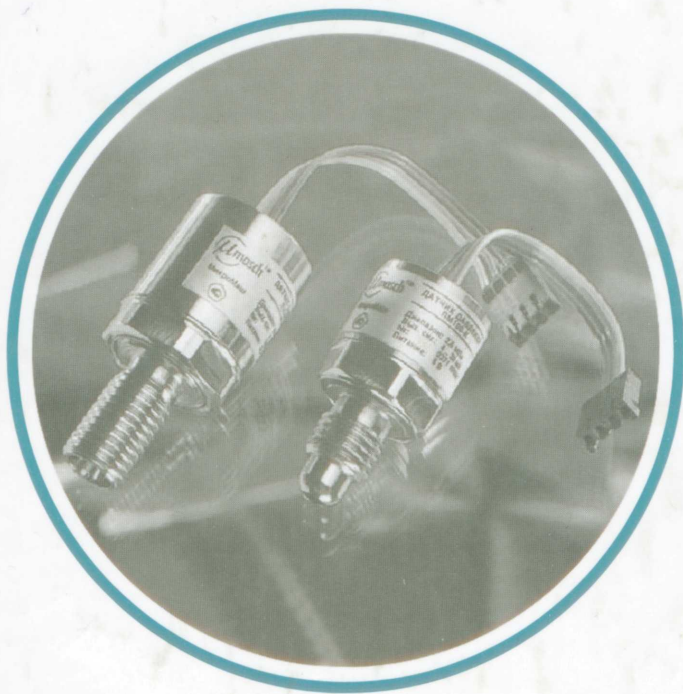




А. Ф. АПЕЙНИКОВ
В. А. ГРИДЧИН
М. П. ЦАПЕНКО

ДАТЧИКИ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ



Jarec

Altai, Barnaul, ASTU,
FITaB, IIT-41
2006.12.10 19:04:48 +06'00'

Министерство образования Российской Федерации
Новосибирский государственный технический университет
Сибирское отделение Российской Академии
сельскохозяйственных наук

А. Ф. АЛЕЙНИКОВ, В. А. ГРИДЧИН, М. П. ЦАПЕНКО

ДАТЧИКИ

(перспективные направления развития)

Под редакцией профессора М. П. Цапенко

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2001

УДК 681.586 (075.8)

А 458

Рецензенты

д-р техн. наук, проф., акад. Метролог. академии *Б. М. Рогачевский*;
д-р техн. наук, проф., чл.-корр. АН Молдовы,
акад. Междунар. академии информатизации *И. Ф. Клисторин*

Книга издана при содействии Президиума СО Россельхозакадемии

Алейников А. Ф., Гридчин В. А., Цапенко М. П.

А 458 Датчики (перспективные направления развития): Учеб. пособие / Под ред. проф. М. П. Цапенко. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. — 176 с.

ISBN 5-7782-0300-4

В пособии приведены классификация и алгоритмы восприятия физических величин и формирования измерительных сигналов в датчиках. Раскрыты понятия многомерных, многофункциональных и многоступенчатых датчиков. Даны сведения о биологических датчиках.

Рассмотрены основы и возможности микроэлектронной технологии изготовления датчиков.

Книга предназначена для студентов, изучающих измерительную, информационную технику, автоматику и микроэлектронику.

УДК 681.586 (075.8)

ISBN 5-7782-0300-4

© Новосибирский государственный технический университет, 2001 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ТЕРМИНОВ	5
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	11
1.1. Датчики. Сенсоры. Чувствительные элементы	11
1.2. О классификации датчиков	13
Список литературы к главе 1	22
ГЛАВА 2. ОДНОМЕРНЫЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ДАТЧИКИ	23
2.1. Варианты построения и метрологические характеристики	23
2.2. Автоматизация поиска набора последовательности физических явлений	36
2.2.1. Основные положения	36
2.2.2. Методика поиска структуры	43
2.2.3. Результаты поиска принципов действия многоступенчатых датчиков	51
Список литературы к главе 2	53
ГЛАВА 3. МНОГОМЕРНЫЕ ДАТЧИКИ	55
3.1. Методы разделения входных величин	—
3.2. Двухмерные датчики	56
3.3. Трехмерные датчики	65
3.4. Коррекция погрешностей измерительных сигналов многомерных датчиков	74
Список литературы к главе 3	78
ГЛАВА 4. БИОДАТЧИКИ	81
4.1. Основные понятия и определения	81
4.2. Основные принципы действия и метрологические характеристики	85
Список литературы к главе 4	99
ГЛАВА 5. МИКРОЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКОВ	100
5.1. Основные этапы кремниевой микроэлектронной технологии	—
5.2. Специальные вопросы технологии микроэлектронных датчиков	123
5.3. Технология соединения элементов конструкции датчика	134
5.4. Применение микроэлектронных технологий для создания датчиков	141
5.5. Тенденции производства микроэлектронных датчиков	159
Список литературы к главе 5	160
ПРИЛОЖЕНИЕ	162

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном мире измерения определяют прогресс в науке и технике и являются существенным фактором развития человеческой цивилизации. К измерениям с особым вниманием относятся и государства и отдельные люди, поскольку они касаются всех. Фундамент измерений образуют датчики — устройства, дополняющие и расширяющие возможности органов чувств человека.

Производство датчиков для разнообразных измерительных систем является наиболее динамичным сектором мировой экономики. В 1995 году общий объем продаж датчиков в мире достигал 6 миллионов долларов. К 2005 году ожидается удвоение этого объема. Средний рост объема продаж составляет не менее 6 % в год, однако производство датчиков для автомобилей и интеллектуальных датчиков растет еще быстрее — до 20 %.

Темпы накопления информации в области разработки и производства датчиков чрезвычайно высоки. Это делает абсолютно необходимым издание книг, отражающих новейшие тенденции в науке о датчиках.

Предлагаемое вниманию читателя издание является попыткой хотя бы частично восполнить пробел в учебной литературе, возникший в России за последнее десятилетие.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, академику Метрологической академии, профессору Б.М. Рогачевскому и доктору технических наук, заслуженному деятелю науки и члену-корреспонденту АН Молдовы, профессору И.Ф. Клисторину за тщательное рецензирование рукописи и высказанные ими полезные замечания.

Micromechanical Transducers. — Soursbook. — I.T.A. Kovacs, Mc. Grew-Hill.

Impact of MEMS Technology of Society — J. Bryzek — Sensors and Actuctors, A56, (1996), p. 1—6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ТЕРМИНОВ

Абсорбция — поглощение газа всем объемом жидкости или твердого тела (абсорбентом).

Адгезия — сцепление соприкасающихся поверхностей двух разнородных жидкостей или твердых тел, обусловленное главным образом взаимодействием между частицами (атомами, ионами, молекулами) или химической связью.

Адсорбция — концентрирование вещества (адсорбата) из объема газообразной или жидкой среды на поверхности ее раздела с жидкостью или твердым телом (адсорбентом) под действием сил притяжения частиц вещества (атомов, ионов, молекул).

Акустические волны — упругие возмущения. Распространяющиеся в твердой, жидкой или газообразной средах в диапазоне частот от долей Гц до 10^{13} Гц.

Акцептор — примесный атом в полупроводнике, способный захватывать электрон из валентной зоны, что эквивалентно появлению в ней дырки.

Анизотропия — зависимость физических свойств (механических, оптических, электрических, магнитных) вещества от направления, связанная с симметрией кристаллов, которая проявляется тем сильнее, чем ниже (хуже) симметрия кристалла.

Анод — электрод электронного или электротехнического прибора или устройства (например, электровакуумного прибора, гальванического элемента), характеризующийся тем, что движение электронов во внешней цепи направлено от него. В электронных приборах соединен с положительным полюсом источника постоянного тока.

Вакуум — среда, представляющая собой газ при давлении меньше атмосферного.

Валентная зона — энергетическая область разрешенных электронных состояний в твердом теле; при $T = 0$ К целиком заполнена валентными электронами.

Индуктивная связь — электрическая связь между элементами электрической цепи, возникающая за счет магнитных полей, создаваемых протекающими в этих элементах переменными токами и характеризующаяся реактивной проводимостью индуктивного типа, или величиной взаимной индуктивности.

Инжекция — введение неравновесных (избыточных) носителей зарядов в полупроводниковый или диэлектрический образец под действием внешнего электрического поля.

Интерференция волн — сложение двух или более волн, при котором амплитуда результирующей волны зависит от разности фаз этих волн в данной точке пространства.

Имплаентация (ионное легирование) — введение легирующих примесей в твердое тело, осуществляемое посредством бомбардировки его ионами примесного вещества, изменяющее величину и тип электропроводности кристалла полупроводника или его отдельных участков.

Ионизация — образование положительных или отрицательных ионов из электрически нейтральных атомов, молекул, радикалов и других частиц.

Катод — электрод электронного или электротехнического прибора или устройства (например, электровакуумного прибора, гальванического элемента), характеризующегося тем, что движение электронов во внешней цепи направлено к нему.

Когерентность — свойство двух или более колебательных, волновых или каких-либо других процессов, определяющее их способность при сложении взаимно усиливать или ослаблять друг друга.

Лазер — источник когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона, действие которого основано на использовании вынужденного излучения атомов и молекул.

Легирование — см. Имплаентация.

Литография — способ формирования заданного рельефа в слое металла, диэлектрика или полупроводника в процессе изготовления интегральных схем или полупроводниковых приборов.

Магнитная индукция — векторная величина, основная характеристика магнитного поля в веществе, представляющая собой среднее значение суммарной напряженности h микроскопических полей, созданных отдельными электронами и другими элементарными частицами по достаточно малому макроскопическому объему V : $\vec{B} = [\hbar dV] V^{-1}$.

Вторичная эмиссия (электронная) — испускание электронов (вторичных) твердыми или жидкими телами (эмиттерами) при их бомбардировке электронами (первичными), которая может наблюдаться как на поверхности, подвергаемой бомбардировке, так и на противоположной поверхности.

Выпрямитель — преобразователь переменного тока в постоянный.

Высокочастотный разряд — газовый разряд, поддерживаемый с помощью энергии поля высокой или сверхвысокой частоты.

Газовый разряд — прохождение электрического тока через газ или испаренные металлы под действием электрического поля.

Гамма-излучение — электромагнитное излучение с длиной волны короче 0,1 нм (частота выше $3 \cdot 10^{18}$ Гц), обладающее ярко выраженными корпускулярными свойствами.

Гелий-неоновый лазер — атомарный газовый лазер, в котором генерация происходит на энергетических переходах между уровнями энергии атомов неона.

Диамагнетизм — свойство вещества намагничиваться навстречу направлению действующего на него внешнего электромагнитного поля.

Диод — электрод ряда электровакуумных приборов (например, фотоэлектронного умножителя), служащий для усиления (умножения) вследствие вторичной электронной эмиссии падающего на него потока электронов.

Дисперсия волн — зависимость фазовой скорости электромагнитной волны от ее частоты.

Дифракция волн — в узком смысле: огибание волной препятствий, захождение в область геометрической тени; в широком — любые нарушения первоначальной формы волнового фронта при распространении волны в среде с неоднородностями.

Диффузия — взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга вследствие неупорядоченного теплового движения частиц вещества.

Диэлектрики — твердые, жидкие и газообразные вещества, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации.

Дырка — квазичастица, представляющая собой незаполненное электронное состояние (вакансию) в валентной зоне полупроводника, которой присваивается положительный заряд, равный заряду электрона.

Магнитный поток — поток вектора магнитной индукции через какую-либо поверхность. Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю.

Магнитомягкий материал — магнитный материал с малой коэрцитивной силой, высокой относительной магнитной проницаемостью, способный намагничиваться до состояния технического насыщения и перемагничиваться в относительно слабых магнитных полях.

Магнитотвердый материал — магнитный материал с большой коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью.

Модуляция — изменение во времени по заданному закону параметров, характеризующих какой-либо стационарный физический процесс.

Монокристалл — отдельный однородный кристалл, имеющий во всем объеме единую кристаллическую решетку.

Монохроматичность — спектральное свойство колебаний (волн), характеризующее степень их близости к идеальным гармоническим колебаниям (волнам).

Монохроматическое излучение — излучение, обладающее свойством монохроматичности (см. Монохроматичность). Наиболее близким к идеальным гармоническим волнам является излучение лазера.

Оксиды (окислы) — группа неорганических соединений химических элементов с кислородом типа CO , NO_2 , Na_2O , Fe_3O_4 и т.п.

Парамагнетики — слабомагнитные вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле вдоль направления поля.

Пассивирующий слой — слой диэлектрической изоляции, покрывающий всю интегральную схему, за исключением площадок, оставленных для присоединения электрических контактов, и защищающий ее от неблагоприятных воздействий окружающей среды.

Пьезоэлектрик — кристаллический диэлектрик с особенной полярной осью, обладающий спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, проявляющейся при изменении его температуры.

Поликристалл — агрегат из большого числа мелких монокристаллов (кристаллитов, или кристаллических зерен) различной ориентации.

Полимеры — вещества, молекулы которых образуются из большого числа повторяющихся мономерных звеньев, соединенных между собой химическими связями.

Полупроводники — широкий класс веществ с электронным механизмом электропроводности, занимающих по ее удельному значению промежуточное место между металлами и диэлектриками.

