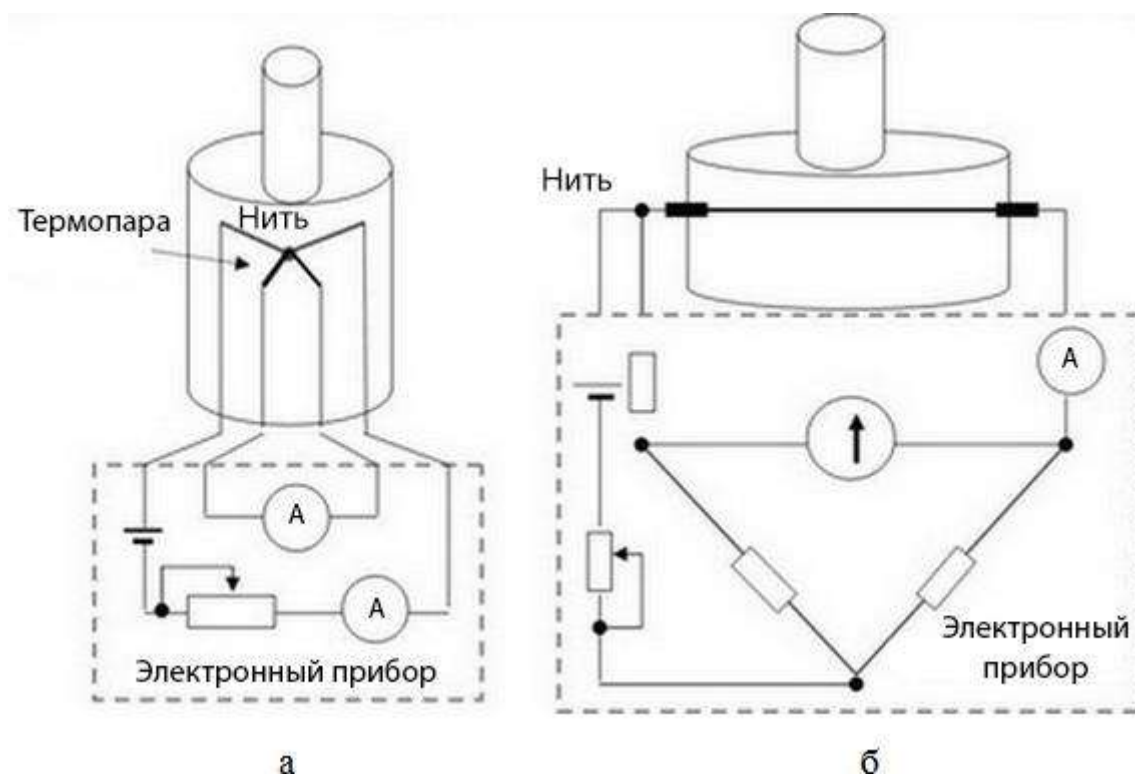


Рис. 13.1. Схемы тепловых датчиков:

а – термопарный; б – сопротивления (Пирани)

В термопарном преобразователе (рис. 13.1, а) нить разогревается путем пропускания электрического тока, а температура нити измеряется термопарой. Ток и термоЭДС термопары измеряются и регулируются электронной схемой.

Электроды расположены в стеклянном или металлическом корпусе, имеющем фланец для подключения к вакуумной системе. В датчике сопротивления (Пирани) для измерения температуры используется зависимость сопротивления от температуры. Для измерения сопротивления используется мостовая схема, где нагревательный элемент включен в одно плечо моста. По величине разбалансировки судят о давлении. Все измерения и преобразования сигналов осуществляет электронная схема. Оба типа датчиков могут работать как в режиме постоянного тока нагревательного элемента, так и в режиме постоянной температуры. Последующие, более современные модификации используют тот же принцип, только усовершенствуются нагревательные элементы, изготавливаемые в основном на базе твердотельной или пленочной технологий.

Существует несколько конструкций датчиков Пирани, используемых в вакуумной технике. В состав некоторых из них входят две пластины, находящиеся при разных температурах. В таких датчиках давление газа определяется по количеству энергии, затраченной на нагрев пластин. Другие датчики используют только одну пластину, при этом теплопроводность газа измеряется по величине теплопотерь в окружающие стенки. Для измерения температуры в состав датчиков обычно входят либо термопары, либо платиновые терморезисторы. Например на рис. 13.2 приведена схема дифференциального датчика Пирани с термисторами с отрицательным температурным коэффициентом (ОТК).

Камера датчика разделена на две идентичные секции. В одной из секций газ находится при эталонном давлении (например, при 1 атм = 760 торр), а вторая расположена в вакуумной камере, давление в которой необходимо измерить. В каждой камере есть нагреваемая пластина, которая для уменьшения теплопередачи через окружающие твердые предметы подвешена на очень тонких соединительных элементах. Пластины нагреваются при помощи электрических нагревателей. В рассматриваемом датчике нагревательным элементом является термистор с отрицательным температурным коэффициентом. Сопротивления термисторов равны и имеют сравнительно низкий номинал, поэтому в них возможно протекание процесса саморазогрева Джоуля.

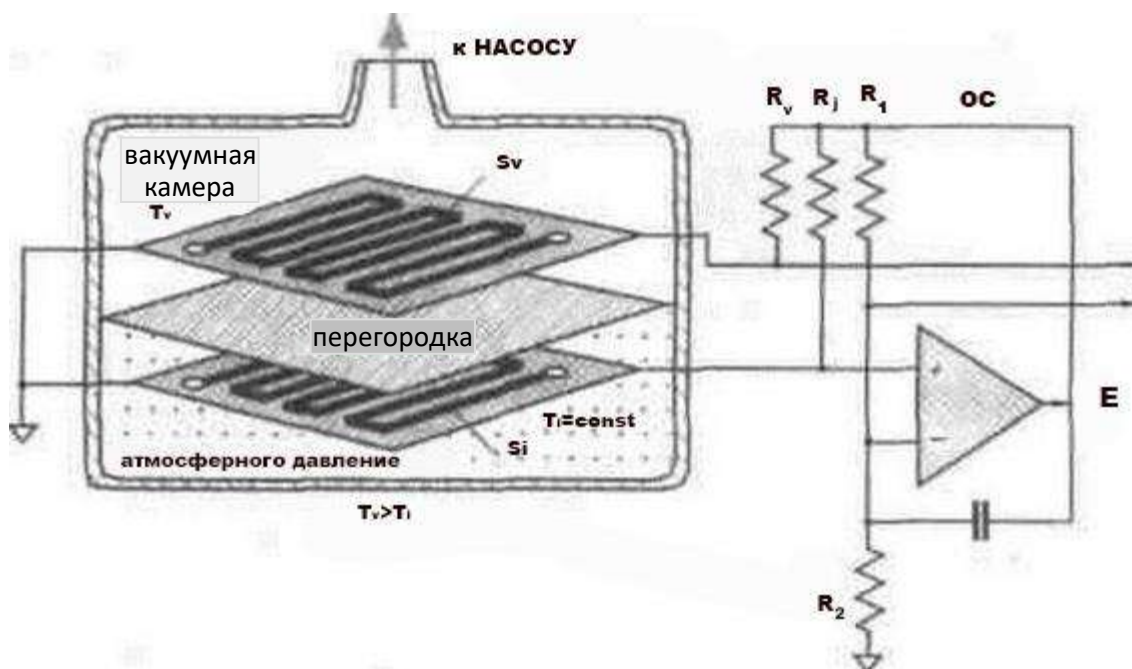


Рис. 13.2. Схема дифференциального датчика с термисторами с ОТК, работающими в режиме саморазогрева

Датчики Пирани показывают общее давление. Однако результат измерения зависит от типа газа. Для остаточных газов с хорошей теплопроводностью, например гелия или водорода, истинная величина вакуума ниже величины, отображаемой на дисплее. Наоборот, если преобладают газы с плохой теплопроводностью, например аргон, неон и углекислый газ, то истинное давление будет выше, чем величина, показанная на дисплее.

Тонкопленочные датчики наиболее технологичны, и их можно изготавливать путем напыления тонких пленок оксидов металлов. Совместимость с современной микроэлектронной технологией будет обеспечена, если получать сенсорные слои разнообразными методами реактивного (в кислородсодержащей среде) распыления (магнетронного, ионно-лучевого, ионно-плазменного и др.) металлов. Такая методика получения сенсорных пленок может быть частью технологического процесса производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. При этом все элементы датчика наносятся на окисленные кремниевые пластины приемами фотолитографии в виде кристаллов размером 1 мм<sup>2</sup>. Тогда из одной стандартной пластины кремния Ø100–200 мм можно сделать десятки тысяч датчиков.

Диапазон рабочих давлений таких датчиков  $10^5$ – $10^{-3}$  Па.

### 13.1.3. Ионизационные датчики

Электрические методы измерения низких общих давлений основаны на закономерностях электрических явлений в вакууме. Наибольшее распространение получил ионизационный метод измерения, использующий пропорциональность между давлением и разрядным током, протекающим

между электродами, к которым приложена разность потенциалов. Это наиболее чувствительные измерительные приборы для очень низких давлений. Они измеряют давление косвенно через измерение ионов, образующихся при бомбардировке газа электронами. Чем меньше плотность газа, тем меньше ионов будет образовано. Большинство ионных датчиков делятся на два вида: горячий катод и холодный катод.

*Горячий катод.* В случае горячего катода электрически нагреваемая нить накала эмитирует электроны. Электроны ионизуют молекулы газа вокруг себя. Образующиеся ионы собираются на отрицательно заряженном электроде, коллекторе. Ток зависит от числа ионов, которое, в свою очередь, зависит от давления газа. Таким образом, измерение тока коллектора позволяет определить давление газа. Имеется несколько подтипов ионизационных датчиков. На рисунке 13.3 приведены схемы таких датчиков. В ионизационном датчике

(рис. 13.3, а) на сетку подается высокое положительное напряжение, а пластина подсоединяется к низкому отрицательному напряжению. Выходным сигналом ионизационного датчика является ток ионов, снимаемый с пластины, пропорциональный давлению и току электронов на сетке. При низких давлениях величина измеряемого тока мала, что снижает их чувствительность и в конечном итоге сужает диапазон измеряемых давлений. Датчики Баярда – Алперта лишены этого недостатка за счет увеличения траектории движения электронов, что повышает вероятность их столкновения с молекулами остаточных газов и приводит к увеличению величины тока ионов. В настоящее время используется усовершенствованная модель этого датчика. Он обладает большей чувствительностью и стабильностью и может измерять более низкие давления. Его принцип действия аналогичен предыдущему датчику, но измеритель Баярда – Алперта имеет другую конструкцию: в нем пластина заменена на провод, окруженный сеткой, а нить накаливания катода вынесена наружу.



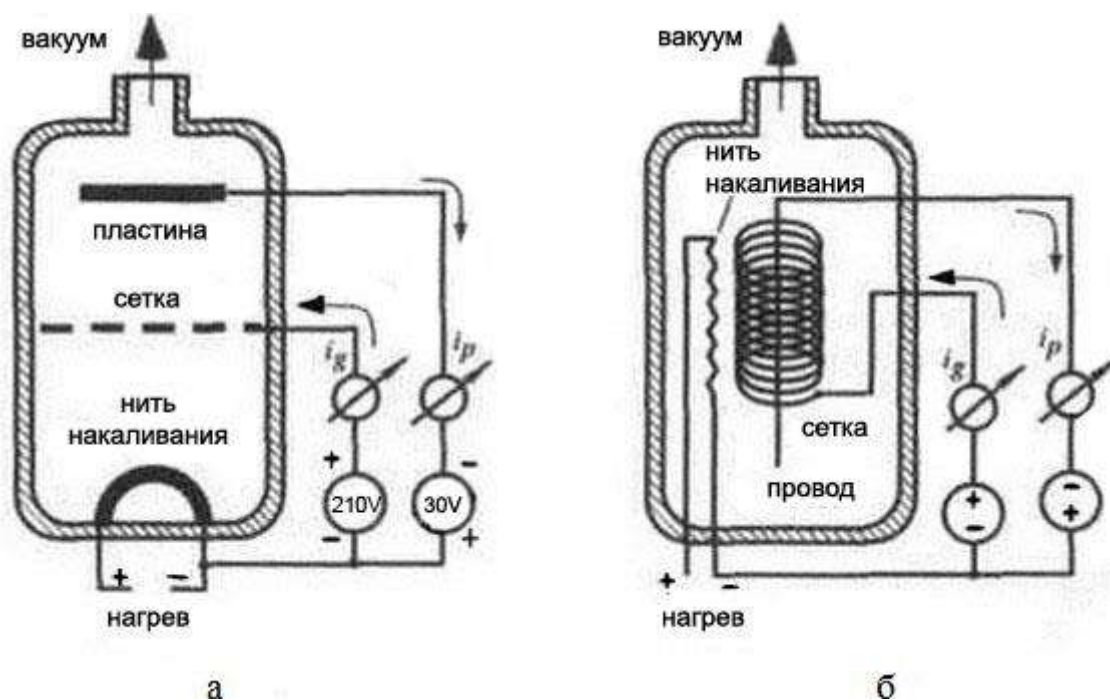


Рис. 13.3. Ионизационный датчик (а) и измеритель Баярда – Алперта (б)

Ионизационный датчик с горячим катодом Баярда – Алперта (рис. 13.3, б) обычно состоит из трех электродов, работающих в режиме триода, где катодом является нить накала. Три электрода – это коллектор, нить накала и сетка. Разность потенциалов между нитью накала и землей обычно составляет 30 В, в то время как напряжение сетки постоянно – 180–210 В. Электроны от нити накала движутся несколько раз в прямом и обратном направлении вокруг сетки пока не попадут на нее, что увеличивает вероятность столкновения с молекулами газа даже при их низкой плотности (низком давлении). При этих движениях часть электронов сталкивается с молекулами газа и осуществляет ионизацию остаточного газа. Число таких ионов пропорционально плотности молекул газа, умноженной на термоэлектронный ток, и эти ионы летят на коллектор, формируя ионный ток. Так как плотность молекул газа пропорциональна давлению, давление оценивается через измерение ионного тока.

Чувствительность к низкому давлению датчиков с горячим катодом ограничена фотоэлектрическим эффектом. *Электроны, ударяющие сетку, производят рентгеновские лучи, которые производят фотоэлектрический шум в ионном коллекторе.* Это ограничивает диапазон датчиков. Дополнительные провода под потенциалом катода в луче обзора между ионным коллектором и сеткой предотвращают этот эффект.

Наиболее распространенный ионный датчик – это датчик с горячим катодом Баярда – Алперта с маленьким ионным коллектором внутри сетки. Стекланный кожух с отверстием к вакууму может окружать электроды, но обычно он не используется и датчик встраивается в вакуумную камеру напрямую. Ионизационные датчики с горячим катодом могут быть

повреждены, если они включаются при атмосферном давлении или даже при низком вакууме. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке автоматического управления системами откачки вакуумного оборудования.

Датчики с горячим катодом измеряют давление в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^{-8}$  Па.

Принцип датчика с холодным катодом тот же, только электроны образуются в разряде, созданном высоковольтным электрическим разрядом.

Существует два вида датчиков с холодным катодом: датчик Пеннинга и инвертированный магнетрон (рис. 13.4).

Ни у одного из них нет нити накаливания, и каждому из них требуется высокое напряжение для функционирования. Главное различие между ними состоит в положении анода относительно катода. Ячейка Пеннинга (рис. 13.4, а) состоит из двух дисковых катодов и цилиндрического анода, в инверсно-магнетронном датчике (рис. 13.4, б) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом. Все электроды находятся в постоянном магнитном поле. На анод подается положительное относительно катода напряжение 2–6 кВ, катод заземлен и соединяется с входом усилителя постоянного тока. Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по спирали в ячейке Пеннинга и по циклоиде в инверсно-магнетронном датчике. При соударении с молекулами остаточного газа электрон теряет часть энергии на ее ионизацию и перемещается к аноду. В связи с тем, что радиальная скорость электронов значительно меньше, чем тангенциальная, при низких давлениях в разрядном промежутке образуется отрицательный объемный заряд. Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к аноду. Так как их масса значительно больше, чем у электрона, то магнитное поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Разрядный ток этих датчиков нелинейно зависит от давления. Верхний предел измерения находится в области давлений в пределах  $10^0$ – $10^3$  Па.

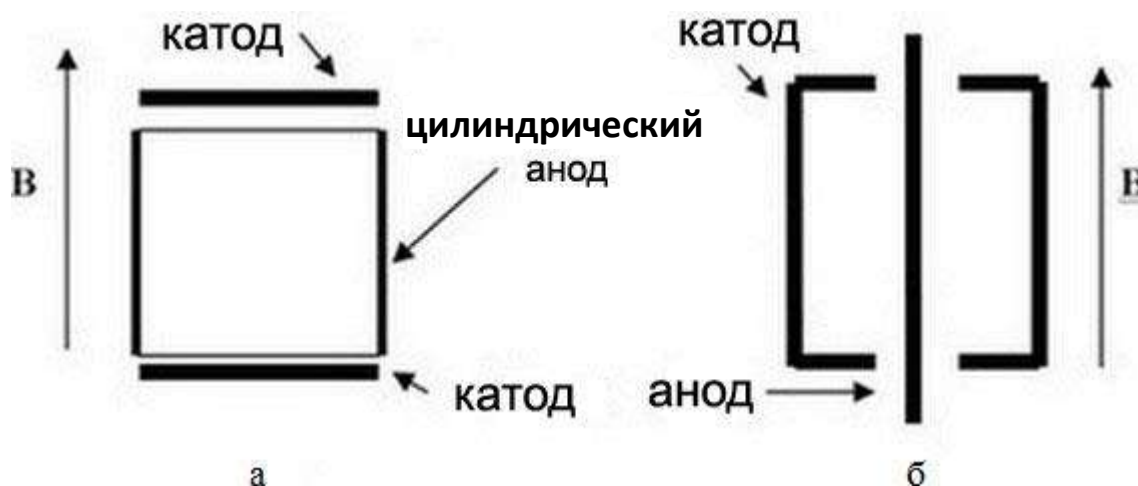


Рис. 13.4. Электродные схемы датчиков с холодным катодом:

а – ячейка Пеннинга; б – инверсно-магнетронная

Преимуществом этих датчиков является более высокая надежность в работе за счет отсутствия накаливаемых элементов, а недостатком – нестабильность, связанная с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении катодов. Эта нестабильность особенно заметна при работе датчиков в вакуумных системах с парами масла, продукты разложения которого при ионной бомбардировке и масляные диэлектрические пленки, покрывающие поверхности электродов, могут существенно изменять показания. В значительной степени лишены этого недостатка самоочищающиеся датчики, работающие на переменном токе.

#### 13.1.4. Баратроны

Работа баратронов (емкостные датчики) основана на измерении емкости, образованной между прогибающейся от разности давлений по обе стороны диафрагмой, и постоянными по положению электродами, которые представляют собой вторую обкладку конденсатора. *Баратрон – это не просто емкостной датчик, это прибор, который по своей надежности и стабильности своих характеристик завоевал 90 % мирового рынка среди подобных датчиков.*

Датчики позволяют измерять абсолютное и дифференциальное давление в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $3.5 \cdot 10^6$  Па с точностью от 0.25 % до 0.05 %.