Поляризация (диэлектриков) — процесс возникновения в диэлектриках состояния, характеризующегося наличием дипольного момента у любого элемента их объема (поляризованного состояния) под действием внешних факторов (электрических полей, механических напряжений, изменения температуры и др.).

Прецессия (намагниченности) — вращательное движение постоянного по величине вектора намагниченности среды, при котором он описывает коническую поверхность вокруг равновесного положения, определяемого внешним постоянным магнитным полем и внутренними полями этой среды.

Проводимость *n*-типа — электронная проводимость; проводимость веществ, обусловленная наличием в них свободных электронов.

Проводимость *p*-типа — дырочная проводимость; проводимость полупроводника, в котором основными носителями заряда являются дырки.

Пьезоэлектрик — кристаллический диэлектрик, способный поляризоваться под воздействием механического напряжения (прямой пьезоэлектрический эффект) и деформироваться под воздействием приложенного внешнего электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект).

Резонанс — явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний в колебательной системе, когда частота периодического воздействия на систему приближается к резонансной частоте.

Рекомбинация — исчезновение пары электрон проводимости — дырка в результате их прямого соударения или последовательного захвата локальными уровнями энергии в запрещенной зоне полупроводника.

Световой поток — физическая величина, пропорциональная мощности оптического излучения, оцениваемая по его действию на нормальный человеческий глаз.

Сегнетоэлектрики — кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешними воздействиями (электрическим полем или механическими напряжениями).

Сорбция — поглощение жидким или твердым телом (сорбентом) какого-либо вещества (сорбата) из окружающей среды.

Температура — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы (степень нагретости тел).

Терморезистор (термистор) — полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от изменения температуры.

Термобатарея — совокупность термоэлементов (см. Термоэлемент), включенных последовательно или параллельно.

Термоэлемент — электрическая цепь или часть цепи, состоящая из последовательно соединенных разнородных проводников или полупроводников, служащая для преобразования тепловой энергии в электрическую.

Ультрафиолетовое излучение — излучение, длина волны которого лежит в диапазоне от 400 нм (фиолетовый видимый свет) до 10 нм (ультрамягкое рентгеновское излучение).

Ферриты — магнитные материалы, представляющие собой соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов.

Ферромагнетики — группа веществ, обладающих свойствами, обусловленными наличием магнитного порядка, в котором элементарные магнитные моменты соседних атомов ориентированы параллельно.

Шум — беспорядочные колебания (флуктуации) различной физической природы, отличающиеся сложной временной и спектральной структурой.

Электреты — тела (образцы) из диэлектриков, длительное время сохраняющие электризованное состояние после снятия воздействия, вызвавшего электризацию.

Эмиссия частиц — испускание электронов, ионов, атомов или молекул в вакуум или иную среду твердым телом или жидкостью.

Эпитаксия — процесс наращивания монокристаллических слоев веществ на подложку (кристалл), при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. ДАТЧИКИ. СЕНСОРЫ. ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Все измерения начинаются с восприятия измеряемых величин и формирования измерительного сигнала, который далее подвергается необходимым преобразованиям. Заметим, что эти процессы неразрывно связаны. Под восприятием величин подразумевается свойство датчиков выделить и представить входную величину в виде измерительного сигнала, удобного для дальнейших действий над ней.

Функцию восприятия входной величины выполняет чувствительный элемент. При этом идентифицируется природа величины и происходит процесс её восприятия. В официальных изданиях (Основные термины в области терминологии: Словарь-справочник /М. Ф. Юдин, М. Н. Селиванов, О. Ф. Тищенко, А. И. Скороходов; Под ред. Ю. В. Тарбеева. — М.: Изд-во стандартов, 1989 и в МИ 2247–93 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения) чувствительный элемент определяется как часть измерительного преобразователя в измерительной цепи, воспринимающая входную величину. Там же дано следующее определение датчика: **датчик** — конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации (он «даёт» информацию). Нужно учесть, что первичный преобразователь может находиться в измерительной цепи любого средства измерений и не обязательно должен быть датчиком, т. е. конструктивно обособленным.

Итак, датчик — это измерительный преобразователь, воспринимающий входную величину и формирующий эквивалентный ей в ин-

формационном смысле измерительный сигнал. Датчик — обособленная, часто вынесенная к объекту исследования конструкция, удаленная от остальной измерительной аппаратуры. Датчик — компактный, конструктивно оформленный отдельно элемент.

В измерительно-информационной технике за рубежом используют несколько терминов, отражающих особенности выполнения функций восприятия и формирования измерительных сигналов: *sensor*, *gange* (англ.), *Geber*, *Primarmessumformer* (нем.), *Transducteur de mesure* (франц.). Термин «сенсор» уже давно «просочился» на страницы отечественных научных публикаций. В настоящее время сложилось такое положение, что термины «датчик» и «сенсор» используются для обозначения измерительного преобразователя, выполняющего функции восприятия входной величины и формирования измерительного сигнала.

Заметим, что термин «сенсор» акцентирует внимание на восприятии входной величины, а термин «датчик» — на формировании и выдаче измерительного сигнала. Под сенсором понимается первичный измерительный преобразователь, воспринимающий входную величину и формирующий измерительный сигнал. На конструкцию и на другие особенности при этом никаких ограничений не накладывается. Следовательно, и сенсор и датчик выполняют одну и ту же функцию восприятия входной величины и формирования измерительного сигнала.

Таким образом, в настоящее время разумно признать правомерным использование обоих этих терминов. В русской литературе более широко используется термин «датчик». Терминология: области физических явлений представлена в книге Электроника: Энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1991. — 688 с.

Сердцевиной чувствительных элементов датчиков является вещество (материал), которое воспринимает входную физическую величину. В нем с помощью определенного физического явления входная величина преобразуется в сигнал, поступающий в последующую измерительную цепь. Помимо чувствительного элемента в измерительную цепь могут входить усилители, делители, фильтры, модуляторы, а также иные устройства преобразования измерительного сигнала, так как нередко нужно произвести изменения размеров или характера физической величины, прежде чем подавать ее на вход датчика. Показательна в этом смысле необходимость довести размеры высо-

ковольтных напряжений и токов входных величин до безопасного уровня и, наоборот, при восприятии малых по уровню величин усилить их, чтобы было возможно с ними работать.

Эти важные операции выполняются специальными элементами, обладающими известными метрологическими характеристиками. В измерительной технике применяют также унифицирующие (нормализующие) преобразователи, приводящие сигналы датчиков к установленным нормам. Делается это для использования стандартной измерительной аппаратуры.

До сих пор особенно остро стоит проблема создания простых малогабаритных и легко размещаемых на объекте исследования датчиков. Сошлемся на то, что при прочностных испытаниях больших самолетов используются десятки тысяч тензо- и термодатчиков, а также датчиков перемещений, сил, давления и т. п.

Биологические исследования зачастую нуждаются в восприятии множества величин от источников информации, расположенных в ограниченном пространстве живого организма. Основная особенность и предназначение таких (назовем их многомерными) датчиков заключается в том, что они могут воспринимать и преобразовывать в измерительные сигналы несколько величин, действующих в малом объеме пространства [1.1].

Таким образом, под датчиком следует понимать конструктивно обособленную совокупность первичных измерительных преобразователей, воспринимающую одну или несколько входных величин и преобразующую их в измерительные сигналы [1.2]. Следует сказать, что для выполнения функций восприятия входных величин используют также измерительные установки, состоящие из сложной совокупности элементов и содержащие сложные в реализации физические эффекты. В настоящем пособии они подробно не рассматриваются.

1.2. О КЛАССИФИКАЦИИ ДАТЧИКОВ

Различают датчики, основанные на разных принципах действия (электрических, акустических и др.) [1.3]. Далее используются для классификации структурные и функциональные признаки, характеризующие датчики.

Активная (энергетическая) входная величина может восприниматься непосредственно. Для восприятия же свойств пассивного

(в энергетическом смысле) вещества необходимо придать ему энергетические свойства, воздействуя на это вещество дополнительной энергией. Например, пропустить через сопротивление ток и получить в качестве параметра вещества напряжение, образовавшееся на его сопротивлении. Оценить размер входной величины можно, используя разность результатов этой оценки до и после ее воздействия. Таким образом, в соответствии со сказанным можно выделить *активные* (генераторные) и *пассивные* (параметрические) датчики.

Классификационным признаком также служит характер *выходного сигнала* датчика. Выходной измерительный сигнал датчиков может быть промодулирован различным образом. Могут быть использованы амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ) модуляции. Сигнал может быть представлен в непрерывной, импульсной и цифровой форме. Среди аналоговых видов модуляции следует выделить частотную. Она является аналогом модуляции сигналов в рецепторах биологических анализаторов [1.4], имеет повышенную помехоустойчивость и несколько информационных параметров (частота, фаза, длина волны, период). Нужно отметить легкость перехода от частотных сигналов к цифровым, потенциально высокую точность операций с частотными сигналами, наличие Государственной службы частоты и времени. Кроме того, принципы построения датчиков — генераторов частотных сигналов — достаточно хорошо разработаны. К частотным датчикам можно отнести датчики резонансного типа, маятниковые, струнные, ядерно-магнитные устройства, *LC* и *RC* генераторы, частотно-зависимые цепи, ультразвуковые устройства, а также датчики, основанные на использовании потока фотонов, на эффекте Баркгаузена, на термошумах и т. п. При использовании электромагнитных, оптических, звуковых частотных сигналов возможны их беспроводная передача, генерация образцовых сигналов в ближней зоне и организация сотовой структуры, обслуживающей одновременно несколько датчиков. Шкала генерируемых частот может быть достаточно широкой.

Остановимся на используемой далее классификации датчиков. Отличие предлагаемой классификации от известных заключается во введении некоторых новых классификационных признаков, характеризующих новые тенденции развития датчиков.

На входе датчиков могут действовать физические величины, измеряемые непосредственно, или их составляющие (при выполнении косвенных измерений).

Как уже говорилось, энергетические свойства входных величин позволяют подразделить датчики на *активные* и *пассивные*. В активных датчиках входные величины имеют энергетическую природу, в пассивных — неэнергетический (вещественный) параметр.

Активными входными величинами являются параметры энергии электрической, магнитной, тепловой, механической, акустической, оптической, радиационной и химической природы.

Приведём краткий перечень основных активных входных величин.

Электрическая энергия: напряжение; ЭДС; потенциал; ток; заряд; мощность; энергия.

Магнитная энергия: магнитодвижущая сила; магнитный поток; магнитная индукция.

Механическая энергия: сила; масса; давление; механическое напряжение; скорость; ускорение; мощность; энергия.

Акустическая энергия: акустическое давление; интенсивность звука; мощность; энергия.

Тепловая энергия: температура; тепловой поток; термодинамический потенциал.

Оптическая энергия: мощность излучения; поток излучения; освещенность; яркость; спектральная плотность; сила света; световой поток.

Ионизационная энергия: энергия излучения; мощность дозы излучения; поток излучения.

Химическая энергия: молярная энергия; химический потенциал.

Пассивные сигналы при восприятии нуждаются в преобразовании их в активные, эквивалентные входным энергетическим сигналам. Затем, так же как и сигналы активных датчиков, они воспринимаются и преобразуются с помощью определённого физического эффекта в веществе чувствительного элемента в измерительный сигнал.

Приведём перечень пассивных входных величин.

Электрическая энергия: проводимость; сопротивление; диэлектрическая проницаемость.

Магнитная энергия: магнитная проницаемость; индуктивность; взаимная индуктивность.

Механическая энергия: масса; механическое сопротивление; вязкость; трение; твердость; длина; площадь; объем; расход.

Акустическая энергия: акустическое сопротивление; акустическая проницаемость; коэффициенты поглощения, отражения и рассеивания.

Тепловая энергия: теплоемкость; коэффициенты теплопроводности, теплопередачи.

Оптическая энергия: коэффициенты отражения, рассеивания, пропускания, преломления; цвет; поляризация.

Ионизационная энергия: постоянная радиоактивного распада; коэффициент поглощения.

Химическая энергия: молярный объем; диффузия; концентрация; молярная энтропия.

Рассмотренные перечни выборочны и могут быть существенно дополнены.

По количеству воспринимаемых и преобразуемых величин можно выделить датчики *одномерные*, оперирующие с одной величиной, и *n-мерные* (многомерные), воспринимающие несколько (n) входных величин. Многомерные датчики могут иметь общие элементы и поэтому могут быть проще, чем совокупность одномерных датчиков [1.1].

По количеству выполняемых датчиком функций их можно разделить на *однофункциональные* и *многофункциональные* ($m = 2, 3 \dots$). Многофункциональные датчики могут помимо основной функции (восприятие величины и формирование измерительного сигнала) выполнять ряд дополнительных функций, таких как, например, функции фильтрации, обработки аналоговых сигналов и т. п. Авторы в предыдущих публикациях использовали термин «многофункциональный датчик» для обозначения датчиков, служащих для восприятия и преобразования *нескольких входных величин*. Однако термин «многофункциональный датчик» более целесообразно отнести к датчикам, каждый из которых выполняет *несколько измерительных функций*. Заметим, что датчики многофункциональные, так же как и многомерные, по своим свойствам приближаются к измерительным системам.

Многофункциональные датчики иногда называют интеллектуальными [1.5]. К таким датчикам, видимо, можно отнести аналоговые и цифровые датчики с суммированием сигналов, с перестраиваемыми режимами работы и параметрами, с функциональным аналого-цифровым преобразованием, метрологическим обслуживанием и т. п. Широкими функциональными возможностями должны обладать датчики со встроенными микропроцессорами. Заметим, что в первичных измерительных преобразователях средств измерений, в которых состав и компоновка не ограничены, микропроцессоры с успехом используются уже сейчас.

В датчиках могут использоваться последовательно или параллельно один или несколько физических эффектов, т. е. они могут быть *одноступенчатыми* и *многоступенчатыми*. В настоящее время датчики, воспринимающие более трех величин, а также датчики, выполняющие более трех функций и основанные на использовании более трех физических явлений, довольно редки.

Итак, датчики можно представить в трехмерном пространстве с координатами: количество величин — n ; количество функций — m ; количество ступеней преобразований — l .

Кроме названных датчиков можно отметить датчики, выполняющие *системные функции*, к которым относятся восприятие полей температуры, деформаций и т. д.

По технологии изготовления датчики можно условно разделить на *элементные*, изготавливаемые из набора отдельных элементов, и *интегральные*, с одновременным изготовлением по интегральной микроэлектронной технологии всех составных элементов датчиков. Эта технология позволяет обеспечить датчикам выдающиеся характеристики (см. главу 5).

Особо следует выделить *биологические* датчики, в которых в качестве чувствительных элементов используются рецепторная часть биологических органов чувств, ферменты и другие вещества и электронная часть, формирующая измерительные сигналы (см. главу 4).

В биологических анализаторах живых организмов участвует очень большое количество рецепторов. Например, рецепторное поле зрительного анализатора включает около 10^8 рецепторов, обонятельного и слухового анализаторов — более 30 тысяч рецепторов, расположенных в небольшом объеме. Как известно (закон Фехнера), выходной сигнал рецепторов пропорционален натуральному логарифму интенсивности воздействия со стороны воспринимаемой величины. Суммарный сигнал поля рецепторов зависит от их количества. При этом точность восприятия градиентов входных величин будет зависеть от размеров рецепторов. Большое, избыточное количество рецепторов, кроме повышения надежности за счет многократного дублирования и интегрирования их сигналов, позволяет обеспечить повышенную точность восприятия входной величины. Уменьшение размеров и массы датчиков может привести при восприятии входной величины к росту суммарного выходного сигнала, снижению влияния помех и, в конечном счете, к повышению достоверности получаемых данных

[1.6—1.7]. Преимущества миниатюрных датчиков особенно проявляются при исследовании малогабаритных объектов.

Поднятые здесь вопросы о применении избыточного количества элементов имеют большое значение для измерительной техники, так как они могут улучшить качество измерений. Наличие большого количества элементов делает уместным применение статистического подхода к анализу и синтезу работы системы. Здесь налицо серьезная стыковка измерительных и вычислительных задач. Положительные результаты в этом направлении могут резко изменить, может быть и революционизировать, измерительную технику (воистину здесь количество рецепторов может перейти в изменение качества измерений).

Итак, датчики могут классифицироваться в зависимости от параметров следующим образом.

По виду входных величин: активные; пассивные.

По количеству входных величин: одномерные ($n = 1$); многомерные ($n = 2, 3 \dots n$).

По количеству измерительных функций: однофункциональные ($m = 1$); многофункциональные ($m = 2, 3 \dots m$).

По количеству преобразований энергии и вещества: одноступенчатые ($l = 1$); многоступенчатые ($l = 2, 3 \dots l$).

По наличию компенсационной обратной связи: компенсационные; некомпенсационные.

По виду модуляции выходного сигнала: амплитудные; частотные и фазовые; непрерывные; импульсные.

По технологии изготовления: элементные; интегральные.

По восприятию пространственных величин: точечные; пространственные.

По взаимодействию с источниками информации: контактные; бесконтактные (дистанционного действия).

По виду измерительных сигналов: аналоговые; цифровые.

По динамическому характеру сигналов преобразования: дискретные (дискретное представление в виде импульсной последовательности); непрерывные (представлены в виде непрерывного процесса).

Самое важное при анализе работы датчиков — это рассмотрение принципов их действия, применения физических явлений, положенных в основу построения датчиков.

В настоящей работе рассматриваются преимущественно аналоговые датчики, относительно простые, с высоким быстродействием и невысокой стоимостью.

Нужно сказать несколько слов об относительно малораспространенных датчиках, с компенсационной обратной связью. Такие датчики исследованы профессором М. М. Фетисовым [1.8]. Компенсационные датчики применялись в аэродинамических весах, а также для устранения влияния начальных сопротивлений тензодатчиков при массовой тензометрии [1.9]. Расширение диапазона измерения при этом происходило за счет того, что компенсация производилась по поддиапазонам и измерялась оставшаяся некомпенсированная часть. Компенсационные датчики потенциально могут обладать повышенной точностью. Однако процесс уравнивания требует временных затрат, следовательно, компенсационные датчики более инерционны.

Отметим, кроме того, также полезность использования так называемых пороговых датчиков, выдающих сигнал при достижении входной величиной заданного уровня. В таких датчиках реализуются функции собственно датчика и устройства сравнения входной величины с образцовой мерой.

Многомерные датчики могут считаться разновидностью многомерных измерительных устройств [1.10]. Для расчета этих датчиков можно использовать соответствующие разделы теории многомерных измерительных устройств, в частности, теоретический материал по многосвязным объектам и методам измерения их параметров. В настоящее время в эксперименте наиболее широко используются одномерные, одноступенчатые и однофункциональные датчики.

Датчики во многом определяют качество средства измерений. Без знаний метрологических характеристик датчик не может быть использован как измерительный преобразователь.

Метрологические характеристики датчика как средства измерений определяет ГОСТ 8.009 — 84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. К основным таким характеристикам следует отнести:

- погрешность восприятия и преобразования (желательно знать случайную, систематическую, статическую, динамическую составляющие и закон распределения вероятностей);
- характеристику (функцию) преобразования датчика, представляющую связь входной с выходной величинами: $y = f(x)$ и её линейность;
- диапазон восприятия и преобразования входной величины;
- чувствительность;

• частотные и динамические характеристики (переходная, амплитудно-фазовая, амплитудно-частотная характеристики; время реакции; постоянная времени и др.).

К основным *систематическим* погрешностям датчика следует отнести следующие погрешности.

1. Погрешности значения меры. Например, загрязнение смеси воды со льдом при определении «нулевой» температуры термодатчика.

2. Погрешности при определении характеристик датчика. Например, при определении функции преобразования тензодатчиков устанавливают её для одного датчика из изготовленной партии. Какого-то конкретный датчик может иметь отличную от испытанного датчика характеристику.

3. Методические погрешности. К ним относятся, например, искажение температуры объекта измерения за счёт теплопроводности датчика температуры, «саморазогрев» термометра сопротивления «измерительным» током и др.

В некоторых случаях желательно знать размер составляющей погрешности от влияния каждой внешней («мешающей») величины. Это может быть использовано для принятия специальных мер уменьшения погрешностей.

Основные причины возникновения *случайных* погрешностей в датчиках:

Во-первых, погрешности, связанные с изменениями собственных параметров датчика. Примером может служить вариация порога чувствительности у потенциометрического датчика. *Порог чувствительности датчика* определяется как максимальное изменение измеряемой величины, которое не вызывает обнаруживаемого изменения выходного сигнала датчика. Если в датчике есть элемент с гистерезисными свойствами, то выходной сигнал зависит от предшествующих условий эксплуатации.

Во-вторых, погрешности из-за появления в измерительной цепи датчиков паразитных сигналов случайного характера (тепловые шумы, наводки от внешних электромагнитных полей, временной дрейф сигналов и параметров элементов датчика и др.).

Характеристика преобразования датчика должна определяться для нескольких значений входной величины, чаще всего для трех: $x = 0$; $x = 1/2$; $x = 1$. Более детальное представление характеристики бывает необходимо при нелинейном её характере.

Определение характеристик датчиков — важная область работы проектировщиков, изготовителей и пользователей датчиков. Эти характеристики формируются не только сразу после изготовления, но и в процессе хранения, а также использования датчиков. Для выполнения этой работы необходимо создать специальное оборудование и разработать методику его использования. Можно использовать следующее оборудование: генераторы входных величин в заданных динамическом и частотном диапазонах с заданной точностью (создание источника входной величины с погрешностью не более трети допустимой часто является трудной задачей); генераторы влияющих величин (они могут быть менее точны). Наиболее квалифицированные работы по определению характеристик датчиков выполняют в специальных лабораториях, например, тепловых, оптических, акустических и др. Некоторые из них отличаются совершенством оснащения и глубиной методического подхода к проводимым исследованиям.

Опыт экспериментальных исследований показывает, что для введения поправок в результат преобразования полезно использовать формирование единичных тарировочных сигналов заданного размера. Этот сигнал может подаваться одновременно с входной величиной.

Важной характеристикой является время преобразования сигнала в датчике (*время реакции*). По виду переходного процесса, возникающего при подаче на вход датчика ступенчатой известной по размеру величины, датчики можно отнести к апериодическим, дифференцирующим, интегрирующим или колебательным звеньям динамической системы. Эти звенья могут быть соединены последовательно, параллельно и встречно. Переходные процессы в аналоговых устройствах изучены подробно в работе [1.11]. Динамика цифровых устройств определяется временем, последовательностью и количеством выполнения операций преобразования сигнала.

Постоянные времени датчиков различны. Например, постоянная времени выпускаемых промышленностью терморезисторов находится в пределах от десятых долей секунды до десятков секунд, термопар — от десятков секунд до нескольких минут, для радиационных, ярких, цветковых и фотоэлектрических пирометров — порядка десятых и сотых долей секунды. Для кратковременного применения можно изготовить термопары и терморезисторы из тонких (диаметром порядка 50 мкм) калиброванных проволок и добиться уменьшения постоянных времени таких датчиков до десятков миллисекунд. Если же

термодатчики размещены в защитной оболочке, то тогда постоянная времени их существенно увеличивается.

Динамические свойства датчиков зачастую определяют быстроедействие всего измерительного устройства. Имеются методы коррекции динамических характеристик путем введения обратных связей по производным от входной величины и других приемов, позволяющих на порядок уменьшить инерционность устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

- 1.1. Алейников А. Ф., Цапенко М. П. Многофункциональные датчики // Измерения, контроль, автоматизация. — 1990. — № 2 (74). — С. 50—57.
- 1.2. Цапенко М. П., Клисторин И. Ф., Алейников А. Ф. Датчики (Функция восприятия входных величин и формирование измерительных сигналов) // Датчики и системы. — 1999. — №1. — С. 17—18.
- 1.3. Датчики измерительных систем: В 2 кн. Кн.1 / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.; Пер. с франц.. — М.: Мир, 1992. — 480 с.
- 1.4. Пинчук Л. Е., Цапенко М. П. Бионика и проблемы измерительной техники // Проблемы электрометрии. — Новосибирск: Наука, 1967. — С. 127—147.
- 1.5. Интеллектуальные средства измерения / Под ред. Э. М. Цветкова. — М.: РИЦ «Татьянин день», 1994. — 280 с.
- 1.6. Карандеев К. Б., Охотская В. Н., Пучкин Б. И., Цапенко М. П. Бионические аспекты автометрии // Автометрия. — 1967. — № 5. — С. 119—128.
- 1.7. Глезер В. Д., Цукерман И. И. Информация и зрение. — М.: Наука, 1961. — 204 с.
- 1.8. Фетисов М. М. Новые автоматические компенсационные приборы для измерения неэлектрических величин. — Л.: Изд-во ЛДНТП, 1960. — 114 с.
- 1.9. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985 — 439 с.
- 1.10. Лихциндер Б. Я., Широков С. М. Многомерные измерительные устройства. — М.: Энергия, 1978. — 312 с.
- 1.11. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1982. — 502 с.

ГЛАВА 2

ОДНОМЕРНЫЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ДАТЧИКИ

2.1. ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В технике измерений широко применяются многоступенчатые датчики, т. е. датчики, принцип действия которых основан на использовании нескольких физических эффектов.

Одной из причин создания таких датчиков является отсутствие физических эффектов, преобразующих входную величину непосредственно в электрический измерительный сигнал. Широкое распространение получили двухступенчатые датчики механических величин. Давление, например, можно воспринять мембраной (первая ступень преобразования), деформация которой преобразуется в электрическую величину тензопреобразователем (вторая ступень преобразования). Ниже приводятся иллюстрации использования нескольких физических эффектов в датчиках.

На рис. 2.1 показан фрагмент конструкции высокочувствительного ёмкостного датчика давления, предназначенного для работы в области низких температур [2.1]. Принцип действия датчика следующий.

Измеряемое давление через капилляр 1 подается в подмембранную полость 10. Корпус 4 и мембрана 3 изготовлены из бериллиевой бронзы. К выступу мембраны через изолирующую прокладку прикреплена подвижная пластина 8 ёмкостного преобразователя. Неподвижная пластина 7 вгоняется в основание 5 в виде конусной пробки, обернутой изолирующей плёнкой 6. Таким образом, обе пластины ёмкостного преобразователя изолированы от корпуса. Соприкасающиеся плоскости корпуса и основания обрабатываются совместно с элект-

родами ёмкостного преобразователя после закрепления электродов на корпусе и в основании. Благодаря такой обработке и изолирующей прокладке 9 устанавливается зазор между электродами ёмкостного преобразователя около 15...20 мкм. Ёмкость изготовленного преобразователя равна 30 пФ. Порог чувствительности составил 10^{-14} м.