Сенсор датчика «Баратрон» состоит из металлической ячейки, разделенной на две части туго натянутой плоской металлической диафрагмой, с одной стороны которой расположены электроды. Электроды с диафрагмой образуют две переменные емкости, которые включены в плечи измерительного моста. Когда давление по обеим сторонам диафрагмы одинаково, мост сбалансирован. Изменение давления в одной из камер деформирует диафрагму, изменяет емкости, разбалансируя мост. Полученный сигнал дисбаланса усиливается и демодулируется, образуя на выходе сигнал постоянного тока.

Эти датчики позволяют проводить измерения, не зависящие от рода газа, и использовать их для измерения давления загрязненных, коррозионных, агрессивных, радиоактивных газов, смесей газов неизвестного состава, а также очень чистых газов.

В абсолютной модели с опорной стороны давление откачивается до  $10^{-5}$  Па, которое поддерживается в течение длительного времени химическим геттером (газопоглотителем). В дифференциальной модели камера с электродами открыта, в нее подается опорное давление, что обеспечивает прямое измерение дифференциального давления с наименьшей погрешностью. В модели избыточного давления камера с электродами сообщается с атмосферой. Электроды выполнены из керамики, покрытой палладием.

*Точность.* Одним из главных преимуществ датчиков «Баратрон» является их высокая точность (от 1 до 0.05 %) при широком диапазоне измерения давлений (от 3 до 5 порядков). Например, «Баратрон 690» с верхним пределом (ВП)  $10^5$  Па и точностью 0.12 % обеспечивает измерения с указанной точностью в диапазоне от 1 до  $10^5$  Па, т. е. пять порядков.

*Нелинейность* – это разность между выходным сигналом датчика и идеальной прямой, проведенной от нуля до величины напряжения, соответствующей полной шкале прибора.

*Гистерезис* – это разность между выходным сигналом датчика, полученным при изменении давления от нуля до полной шкалы, и выходным сигналом, полученным при изменении давления от полной шкалы до нуля.

*Невоспроизводимость* – это разность между последовательными измерениями одного и того же давления, проведенными в одинаковых условиях и идентичными методами.

Все описанные факторы определяются конструктивными особенностями и калибровкой каждого датчика и указываются для каждого типа датчика в соответствующих каталогах. Разработчикам предоставляется широкое поле выбора по этим характеристикам, где важны разумное сочетание этих характеристик со стоимостью приборов.

*Влияние температуры.* Температурные изменения являются внешним фактором, так как определяются окружающей средой. Поэтому температурные ошибки приводятся отдельно в виде температурных коэффициентов. В некоторых моделях, например компании MKS Instruments, используют конструктивное решение по температурной компенсации (компенсация выходного сигнала в соответствии с изменениями температуры) или термостатирование (поддержание постоянной температуры внутри сенсора). В наиболее точных моделях применяются оба метода, что дает возможность получить температурный коэффициент дрейфа нуля больше чем 0.0004 % ВП/1 °С, температурный коэффициент по углу наклона выходного сигнала больше чем 0.002 % от показания/1 °С. Также должен быть предпринят ряд мер самим заказчиком: расположить датчик вдали от сквозняков, прямого солнечного света, устройств, являющихся источником сильного изменения температуры.

*Меры предосторожности.* Датчики «Баратрон» являются надежными и долговечными приборами при условии правильного обращения с ними. Датчик, упавший со стола, будет безнадежно испорчен из-за повреждения мембраны. Цена ячейки, которую придется заменить, составляет 80 % стоимости прибора.

### 13.1.5. Течеискание

Любая вакуумная установка или система для нанесения или обработки технологического слоя является достаточно сложным устройством, состоящим из различных деталей, приборов и т. д. Эта система для удобства эксплуатации является сборно-разборной. Это приводит к тому, что все места соединений

разных элементов являются потенциально негерметичными и требуют разного рода уплотнителей, прокладок и т. д. Поэтому при монтаже и эксплуатации требуется определить и соответственно устранить все негерметичные механические контакты, т. е. провести процесс течеискания. Для поиска течей в вакуумных системах основным рабочим газом является гелий. Почему именно гелий используется в качестве рабочего газа? Гелий является инертным и нейтральным газом, что обеспечивает безопасность и долговечность работы. Молекула газа состоит из одного атома, ее диаметр 0.215 нм, плотность гелия при нормальных условиях в 7.2 раза меньше воздуха, а притяжение его молекул в 16 800 раз меньше, чем у воздуха. Это делает гелий высокотекучим и позволяет ему проникать сквозь микроскопические отверстия. Гелий имеет относительно низкую цену. Его избыточное наличие легко определяется масс-спектрометрической ячейкой благодаря отсутствию интерференции с другими газами и парами. Содержание гелия в атмосфере очень мало (0.0005 %), что позволяет обеспечить высокую точность измерения, даже при работе по методу шупа.

#### 13.1.5.1. Основные методы контроля герметичности

##### *Вакуумный метод*

Этот метод наиболее применим при поиске течей в вакуумном технологическом оборудовании (рис. 13.5).



Рис. 13.5. Вакуумный метод поиска течей

Вакуумирование исследуемого объема обеспечивается откачными средствами самого течеискателя (при малых объемах исследуемых объектов) или комбинированными средствами (насосами вакуумного оборудования в сочетании с откачкой течеискателем) с последующим обдувом предполагаемого места течи. Для повышения чувствительности подключение

вакуумопровода откачки течеискателя осуществляется в непосредственной близости от входного фланца форвакуумного насоса.

*Достоинства метода:* высокая чувствительность, возможность глобального (метод гелиевого чехла) и локального (обдув) контроля герметичности, относительно невысокая стоимость.

*Недостатки:* большое время реагирования (сильно зависит от величины объема камеры и средств откачки); при использовании дополнительных средств откачки возможно снижение пороговой чувствительности.

### ***Глубоковакуумный метод***

Используется для глобального контроля герметичности. Исследуемый объект помещается в вакуумную камеру и надувается гелием под давлением (газовая опрессовка) (рис. 13.6).



Рис. 13.6. Глубоковакуумный метод поиска течей

*Достоинства метода:* самая высокая чувствительность, проверка всего объекта, небольшое время отклика.

*Недостатки:* высокая стоимость, ограничения по механической прочности контролируемого изделия и его габаритов.

### ***Метод щупа (метод избыточного давления)***

Исследуемый объект надувается гелием и далее обследуется при помощи щупа течеискателя (рис. 13.7).



Рис. 13.7. Метод щупа

Как видно из приведенных рис. 13.5–13.7, основным элементом системы является течеискатель. Основным современным течеискателем является масс-спектрометр.

### 13.1.5.2. Масс-спектрометр

Существенное отличие масс-спектрометрии от других аналитических спектральных, например оптических, методов состоит в том, что оптические методы детектируют излучение или поглощение энергии молекулами или атомами, а масс-спектрометрия – непосредственно сами частицы вещества.

Прибор, осуществляющий измерение отношения массы фрагмента молекулы к его заряду, называется *масс-спектрометр*. Попадая в него, анализируемые молекулы, последовательно ионизируются, получившиеся в результате этого ионы разделяются в зависимости от присущих им отношений массы к заряду и детектируются. Результатом этих процессов является *масс-спектр*, который несет в себе информацию о молекулярной массе аналита и его структуре. Таким образом, масс-спектр представляет собой совокупность данных об образующихся при определенных условиях ионизации в результате распада конкретного вещества ионах и их интенсивности.

*Характеристический ион* – обычно молекулярный ион или его фрагмент, присутствие которого в масс-спектре способствует идентификации вещества. Интенсивность ионов в масс-спектре, хотя иногда она опускается, выражается в процентах к интенсивности максимального иона в данном спектре и называется *относительной интенсивностью*.

Масс-спектрометры любого вида обычно работают в двух режимах регистрации ионов: *сканирования* (SCAN) полного или части диапазона величин отношения массы к заряду для исследуемого вещества или *мониторинга характеристических ионов* (селективный ионный мониторинг, SIM) этого и других веществ в пределах определенного заданного времени (dwell times).

Важной характеристикой метода является *отношение сигнал/шум*, которое представляет собой отношение величины сигнала детектора к интенсивности систематических и других помех, вызванных разными причинами. Обычно соотношение 3:1 считается значимым с точки зрения регистрации сигнала анализируемого вещества.

## Общая схема метода масс-спектрометрии

Масс-спектрометрия – метод исследования и анализа вещества, основанный на ионизации атомов и молекул, входящих в состав пробы, и регистрации спектра масс образовавшихся ионов.

Идея метода проста и может быть изложена в виде следующей схемы:

- 1) превратить нейтральные частицы – атомы или молекулы в частицы заряженные – ионы;
- 2) разделить образовавшиеся ионы в пространстве в соответствии с их массой посредством электрического или магнитного поля;
- 3) измеряя электрический ток, образуемый направленно движущимися ионами, можно судить об изотопном, атомарном и молекулярном составе анализируемого вещества, как на качественном, так и на количественном уровне.

Оборудование для проведения исследований методом масс-спектрометрии обычно состоит из нескольких основных блоков. На рис. 13.8 приведена принципиальная блок-схема масс-спектрометра.

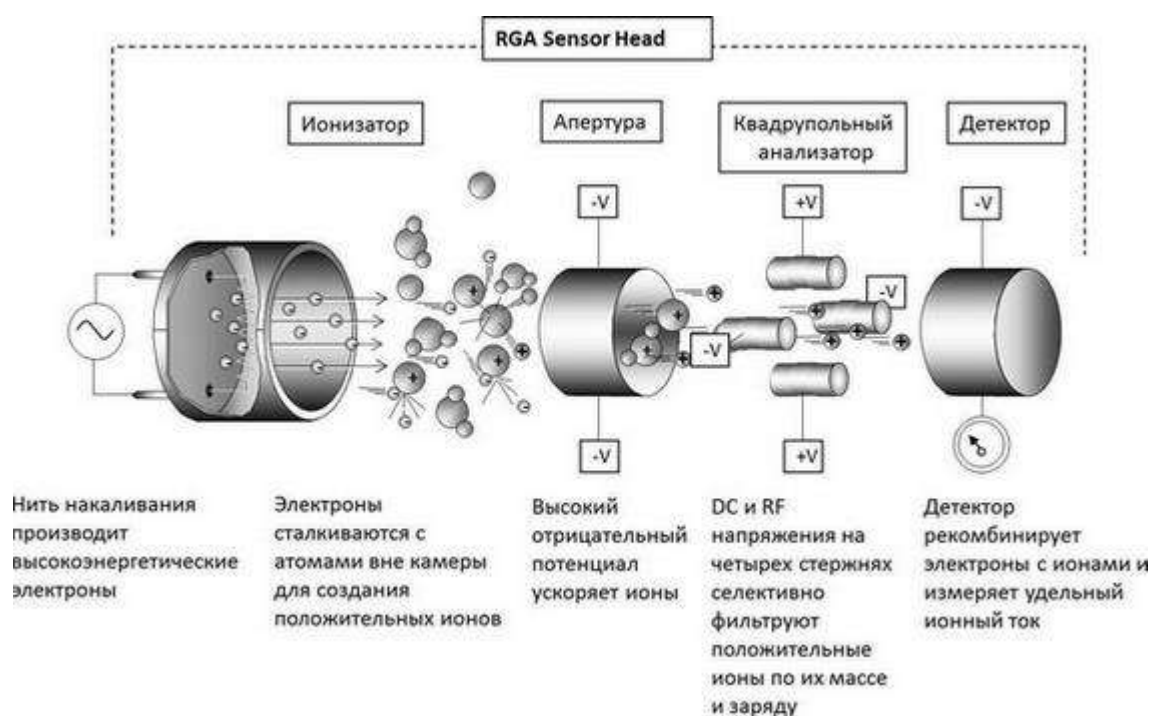


Рис. 13.8. Блок-схема масс-спектрометра

Наиболее распространенный применяемый в современной масс-спектрометрии метод ионизации газовых молекул – это так называемый электронный удар. Это осуществляется в источнике ионов. Электроны из термокатода, ускоренные электрическим полем, сталкиваясь с молекулами газа, выбивают из электронных оболочек электроны и превращают молекулы в ионы. При этом молекулы часто разваливаются на заряженные фрагменты по определенному для каждого соединения механизму. Именно в результате этого



процесса в конечном итоге получится масс-спектр – набор рассортированных по массам ионов – несущий информацию о структуре молекулы

Надо отметить, что, начиная от ионного источника и до детектора, масс-спектрометр представляет собой вакуумный прибор. Довольно глубокий вакуум обеспечивает беспрепятственное движение ионов внутри масс-спектрометра, а при его отсутствии ионы просто рассеются и рекомбинируют (превратятся обратно в незаряженные частицы). На установках элементного анализа применяются магнитные и квадрупольные масс-анализаторы.

В магнитном масс-анализаторе разделение по массам происходит в магнитном поле, перпендикулярном плоскости движения ионного пучка. В магнитном поле с индукцией  $B$  на ион с кратностью заряда  $q_i$  действует сила Лоренца:

$$q_i e [vB]/c = q_i e v B / c, \quad (13.1)$$

поэтому ион массой  $m_i$  будет двигаться по окружности, радиус  $R$  которой определяется из условия

$$\frac{m_i v^2}{R} = \frac{q_i e}{c} v B. \quad (13.2)$$

Следовательно,

$$R = \frac{1}{B} \frac{c}{q_i e} m_i v = \frac{1}{B} \frac{c}{q_i e} \sqrt{2 E m_i}. \quad (13.3)$$

Если напряжение на ионном источнике  $U_0$ , то энергия ионов в пучке независимо от их массы равна  $q_i e E$ , поэтому выражение (13.3) можно записать в виде

$$R = \frac{144.3}{B} \sqrt{\frac{M_i U_0}{q_i}}, \quad (13.4)$$

где  $R$  – радиус искривления траектории иона, см;

$B$  – напряженность магнитного поля, Гс;

$M$  – масса иона, а.е.м.;

$U_0$  – напряжение на ионном источнике, В.

Если  $B$  и  $U_0$  – const, то ионы разных масс (более точно с разными значениями  $M_i/q_i$ ) будут двигаться по окружностям разного радиуса. Поставив на их пути приемник ионов в виде, например, фотопластинки, мы получим масс-спектрограф. Зная  $B$ ,  $U_0$  и определив геометрией эксперимента радиусы (рис. 13.9), по которым двигались ионы, можно определить их массы.

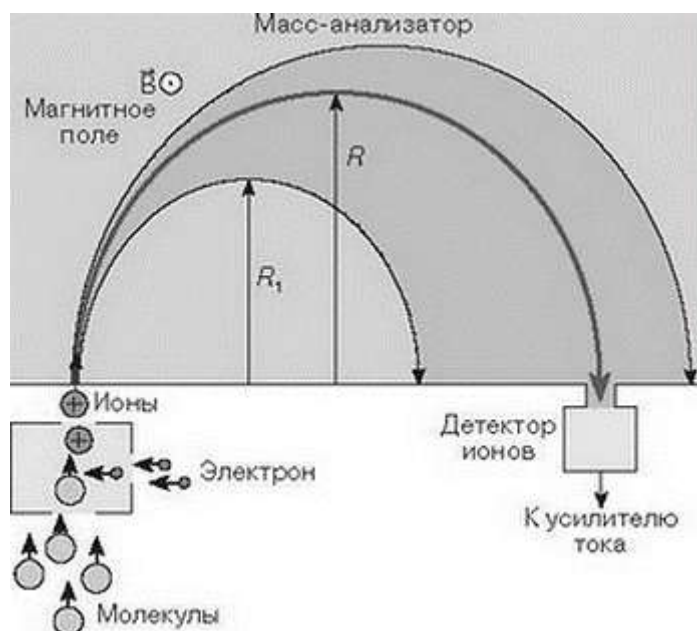


Рис. 13.9. Схема ионизации методом электронного удара и разделения ионов по массам в магнитном масс-анализаторе

Если менять индукцию магнитного поля  $B$ , то по одному и тому же радиусу, который принято называть радиусом магнита, можно будет провести ионы с разными значениями  $M_i/q_i$  и таким образом определить массу ионов. Разной кратности заряда ионов одной и той же массы будут отвечать магнитные индукции  $B_i$  и  $B_i^2$ . На этом принципе действуют все так называемые статические масс-анализаторы или масс-спектрометры, принцип действия которых проиллюстрирован на рис. 13.9. На этом рисунке средняя линия – траектория иона, масса которого удовлетворяет уравнению (13.4), боковые линии – траектории ионов другой массы. Так как магнитная индукция магнита масс-анализатора должна меняться, то в масс-анализаторах используются электромагниты.

Пусть на вход электромагнита поступают однократно заряженные ионы ( $q = 1$ ) ионы массой  $M_1$  и  $M_2$ , ускоренные одной и той же разностью потенциалов. Тогда, если масс-анализатор настроен на пропускание ионов  $M_1$ , то индукция магнитного поля

$$B_1 = \frac{144.3}{R} \sqrt{M_1 U_0}. \quad (13.5)$$

Ионы массы  $M_2$  будут при этом двигаться по радиусу

$$R_2 = \frac{144.3}{B_1} \sqrt{M_2 U_0}, \quad (13.6)$$

который будет отличаться от радиуса поворота данного электромагнита  $R$  на величину

$$\Delta R = R - R_2 = R(1 - \sqrt{M_2/M_1}). \quad (13.7)$$

С величиной  $\Delta R$  связано такое понятие, как разрешение электромагнита по массам. Так как на выходе магнита стоит диафрагма, имеющая конечную ширину щели, то, приняв полуширину этой щели  $d$  за  $\Delta R$ , из (13.7) получим условие

$$\frac{M_2}{M_1} = \left(1 - \frac{d}{R}\right)^2, \quad (13.8)$$

откуда после вычитания из обеих сторон 1 получим

$$\frac{M_2 - M_1}{M_1} = \left(\frac{d}{R}\right)^2 - 2\frac{d}{R}. \quad (13.9)$$

Дробь, стоящую в левой части этого равенства, можно рассматривать как  $\Delta M/M$ , где  $M$  – масса, на которую настроен магнит,  $\Delta M$  – ближайшая к  $M$  масса, ионы которой не пройдут через электромагнит (попадут на край щели выходной диафрагмы). Величина, обратная этому отношению, называется разрешением масс-анализатора по массам  $R_M$ .

В реальных масс-анализаторах на вход электромагнита поступает ионный пучок, имеющий некоторую угловую расходимость, кроме того, входная диафрагма магнита тоже имеет конечную ширину, поэтому радиус окружности, по которой будет двигаться ион при фиксированном  $B$ , будет отличаться от значения  $R$ , вычисленного по формуле (13.6). Поэтому геометрия магнитного поля масс-анализатора должна обеспечить также фокусировку, т. е. свести ионы одной и той же массы в малое пятно на выходе из электромагнита. Для реализации подобной фокусировки используется магнитное поле специальной геометрии, которое создается геометрией полюсных накладок электромагнита.

Естественно, в этом случае для разрешения по массам получится более сложное выражение, чем полученное выше. Однако общая картина останется прежней: разрешение по массам определяется геометрией электромагнита (радиус магнита, ширина щелей входной и выходной диафрагмы), т. е. для конкретного электромагнита  $R_M$  константа, не зависящая от того, какие ионы проходят через него.

Существует другой способ разделения ионов по массе.

Комбинированное высокочастотное (несколько мегагерцев) переменное и постоянное электрическое напряжение вида  $U = V + U_0 \cos \omega t$ , подаваемое на систему четырех электродов (рис. 13.10), вынуждает ионы совершать колебательное движение в такт с частотой  $\omega$  этого поля. При определенных величинах  $U_0$ ,  $V$  и  $\omega$  в выходную щель масс-анализатора будут проходить только ионы с определенной массой  $m$ , отвечающей условию

$$m = aU_0/\omega^2, \quad (13.10)$$

где  $a$  – некоторая постоянная прибора.

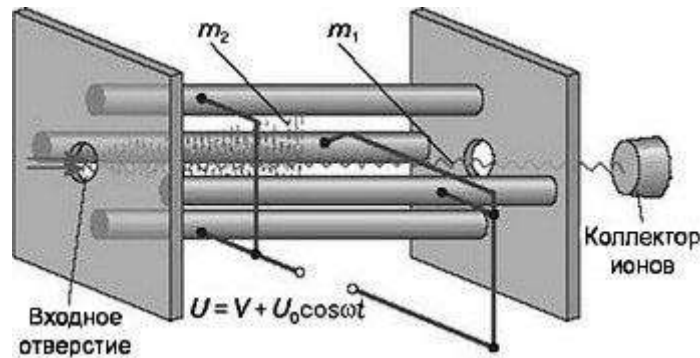


Рис. 13.10. Схема квадрупольного масс-анализатора

Все ионы с отличающимися массами будут двигаться с нарастающими амплитудами колебаний, что приводит к их нейтрализации на стенках электродов. Путем изменения амплитуды высокочастотного напряжения  $U_0$  или его частоты  $\omega$  масс-анализатор настраивают на регистрацию ионов той или иной требуемой массы. Так работают квадрупольные масс-анализаторы. Они компактнее магнитных и обладают довольно высокой чувствительностью.

Еще один способ разделить ионы по массам – создать кратковременный импульс постоянного электрического поля (рис. 13.11).

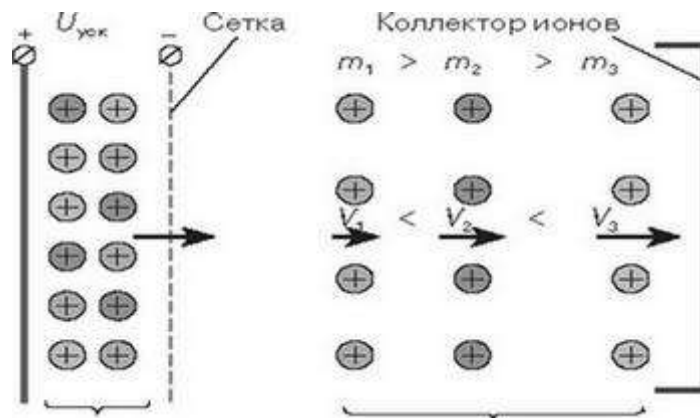


Рис. 13.11. Схема времяпролетного масс-спектрометра

Приобретая скорость

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}, \quad (13.11)$$

ионы долетают до коллектора за время

$$t = \frac{L}{v} = L \sqrt{\frac{m}{2qU}}, \quad (13.12)$$

где  $L$  – длина анализатора.

Таким образом, из-за различия в массах ионы приобретают различные скорости, обратно пропорциональные  $\sqrt{m}$ . Образуется ионный «пакет», в голове которого летят легкие ионы, тогда как тяжелые его замыкают, и, следовательно, ионы достигают коллектора в разные моменты времени. В этом состоит принцип разделения ионов по массам во времяпролетном масс-спектрометре, главными преимуществами которого являются практически неограниченный диапазон масс и очень быстрое время регистрации масс-спектра порядка  $10^{-3}$  с.

В масс-спектрометрах ион-циклотронного резонанса (рис. 13.12) ион движется под действием сразу двух полей: сильного постоянного магнитного и переменного электрического. Под действием магнитного поля ион движется по окружности с циклической частотой

$$\omega_B = \frac{qB}{m}, \quad (13.13)$$

определяемой массой иона и магнитной индукцией. Электрическое поле изменяется с циклической частотой  $\omega_E$  по закону

$$E = E_0 \cos \omega_E t. \quad (13.14)$$

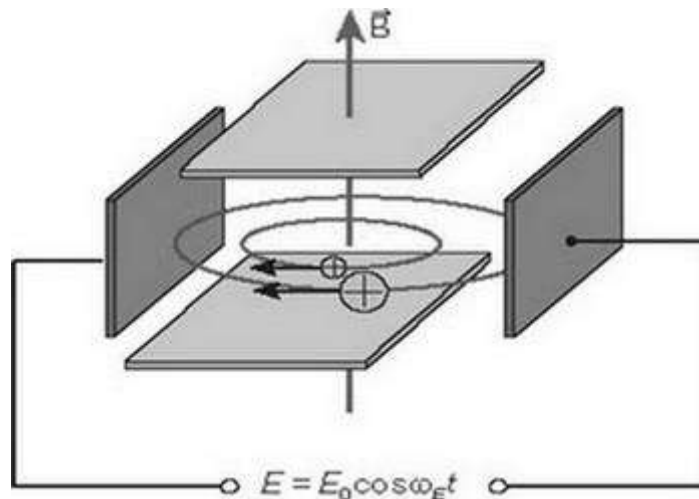


Рис. 13.12. Ячейка масс-спектрометра ион-циклотронного резонанса

При равенстве частот  $\omega_E$  и  $\omega_B$  (напомним, что последняя зависит от массы иона) наступает резонанс, проявляющийся в заметном поглощении энергии электрического поля. Такой масс-спектрометр чрезвычайно компактен (ячейка некоторых разновидностей не превышает размера кусочка сахара),

имеет очень высокие чувствительность, разрешающую способность и диапазон масс. Интересно отметить, что ионы в ячейке могут удерживаться на своих круговых орбитах по несколько десятков часов. Отрицательные ионы, которые также могут образовываться в процессе ионизации, вращаются в ячейке в противоположном направлении и также будут регистрироваться в масс-спектре при частоте электрического поля, соответствующей их массе.

Третья обязательная деталь масс-спектрометра – регистрирующее устройство, с помощью которого можно определить количество ионов с данным  $m/z$ . Первые масс-спектрографы использовали в качестве детектора фотопластинку. Сейчас используются диодные вторично-электронные умножители, в которых ион, попадая на первый диод, выбивает из него пучок электронов, которые в свою очередь, попадая на следующий диод, выбивают из него еще большее количество электронов и т. д. Другой вариант – фотоумножители, регистрирующие свечение, возникающее при бомбардировке ионами люминофора. Кроме того, используются микроканальные умножители, системы типа диодных матриц и коллекторы, собирающие все ионы, попавшие в данную точку пространства (коллекторы Фарадея). В современном приборе регистрирующее устройство непосредственно связано с компьютером, который производит обработку результатов и управляет экспериментом.

### ***Обработка результатов***

Для обработки результатов используют библиотеки масс-спектров, которые являются мощным средством, позволяющим выяснить структуры масс-спектров электронного удара. В большинстве из них поиск возможен в режиме on-line. Из информации об измеренном спектре выбирают только небольшой объем данных о наиболее важных пиках и эти данные сравнивают с библиотечными спектрами. Согласие между измеренным спектром и библиотечным образцом выражается некоторым числом, обычно лежащим в диапазоне 0–1000, где значение 1000 соответствует идеальному совпадению. Десять наилучших библиотечных спектров выводятся на экран для последующей визуальной обработки пользователем.

Компьютерный поиск в библиотеках спектров оказывается весьма полезным, так как он дает направления поиска в случае анализа совершенно неизвестных образцов или предоставляет надежные данные для подтверждения того, что исследуемое вещество действительно присутствует в образце. При использовании компьютерного поиска следует твердо придерживаться правила: компьютер быстро сравнивает измеренный масс-спектр с библиотечным, но окончательное решение об идентификации исследуемого соединения принимает пользователь после изучения имеющихся данных и результатов компьютерной обработки.

В то время как поиск в компьютерных базах данных при масс-спектрометрии с ионизацией электронным ударом является достаточно мощным средством благодаря как временной («день ото дня»), так и

межлабораторной («от прибора к прибору») воспроизводимости спектров электронного удара, ситуация при мягкой ионизации и десорбционной химической ионизации совершенно противоположная. В этих случаях результаты масс-спектрометрии настолько сильно зависят от экспериментальных условий, что накопление универсальных библиотек становится невозможным. Однако иногда использование библиотек внутри фирмы или лаборатории может быть оправданным.

*Критерии идентификации.* При масс-спектрометрии в комбинации с разделительными методами в каждой лаборатории должны быть утверждены в установленном порядке критерии идентификации, на основании которых аналитики интерпретируют полученные результаты и выдают свои заключения. Разумеется, для разделительного метода и масс-спектрометрии такие критерии должны быть свои, учитывающие особенности использованных методов.

*Критерии для масс-спектрального анализа.* При работе в режиме сканирования масс-спектров условия подбираются таким образом, чтобы снятие спектров начиналось с величины  $m/z$ , превышающей все аналогичные показатели искомым аналитов, или их продуктов дериватизации, если для другого нет специальных указаний. После получения спектров в выбранном диапазоне проводят сравнение спектра анализируемого вещества со спектром аналитического вещества сравнения. При этом все пики с относительной интенсивностью более 10 % от интенсивности максимального пика аналитического образца сравнения должны присутствовать в исследуемом спектре. Относительная интенсивность трех характеристических ионов может быть получена путем анализа одиночного или усредненного спектра или по площадям пиков масс-фрагментограмм этих ионов.

Если не удастся достичь совпадения относительных интенсивностей трех характеристических ионов в пределах 5 %, используют дериватизацию или другой метод ионизации. К результатам этих исследований применяются те же критерии.

Важнейшими техническими характеристиками масс-спектрометров являются чувствительность, динамический диапазон, разрешение, скорость.

*Скорость сканирования.* Масс-анализатор пропускает ионы с определенным соотношением массы и заряда в определенное время (кроме многоколлекторных приборов и ионно-циклотронного резонанса, орбитальной ловушки ионов). Для того чтобы проанализировать все ионы по отношению их массы к заряду, масс-спектрометр должен сканировать, т. е. параметры его поля должны за заданный промежуток времени пройти все значения, нужные для пропускания к детектору всех интересующих ионов. Эта скорость разворачивания поля называется скоростью сканирования и должна быть как можно больше (соответственно время сканирования должно быть как можно меньше), поскольку масс-спектрометр должен успеть измерить сигнал за короткое время, например, за время выхода хроматографического пика, которое может составлять несколько секунд. При этом, чем больше масс-спектров за

время выхода хроматографического пика будет измерено, тем точнее будет описан хроматографический пик, тем менее вероятно будет проскочить мимо его максимального значения, а с помощью математической обработки определить, является ли он индивидуальным и «доразделить» его с помощью масс-спектрометрии.

Самым медленным масс-анализатором является магнит, минимальное время его сканирования без особой потери чувствительности составляет доли секунды. Квадрупольный масс-анализатор может разворачивать спектр за десятые доли секунды, а ионная ловушка еще быстрее, линейная ионная ловушка – еще быстрее и чуть медленнее масс-спектрометр ионно-циклотронного резонанса. Любое сканирование всех перечисленных выше масс-анализаторов является компромиссным – чем больше скорость сканирования, тем меньше времени тратится на запись сигнала на каждое массовое число, тем хуже чувствительность.

*Разрешение.* Наглядно разрешение (разрешающую способность) можно определить как возможность анализатора разделять ионы с соседними массами. Очень важно иметь возможность точно определять массу ионов, это позволяет вычислить атомную композицию иона или идентифицировать пептид путем сравнения с базой данных, сократив число кандидатов с тысяч и сотен до единиц или одного единственного. Для магнитных масс-анализаторов, для которых расстояние между пиками масс-спектра не зависит от масс ионов, разрешение представляет собой величину, равную  $M/DM$ . Эта величина, как правило, определяется по 10%-й высоте пика. Так, например, разрешение 1000 означает, что пики с массами 100.0 и 100.1 а. е. м. отделяются друг от друга, т. е. не накладываются вплоть до 10%-й высоты.

Для анализаторов, у которых расстояние между пиками меняется в рабочем диапазоне масс (чем больше масса, тем меньше расстояние), таких как квадрупольные анализаторы, ионные ловушки, времяпролетные анализаторы, строго говоря, разрешение имеет другой смысл. Разрешение, определяемое как  $M/DM$ , в данном случае характеризует конкретную массу. Имеет смысл характеризовать эти масс-анализаторы по ширине пиков, величине, остающейся постоянной во всем диапазоне масс. Эта ширина пиков, обычно, измеряется на 50 % их высоты. Для таких приборов ширина пика на полувысоте, равная 1, является неплохим показателем и означает, что такой масс-анализатор способен различить номинальные массы, отличающиеся на атомную единицу массы практически во всем его рабочем диапазоне. Масс-спектрометры с двойной фокусировкой (магнитной и электростатической), ионно-циклотронного резонанса – приборы среднего или высокого разрешения. Типичным для магнитного прибора разрешением является  $> 60\,000$ , а работа на уровне разрешения  $10\,000$ – $20\,000$  является рутинной. На масс-спектрометре ионно-циклотронного резонанса на массе около 500 а. е. м. можно легко достигнуть разрешения  $500\,000$ , что позволяет проводить измерения массы ионов с точностью до 4–5 знака после запятой. Разрешения в



несколько тысяч также можно добиваться при использовании времяпролетных масс-анализаторов, однако на высоких массах, в области которых собственно этот прибор имеет преимущество перед другими, и этого разрешения хватает лишь для того, чтобы измерить массу иона с точностью  $+/-$  десятки а. е. м.

Как видно из вышесказанного, разрешение тесно связано с другой важной характеристикой – точностью измерения массы. Проиллюстрировать значение этой характеристики можно на простом примере. Массы молекулярных ионов азота ( $N_2^+$ ) и монооксида углерода ( $CO^+$ ) составляют 28.00615 а. е. м. и 27.99491 а. е. м. соответственно (оба характеризуются одним массовым числом 28). Эти ионы будут регистрироваться масс-спектрометром порознь при разрешении 2500, а точное значение массы даст ответ на вопрос: какой из газов регистрируется. Измерение точной массы доступно на приборах с двойной фокусировкой, на тандемном квадрупольном масс-спектрометре и на масс-спектрометрах ионно-циклотронного резонанса.

*Динамический диапазон.* Если мы анализируем смесь, содержащую 99.99 % одного соединения или какого-либо элемента и 0.01 % какой-либо примеси, мы должны быть уверены, что правильно определяем и то и другое. Для того чтобы быть уверенным в определении компонентов в этом примере, нужно иметь диапазон линейности в 4 порядка. Современные масс-спектрометры для органического анализа характеризуются динамическим диапазоном в 5–6 порядков, а масс-спектрометры для элементного анализа 9–12 порядков. Динамический диапазон в 10 порядков означает, что примесь в пробе будет видна даже тогда, когда она составляет 10 мг на 10 т.

*Чувствительность.* Это одна из важнейших характеристик масс-спектрометров. Чувствительность это величина, показывающая, какое количество вещества нужно ввести в масс-спектрометр для того, чтобы его можно было детектировать. Для простоты будем рассматривать связанный с чувствительностью параметр – минимальное определяемое количество вещества, или порог обнаружения. Типичная величина порога обнаружения хорошего хромато-масс-спектрометра, используемого для анализа органических соединений, составляет 1 пг при вводе 1 мкл жидкости.

Для того чтобы достигнуть как можно большей чувствительности при улучшении отношения сигнала к шуму, прибегают к детектированию по отдельным выбранным ионам. Выигрыш в чувствительности и селективности при этом колоссальный, но при использовании приборов низкого разрешения приходится пренебрегать другим важным параметром – достоверностью. Ведь если вы записывали только один пик из всего характеристического масс-спектра, вам понадобится еще много поработать, чтобы доказать, что этот пик соответствует именно тому компоненту, который вас интересует. Как же разрешить эту проблему? Использовать высокое разрешение на приборах с двойной фокусировкой, где можно добиться высокого уровня достоверности не пренебрегая чувствительностью. Или использовать тандемную масс-

спектрометрию, когда каждый пик, соответствующий одиночному иону, можно подтвердить масс-спектром дочерних ионов.

### ***Основные технологические использования масс-анализаторов***

*Обнаружение течи.* Анализатор остаточных газов способен непрерывно контролировать содержание гелия (или любого другого пробного газа), выполняя функцию проверки герметичности камеры (рис. 13.13). Программное обеспечение выдаст предупреждение (звуковое и визуальное), чтобы оповестить пользователя в случае превышения предварительно заданного уровня содержания гелия.



Рис. 13.13. Возможные места течи

*Мониторинг фона и характеристик техпроцесса.* Анализаторы остаточных газов можно использовать для определения характеристик фоновой газовой среды в технологической камере. Если известен ожидаемый состав фоновой среды и уровни содержания газов, тогда анализатор остаточных газов можно использовать для отслеживания отклонения содержания газов от этих уровней.

*Мониторинг техпроцесса.* Анализатор остаточных газов может непрерывно осуществлять мониторинг техпроцесса и немедленно сообщать обо всех нарушениях или отклонениях от нормального состояния техпроцесса. Комплектное ПО может осуществлять обратную связь и передавать

полученные данные оборудованию для выполнения соответствующих операций.

*Контроль загрязнения.* Анализатор остаточных газов можно использовать для обнаружения непредвиденных и нежелательных веществ в системе. Источники этих загрязняющих веществ могут быть совершенно различными. ПО анализатора остаточных газов содержит библиотеку известных спектров, по которым можно определять посторонние и неизвестные вещества.

*Управление техпроцессом.* Данные, полученные анализатором остаточного газа, можно использовать для управления техпроцессом. Например, реле, запрограммированные для замыкания при достижении предварительно заданных парциальных давлений, могут управлять клапанами или аналоговые выходные сигналы можно подавать на информационный дисплей.

## **13.2. Кварцевый датчик измерения толщины пленок в процессе создания**

Одним из возможных решений задачи по вычислению толщин пленок непосредственно во время осаждения является использование так называемых резонансных (QCM) датчиков. В основе метода лежит физика пьезоэлектрического эффекта, использование пьезоэлектриков из кварца, вычисление резонансных частот, уравнение Сауэрбрейя и соотношение между толщиной и массой материала.

### **13.2.1. Пьезоэлектрический эффект**

Пьезоэлектрический эффект, открытый в 1880 г. братьями Жаком и Полем Кюри, состоит в том, что на гранях некоторых кристаллов при их «ударном» сжатии или растяжении появляются заряды, подобные поляризационным. К таким кристаллам в первую очередь относится кварц.