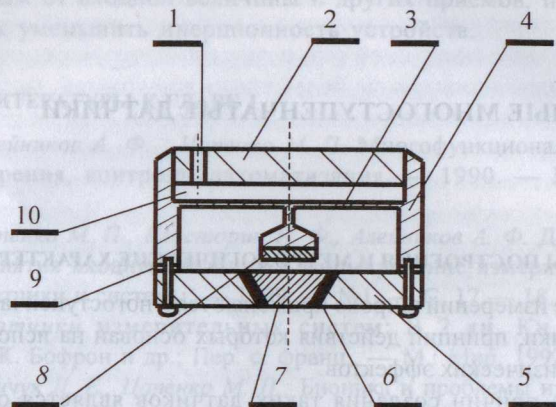


Рис. 2.1. Двухступенчатый ёмкостный датчик давления:
1 — капилляр в пробке; 2 — мембрана корпуса; 3 — основание; 4 — изолирующая плёнка; 5 — конус (обкладка конденсатора); 6 — пластина (обкладка конденсатора); 7 — прокладка; 8 — подмембранная камера

Другой причиной использования многоступенчатых датчиков является расширение функциональных возможностей традиционных и хорошо себя зарекомендовавших в измерительной практике одноступенчатых датчиков. Например, ртутные стеклянные термометры расширения до сих пор широко используются, в частности, в химической промышленности. Простота их реализации, широкий диапазон измерения температур ($-55...+700$ °С), отсутствие источника внешнего питания, равномерность шкалы измерения, химическая инертность стеклянного корпуса — все эти преимущества обеспечивают «долговечность» термометров расширения [2.2].

К одному из недостатков таких термометров следует отнести отсутствие выходного электрического сигнала и как следствие невозможность дистанционной передачи показаний. На рис. 2.2 приведена конструкция двухступенчатого термометра расширения, лишённого указанного выше недостатка.

Принцип действия такого датчика очень прост. При перемещении ртути по капилляру (первая ступень) изменяется индуктивность ΔL обмотки 2 (вторая ступень), к которой подключен источник переменного напряжения (индуктивный преобразователь).

Третьей причиной использования многоступенчатых датчиков является возможность минимальных изменений датчика определённой величины с целью его применения при измерении другой входной величины.

При измерении оптического излучения используются термоэлементы, одна из конструкций которых показана на рис. 2.3. Принцип действия таких многоступенчатых датчиков основан на преобразовании энергии оптического излучения в тепловую энергию.

Диск покрыт слоем черни, поглощающей оптическое излучение. Коэффициент поглощения черной поверхности приблизительно равен единице, если слой черни имеет толщину, большую максимальной длины волны излучения. Для ультрафиолетового и инфракрасного излучения толщина черни 30...40 мкм. Диск нагревается, и выходной сигнал термопары (ЭДС) несет информацию об интегральной мощности падающего излучения. Эта ЭДС не

зависит от спектрального состава излучения [2.3]. Для уменьшения конвективных потерь элементы датчика помещают в стеклянный баллон, в котором создают вакуум (на рис. 2.3 не показан). Баллон имеет специальные окна из кварцевого стекла, которое прозрачно для ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

Четвёртая причина увеличения количества используемых физических явлений в датчиках — это повышение требований к условиям их эксплуатации.

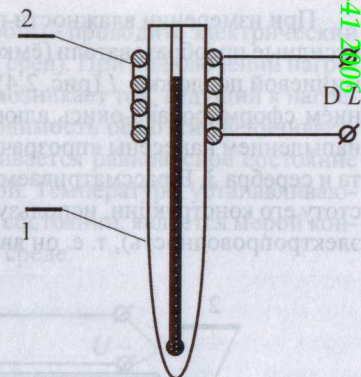


Рис. 2.2. Двухступенчатый датчик температуры:
1 — стеклянный ртутный термометр;
2 — обмотка индуктивности

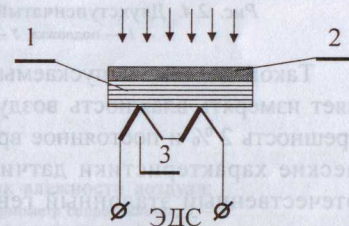


Рис. 2.3. Двухступенчатый датчик оптического излучения:
1 — металлический диск; 2 — слой черни;
3 — дифференциальная термопара

При измерении влажности газов широко используются алюминиево-оксидные преобразователи (ёмкостные датчики). Датчик состоит из алюминиевой подложки 1 (рис. 2.4), на которой электрохимическим окислением сформирована окись алюминия (Al_2O_3). На эту окись вакуумным напылением нанесены «прозрачные» для молекул воды тонкие слои золота и серебра 3. В рассматриваемом датчике, несмотря на кажущуюся простоту его конструкции, используются два физических явления (сорбция и электропроводность), т. е. он является двухступенчатым.

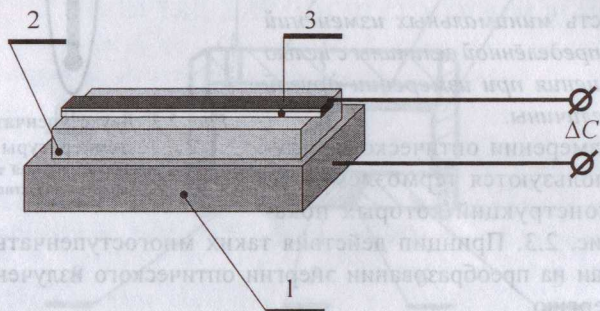


Рис. 2.4. Двухступенчатый ёмкостный датчик влажности газов:

1 — подложка; 2 — окись алюминия; 3 — электрод

Такой датчик, выпускаемый фирмой Testoterm (Германия), позволяет измерять влажность воздуха в диапазоне от 2 до 90 %, имеет погрешность 2 % и постоянное время реакции около 1 с [2.4]. Метрологические характеристики датчика довольно высоки, если учесть, что отечественный эталонный генератор влажности воздуха «Родник-2» имеет основную погрешность преобразования, равную 1 % [2.5]. Этот датчик предназначен для использования при температурах от 0 до 40 °С.

На рис. 2.5 приведена конструкция четырёхступенчатого электролитического датчика влажности, пригодного для эксплуатации при температуре окружающей среды от -50 до +100 °С [2.6, 2.7]. Датчик состоит из изоляционной трубки — корпуса 1, который обернут тканью 3, пропитанной хлористым литием. На корпус также намотана обмотка нагревателя 4. Внутри корпуса помещён датчик температуры — термометр сопротивления 2. В данном случае используются два свойства хлористого лития. Во-первых, он является гигроскопичным веществом, поглощающим из воздуха молекулы воды (явление сорбции). Во-вторых, возникающий при этом водный раствор хлористого ли-

2. 1. Варианты построения

тия представляет собой электролит, способный проводить электрический ток (явление электропроводности жидких сред). При подключении нагревателя 4 к источнику переменного тока 5 возникает ток, ведущий к нагреву всего датчика (эффект Джоуля). Проводимость обмотки увеличивается, и влага испаряется. В итоге устанавливается равновесное состояние между фазой водяного пара и жидкой фазой. Температура, устанавливающаяся автоматически в этом равновесном состоянии, является мерой концентрации водяных паров в окружающей среде.

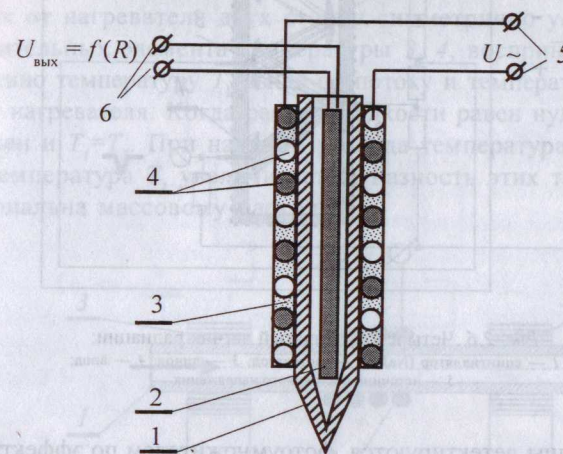


Рис. 2.5. Четырёхступенчатый датчик влажности воздуха:

1 — корпус из диэлектрика; 2 — платиновый термометр сопротивления; 3 — стекловолнока, пропитанное хлористым литием; 4 — нагреватель; 5 — вывод источника переменного тока; 6 — выводы термометра сопротивления

Многоступенчатые датчики используются при проведении *специальных измерений*, например при измерении энергии микрочастиц, где требуется *высокая чувствительность*. На рис. 2.6 показана упрощённая конструкция сцинтилляционного детектора ядерного излучения (γ -частиц). Чувствительным элементом такого датчика является вещество 1, которое позволяет преобразовать энергию попадающей активной частицы в кванты света (явление флуоресценции).

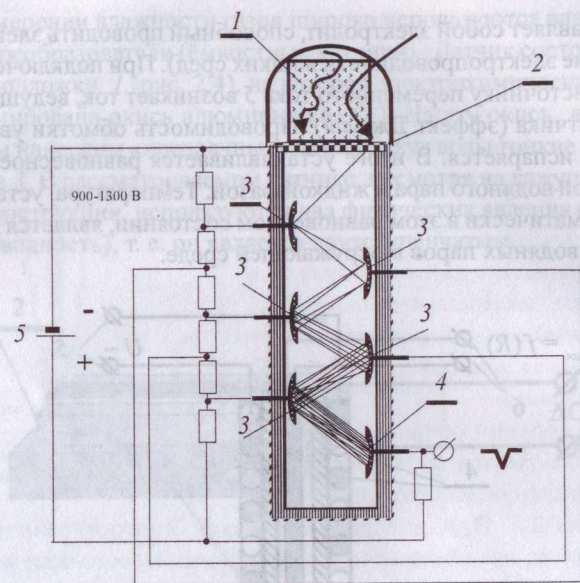


Рис. 2.6. Четырёхступенчатый датчик радиации:
1 — сцинтиллятор (NaI); 2 — фотокатод; 3 — динод; 4 — анод;
5 — источник постоянного напряжения

Гамма-частицы детектируются фотоумножителем по эффекту сцинтилляции, которые вызываются электронами [2.6]. В фотоумножителях для усиления первичного фототока помимо фотокатода 2 и анода 4 используются вторичные катоды (диноды 3) и система фокусировки электронного пучка. Высокоэнергетичные электроны, бомбардируя поверхность фотокатода, выбивают электроны из его поверхности (явление вторичной электронной эмиссии). Эти электроны фокусируются электростатическим полем на первый из последовательно расположенных электродов — динодов, покрытых материалом, для которых вторичная электронная эмиссия значительна (эффект Комптона). Потенциалы к последовательно расположенным динодам подводятся от резистивного моста (подключенного к источнику постоянного напряжения 5) и непрерывно возрастают от динода к диноду таким образом, что вторичные электроны, вылетевшие из k -го динода, фокусируются на $k+1$ диноде. При этом каждый из электронов выбивает несколько вторичных электронов и осуществляется процесс их «умно-

жения». Амплитуда выходного сигнала пропорциональна теряемой энергии частицы и зависит от ее природы.

Многоступенчатые датчики применяются тогда, когда по условиям измерительной задачи *требуется осуществить бесконтактный метод измерения*.

Например, тепловой датчик массового расхода жидкости (рис. 2.7) состоит из тонкостенной трубки 1, на поверхность которой намотана обмотка 2 нагревателя [2.6]. При подключении обмотки к источнику тока U происходит ее нагрев (эффект Джоуля). С противоположных от нагревателя двух сторон симметрично установлены два чувствительных элемента температуры 3, 4, воспринимающих соответственно температуру T_1 выше по потоку и температуру T_2 ниже по потоку нагревателя. Когда расход жидкости равен нулю, нагрев симметричен и $T_1 = T_2$. При наличии расхода температура T_1 уменьшается, а температура T_2 увеличивается. Разность этих температур пропорциональна массовому расходу.

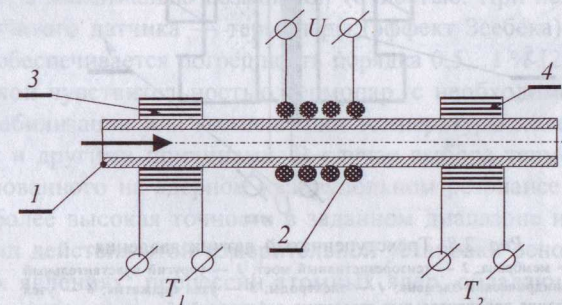


Рис. 2.7. Двухступенчатый датчик массового расхода жидкостей:
1 — трубка; 2 — обмотка нагревателя; 3, 4 — чувствительные элементы температуры, например, термометры сопротивления

В многоступенчатых датчиках имеется возможность *введения в конструкцию элементов компенсации (коррекции) его погрешности*. На рис. 2.8 показана конструкция трёхступенчатого датчика давления, в котором компенсация его дополнительных погрешностей производится с помощью процедуры сравнения входной величины с мерой.

Датчик работает следующим образом. Измеряемое давление через мембрану 1 и силопередающий элемент 8 вызывает деформацию чувствительного элемента, а следовательно, сопротивления тензорезис-

торов моста 2. С другой стороны, на электроды 4 узла принудительных эталонных деформаций 6, состоящего из пьезоэлемента 7, помещенного внутрь чувствительного элемента 3, подается известное эталонное электрическое напряжение $U_{\text{этал}}$, вызывающее деформацию

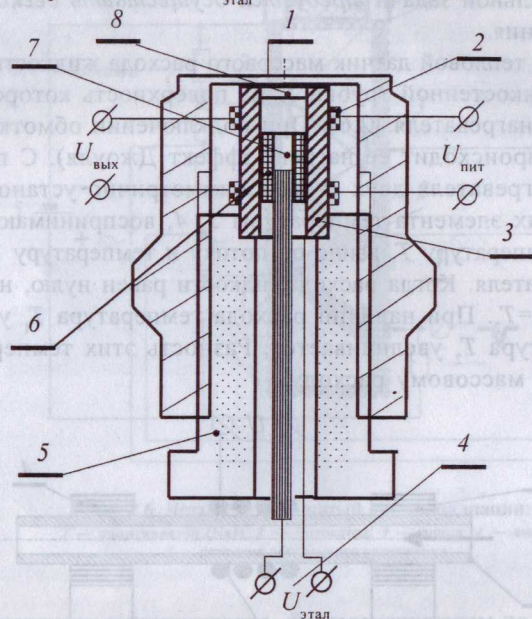


Рис. 2.8. Трёхступенчатый датчик давления:

1 — мембрана; 2 — тензорезистивный мост; 3 — упругий чувствительный цилиндрический элемент; 4 — электроды; 5 — узел поджатия; 6 — узел создания принудительных эталонных деформаций; 7 — пьезоэлемент; 8 — силовопередающий элемент

чувствительного элемента 3 (обратный пьезоэффект). Так как пьезоэлемент жестко связан с упругим чувствительным элементом 3, эта деформация вызывает соответствующую деформацию чувствительного элемента и изменение сопротивлений тензорезистивного моста 2. Размер деформации узла 6 является эталонной величиной («мерой»).

Таким образом, осуществляется компенсация дополнительных погрешностей датчика давления, например, от влияния температуры окружающей среды. Узел эталонных деформаций может быть выполнен в виде магнитострикционного преобразователя, термдеформационного преобразователя и др. Размер эталонных деформаций, создаваемый узлом 6, может задаваться дискретно или непрерывно, в

зависимости от применяемого метода измерений. В случае применения нулевого метода измерений происходит процесс постоянного сравнения измеряемой величины с «мерой». Компенсация воздействия влияющих величин оказывается более полной [2.8].

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ДАТЧИКОВ

Многоступенчатые датчики в большинстве случаев не уступают по своим метрологическим характеристикам одноступенчатым датчикам. На качественные свойства датчика как средства измерений влияют *эффективность и обоснованность выбора физического явления* при реализации датчика конкретной величины, а также *степень чистоты материала* чувствительного элемента и наличие у него *требуемых свойств*.

Например, представим, что по условиям измерительной задачи необходимо измерить температуру в области низких температур от 70 до 273 К с максимально возможной точностью. При использовании одноступенчатого датчика — термопары (эффект Зеебека) в заданном диапазоне обеспечивается погрешность порядка 0,5...1 % [2.9]. Это связано с низкой чувствительностью термопар, с необходимостью обеспечения стабилизации или компенсации температуры холодных спаев термопары и другими причинами. В случае выбора термопреобразователя, основанного на ядерном квадрупольном резонансе (ЯКР), достигается более высокая точность в заданном диапазоне измерения.

Принцип действия этой измерительной установки основан на двух физических явлениях: прецессии атомных ядер, обладающих квадрупольным моментом, и явлении резонансного поглощения излучения веществом [2.10]. При этом используется зависимость частоты поглощения высокочастотных колебаний в некоторых веществах от температуры (см. рис. 2.9). Например, частота поглощения хлората калия (KClO_3) при 0 °С составляет $28\,213\,421 \pm 2$ Гц.

Датчик температуры состоит из цилиндра 1, в котором размещена катушка индуктивности 2 генератора высокочастотных колебаний, окруженная термочувствительной солью 3. Полость датчика вакуумируется и заполняется инертным газом (гелием). С помощью измерительной установки катушка индуктивности подключается к высокочастотному LC-генератору и производится автоматический поиск и настройка на частоту ЯКР. Установки, в которых используется ЯКР одних и тех же ядер в образцах идентичного состава, имеют

одинаковую и стабильную зависимость частоты ЯКР от температуры. Датчик с чувствительным элементом из хлората калия обеспечивает измерение температуры в диапазоне от 77 до 303 К с абсолютной погрешностью $\pm 0,005 \dots 0,015$ К [2.10].

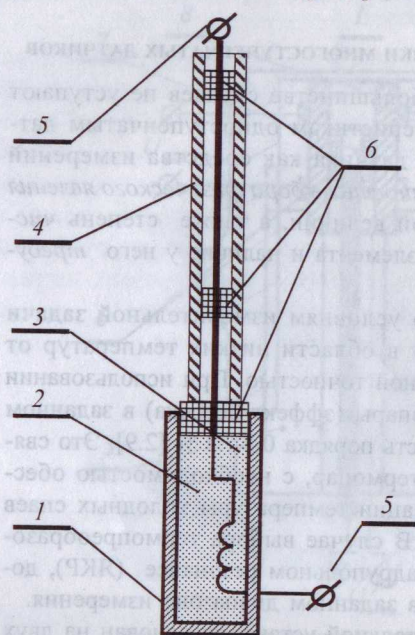


Рис. 2.9. Двухступенчатый датчик температуры:

1 — цилиндр; 2 — катушка индуктивности; 3 — соль (КСО₃); 4 — трубка; 5 — электрический вывод катушки 2; 6 — изоляционные втулки

газов распространены конденсационные датчики (датчики точки «росы»). Принцип действия такого многоступенчатого датчика основан на следующем (рис. 2.10). При равномерном охлаждении некоторого объема газа парциальное давление составляющих газового состава и водяного пара остается постоянным до момента насыщения (конденсация пара). При этом существует зависимость давления насыщенного пара над плоской поверхностью воды от температуры (принцип Ренью). Определение парциального давления (влажности газа) сводится к измерению температуры насыщения.

Идентичность и стабильность градуировочных характеристик ЯКР-датчиков в сочетании с частотным выходом позволяет использовать их при дистанционных измерениях температуры в метеорологии, океанографии и других областях. Кроме того, ЯКР-датчики применяются при создании эталонов температуры, например при воспроизведении практической температурной шкалы [2.10].

Следует учесть, что в многоступенчатых датчиках физические эффекты не обязательно образуют только лишь последовательную цепь при преобразовании измерительных сигналов. Они могут быть использованы параллельно и способствовать повышению качественных характеристик датчика. Например, при измерении влажности

Основными элементами такого датчика являются зеркало 3, система регулирования его температуры, состоящая из охладителя 10 и нагревателя 9, и чувствительный элемент температуры 8. Источник света 7 освещает металлическое зеркало таким образом, что при отсутствии конденсата влаги на нём свет не попадает на фотоприёмник 5. Затем зеркало охлаждается (эффект Пельтье) вплоть до появления росы. При появлении росы или иная рассеянный свет попадает на фотоприёмник и зеркало начинает подогреваться с помощью нагревателя сопротивления 9 (эффект Джоуля). При повышении температуры роса и соответственно рассеянный свет исчезают и вновь производится охлаждение зеркала. Терморезистор 8, закрепленный на обратной стороне зеркала, измеряет температуру при появлении росы (термоэлектрическая зависимость), по которой судят о влажности газа.

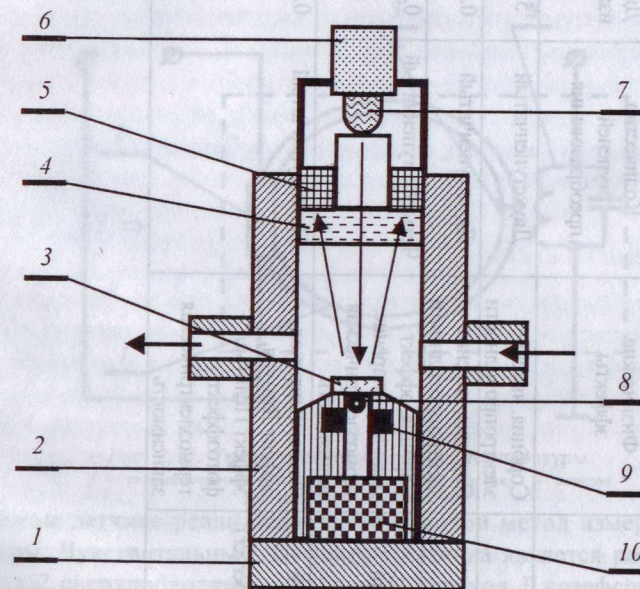


Рис. 2.10. Пятиступенчатый датчик влажности газов:

1 — основание; 2 — корпус; 3 — зеркало; 4 — окно; 5 — фоторезистор; 6 — осветительный блок; 7 — источник излучения; 8 — терморезистор; 9 — нагреватель сопротивления; 10 — охладитель (элемент Пельтье)

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики многоступенчатых датчиков влажности газов

Тип датчика (фирма)	Характеристики				Диапазон температуры внешней среды
	Физические эффекты	Количество ступеней преобразования	Диапазон измерения	Относительная погрешность	
Резистивный	Сорбция, явление электропроводности	Двухступенчатый	5...95 %	От 2% до 5 %	-10...60 °C
Ёмкостный (Coreci)	Сорбция, явление электропроводности	Двухступенчатый	0...100 %	2%...3%	-40...80 °C
Сорбционный — хлористолитиевый (Siemens)	Сорбция, эффект Джоуля, испарение, термоэлектрическая зависимость	Четырёхступенчатый	0...100 %	2%...3%	-40...120 °C
Конденсационный {точки «росы»} (Sereg — Schlumberger)	Фазовый переход, эффект Джоуля, эффект Пельтье, фотоэффект, термоэлектрическая зависимость	Пятиступенчатый	0...100 %	1,5%...2%	-70...180 °C

2. 1. Метрологические характеристики

Несмотря на большое количество эффектов, используемых в принципе действия рассматриваемого датчика, его метрологические характеристики превышают характеристики более простых двухступенчатых датчиков. В табл. 2.1 сведены сравнительные характеристики основных датчиков измерения влажности газов, доказывающие данное утверждение.

Следует заметить, что и при *последовательном сочетании* физических эффектов в многоступенчатых датчиках в ряде случаев удаётся достигнуть приемлемых метрологических характеристик датчиков конкретных величин. Задача нахождения таких сочетаний относится к оптимизационным задачам. В качестве примера на рис 2.11 схематично приведена структура конструкции трёхступенчатого датчика сверхнизких температур [2.10].

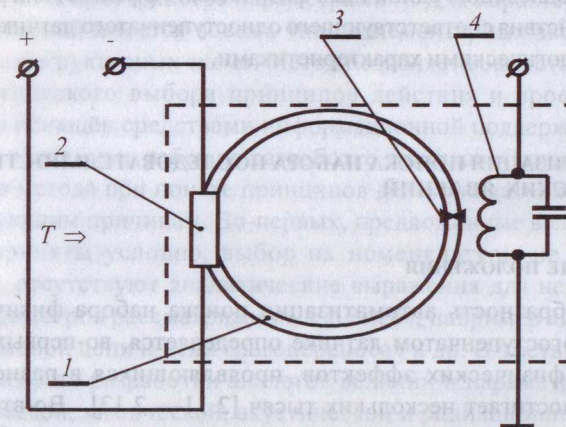


Рис. 2.11. Трёхступенчатый датчик температуры:
1 — сверхпроводящее кольцо; 2 — резистивный участок; 3 — переход Джозефсона; 4 — LC-контур

В этом датчике реализован термошумовой метод измерения температуры. Чувствительным элементом датчика является резистивный переход 2 сверхпроводящего кольца 1, переход Джозефсона 3 которого индуктивно связан с LC-контуром. Резистивный участок 2 с сопротивлением $R = 10^{-5}$ Ом служит источником тепловых шумов (шумов Найквиста). Так как напряжение шумов может принимать значение, близкое к нулю, то через резистор R пропускают ток смещения $I = 10^{-6}$ А. Таким образом, к переходу 3 приложена сумма напряжения теплового шума и

начального напряжения. В соответствии с нестационарным эффектом Джозефсона приложенное напряжение вызывает через переход 2 переменный ток, который модулирует высокочастотное напряжение на LC -контуре. В данном случае переход Джозефсона используется как преобразователь напряжения — частота. Напряжение с контура подается в дальнейшем на усилитель высокой частоты. Затем выделяется сигнал переменного тока, флуктуации частоты которого несут информацию об измеряемой температуре. Практически реализованные средства измерений с таким датчиком позволяют измерять температуру в диапазоне от 10 мК до 10 К с погрешностью около 1 %.

В заключение уместно заметить, что при измерении многих физических величин, таких как давление, влажность газов, концентрация различных веществ, широко используются двух- трёх-ступенчатые датчики (из-за отсутствия подходящих единичных физических эффектов) для реализации принципа действия соответствующего одноступенчатого датчика, с требуемыми метрологическими характеристиками.