Если мысленно провести через кристалл кварца ось  $Z$  и перпендикулярно ей оси  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , как это показано на рис. 13.14, то мы получим оптическую и перпендикулярные ей электрические оси кварцевого кристалла соответственно.

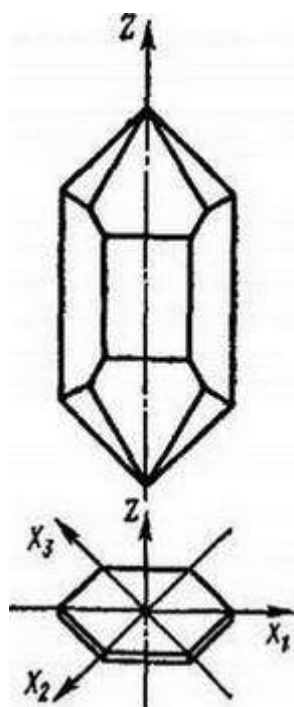


Рис. 13.14. Оптическая ось  $Z$  и перпендикулярные ей электрические оси  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$

Если плоскопараллельную пластинку (рис. 13.15) вырезать таким образом, что ее толщина и ребро  $d$  будут направлены параллельно электрической оси  $X$ , высота и ребро  $b$  – параллельно оптической оси  $Z$ , а длина и ребро  $l$  – параллельно оси  $Y$ , перпендикулярной осям  $X$  и  $Z$ , и подвергнуть эту пластинку деформациям сжатия или растяжения в направлениях осей  $X$ ,  $Y$  или  $Z$ , то можно прийти к следующим выводам:

- 1) сжатие вдоль оси  $X$  вызывает появление разноименных зарядов на обеих гранях, нормальных к оси  $X$  – продольный прямой пьезоэлектрический эффект;
- 2) растяжение вдоль оси  $Y$  вызывает появление разноименных зарядов на обеих гранях, нормальных к оси  $X$  – поперечный прямой пьезоэлектрический эффект;
- 3) при растяжении пластинки вдоль  $X$  или сжатии ее вдоль оси  $Y$  знаки зарядов на указанных гранях изменяются на противоположные;
- 4) сжатие или растяжение вдоль оси  $Z$  не вызывает пьезоэлектрического эффекта.

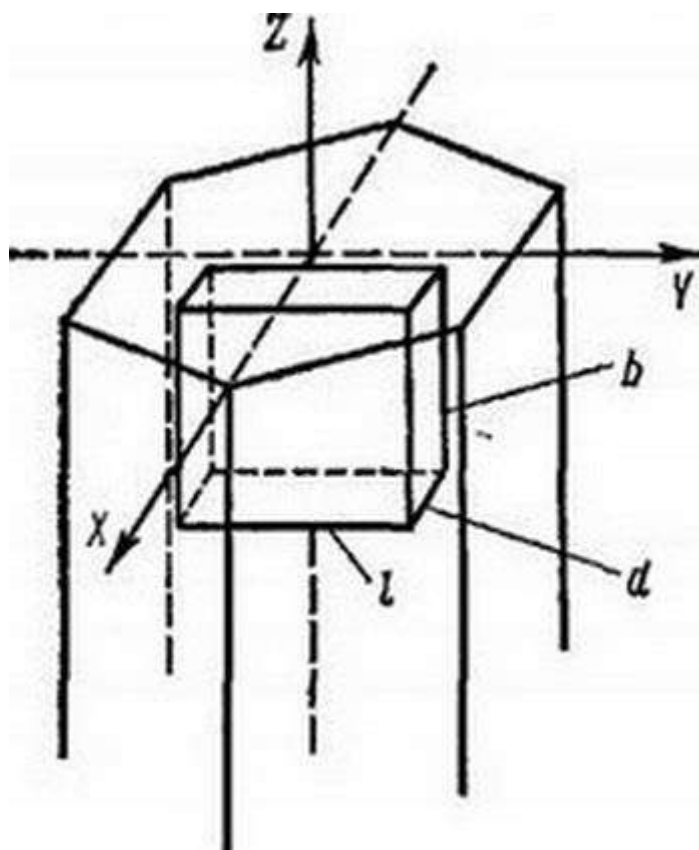


Рис. 13.15. Плоскопараллельная пластина кварца

Существует также обратный пьезоэффект, в этом случае различают продольный и поперечный эффекты, которые состоят в следующем: при внесении кварцевой пластинки в электрическое поле, направленное вдоль оси  $X$ , пластинка деформируется не только в направлении оси  $X$  (продольный обратный пьезоэффект), но и в направлении оси  $Y$  (поперечный обратный пьезоэффект), причем растяжение пластинки вдоль оси  $X$  сопровождается ее сжатием вдоль оси  $Y$ . Изменение направления электрического поля вызывает изменение характера деформации вдоль осей  $X$  и  $Y$ .

Пьезоэффект наблюдается только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Наличие других элементов симметрии, а именно оси или плоскости симметрии, может запрещать появление поляризации в некоторых кристаллографических направлениях, т. е. также ограничивает число кристаллических пьезоэлектриков. В результате пьезоэлектрики могут принадлежать к 20 точечным группам симметрии из 32.

Механизм возникновения пьезоэффекта можно пояснить на примере кварца. В первом приближении кварц ( $\text{SiO}_2$ ) представляет собой размещение ионов кремния ( $\text{Si}$ ) и кислорода ( $\text{O}$ ) в шестиугольных структурных ячейках, плоскость которых перпендикулярна оптической оси  $Z$  кристалла. Каждый ион кремния обладает положительным зарядом  $+4e$ , а каждый ион кислорода – отрицательным зарядом  $-2e$ . В ячейке заряды всех ионов взаимно компенсируются, и в целом она электрически нейтральна. Если для упрощения

рассматривать каждую пару ионов кислорода как одну частицу с зарядом  $-4e$ , то ячейка принимает форму, показанную на рис. 13.16.

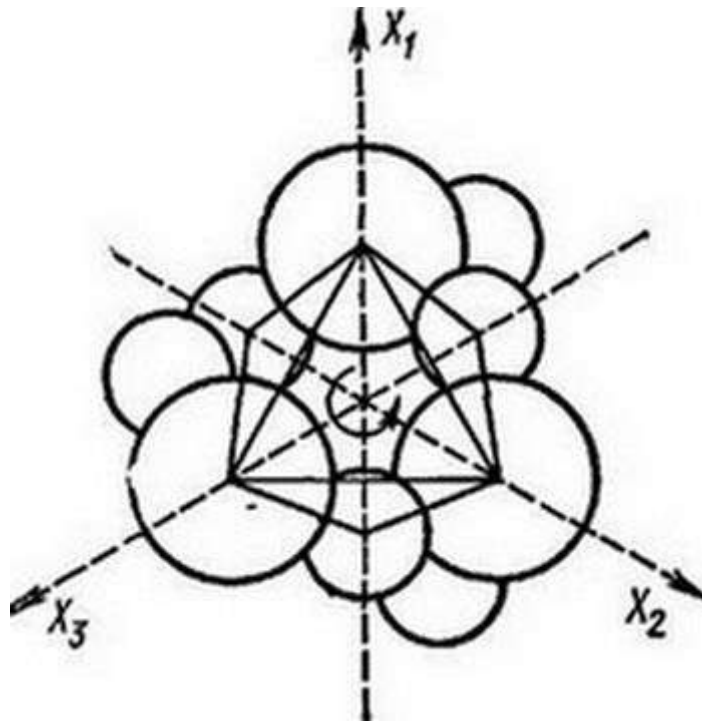


Рис. 13.16. Форма ячейки кварца (большими кружками обозначены ионы кремния, маленькими – ионы кислорода)

Мысленно обозначим две поверхности: поверхность  $A$ , находящаяся на стороне верхних ионов кремния, и  $B$ , расположенная возле нижних ионов кислорода. Предположим теперь, что такая структурная ячейка сжимается в направлении электрической оси  $X_1$ , как показано на рисунке 13.17, б. Тогда верхние ионы кремния 1 будут сдвигаться ближе к центру, становясь практически параллельно с лежащими по бокам ионами кислорода 2 и 6, а расположенный противоположно ион кислорода 4 похожим образом становится между соседними ионами кремния 3 и 5. По этой причине на поверхности  $A$  ячейки возникает отрицательный заряд, а на противоположной поверхности  $B$  – положительный, т. е. имеет место продольный прямой пьезоэлектрический эффект. Если же сжатие происходит в направлении, перпендикулярном оси  $X_1$ , как показано на рисунке 13.17, в, то ионы сдвигаются в перпендикулярных направлениях и на поверхностях  $A$  и  $B$  появляются заряды, противоположные по знаку тем, которые наблюдались в первом случае.

Пользуясь моделью ячейки, можно рассмотреть и обратный пьезоэффект. Если внешнее электрическое поле направлено параллельно оси  $X_1$ , то верхние ионы кремния смещаются к поверхности  $A$ , а ион кислорода – к поверхности  $B$ ; кристалл удлиняется в направлении оси  $X_1$  и сжимается в направлении, перпендикулярном ей, как показано на рисунке 13.17, в.

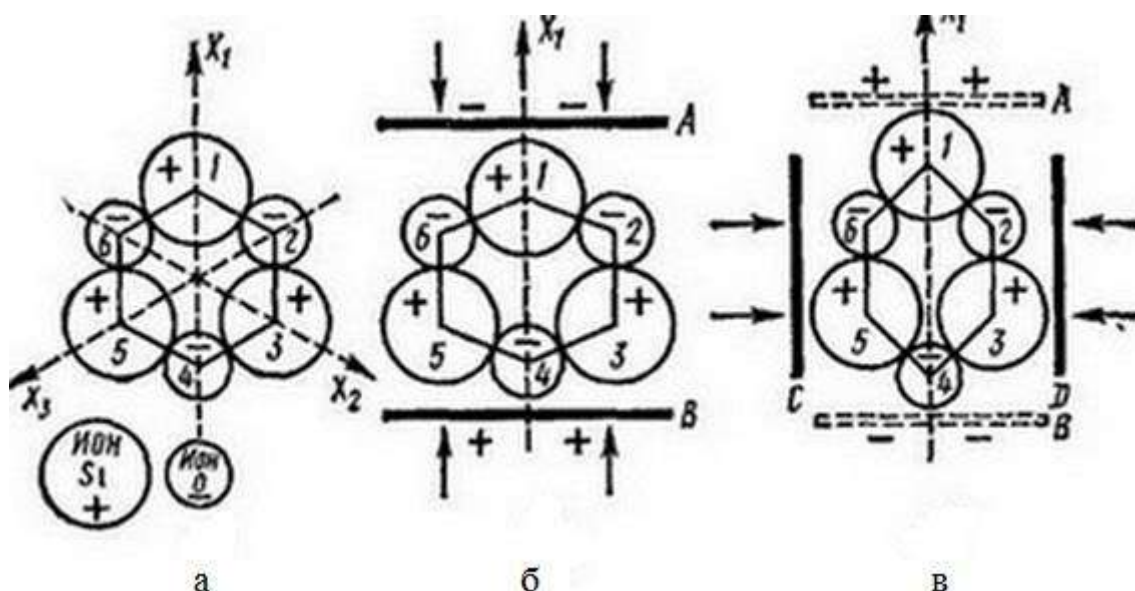


Рис. 13.17. Структурная ячейка кварца:

а – не испытывающая воздействия; б – сжимаемая в направлении электрической оси  $X_1$ ;  
в – сжимаемая в направлении перпендикулярном оси  $X_1$

### 13.2.2. Пьезоэлементы на основе кварца

Кристаллические срезы кварца (рис. 13.18), благодаря комбинации высокой добротности, стабильности, малых размеров и низкой стоимости, в основном используются в качестве пьезоэлектрических резонаторов. Свойства кварца чрезвычайно устойчивы с течением времени при скачках температуры и других изменениях в окружающей среде. Кварц также обладает высокой повторяемостью свойств от одного образца к другому, а его акустические потери достаточно низкие. В зависимости от формы и ориентации кристаллической заготовки, получаемой из кварцевого материала, реализуется множество различных режимов вибрации (рис. 13.19) и частотно-температурных характеристик кварцевого резонатора. Кристаллическая заготовка получается путем разрезания под строго определенными углами к различным осям кристалла.

К примеру, одна из граней среза кварца нормальна к оси  $X$  кристалла, такой срез при сжатии генерирует относительно большое напряжение, которое уменьшается при одинаковой частоте с ростом температуры.

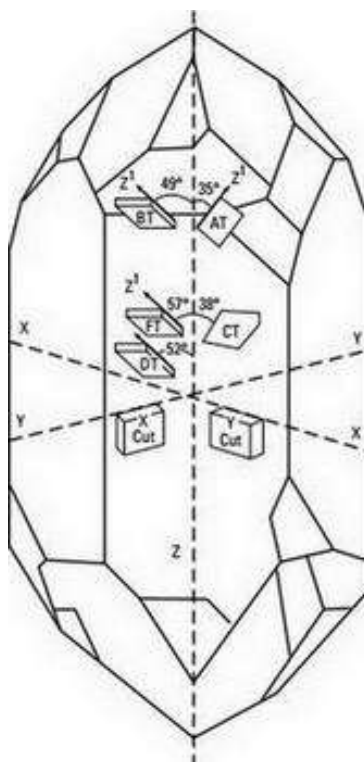


Рис. 13.18. Основные типы срезов кварца

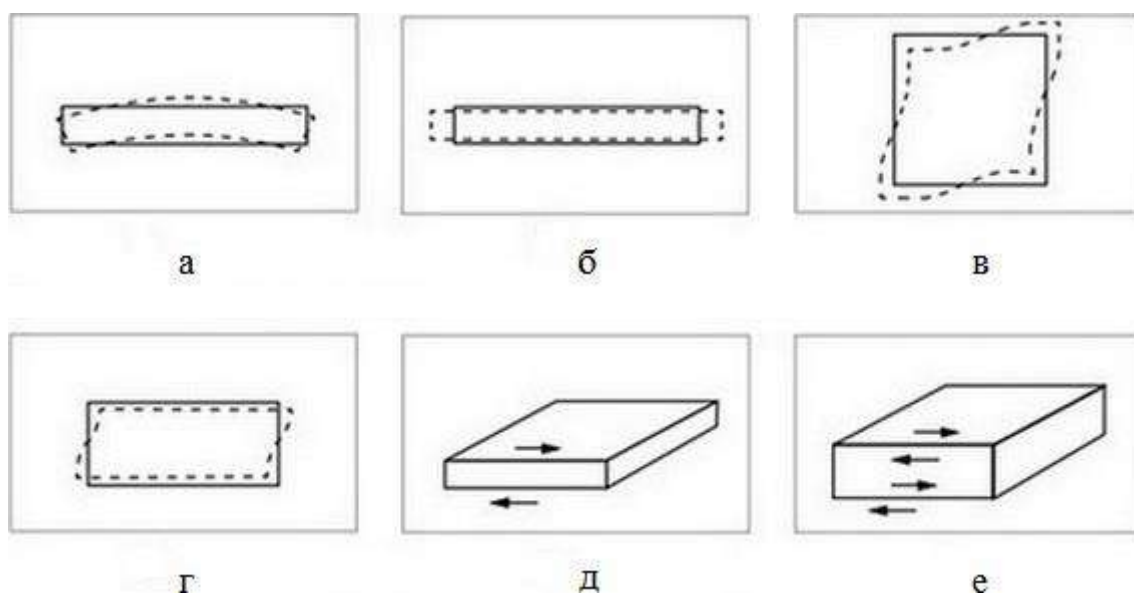


Рис. 13.19. Виды смещения (вибрации) кварца:

а – изгиб; б – растяжение по длине; в – сдвиг по длине; г – сдвиг по толщине; д – основной режим вибрации; е – режим с третьим обертоном

Аналогичное напряжение можно сгенерировать на пластине среза, однако данный срез дает положительный температурный коэффициент. Существуют и более сложные виды срезов, такие как АТ-срез ( $\theta = 34^\circ$ ) и SC-срез ( $\theta = 34^\circ$ ,  $\varphi = 22^\circ$ ), где  $\theta$  и  $\varphi$  – углы вращения по отношению к осям кристалла (рис. 13.20).



Сравнительная характеристика наиболее популярных срезов кварца представлена в табл. 13.2.

### 13.2.3. Резонансная частота кварца

Если срез кристалла кварца подвергнуть внешнему воздействию электрического поля, то будет наблюдаться обратный пьезоэффект. Если напряжение изменять с определенной частотой, кристалл будет вибрировать и производить устойчивый сигнал. Как уже было сказано, режим вибрации зависит от того, с какими параметрами был выполнен срез кристалла. Иллюстрация различных режимов вибрации приведена на рис. 13.19.

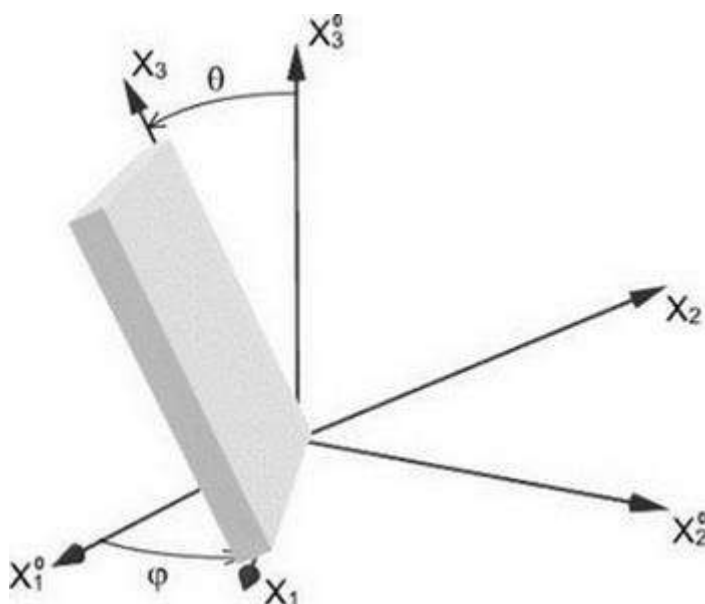


Рис. 13.20. Углы вращения  $\theta$  и  $\varphi$  по отношению к осям кристалла

Таблица 13.2

Характеристика срезов кварца

Срез	Диапазон частот	Тип вибрации	Угол к оси
АТ	300 кГц– 25 МГц	Сдвиг по толщине	3518'
АТ	10 – 150 МГц	Сдвиг по толщине	3515'
ВТ	1– 35 МГц	Сдвиг по толщине	–498'
ВТ	20 – 75 МГц	Сдвиг по толщине	498'
СТ	250 – 1000 кГц	Сдвиг по длине	3740'
ДТ	60 – 500 кГц	Сдвиг по длине	5230'

Колебания резонаторов сопровождаются разного рода потерями. Эти потери имеют как механическую, так и электрическую природу. Основными видами потерь являются: потери на акустическое излучение, внутреннее и

наружное трение, связанные колебания в пьезоэлементе. Трение в поверхностном слое пьезоэлемента, нарушенном процессами обработки, также является источником интенсивных потерь. Потери этого рода значительно больше потерь на внутреннее трение кристалла. Современные технологии позволяют существенно уменьшить разного рода механические потери и гарантировать хороший уровень добротности.