2.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА НАБОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

2.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Целесообразность автоматизации поиска набора физических величин в многоступенчатом датчике определяется, во-первых, тем, что количество физических эффектов, проявляющихся в разнообразных веществах, достигает нескольких тысяч [2.11—2.12]. Во-вторых, тем, что количество сочетаний сигналов различного вида энергий, веществ, участвующих в алгоритмах восприятия, а также входных величин астрономически велико [2.13, 2.14].

Для автоматизации процесса поиска набора физических явлений необходимы формализация поставленной задачи и разработка модели, описывающей преобразования сигналов в будущей структуре многоступенчатого датчика. При описании преобразований сигналов в датчике также необходим единый математический, физический или другой обобщающий аппарат, который был бы независим от физической природы входных величин и преобразований.

Известен энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов датчиков [2.15—2.16]. Этот метод может быть использован при поиске набора физических эффектов многоступенчатых датчиков некоторых величин. Для поиска принципов действия датчиков предложены информационные модели цепей различной физической природы: электрической; магнитной; механической (линейной); механической (угловой); тепловой; гидравлической и влагопереносной. В качестве обобщенных величин и их параметров для этих цепей используются: «воздействие; реакция; заряд; импульс; сопротивление (проводимость); ёмкость (жесткость) и индуктивность (дедуктивность)». Аналитически описаны критерии, выражающие связь между величинами и параметрами: энергетический, статистический, динамический, параметрический и распределённый (для «систем с сосредоточенными и с изменяющимися во времени и пространстве параметрами»). Для характеристики физических явлений имеется восемь типов элементарных звеньев «параметрических структурных схем». Метод позволяет совместить процедуры автоматического выбора принципов действия и проектирования датчика, он оснащён средствами информационной поддержки проведения всех необходимых работ по разработке датчиков. Однако использование этого метода при поиске принципов действия датчиков затруднено по следующим причинам. Во-первых, предложенные величины и параметры приняты условно, выбор их номенклатуры не обоснован. Во-вторых, отсутствуют аналитические выражения для некоторых величин и параметров рассматриваемых «цепей», например «индуктивности для тепловой цепи и цепи влагопереноса» и др. В-третьих, возникает необходимость разработки аналогов величин и параметров для «цепей» оптической, химической, акустической и радиационной природы, как это и утверждают авторы. Действительно, химическую «цепь» — энергию нужно рассматривать как совокупность механической, тепловой и электрической энергии и определить степень их «участия» в этой «цепи». В-четвертых, в этом методе используется только энергетический анализ и критерием оценки эффективности принципа действия датчика служит «совокупность эксплуатационных характеристик» существующих датчиков. В данном случае затруднительно найти новый и эффективный принцип действия. Кроме того, эксплуатационные характеристики датчика зависят не только от выбранной совокупности физических явлений, но и от применяемых материалов чувствительных

элементов и других причин. В-пятых, рассматриваемый метод не может быть использован при поиске принципов действия, например, многомерных многоступенчатых датчиков.

Для поиска принципов действия многоступенчатых датчиков предложен «вещественно-энергетический» метод описания процессов, происходящих в датчике [2.17, 2.18]. Можно утверждать, что основой аналоговой информационно-измерительной техники являются не только традиционно рассматриваемые энергетические преобразования, но и преобразования вещества, происходящие в измерительных элементах. Под преобразованиями вещества понимается изменение свойств чувствительных элементов датчиков. Общеизвестно, что энергия характеризует общую количественную меру движения и взаимодействия всех видов материи. Вещество — это качественная сущность вида материи, и его состояние можно представить эквивалентной энергией. Целесообразность рассмотрения энергетических преобразований обусловлена взаимосвязью энергии сигнала с измерительной информацией. Но и преобразования энергии вне вещества не происходит. Поэтому очевидна необходимость целенаправленного и совместного рассмотрения характерных особенностей преобразований энергии и вещества, происходящих при формировании измерительных сигналов.

Для создания единого подхода разработан специальный классификационный перечень большинства измеряемых величин [2.19]. Они условно разбиты на величины с «вещественными» и «энергетическими» свойствами. Под такими свойствами понимаются признаки измеряемых величин, составляющие их отличительную особенность по отношению к веществу или энергии. Например, электрические величины, такие как ток, заряд, обладают «энергетическими» свойствами, а величины типа сопротивления, ёмкости — «вещественными». Кроме того, не ограничивается количество физических явлений в синтезируемом принципе действия, как это традиционно принято.

Основные положения методики поиска структур преобразований вещества и энергии измерительных сигналов следующие [2.17]: а) выделяются механический, тепловой, акустический, электрический, магнитный, оптический, ионизационный и химический виды энергии; б) считается, что сформированные сигналы отражают причинно-следственные связи протекающих преобразований; в) показывается, что на основе анализа этих связей можно обосновать обобщен-

ные физические величины и построить эквивалентные математические уравнения, необходимые при описании преобразований измерительных сигналов, различных по физической природе; г) учитывается, что методы измерения любых физических величин построены на общих закономерностях преобразований видов энергии и свойств веществ; д) принимается, что в закономерностях преобразований в веществе видов энергии проявляются свойства однородности и изотропности преобразований. При этом под однородностью преобразований понимается равная возможность участия всех видов энергии и свойств веществ при построении структуры преобразований любой физической величины, а под изотропностью — равноправие всех комбинаций (сочетаний) видов энергии и свойств веществ в выявляемых алгоритмах преобразований измерительных сигналов в аналоговой части средств измерений.

При анализе эффективности синтезируемых принципов измерений используется теория измерительных преобразователей, представляемых в виде электрических четырёхполюсников.

При изучении любого явления, состоящего во взаимодействии двух величин, допускается принять одну величину за причину (воздействие), а другую — за следствие (реакцию) (табл. 2.2).

В средствах измерений в первую очередь необходимо рассматривать процесс преобразований, происходящих в аналоговой части, который характеризуют носители информации — потоки энергии сигналов. Эти потоки энергии представлены в виде двух величин: воздействия и реакции. Например, поток электрической энергии описывается произведением напряжения и тока. Напряжение рассматривается как воздействие, а ток — как реакция. Под обобщенным же зарядом понимается свойство материи к взаимодействию, способность реагировать на различные воздействия во времени. Например, для химической энергии обобщенным зарядом является концентрация вещества. Чем больше концентрация вещества, тем выше его способность к химическим превращениям (реакциям). Обобщенное сопротивление для любого вида энергии определялось отношением воздействия и вызванной им реакции. Эта величина характеризует присущую материи способность оказывать сопротивление внешним воздействиям.

При формализации описания алгоритма преобразований, происходящих в датчиках, можно принять следующие условные обозначения.

Таблица 2.2

Обобщенные величины для различных видов энергии

Виды энергии $\mathcal{E}^*$	Обобщенные величины					Поток энергии $\mathcal{P}^*$
	Напряжение (причина) $\mathcal{U}^*$	Ток (следствие) $\mathcal{I}^*$	Заряд $\mathcal{Q}^*$	Сопротивление $\mathcal{R}^*$	Энергия $\mathcal{E}^*$	
Электрическая $\mathcal{E}_E$	U	$I = dq/dt$	$Q = CU$	R	Uq	$U \cdot I$
Магнитная $\mathcal{E}_H$	F_h	$d\Phi/dt$	$\Phi = LFI$	$R_h = \frac{F_h}{d\Phi/dt}$	$F_h \Phi$	$F_h d\Phi/dt$
Механическая $\mathcal{E}_F$	F	$V = dl/dt$	$L = FID$	$R_f = F/v$	FI	Fv
Акустическая $\mathcal{E}_p$	p	dV/dt	V	$R_p = \frac{p}{dV/dt}$	pV	$p dV/dt$
Тепловая $\mathcal{E}_T$	$\text{grad } T$	$V_T = \frac{d(IC_v)}{dt}$	IC_v	$R_T = \frac{\Delta T}{V\lambda}$	$\text{grad } T \cdot IC_v$	$\text{grad } T \cdot V_T$
Оптическая $\mathcal{E}_J$	H	$v_i = \frac{d(J/E)}{dt}$	$s = \frac{J}{E}$	$R_i = \frac{\omega H}{sn}$	Js	$H \cdot v_i$
Ионизационная $\mathcal{E}_R$	D_n	dm/dt	m	$R_r = \frac{D_n}{dm/dt}$	$D_n m$	$D_n dm/dt$
Химическая $\mathcal{E}_C$	$d\chi/dt \cdot V$	dN/dt	N	$R_c = \frac{d\chi/dt \cdot V}{dN/dt}$	$d\chi/dt \cdot V \cdot N$	$\frac{d\chi}{dt} V \frac{dN}{dt}$

Систематизация обобщенных величин: F_h – магнитодвижущая сила; Φ – магнитный поток; L – индуктивность; v – скорость; l – перемещение; D – жесткость; p – звуковое давление; V – объем; $\text{grad } T$ – градиент температуры; ΔT – приращение температуры; C_v – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; H – энергетическая экспозиция; J – сила света; E – энергетическая освещенность; D_n – доза излучения; m – масса; dm/dt – поток ионизирующего излучения; χ – коэффициент диффузии; N – концентрация; n – поток фотонов.

$\mathcal{E}_E, \mathcal{E}_H, \mathcal{E}_F, \mathcal{E}_p, \mathcal{E}_T, \mathcal{E}_J, \mathcal{E}_R, \mathcal{E}_C$ – виды энергии соответственно электрической, магнитной, тепловой, механической, акустической, оптической, радиационной и химической природы;

$\mathcal{E}_{kx} (B_{kx})$ – обобщенное энергетическое (вещественное) свойство измеряемой величины, где индекс k указывает на принадлежность

величины к одному из видов энергии (электрической, механической и т. д.), а x – на принадлежность к конкретной измеряемой величине (напряжение, сила и т. д.);

$\mathcal{E}_k^0$ – вид энергии с фиксированным нормированным размером;

$\Delta \mathcal{E}_k$ – приращение (изменение) энергии;

B_r – активные вещества чувствительных элементов датчиков, способные генерировать вид энергии, отличный от входной (генераторные);

B_n – пассивные вещества чувствительных элементов датчиков, способные преобразовывать входной вид энергии (параметрические);

B^* – видоизмененное состояние вещества (агрегатное, фазовое и т. п.) или вещественного свойства;

$(B_1 B_2 \dots)$ – композиция веществ чувствительного элемента;

« $\wedge$ » – знак конъюнкции;

« $\Rightarrow$ » – знак воздействия входной величины;

« $\rightarrow$ » – знак преобразования вида энергии или свойств вещества.

Все преобразования основаны на базовых алгоритмах [2.17]. При восприятии свойств вещества B_x используется известная вспомогательная энергия $\mathcal{E}^0$, которая взаимодействует с веществом и изменяется, принимая вид части энергии $\mathcal{E}^0 - \Delta \mathcal{E}$. В результате формируется сигнал

$$(\mathcal{A}_{bx} : B_x \rightarrow \Delta \mathcal{E}),$$

$$\uparrow \mathcal{E}^0$$

а восприятие энергии выполняется в зависимости от свойств вещества чувствительного элемента:

$\mathcal{A}_{x1} : \mathcal{E}_x \Rightarrow B_r \rightarrow \mathcal{E}$ (используются «генераторные» свойства вещества) и

$\mathcal{A}_{x2} : \mathcal{E}_x \Rightarrow B_n^* \rightarrow \Delta \mathcal{E}$ (преобразование пассивного вещества B_n).

$$\uparrow \mathcal{E}^0$$

Таким образом, один из алгоритмов $\mathcal{A}_{x1}$ связан с применением вещества, позволяющего изменять вид энергии входной величины, например тепловой на электрический ($\mathcal{E}_T \Rightarrow B_r \rightarrow \mathcal{E}_E$), а другой $\mathcal{A}_{x2}$ – с изменением параметра вещества B_n^* , с последующим преобразованием его в энергию.

Рассмотрим алгоритм измерения температуры посредством термпары, нашедший широкое распространение из-за достаточно хороших метрологических характеристик, а также простоты, дешевизны и надежности [2.9]. Этот алгоритм действует при наличии двух веществ, образующих термопару (B_1 и B_2), генерирующую $\mathcal{E}_T$. Метод

основан на существовании определенной зависимости между термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) E_T , возникающей в цепи, составленной из разнородных проводников $(B_1 \cdot B_2)_T$, и температурой T мест соединения этих проводников. ТермоЭДС термопара зависит лишь от материала термоэлектродов B_1, B_2 , от температуры её «горячего» спая T и температуры окружающей среды T_0 («холодного» спая) и не зависит ни от диаметра термоэлектродов, ни от их длины, ни от распределения температур по их длине (эффект Зеебека). Недостатком применения термопары является необходимость учета температуры холодного спая — температуры окружающей среды T_0 . Это достигается учетом результата измерения этой температуры, а в некоторых случаях ее компенсацией $(E_T - E_0)$. Учет температуры холодного спая может быть выполнен с помощью дополнительного датчика температуры B_n (термометра сопротивления), формирующего сигнал температуры холодного спая E_0 .