Тонкие пластины из кристалла кварца имеют ярко выраженные резонансные свойства. Когда частота приложенного к пьезорезонатору переменного напряжения изменяется вблизи резонансной частоты упругих колебаний, наблюдается значительное резонансное изменение их амплитуды и, как следствие, такое же резонансное изменение амплитуды тока во внешней цепи. На резонансной частоте амплитуда тока во внешней цепи становится максимальной. Поэтому пьезоэлектрический резонатор, включенный в электрическую цепь, эквивалентен последовательному колебательному контуру с такой же высокой добротностью, какая характеризует резонансные свойства упругих колебаний (рис. 13.21).

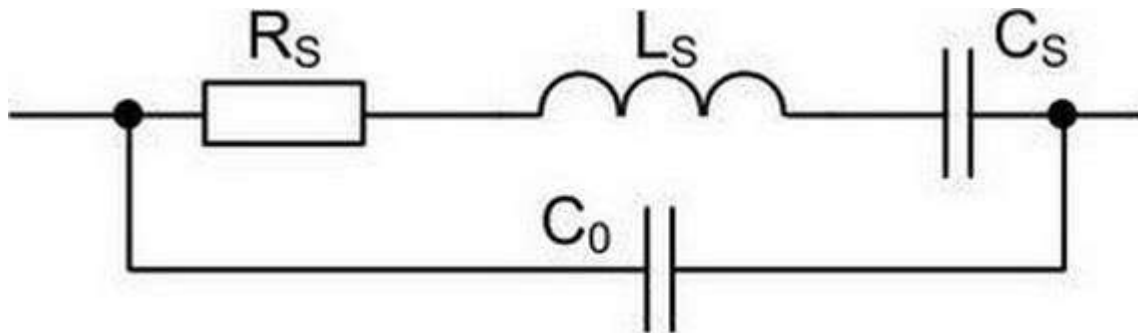


Рис. 13.21. Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора

Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора включает в себя конденсатор ( $C_0$ ), отображающий наличие не связанной с пьезоэффектом емкости, которой обладают электроды, нанесенные на пьезоэлемент, проводники, соединяющие электроды с внешней цепью, и кристаллодержатель, а также емкость ( $C_s$ ), индуктивность ( $L_s$ ) и резистор ( $R_s$ ), являющиеся параметрами колебательного контура, эквивалентного пьезоэлектрическому резонатору. Эти три величины называют динамическими параметрами пьезорезонатора.

Кристалл кварца имеет две резонансные характеристики (рис. 13.22), последовательную резонансную частоту

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (13.15)$$

и антирезонансную частоту

$$f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \cdot \frac{C_s C_0}{C_s + C_0}}} \quad (13.16)$$

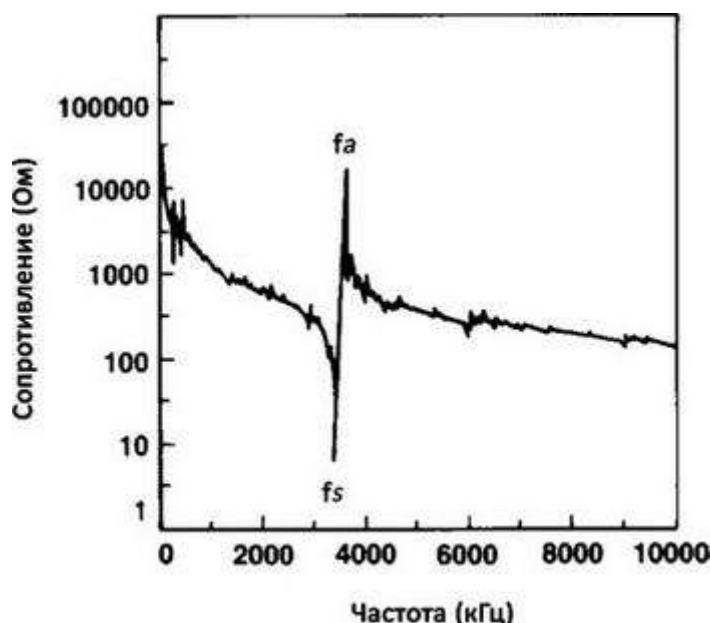


Рис. 13.22. Последовательная ( $f_s$ ) и антирезонансная частота ( $f_a$ )

#### 13.2.4. Метод измерения масс

В 1959 г. Сауэрбрей ввел новый метод измерения масс. Вместо того чтобы измерять изменения угла наклона пучка баланса или смещение в случае пружинных весов, он использовал изменение частоты кварцевого резонатора для измерения массы пленки, осажденной на поверхность кварцевого резонатора. Таким образом, стали доступны измерения вплоть до  $10^{-16}$  кг, в то время как существовавшие в то время коммерческие измерители работали до  $10^{-10}$  кг. Сауэрбрей показал, что масса может быть измерена с помощью вибрации и изменение резонансной частоты связано с изменением массы. Было разработано несколько вибрационных систем измерения. С тех пор как кварцевые резонаторы нашли применение в оборудовании радиотелефонной связи, эффект от инородного материала, осажденного на поверхности резонатора, был известен. Тем не менее количественное отношение появилось только в 1959 г., а именно – было зафиксировано, что уменьшение резонансной частоты тонкопленочного вибрационного кристалла кварца, имеющего тип среза АТ или ВТ тип среза, пропорционально массе осаждаемой на кристалл пленки:

$$\Delta f = -\frac{f_s^2 M_f}{N p_q S} = -\frac{f_s^2 m_f}{N p_q}, \quad (13.17)$$

где  $f_s$  – основная резонансная частота кварца;

$N$  – частотная константа, учитывающая тип среза кварца ( $N_{AT} = 1.67 \times 10^5$  Гц/см<sup>-1</sup>;  $N_{BT} = 2.5 \cdot 10^5$  Гц/см<sup>-1</sup>);

$\rho_q$  – плотность кварца;

$S$  – площадь поверхности осажденной пленки, масса которой равна  $M_f$ .

Изменения резонансной частоты (с нагрузкой и без нее) показаны на рис. 13.23.



Рис. 13.23. Изменения резонансной частоты (с нагрузкой и без нее)

Прибор для измерения массы, введенный Сауэрбрейем, был назван Quartz Crystal Microbalance (QCM) и стал в значительной степени использоваться для измерения малых масс (рис. 13.24). Ядром QCM является кристалл кварца АТ-среза, имеющий форму круга и работающий в режиме сдвига по толщине. Такая геометрия обеспечивает стабильное колебание с малым откликом на изменения температуры. К кристаллу от схемы генератора подводятся электроды из платины или золота, и он колеблется на резонансной частоте, определяемой исходя из массы, геометрии, температуры, приложенного напряжения и т. д.

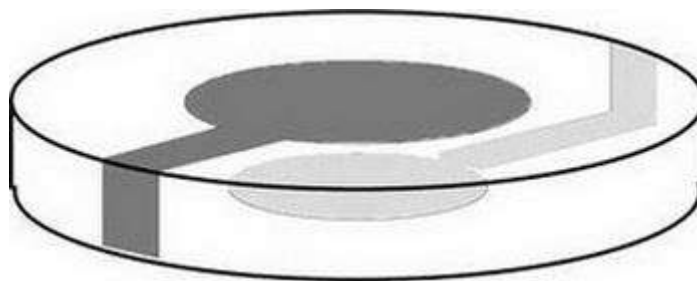


Рис. 13.24. Схема QCM-датчика

Поскольку кварцевый резонансный датчик QCM предназначен для контроля толщины пленки непосредственно в процессе осаждения, датчик

устанавливается в вакуумной камере, где происходит осаждение, вблизи подложки с растущей пленкой (рис. 13.25).

Система контроля состоит из непосредственно кварцевого датчика, системы мониторинга и канала проходного соединения для передачи информации от датчика до монитора. Остановимся подробно на каждой из этих частей.

### 13.2.5. Кварцевый сенсор

Конструктив кварцевого сенсора представлен на рис. 13.26. Кварцевый кристалл имеет стандартные для подобных сенсоров параметры. Это, как правило, кристалл АТ-среза. Однако если требуется применение при более высоких температурах либо повышенная точность измерений, то можно использовать кристаллы SC- и IT-среза соответственно.

Чаще всего кварцевые кристаллы, производимые для резонансных датчиков, делятся на три вида по рабочей частоте: 5, 6 и 10 МГц. Быстрые вычисление и детектирование, используемые во время нанесения пленки, опираются на приближенные данные, получаемые с кварцевого датчика, поэтому в большинстве случаев разбежка в рабочей частоте между кристаллами как не увеличивает, так и не уменьшает ощутимой точности детектирования. По этой причине выбор часто падает на датчики 5 МГц, так как они имеют самую низкую цену, однако есть ряд случаев, когда для нормальной работы кварцевого резонатора подходят только кристаллы 6 или 10 МГц.

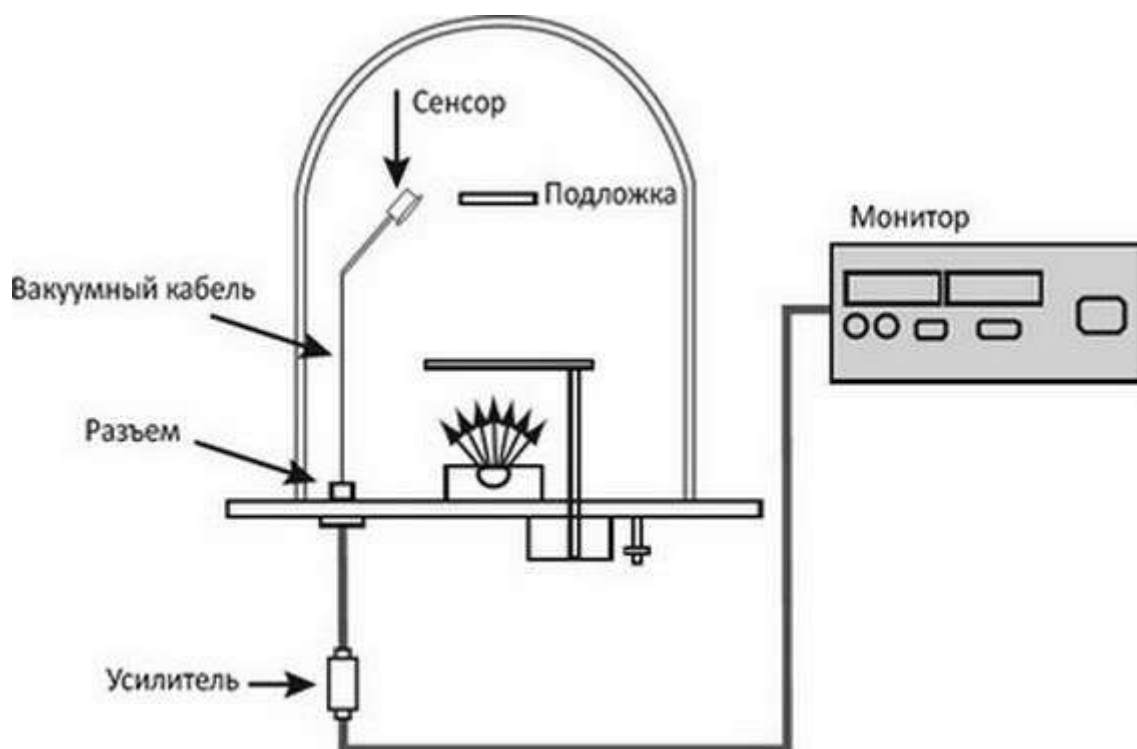


Рис. 13.25. Схема расположения кварцевого датчика в камере, где происходит нанесение пленки

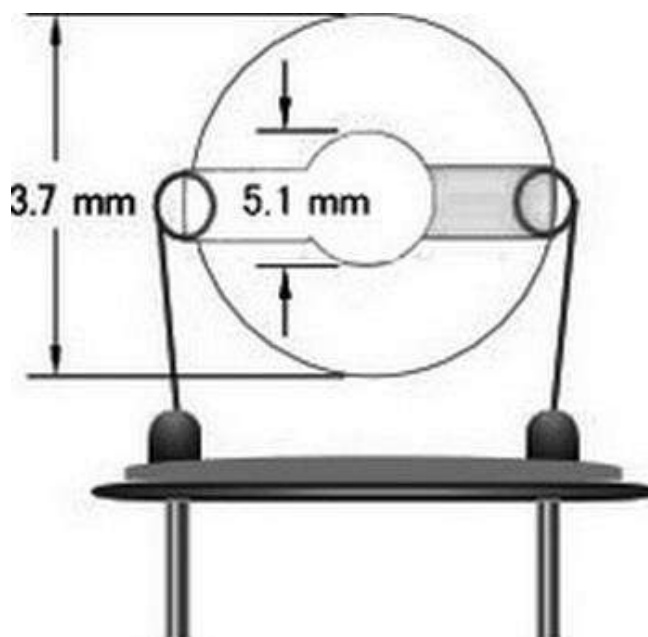


Рис. 13.26. Конструктив кварцевого сенсора

Кристалл имеет два электрода в зависимости от выставляемых требований к датчику (материал и топология пленок, температурные условия нанесения, цена на датчик). Электроды могут быть золотыми или серебряными. Если условия таковы, что есть возможность использовать оба типа электродов, то рекомендуется использовать золотые, так как они имеют более высокую скорость отклика, а это необходимо для быстрого реагирования на изменение во время нанесения пленки.

Диаметр кристалла составляет  $13.7 \pm 0.1$  мм – это стандартный диаметр сенсора. Под данный размер создается большинство проходных соединений, что дает большую мобильность подбирать кристаллы и использовать детектор в разных условиях с отличающимися требованиями к кристаллу, при этом использовать одно и то же проходное соединение и подключенные к нему систему мониторинга и контроллер.

### 13.3. Эллипсометрический датчик измерения толщины пленок в процессе создания

Существует обширный арсенал методов оптического контроля толщины пленок в процессе их создания: оже-спектроскопия, дифракция медленных и быстрых электронов, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, атомно-силовая микроскопия и др. Особое место в этом ряду занимает эллипсометрия.

*Эллипсометрия* – это оптический метод, основанный на анализе состояния поляризации отраженного от образца света. Он используется для исследования физико-химических свойств поверхности, ее морфологии, для измерения толщин многослойных структур и характеристики оптических свойств тонких пленок.

Эллипсометрические измерения имеют высокую чувствительность. Еще одно важное свойство метода – это неразрушающее и невозмущающее воздействия измерений. Энергия зондирующих фотонов составляет всего несколько электронвольт. Их воздействие на исследуемую структуру пренебрежимо мало по сравнению, например, с электронным пучком, где энергия электронов на 3–4 порядка выше.

Исследуемый образец не нужно специально готовить к измерениям. Тем самым проявляется еще одно качество этого метода – *экспрессность*. Слабые требования к условиям измерения, а также бесконтактность и высокое быстродействие делают метод очень технологичным и позволяют использовать его для контроля непосредственно в процессе создания структур

При отражении света от гладкой поверхности состояние его поляризации изменяется. Степень этого изменения зависит от свойств поверхности и поверхностных пленок, а также от угла падения света. Регистрация изменений в поляризации отраженного света и их интерпретация составляют содержание метода эллипсометрии. Пусть плоская волна падает на поверхность (рис. 13.27), расположенную в плоскости  $XY$ , а ее волновой вектор  $k_i$  лежит в плоскости  $XZ$ . Тогда электрические векторы падающей и отраженной волн записываются в виде

$$E_i(r, t) = E_{0i} \cdot \exp(i(\omega t - k_i r)) \text{ и } E_r(r, t) = E_{0r} \cdot \exp(i(\omega t - k_r r)),$$

где  $k_i$  и  $k_r$  – волновые векторы;

$E_{0i}$ ,  $E_{0r}$  – комплексные амплитуды падающей и отраженной волн;

$\omega$  – частота волны.

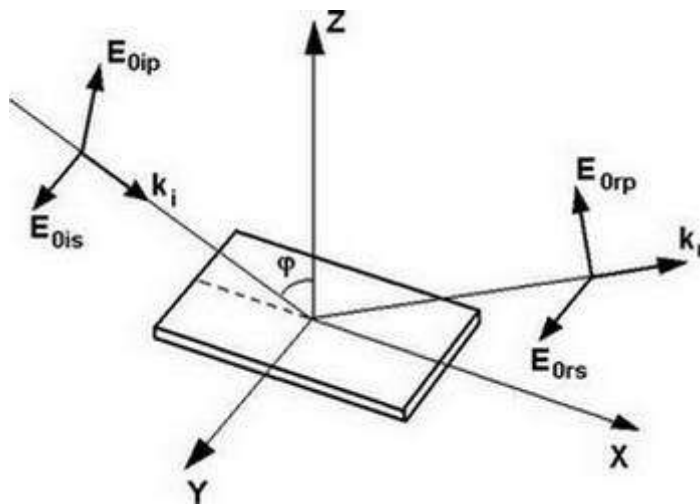


Рис. 13.27. Отражение плоской электромагнитной волны от поверхности

Плоскость, проведенная через векторы  $k_i$  и  $k_r$ , называется плоскостью падения света, на рис. 13.27 эта плоскость совпадает с плоскостью  $XZ$ . Векторы амплитуд электрического поля удобно разложить на составляющие, лежащие в плоскости падения и перпендикулярно ей, так называемые  $p$ - и  $s$ -компоненты  $E_{0i} = e_p E_{0ip} + e_s E_{0is}$ ,  $E_{0r} = e_p E_{0rp} + e_s E_{0rs}$ , где  $e_p$  и  $e_s$  – единичные векторы

вдоль соответствующих направлений. Комплексными коэффициентами отражения называются отношения амплитуд отраженной и падающей волн  $R_p = E_{0rp}/E_{0ip}$ ,  $R_s = E_{0rs}/E_{0is}$ . Модуль комплексного коэффициента отражения показывает, во сколько раз изменилась амплитуда волны после отражения, а фаза характеризует фазовый сдвиг между падающей и отраженной волнами. Значения коэффициентов отражения определяются свойствами отражающей поверхности, геометрией поверхности или рельефом, а также внешними по отношению к поверхности параметрами: углом между нормалью к поверхности и вектором  $k_i$ , показателем преломления внешней среды  $n_a$  и длиной волны  $\lambda$ , которые всегда считаются известными величинами. Поскольку значения коэффициентов отражения содержат в неявном виде информацию о структуре отражающей поверхности, то полезно было бы измерить их амплитуды и фазы. Однако экспериментально при эллипсометрических измерениях определяются не сами коэффициенты отражения, а их отношение, представленное в виде

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}. \quad (13.18)$$

Параметры  $\psi$  и  $\Delta$  называются поляризационными параметрами и являются измеряемыми в эксперименте величинами. Иногда для удобства записанную выше комбинацию эллипсометрических параметров обозначают символом  $\rho$  и называют комплексным эллипсометрическим параметром. Физический смысл эллипсометрических параметров простой –  $\tan \psi$  показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для  $p$ - и  $s$ -волн, а параметр  $\Delta$  равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении.

Приборы для измерения эллипсометрических параметров называют схемами эллиптических измерителей.

На рис. 13.28 изображена оптическая схема нулевых эллипсометрических измерений. Ее называют PCSA-схемой по названию основных элементов. Луч света после прохождения поляризатора  $P$  приобретает линейную поляризацию. Компенсатор  $C$  превращает эту линейную поляризацию в эллиптическую. После взаимодействия с исследуемым образцом  $S$  свет в общем случае будет иметь эллиптическую поляризацию. Однако если специальным образом подобрать азимуты поляризатора и компенсатора, то можно добиться, чтобы отраженная волна вновь стала линейно поляризованной; этого можно добиться также вращением одного из элементов при фиксированном азимуте второго. При этом фазовые сдвиги, создаваемые компенсатором и образцом, взаимно компенсируют друг друга. Именно это функциональное назначение компенсатора лежит в основе его названия. Легко понять, что линейную поляризацию отраженного света можно загасить, поместив на пути луча второй поляризатор в скрещенное положение, т. е. такое положение, когда его ось пропускания перпендикулярна поляризации отраженной волны. Этот



поляризатор выполняет функцию анализирующего устройства, поэтому называется анализатором и обозначен на схеме буквой А.

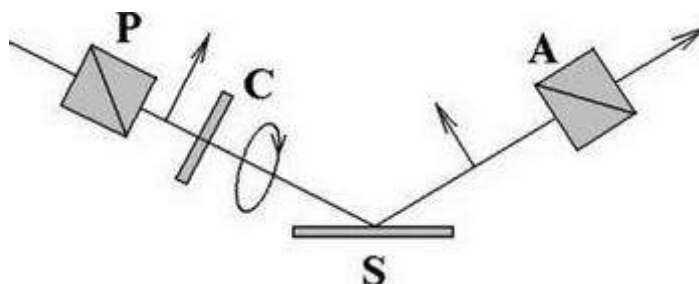


Рис. 13.28. Оптическая схема нулевых эллипсометрических измерений

На рис. 13.29 представлена классическая схема фотометрических измерений PSA. В этой схеме регистрируется интенсивность света, отраженного от образца и прошедшего через оптические элементы. Если азимут поляризатора не совпадает с  $\rho$ - или  $s$ -направлением, то свет, отраженный от поверхности, будет в общем случае иметь эллиптическую поляризацию. Параметры эллипса поляризации зависят от эллипсометрических параметров образца. Устанавливая поочередно анализатор в различные положения и регистрируя интенсивность прошедшей волны можно восстановить параметры эллипса и тем самым определить эллипсометрические параметры. Стоит обратить внимание, что в отличие от  $\psi$  значение  $\Delta$  определяется в этой схеме неоднозначно (параметры образца  $\Delta_1 = 180^\circ + \delta$  и  $\Delta_2 = 180^\circ - \delta$  образуют одни и те же эллипсы, отличающиеся только направлением вращения электрического вектора). Чтобы избежать этой неоднозначности, в оптический тракт вставляют компенсатор.

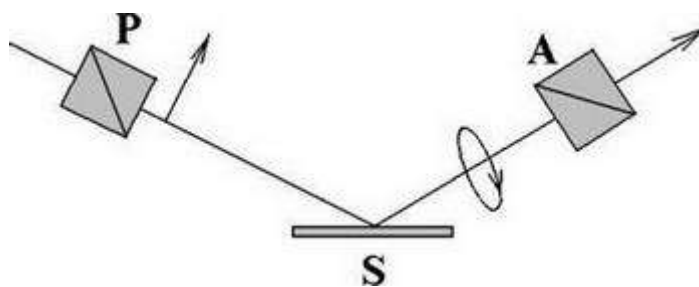


Рис. 13.29. Классическая схема фотометрических измерений PSA

В основе эллипсометра, предназначенного для определения толщины пленки непосредственно в процессе нанесения, лежит статическая фотометрическая схема измерений, изображенная на рис. 13.30.

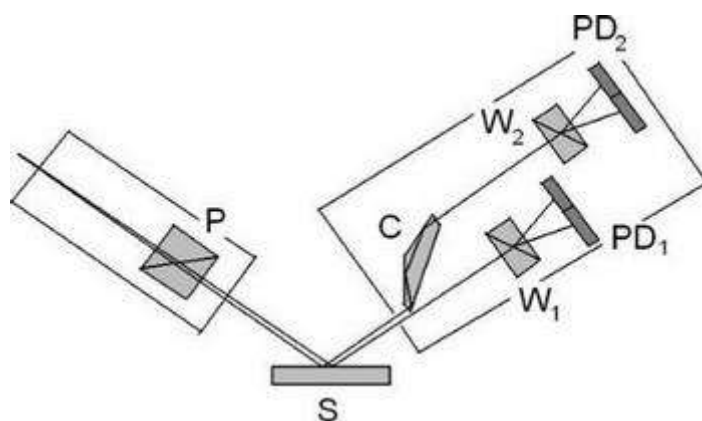


Рис. 13.30. Статическая фотометрическая схема измерений

В этой схеме слабо расходящийся пучок света поляризуется поляризатором  $P$ , отражается от исследуемой поверхности  $S$  и попадает в анализирующий блок эллипсометра. В нем свет расщепляется по фронту на два пучка: один проходит напрямую, второй отщепляется призмой полного внутреннего отражения  $C$  и попадает в канал с призмой. В обоих каналах свет расщепляется поляризационными призмами Волластона  $W_1$  и  $W_2$  на два пучка с взаимно ортогональными поляризациями. Эти пучки засвечивают площадки фотодетекторов  $PD_1$  и  $PD_2$ , с которых снимаются электрические сигналы:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  – пропорциональные интенсивностям этих пучков. Эллипсометрические параметры рассчитываются на основании значений измеренных сигналов. Данная схема простая, на ней легко описывать суть работы поляризатора, компенсатора фотодетекторов и всего прибора в целом. Конструкция современного эллипсометрического прибора в основном получена из набора специальных требований и ограничений, вытекающих из использования его в качестве устройства, работающего непосредственно в процессе роста пленки (рис. 13.31).

В стандартных конфигурациях эллипсометра луч света сначала фиксируется в определенное поляризационное состояние с помощью поляризатора, а затем отражается от передней стороны зондируемой пленки под определенным углом падения. После отражения измененное состояние поляризации измеряется анализатором.

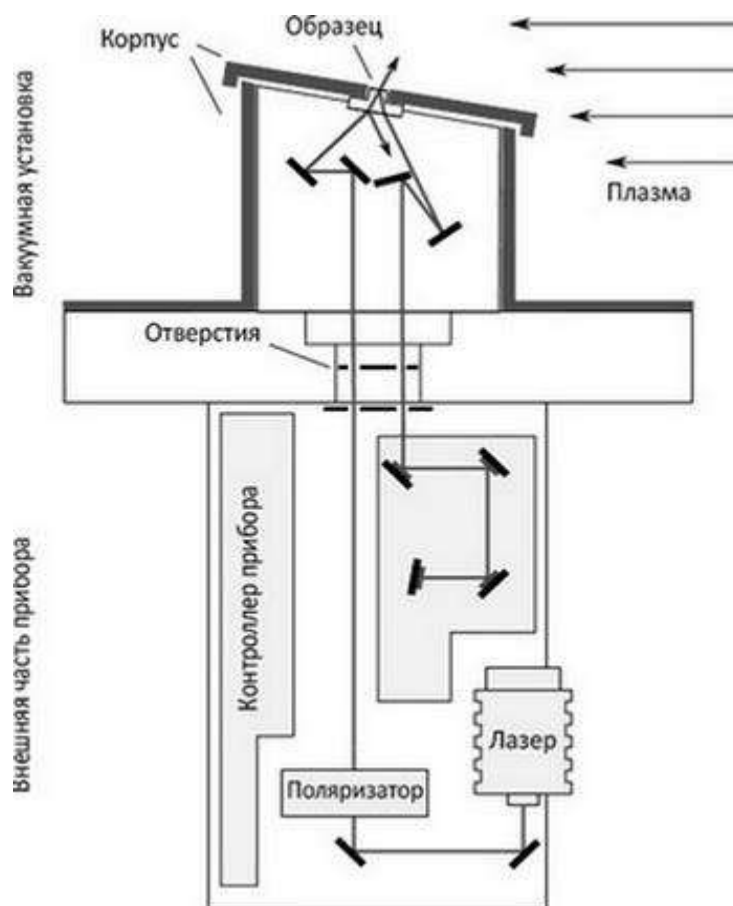


Рис. 13.31. Схема эллипсометра

Современные эллипсометрические устройства, предназначенные для измерения толщин пленок во время их роста, имеют достаточно сложную конструкцию. В передней ближней к образцу части устройства имеется так называемый зонд, который в свою очередь имеет небольшой головной узел. Головной узел состоит из двух частей: головного зонда эллипсометра и охлаждающего корпуса, обеспечивающего тепловую защиту электроники эллипсометра. Головной зонд включает в себя поляризатор и анализатор, чем достигается компактность узла.

Оптический путь также приобрел специфику. Зондирующий световой пучок генерируется с помощью диодного лазера из части, находящийся вне вакуумного оборудования. Лазерный луч прибора падает на зондируемую пленку с задней стороны через прозрачную подложку. Оптика, находящаяся внутри вакуумной установки, имеет графитовую защиту от высоких температур и частиц из плазмы.

Для эллипсометрических измерений выбор материала экрана имеет решающее значение. Используемые материалы не должны влиять на степень поляризации света, проходящего через него. На практике же любые экраны всегда вносят небольшое смещение. Поэтому целесообразно использовать оптически изотропный материал с низкой остаточной деформацией.

Поляризаторы предназначены для формирования линейно поляризованного пучка света. На рис. 13.32 схематически изображен поляризатор, который называется призмой Глана – Фуко. Он состоит из двух одинаковых призм, вырезанных из оптически одноосного кристалла и соединенных друг с другом так, что между ними остается воздушный зазор. В качестве материала призм обычно используют кальцит. Оптическая ось кристалла ориентирована перпендикулярно плоскости рисунка. Угол между гранями призмы выбирают таким образом, чтобы луч, поляризованный в плоскости рисунка  $E_0$ , испытывал полное внутреннее отражение на границе призм с воздушным зазором и падал на почерненную грань призмы. При этом луч, поляризованный перпендикулярно плоскости рисунка  $E_e$ , преломляется в воздушный зазор и проходит через вторую призму, не меняя своего направления. Таким образом, на выходе призмы всегда будет только необыкновенная волна, с поляризацией, ориентированной перпендикулярно плоскости рисунка. Это направление называют осью пропускания поляризатора. Вторая призма нужна только для того, чтобы сохранить исходное направление луча, и может быть выполнена из изотропного материала.

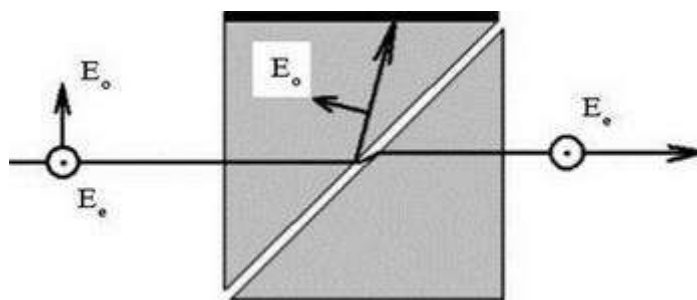


Рис. 13.32. Схематическое изображение поляризатора, призма Глана – Фуко

На рис. 13.33 показан другой тип поляризатора – призма Рошона, которая состоит из двух половинок, посаженных на оптический контакт. Оптические оси обеих половинок показаны на рисунке линиями или точками. В этом устройстве обыкновенный луч проходит без изменения, в то время как необыкновенный луч отклоняется на некоторый угол и выводится из оптического тракта. Угол отклонения необыкновенного луча зависит от величины двулучевого преломления  $n_0 - n_e$  и составляет обычно несколько градусов.

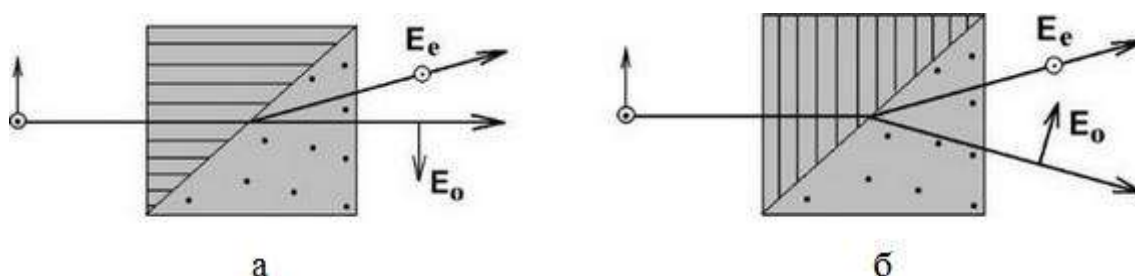


Рис. 13.33. Схематическое изображение поляризатора, призма Рошона

Фазосдвигающее устройство, или компенсатор, предназначено для относительного сдвига фаз между двумя ортогонально поляризованными волнами (положение а и б). В эллипсометрах различного типа, работающих при одной длине волны, чаще всего используется в качестве компенсатора пластина кристаллического кварца, оптическая ось которой ориентирована в плоскости поверхности пластины. Если предположить, что свет распространяется вдоль оси  $Y$ , произвольная пластина толщиной  $d$  располагается так, чтобы ее плоскость была перпендикулярна этому лучу, а ориентация оптической оси совпадала с направлением координатной оси  $Z$ , как это показано на рис. 13.34. При прохождении через пластину фаза волны изменяется на величину, равную произведению волнового вектора на толщину  $d$ , если пренебречь эффектом многократных отражений света на пластине. Для поляризации  $E_x$  и  $E_z$  соответствующие набег фаз обыкновенной и необыкновенной будут равны  $\delta_x = 2\pi n_o d/\lambda$  и  $\delta_z = 2\pi n_e d/\lambda$ , а относительный сдвиг фаз  $\delta_x - \delta_z$  выражается формулой

$$\delta_c = 2\pi(n_o - n_e)d/\lambda. \quad (13.19)$$

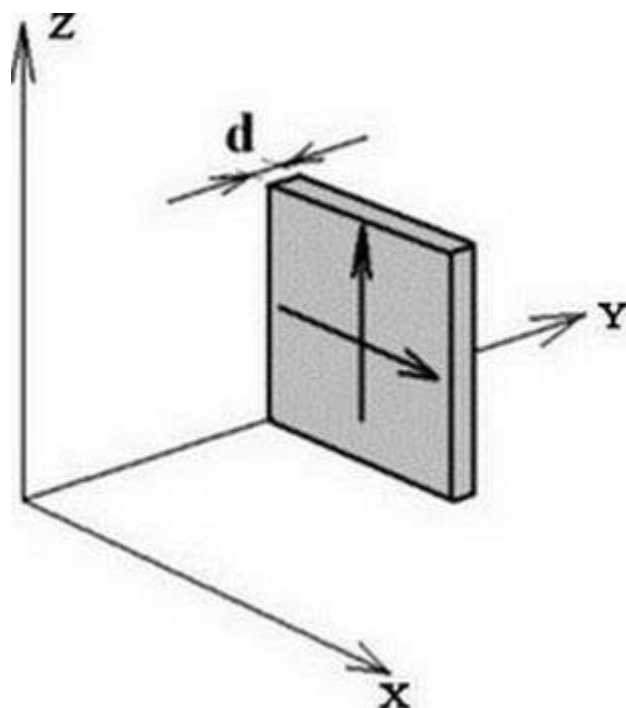


Рис. 13.34. Схема пластины компенсатора

Толщину пластины подбирают таким образом, чтобы относительный фазовый сдвиг был равен  $\pi/2$ . В длинах волн это соответствует  $\lambda/4$ , поэтому такая пластина называется четвертьволновой пластиной или компенсатором с

набегом фаз  $\lambda/4$ . Направления в плоскости пластины вдоль оптической оси и перпендикулярно ей называются осями компенсатора.

Данный тип компенсатора достаточно прост в изготовлении, однако обладает некоторыми недостатками, так как технологически трудно изготовить пластину заданной толщины с требуемой точностью. Для кварца, например,  $n_o - n_e = 0.009$ , поэтому отклонение толщины пластины всего на 0.2 мкм приведет к изменению  $\delta_c$  более чем на  $1^\circ$ . Но главное заключается в другом. Температурные изменения  $\delta_c$  за счет термооптического эффекта, изменения показателей преломления с температурой или за счет термического расширения будут пропорциональны толщине  $d$ . Из соображений технологического характера пластины изготавливают толщиной порядка 0.5 мм, так, чтобы фазовый сдвиг был равен  $2\pi m + \pi/2$ , где  $m$  – целое число. Поэтому фазовый сдвиг компенсатора сильно меняется с температурой. Реально эти изменения составляют величину порядка  $10^\circ$  при изменении температуры от 15 до 30 °С. Второй недостаток кварцевого компенсатора проявляется при проведении спектральных эллипсометрических измерений. Фазовый сдвиг сильно зависит от длины волны, поэтому кварцевый компенсатор может быть использован как четвертьволновая пластина только в очень узком спектральном интервале. Отчасти эта проблема может быть решена, если вместо кварца использовать оптическую слюду. Для слюды легко получить пластины толщиной десятки микрон.

Однако радикально проблема решается с помощью ахроматических компенсаторов. На рис. 13.35, а показан один из таких компенсаторов, который называется ромбом Френеля. Принцип действия ромба Френеля основан на явлении полного внутреннего отражения. Сдвиг фаз при полном внутреннем отражении зависит от угла падения света и показателя преломления материала. Геометрия устройства выбирается таким образом, чтобы после двукратного отражения суммарный сдвиг фаз между ортогональными компонентами составлял  $\pi/2$ . При прохождении света через ромб Френеля луч сохраняет свое направление, но испытывает параллельное смещение. Это недопустимо, если в процессе измерений требуется азимутальное вращение компенсатора. В этом случае используется двойной ромб Френеля (рис. 13.35, б), который получается путем склеивания двух ромбов Френеля и обеспечивает соосность входящего и выходящего лучей.

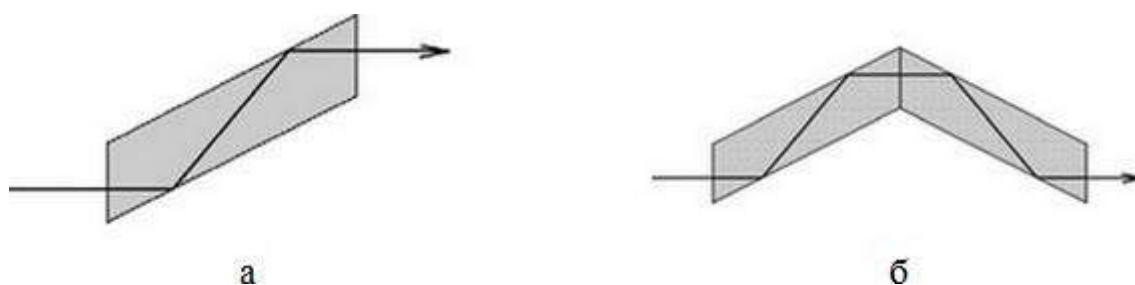


Рис. 13.35. Компенсаторы:

а – ромб Френеля; б – двойной ромб Френеля

Одним из наиболее важных компонентов головной части зонда является источник зондирующего луча. Устойчивый луч света, имеющий на выходе постоянное состояние поляризации, имеет решающее значение для функционирования эллипсометра. Перед лазерной системой стоит задача придерживаться высокого уровня миниатюризации, необходимой для соблюдения пространственных ограничений в пределах головной части зонда, быть достаточно гибкой для модификаций и иметь стабильный световой луч.