Итак, алгоритм действия, позволяющий формализовать рассматриваемый метод измерения температуры, следующий:

$$\left. \begin{array}{l} T \Rightarrow (B_1 \cdot B_2)_T^* \rightarrow E_T \\ T_0 \Rightarrow B_n \rightarrow E_0 \end{array} \right\} \rightarrow (E_T - E_0), \quad (2.1)$$

Другой тип алгоритма связан с получением разности между состоянием вещества чувствительного элемента до воздействия входной величины и после ее воздействия.

Этот тип алгоритма реализуется при восприятии и преобразовании температуры с помощью термопреобразователей сопротивления. В данном случае терморезистор B_{n1} и компенсационный резистор B_{n2} , включенные в мостовую схему, находятся при температуре T и T_0 . Если термометры включены в соседние плечи мостовой цепи, питаемой от источника постоянного тока $\mathcal{E}_E^0 \{I\}$, то в измерительной диагонали формируется напряжение, несущее информацию о температуре окружающей среды U_0 . При воздействии измеряемой температуры T электрическое сопротивление термометра изменяется B_{n1}^* , а следовательно, изменяется и падение напряжения U_T на термометре. На измерительной диагонали мостовой схемы формируется электрический сигнал, несущий информацию об измеряемой температуре $\Delta \mathcal{E}_E (U_T - U_0)$.

Таким образом, алгоритм работы датчика может быть записан в следующем виде:

$$T \Rightarrow \left. \begin{array}{l} B_{n1} \rightarrow B_{n1}^* \rightarrow U_T \\ \mathcal{E}_E^0 \{I\} \Rightarrow B_{n2}^* \rightarrow U_0 \\ T_0 \Rightarrow B_{n2} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta \mathcal{E}_E (U_T - U_0), \quad (2.2)$$

Применение алгоритмов позволяет формально описать процесс преобразования сигналов в аналоговых датчиках.

В приложении приведены сведения о некоторых основных физических явлениях и материалах, где они проявляются: для датчиков температуры, механических величин (давление, сила, деформация), относительной влажности воздуха, магнитной индукции, светового потока, активности радиационной и звуковой энергии.

Выбор этих величин обусловлен их широким распространением в различных областях науки и техники и в жизни человеческого общества.

2.2.2. МЕТОДИКА ПОИСКА СТРУКТУРЫ

Разработана методика автоматизированного поиска структур преобразований для 8 видов энергии и веществ (преобразователей энергии и параметрических преобразователей) [2.20]. Она включает: а) формирование принципа работы датчика, т. е. совокупности физических явлений, с помощью обобщающих алгоритмов, найденных в результате анализа более 200 методов измерения физических величин и формализованных рабочих алгоритмов преобразований вещества и энергии в датчиках; б) создание банка данных по физическим явлениям в форме, удобной для машинной обработки; в) оценку свойств структур преобразований с использованием критерия согласования обобщенных сопротивлений, разработанного с привлечением материалов теоретической механики, теории четырёхполюсников и теории аналогий и подобия. При разработке критерия использовалась идея академика А. А. Харкевича по выводу обобщенных сопротивлений для некоторых видов энергии и известный в теории электрических четырёхполюсников способ оценки эффективности генераторных и параметрических преобразователей [2.21]. Таким образом, был автоматизирован поиск структур преобразований сигнала.

лов с подбором наиболее рациональных комбинаций физических явлений и использовалась база знаний о свойствах материалов, в которых проявляются эти явления. Конструкция датчиков разрабатывается в дальнейшем с учетом предложенной структуры.

На основе «вещественно-энергетического» подхода разработана методика* поиска наборов принципов построения одномерных и многомерных многоступенчатых датчиков с использованием И-ИЛИ графа Кёнига и банка физических явлений и материалов, где они проявляются [2.17].

Рассмотрим основные особенности этой методики и условия ее применения. Пусть имеется некоторое конечное множество физических явлений, действие которых отражается в ориентированном графе Кёнига $G = (X', X'', u)$, где к И-вершинам X' относим вещества (В), а к ИЛИ-вершинам X'' — входные и выходные виды энергии (Э). Граф G имеет дуги из $x \in X'$ и $y \in X''$, если x соответствует входной энергии, относящейся к физическому объекту (В) — y , и дуги из $y \in X''$ в $x \in X'$, если вершина x соответствует выходному виду энергии, относящемуся к физическому объекту (В) — y . Пусть для каждой вершины $x \in X''$ на парах дуг (u, v) , одна из которых входит, а другая выходит из x , определена функция: $\Delta(u, v) = 0$, если для смежных входной и выходной вершин вид энергии имеет одинаковую физическую природу; 1 — в противном случае.

Пример такого графа приведен на рис. 2.12, а, где вершины из множества X' (В-вершины) обозначены положительными числами. Это И-вершины. Например, чтобы получить выходные виды энергии —4 и —6 необходимо, чтобы на физическое тело (вершина 4) действовало одновременно два входных вида энергии —1 и —2.

Вершины из множества X'' (Э-вершины) обозначены отрицательными числами. Например, выходным видом энергии физических тел 4 и 5 является вид энергии —6. В таком случае для физических объектов 6 и 7 безразлично, какой выбрать вид энергии от вершины 4 или 5. Таким образом, вершина —6 может быть обозначена как ИЛИ-вершина.

В графе на рис. 2.12, а вершины —1, —2, —3 являются входными измеряемыми величинами (для многомерных многоступенчатых датчиков), вершина —7 — выходным видом энергии, реализующим заданную функцию датчика. Справа на рис. 2.12, а представлена $\Delta(u, v)$

* Приводимый далее материал полезен главным образом при проектировании новых датчиков, а также при анализе работы многоступенчатых датчиков.

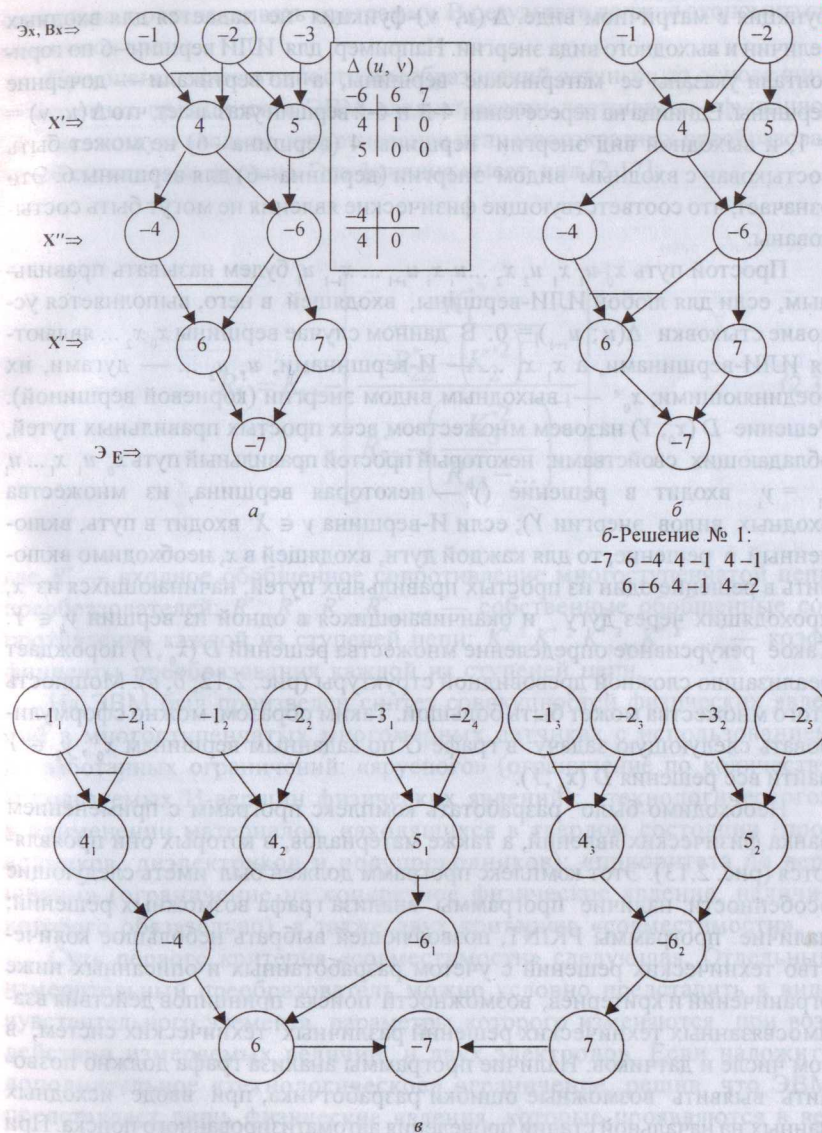


Рис 2.12. Пример И-ИЛИ графа (а) и построение И-ИЛИ дерева (б, в)

функция в матричном виде. $\Delta(u, v)$ -функция не задается для входных величин и выходного вида энергии. Например, для ИЛИ вершин-6 по горизонтали указаны ее материнские вершины, а по вертикали — дочерние вершины. Единица на пересечении 4-й и 6-й вершин указывает, что $\Delta(u, v) = 1$, и выходной вид энергии вершины 4 (вершина-6) не может быть состыкован с входным видом энергии (вершина-6) для вершины 6. Это означает, что соответствующие физические явления не могут быть состыкованы.

Простой путь $x_0 u_1 x_1 u_2 x_2 \dots u_i x_i u_{i+1} \dots x_{i-1} u_i$ будем называть правильным, если для любой ИЛИ-вершины, входящей в него, выполняется условие стыковки $\Delta(u_i; u_{i+1}) = 0$. В данном случае вершины $x_0 x_2 \dots$ являются ИЛИ-вершинами, а $x_1 x_3 \dots$ — И-вершинами; $u_1 u_2 \dots$ — дугами, их соединяющими; x_0 — выходным видом энергии (корневой вершиной). Решение $D(x_0, Y)$ назовем множеством всех простых правильных путей, обладающих свойствами: некоторый простой правильный путь $x_0 u_1 x_1 \dots u_i x_i = y_i$ входит в решение (y_i — некоторая вершина, из множества входных видов энергии Y); если И-вершина $y \in X'$ входит в путь, включенный в решение, то для каждой дуги, входящей в x , необходимо включить в решение один из простых правильных путей, начинающихся из x , проходящих через дугу и оканчивающихся в одной из вершин $y_k \in Y$. Такое рекурсивное определение множества решений $D(x_0, Y)$ порождает реализацию сложной древовидной структуры (рис. 2.12, б, в). Мощность этого множества может быть большой. Таким образом, можно сформулировать следующую задачу: в графе G по заданным вершинам $x_0, y_k \in Y$ найти все решения $D(x_0, Y)$.

Необходимо было разработать комплекс программ с применением банка физических явлений, а также материалов, в которых они проявляются (рис. 2.13). Этот комплекс программ должен был иметь следующие особенности: наличие программы анализа графа возможных решений; наличие программы PRINT, позволяющей выбрать небольшое количество технических решений с учетом разработанных и описанных ниже ограничений и критериев, возможности поиска принципов действия взаимосвязанных технических решений различных технических систем, в том числе и датчиков. Наличие программы анализа графа должно позволить выявить возможные ошибки разработчика, при вводе исходных данных на начальной стадии проведения автоматизированного поиска. При наличии ошибки ЭВМ должна классифицировать ее, оповещать об этом

оператора и останавливать программу. В результате должно экономиться машинное время.

При оценке эффективности преобразований датчиков на основе синтезируемых принципов в ЭВМ следует ввести лестничную функцию, определяющую входное сопротивление цепи многократных преобразователей сигналов в датчике. Эта функция имеет вид [2.17]:

$$R_1^* = R_{11}^* - \left[\frac{K_1^{*2}}{R_{22}^* - (K_2^{*2})^{-1}} \right]^{-1} \left[\frac{K_3^{*2}}{R_{33}^* - (K_4^{*2} - \dots)^{-1}} \right]^{-1}, \quad (2.3)$$

где R_1^* — входное обобщенное сопротивление многоступенчатой цепи преобразователей; $R_{11}^*, R_{22}^*, R_{33}^*, R_{44}^*, \dots$ — собственные обобщенные сопротивления каждой из ступеней цепи; $K_1^{*2}, K_2^{*2}, K_3^{*2}, K_4^{*2}, \dots$ — коэффициенты преобразования каждой из ступеней цепи.

На ЭВМ был произведен синтез совокупностей физических явлений в многоступенчатых многомерных датчиках с использованием разработанных ограничений: «ярусного» (ограничение по количеству используемых И-вершин физических явлений); «технологического» в применении материалов, находящихся в твердом состоянии (проводников, диэлектриков и полупроводников); «приоритета по вершинам» (ограничение на конкретное физическое явление, наличие которого обязательно), а также двух критериев «совместимости».