Диодные лазеры способны выполнять эти требования стабильности луча при малом форм-факторе, который необходим для интеграции в эллипсометрический зонд. Однако они имеют меньшую стабильность, чем газовые лазеры. Там не менее существуют разные методы для стабилизации луча лазерного диода. Наиболее распространенным является использование внешней решетки. Ограничения в устойчивости центральной длины волны лазера не критичны для эллипсометрических целей. Идеальное зеркало для эллипсометрии должно отражать поляризованный свет на 100 % и не должно вводить какого-либо фазового сдвига. Несмотря на то что полностью диэлектрические зеркала могут быть приближены к этой идеализации, они не подходят для высоких температур, сопровождающих процессы в вакуумной установке. Поэтому используются термически устойчивые металлические зеркала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемый читатель!

Изучив данное учебное пособие, вы ознакомились с некоторыми типами наиболее востребованных датчиков. Несмотря на то что практически каждый год появляются новые датчики в разных областях жизнедеятельности человека, каждый из них работает по одному из общеизвестных физико-химических принципов. Именно поэтому мы уделили особое внимание краткому описанию этих принципов и показали, как современными конструктивно-технологическими приемами можно эффективно использовать заложенные в данных принципах скрытые возможности и получить оригинальное техническое устройство, позволяющее контролировать, регулировать или улучшать требуемый процесс изготовления или параметры и характеристики конкретного изделия.

Вы также обратили внимание на то, что схмотехнически любой датчик гораздо проще интегральной схемы и технологические приемы изготовления кремниевого датчика и кремниевой ИС формально одинаковы (окисление, легирование, литография и т. д.). Однако у датчиков толщина технологических слоев на одном и том же датчике может колебаться от единиц нанометров до сотен микрометров. Эти незначительные (в кавычках) отличия приводят к тому, что некоторые операции, особенно при реализации актюаторов, практически гораздо сложнее, чем в технологии самой современной ИС. Поэтому мы уделили повышенное внимание таким специфичным чисто производственным процессам.

Именно такой сугубо прагматичный подход к изучаемому материалу позволит вам стать востребованным и успешным специалистом в очень интересном и нужном деле – производстве датчиков. В добрый путь!

Автор выражает сердечную благодарность студентам Анастасии Ткач, Анастасии Архиповой, Дмитрию Мир, Владимиру Федосенко, Родиону Новак, Николаю Шабуневичу и Артему Радевичу за большую помощь в оформлении данного учебного пособия.

*С уважением, автор.*



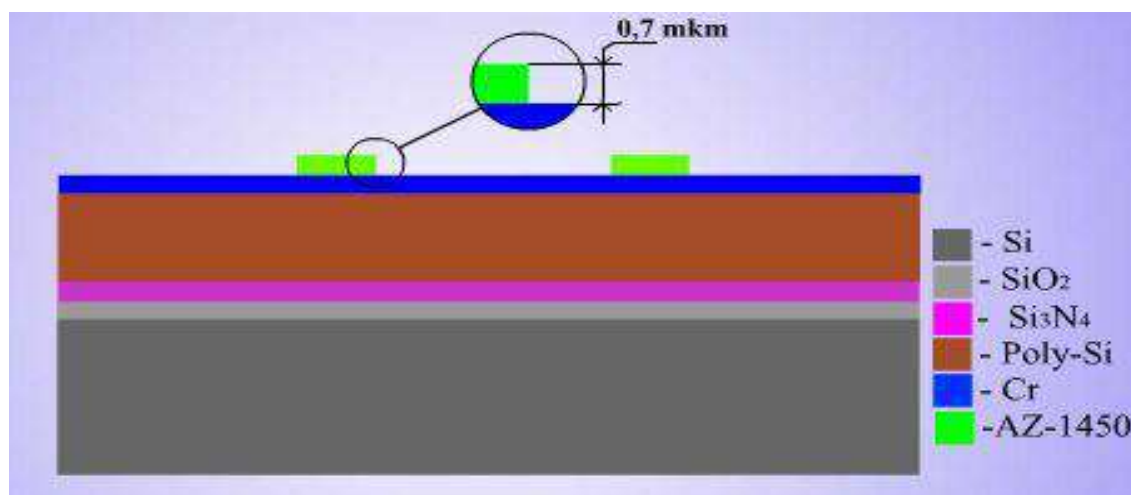
## УПРОЩЕННЫЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

### Изготовление верхней части



Исходная подложка – кремний КЭФЗ-4.5.

### Нанесение технологических слоев



1. Образование диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной 1 мкм происходит во влажной среде при  $T = 1200^\circ\text{C}$ ,  $t = 55$  мин.

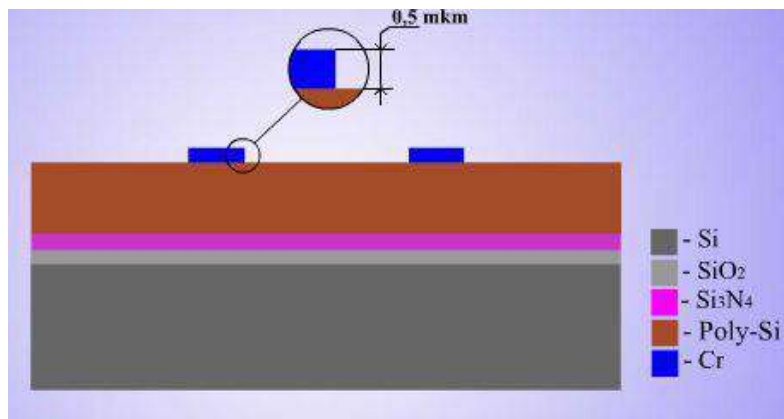
2. Образование слоя нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) толщиной 1 мкм происходит при осаждении из газовой фазы (давление от 0.1–0.01 Па, температура 600 – 650 °C, время 1–1.5 ч).

3. Слой поликристаллического кремния толщиной 2,5 мкм был получен разложением силана ( $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2 \text{H}_2$ ). (Давление от 25–100 Па, температура 600–650 °C, время 4–6 ч).

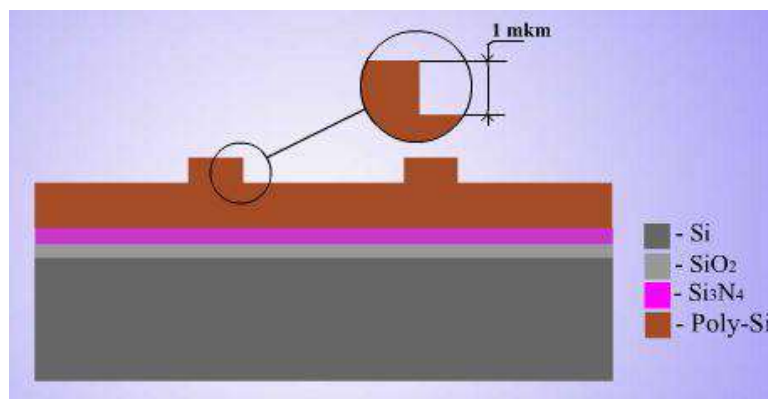
4. Нанесение слоя хрома толщиной 0,5 мкм происходит методом магнетронного распыления (плазмообразующий газ – аргон (Ar),  $P = 10^{-2} - 1$  Па,  $T = 200-300^\circ\text{C}$ ,  $t = 1-1,5$  мин).

5. Нанесение позитивного фоторезиста AZ-1450, экспонирование, проявление проэкспонированной области.

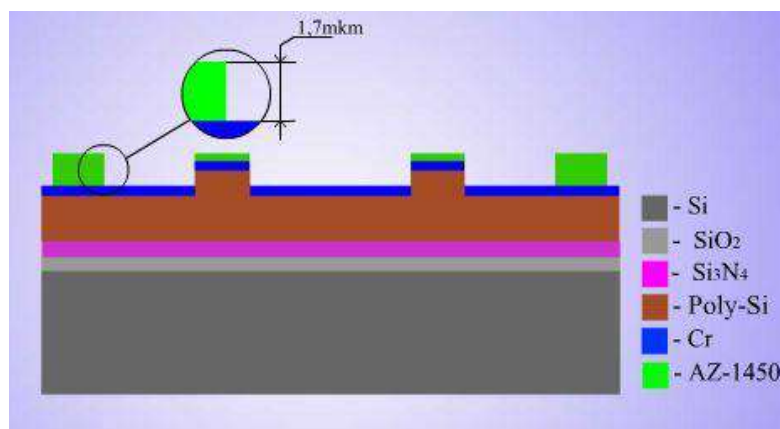
## Формирование топологии



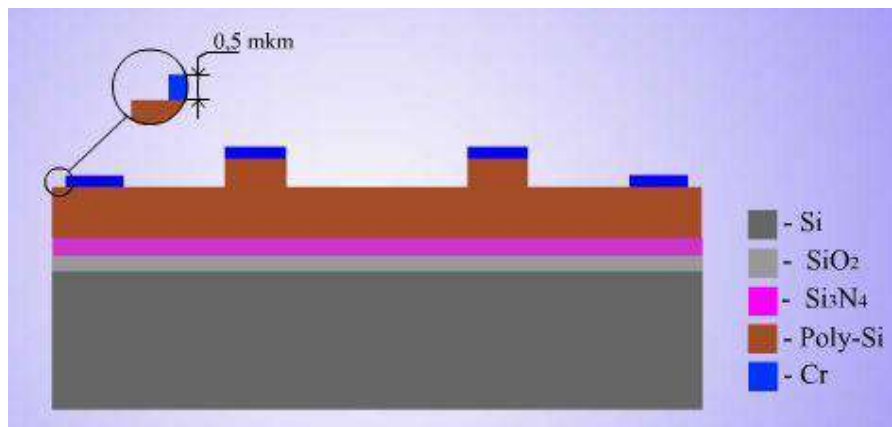
1. Травление хрома в растворе красной кровяной соли ( $2K_3[Fe(CN)_6] + 2KOH$ ) в течение 10 мин.
2. Проявление непроэкспонированного фоторезиста.



3. Травление кремния на толщину 1 мкм.
4. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.

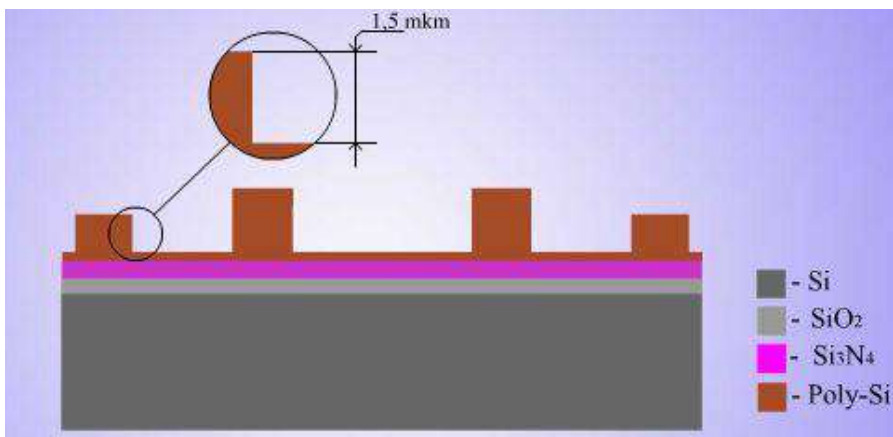


5. Нанесение хрома методом магнетронного распыления.
6. Нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



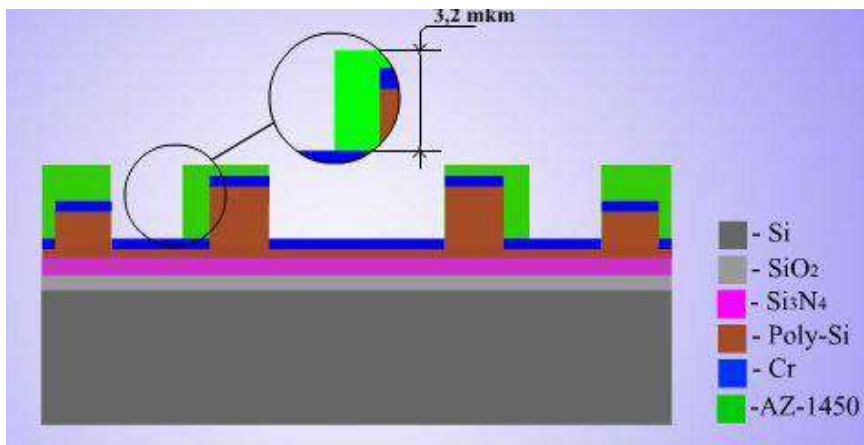
7. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.

8. Удаление непроэкспонированного фоторезиста в кислородной плазме.



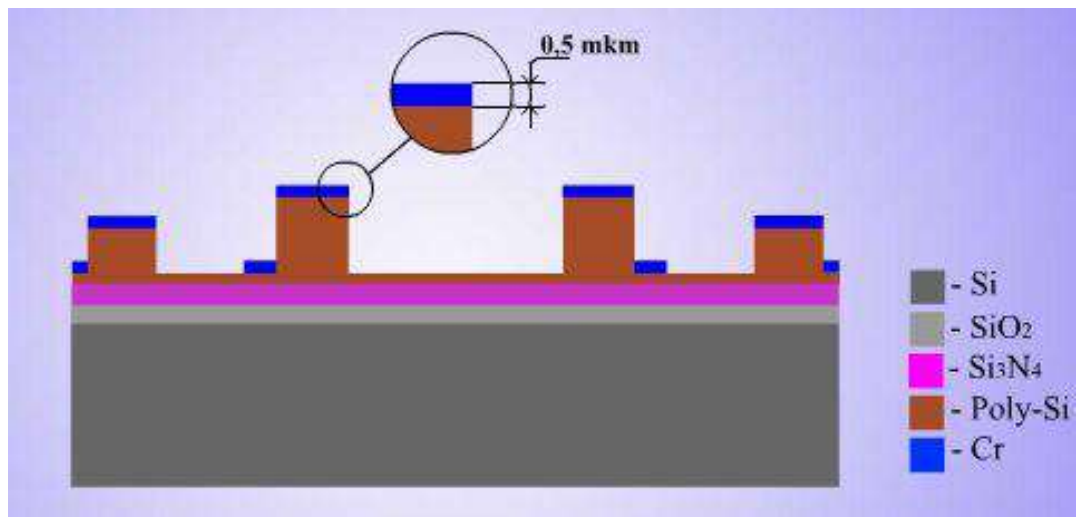
9. Травление поликремния на 1.5 мкм.

10. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.

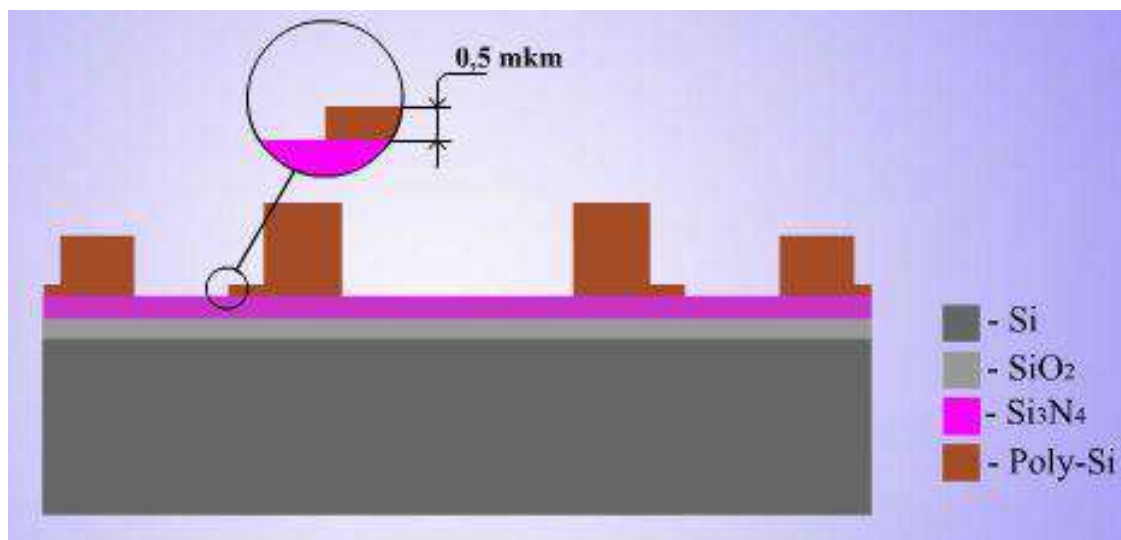


11. Нанесение хрома.

12. Нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



13. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
14. Удаление непроэкспонированного фоторезиста.



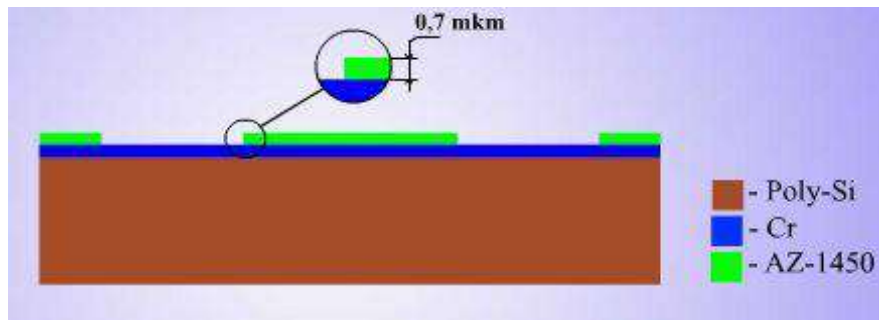
15. Травление поликремния на 0,5 мкм.
16. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.

### Изготовление нижней части

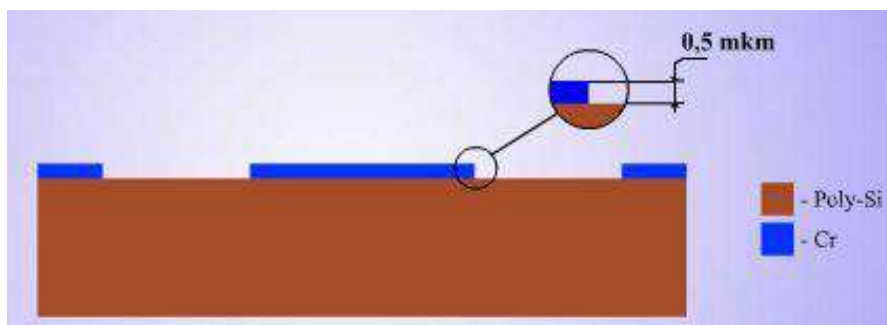


Исходная подложка – поликристаллический кремний.

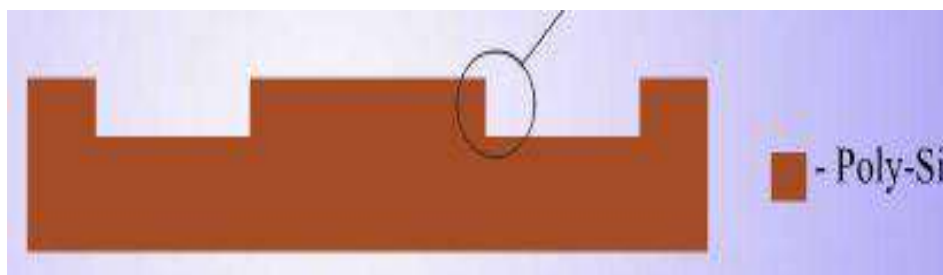
## Нанесение технологических слоев и создание топологии



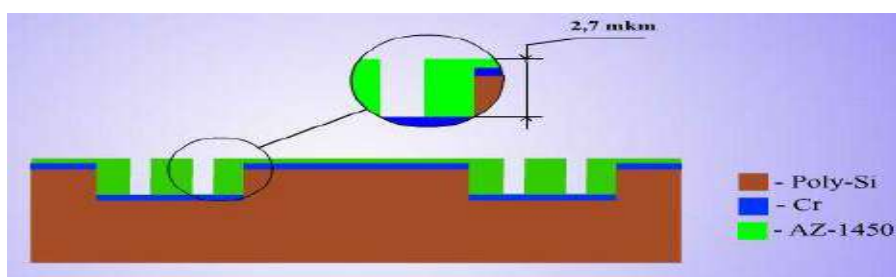
1. Нанесение слоя хрома толщиной 0,5 мкм методом магнетронного распыления (плазмообразующий газ – аргон (Ar),  $P = 10^{-2} - 1$  Па,  $T = 200 - 300$  °C  $t = 1 - 1,5$  мин.
2. Нанесение позитивного фоторезиста AZ-1450, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



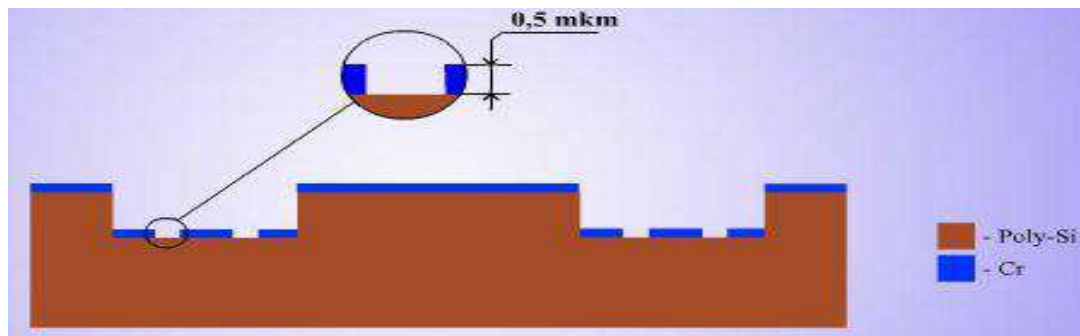
3. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
4. Проявление проэкспонированного фоторезиста.



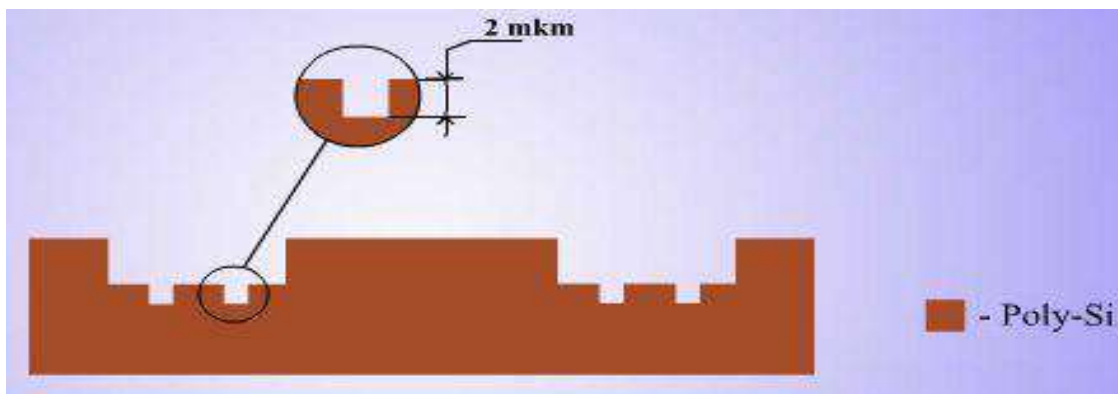
5. Травление кремния на толщину 2 мкм.
6. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.



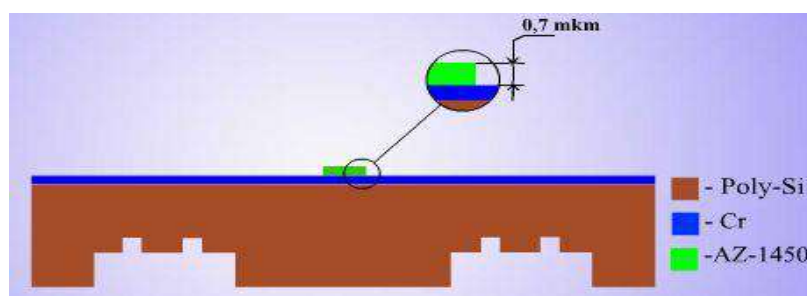
7. Нанесение хрома методом магнетронного распыления.
8. Нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



9. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
10. Удаление непроэкспонированного фоторезиста в кислородной плазме.

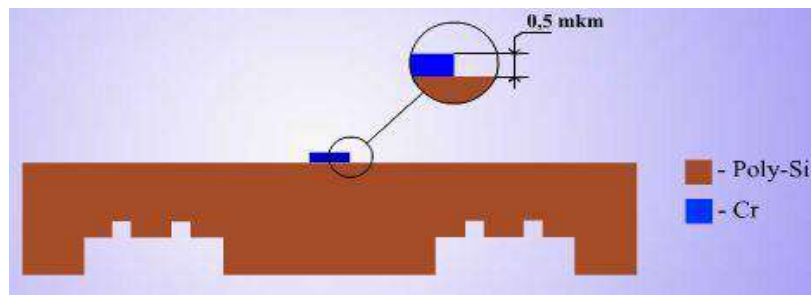


11. Травление поликремния на 1 мкм.
12. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.

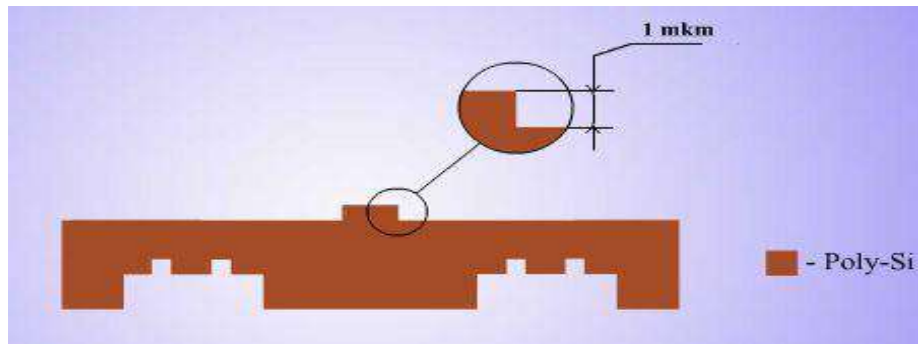


13. Нанесение слоя хрома толщиной 0,5 мкм методом магнетронного распыления (плазмообразующий газ – аргон (Ar),  $P = 10^{-2} - 1$  Па,  $T = 200 - 300$  °C,  $t = 1 - 1,5$  мин.
14. Нанесение позитивного фоторезиста AZ-1450, экспонирование, проявление проэкспонированной области.

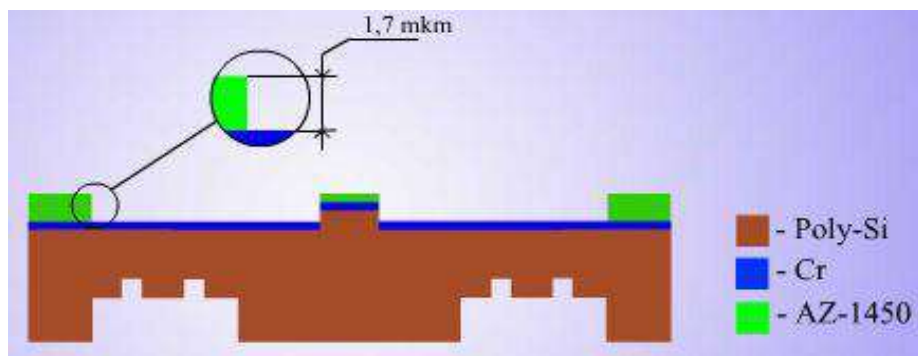




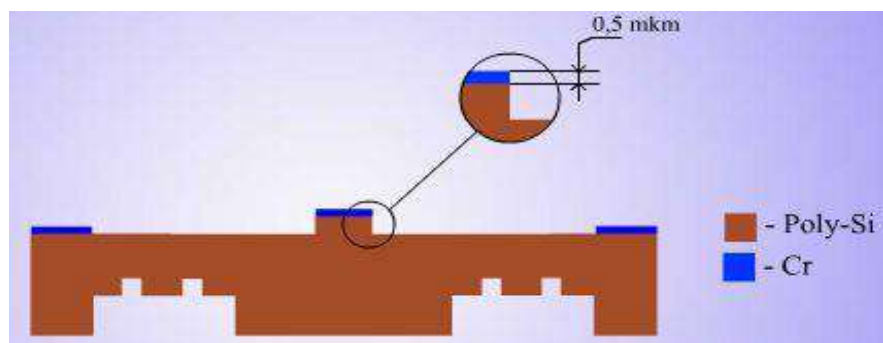
15. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
16. Удаление непроэкспонированного фоторезиста.



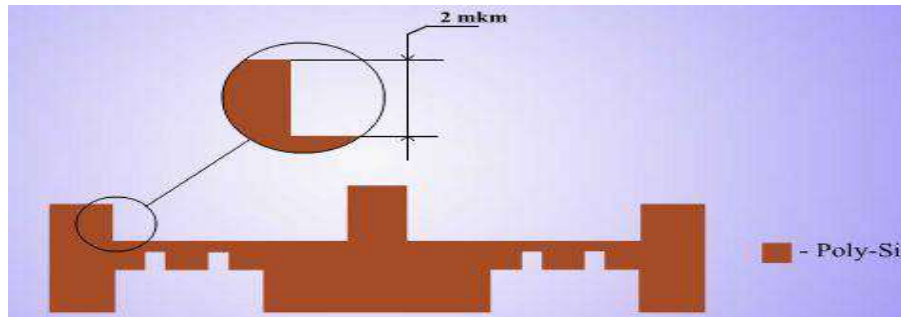
17. Травление поликремния на 1 мкм.
18. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.



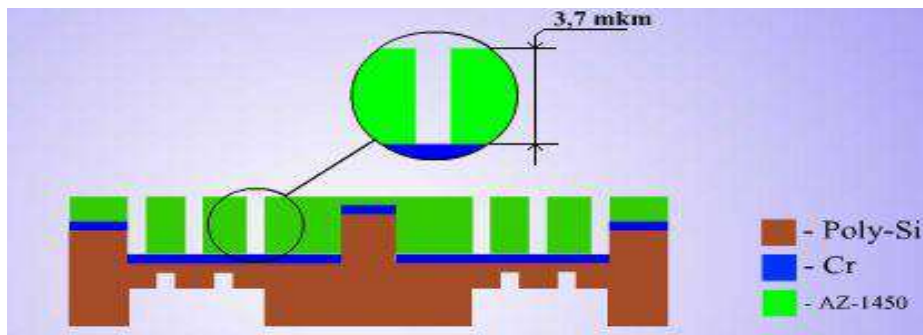
19. Нанесение хрома методом магнетронного распыления.
20. Нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



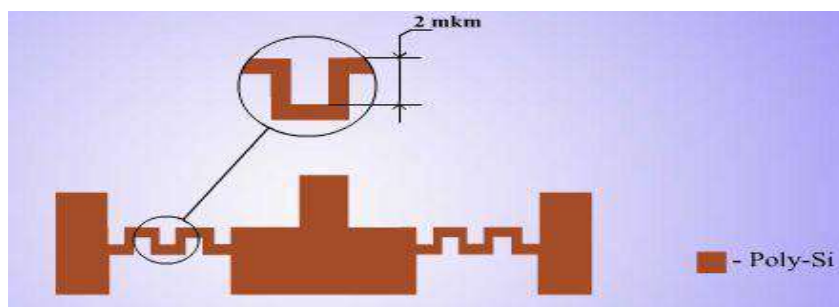
21. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
22. Удаление непроэкспонированного фоторезиста в кислородной плазме.



23. Травление поликремния на 1 мкм.
24. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.



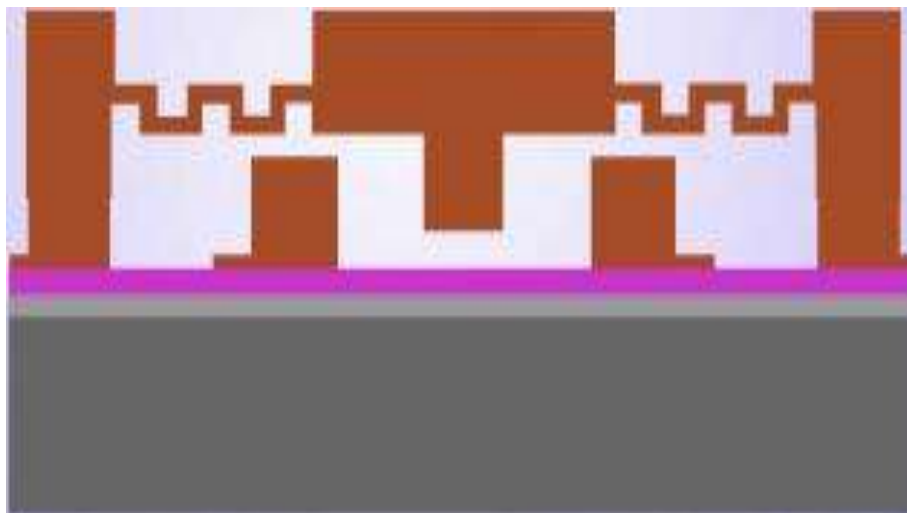
25. Нанесение хрома методом магнетронного распыления.
26. Нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление проэкспонированной области.



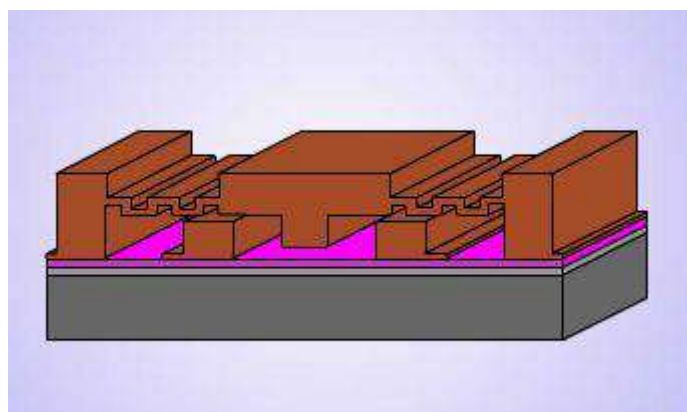
27. Травление хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.
28. Удаление непроэкспонированного фоторезиста.
29. Травление поликремния на 1 мкм.
30. Дотравливание хрома в растворе красной кровяной соли в течение 10 мин.



## Объединение нижней и верхней частей методом диффузионной сварки



Внешний вид полученного акселерометра



## Технические характеристики некоторых видов акселерометров

Тип	Число осей чувств.	U <sub>пит</sub> , В	Интерфейс	Чувствительность, В/г	Диапазон измерения, г	Тип корпуса, его размеры, мм
AIS326DQ	3	3...3,6	SPI	—	±2/±6	QFPN-28 7×7×1,9 мм
AIS226DS	2	2,16...3,60	I <sup>2</sup> C/SPI	—	±2/±8	SO-16L
LIS202DL	2	2,40...3,60	Аналоговый	0,42	±2	LGA 3,0×5,0×1,0
LIS244AL	2	2,16...3,60	I <sup>2</sup> C/SPI	—	±2/±8	LLGA 4,0×4,0×1,5
LIS302DL	3	3,00...3,60	Аналоговый	0,478	±2	LGA 3,0×5,0×1,0
LIS331AL	3	2,16...3,60	I <sup>2</sup> C/SPI	—	±2/±6	LLGA 3,0×3,0×1,0
LIS3LV02DL	3	2,40...3,60	Аналоговый	0,66	±2	LGA 4,0×7,5×1,0
LIS3LV02DQ	3	2,16...3,60	I <sup>2</sup> C/SPI	—	±2/±8	QFPN 7,0×7,0×1,9
LIS3L02AL	2	2,40...3,60	Аналоговый	0,66	±2	LGA 5,0×5,0×1,6
LIS331DL	3	2,16...3,60	I <sup>2</sup> C/SPI	—	±2/±8	LLGA 3,0×3,0×1,0

1. STAIS226DS, AIS326DQ – двух- и трехосевые акселерометры, предназначенные для автомобильной промышленности и имеющие рабочий диапазон температур – 40...105 °С.
2. LIS202DL – двухосевой акселерометр с низким потреблением энергии.
3. LIS244AL, LIS344AL – двух- и трехосевые акселерометры для измерения небольших величин ускорения.

4. LIS302DL – датчик ускорения для систем защиты жестких дисков, создания бесконтактных интерфейсов в современных мобильных телефонах и ноутбуках.

5. LIS302DLH включают в себя функции обнаружения движения; тревожной сигнализации о смене ориентации в пространстве; обнаружения состояния свободного падения; мониторинга уровня вибрации.

6. LIS331AL, LIS331DL – трехосевые, линейные, универсальные, экономичные МЭМС-акселерометры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джексон, Р. Новейшие датчики / Р. Джексон. – М. : Техносфера, 2005.
2. Неволин, В. Зондовые нанотехнологии в электронике / В. Неволин. – М. : Техносфера, 2005.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005.
4. Датчики / В. М. Шарапов [и др.]. – М. : Техносфера, 2012.
5. Бордун, Г. Д. Основы метрологии / Г. Д. Бордун, Б. Н. Марков. – М. : Изд. стандартов, 1985.
6. Готра, З. Ю. Датчики. Справочник / З. Ю. Готра, Л. Я. Ильницкий, Е. С. Полищук. – Львов : Каменяр, 1995.

*Учебное издание*

**Родионов Юрий Анатольевич**

***МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ И СЕНСОРНЫЕ  
УСТРОЙСТВА***

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор *Е. И. Костина*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 30.01.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 17,55. Уч.-изд. л. 18,2. Тираж 100 экз. Заказ 237.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6