Суть первого критерия «совместимости» следующая. Отдельный измерительный преобразователь можно условно представить в виде чувствительного элемента, параметры которого изменяются при воздействии измеряемых величин, и двух электродов. Если наложить дополнительное «технологическое» ограничение, решив, что ЭВМ представляет лишь физические явления, которые проявляются в веществах, находящихся в твердом состоянии (в проводниках и диэлектриках), и дополнительно задать условия обязательности последова-

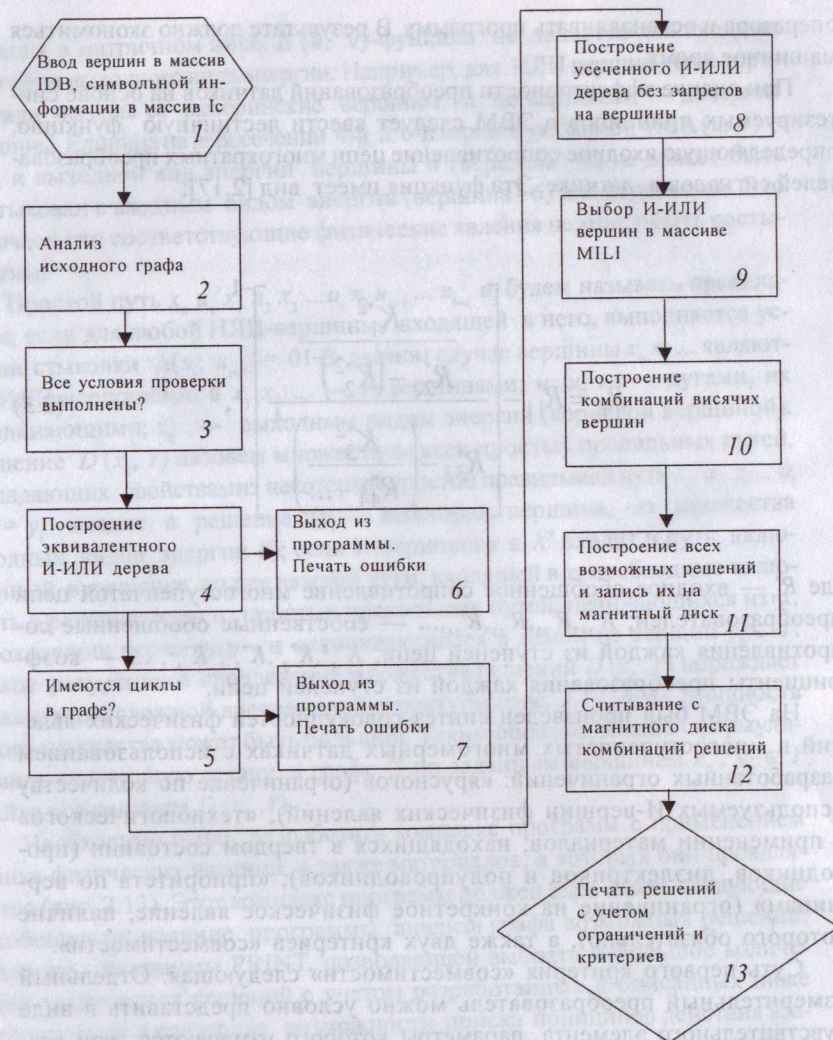


Рис 2.13. Схема алгоритма использования комплекса программ

тельного чередования слоев материалов диэлектрика и проводника, то появится возможность исполнить конструкцию, которая будет отличаться от простой комбинации одномерных датчиков. Выполнение таких операций позволяет находить структуры датчиков, обладающие следующими преимуществами. Во-первых, можно уменьшить количество электродов, так как один и тот же электрод может быть общим для чувствительных элементов. Это позволит уменьшить габариты и массу датчика. Кроме того, в данном случае сократится число электрических соединений электродов и «выводов», что, в свою очередь, повысит его надежность. Во-вторых, появится возможность использовать чувствительный элемент, выполненный из электропроводящего вещества, в качестве электрода, что упростит структуру датчика. В этом случае чувствительный элемент, предназначенный для получения информации об одной из измеряемых величин, дополнительно сможет выполнять функцию электрода для другой входной величины. В каждом конкретном случае применяется этот критерий на основе анализа материалов, представленных ЭВМ для данного варианта принципа действия датчика, и поиска материалов для всех измеряемых величин.

Второй критерий совместимости предусматривает согласование входных и выходных сопротивлений в цепи измерительных преобразований датчика [формула (2.3)].

В качестве графа технических решений (для поиска новых принципов действия многомерных датчиков температуры, усилия и относительной влажности) был использован граф, который содержал всего лишь 40 хорошо известных и используемых на практике физических явлений (рис. 2.14).

Во-первых, это сделано специально и связано с тем, что при использовании расширенного банка физических явлений всегда существует большая вероятность выбора новой совокупности явлений нетрадиционного применения (в цепи вещественных и энергетических преобразований) и малоизвестных широкому кругу специалистов.

Во-вторых, для характеристики большого количества физических явлений необходимы вывод исходных уравнений и данные для расчета условий согласования сопротивлений. Для этого потребуется значительное время.

Таким образом, задачу поиска набора физических явлений в датчиках можно решить следующим образом:

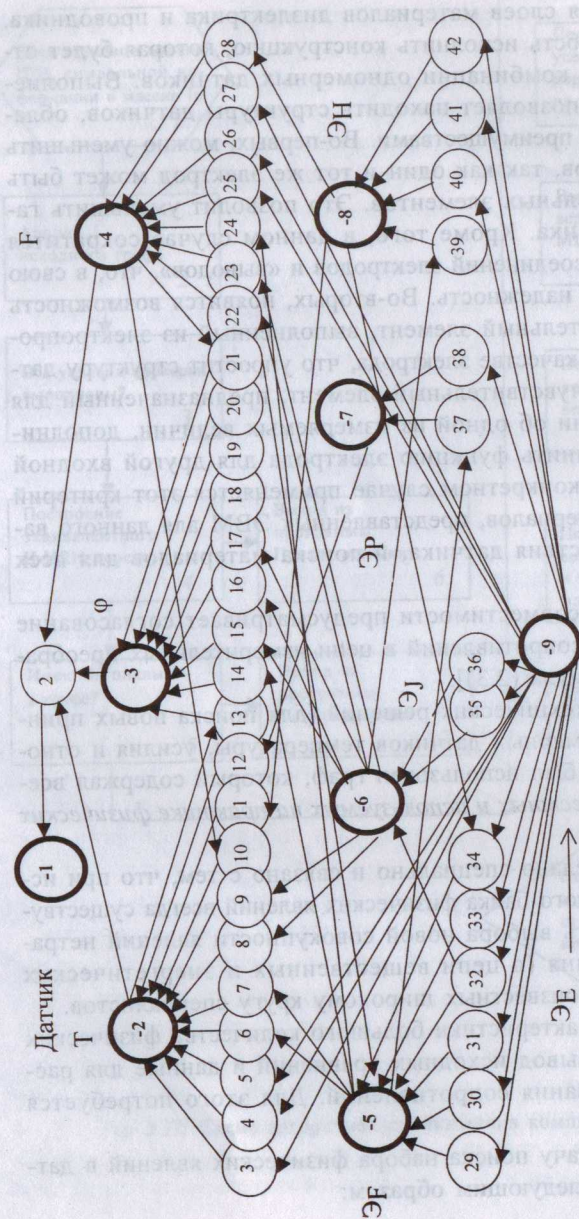


Рис. 2.14. И-ИЛИ граф возможных принципов измерений температур (T), влажности (ϕ) и усилия (F); Физические явления: 3 — эффект Зеебека, 4 — термоэлектрическая зависимость; 5 — пироэлектрический; 6 — объемный, 7 — биметалл, 8 — «тушение» люминесценции, 9 — термоминистор, 10 — манометрирование, 11 — термолюминесценция, 12 — акустический, 13 — теловый, 14 — деформационный, 15 — гитрошовый, 16 — тушение люминесценции, 17 — хемилюминесценция, 18 — электромагнитный, 19 — абсорбция, 20 — кондуктометрический, 21 — газометрический, 22 — пьезоэлектрический, 23 — «тушение» люминесценции, 24 — эффект мембраны, 25 — прямой пьезоэффект, 26 — теплоэффект, 27 — фотоэффект, 28 — пьезомагнетизм, 29 — эффект униполярной индукции, 30 — эффект электрической проводимости, 31 — эффект резиста, 32 — пространственно-оптический, 33 — пространственно-оптический, 34 — эффект регулировки индуктивности, 35 — эффект Беккера, 36 — фотоэффект, 37 — эффект Холла, 38 — сегнетоэлектрический, 39 — люминесценция, 40 — магнитосопротивление, 41 — электромагнитная индукция, 42 — эффект Хоуга

1) в форме, удобной для машинной обработки, создать базу данных, включающих сведения о материалах веществ, где проявляются эти явления;

2) задать ограничения, налагаемые на получаемые совокупности физических явлений;

3) найти возможные комбинации физических явлений с учетом заданных ограничений и оценить эффективность преобразований по предложенной методике.

2.2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ПРИНЦИПОВ ДЕЙСТВИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ДАТЧИКОВ

С помощью ЭВМ был произведен автоматизированный поиск новых совокупностей физических явлений в датчиках температуры, силы и относительной влажности воздуха, с использованием И-ИЛИ графа, показанного на рис. 2.14, и ограничений: «ярусного» (количество И-вершин задавалось равным 2) и «технологического». В результате поиска были найдены более 20 ранее неизвестных принципов действия таких датчиков.

На основе одного из найденных принципов разработана конструкция многоступенчатого датчика температуры (рис. 2.15). Датчик выполнен в виде полый цилиндрической втулки из диэлектрического теплоизоляционного материала с малым объемным коэффициентом температурного расширения. В верхней части корпуса установлены интегральный тензопреобразователь и прижимная втулка. Интегральный тензопреобразователь представляет собой кремниевую профилированную мембрану, обрамленную кольцом жесткости. Между втулкой и тензопреобразователем помещено термометрическое вещество с большим коэффициентом объемного расширения — серебро B_r . Принцип действия датчика основан на изменении давления p между втулкой и тензопреобразователем при изменении температуры T серебра $B_r \Rightarrow B_r^*$. Изменение давления p приводит к деформации мембраны тензопреобразователя (тензорезистивный мост с измерительным B_{n1} и компенсационным B_{n2} терморезисторами). Мост питается от источника постоянного тока $E^0 \{I\}$. В результате на измерительной диагонали моста формируется электрический выходной сигнал — $\Delta E_E (U_1 - U_2)$.

Формальное описание преобразований датчика (рис 2.15) следующее:

$$\left. \begin{array}{l} T \Rightarrow B_r \rightarrow B_r^* \rightarrow p \rightarrow B_{n1} \rightarrow U_1 \\ \uparrow \\ T_0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta \mathcal{E}_E (U_1 - U_2), \quad (2.4)$$

$$\mathcal{E}_E^0 \{I\} \Rightarrow B_{n2} \rightarrow U_2$$

Датчик был изготовлен на базе интегрального преобразователя с квадратной мембраной толщиной 60 мкм. Его чувствительность к изменению давления составила $\Delta S_p = 10^{-7} \dots 10^{-8}$ Па [2.22].

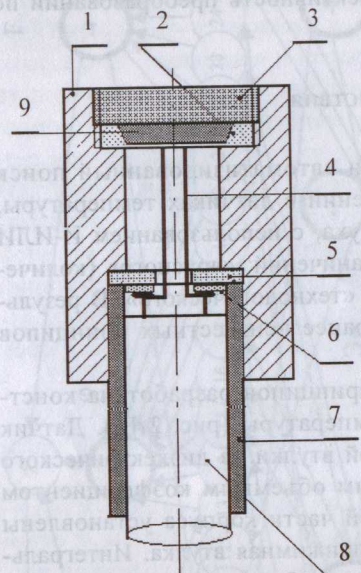


Рис. 2.15. Двухступенчатый датчик температуры:

1 — цилиндрический корпус; 2 — интегральный тензопреобразователь с мембраной; 3 — прижимная резьбовая втулка; 4 — электрические выводы интегрального преобразователя; 5 — токосъемник из фольгированного стеклотекстолита с контактными площадками; 6 — ограничительная трубка; 7 — электрический выходной кабель; 8 — серебро

Многоступенчатый датчик воспринимал температуру в диапазоне от 0 до 4 °C с погрешностью 0,01 °C. Проверка датчика проводилась в термостате UTU-2, с использованием стеклянного ртутного термометра ТЛ-2.

Датчик нашёл применение при проведении научно-исследовательской работы по изучению влияния абиотических (внешних) стрессов на процесс роста и развития сельскохозяйственных культур при их селекции [2.14]. Дело в том, что если растение охлаждать по определенной программе и точно фиксировать момент фазового перехода соков растения из жидкой фазы в твердую, то по этой информации можно судить о морозоустойчивости объекта исследований. А для этого необходим датчик температуры с высокой чувствительностью (менее 0,01 °C).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

- 2.1. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи): Учеб. пособие для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.
- 2.2. Хофман Д. Техника измерений и обеспечения качества: Справочная книга / Пер с нем.; Под ред. Л. М. Закса, С. С. Кивилиса. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 472 с.
- 2.3. Электрические измерения неэлектрических величин / А.М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.
- 2.4. Лазутин В. И. Сорбционные преобразователи и приборы для измерения влажности // Приборы, средства автоматизации и управления / ТС-4 Аналитические приборы и приборы для научных исследований. Вып. № 4. — М.: Информприбор. — 54 с.
- 2.5. Приборы контроля окружающей среды / В. Е. Манойлов, П. Н. Неделин, А. Н. Лукичев и др.; Под ред. проф. В. Е. Манойлова. — М.: Атомиздат, 1980. — 213 с.
- 2.6. Датчики измерительных систем: В 2 книгах. Кн. 2 / Ж. Аш, П. Андре, П. Дегут и др.; Пер. с франц. — М.: Мир, 1992. — 424 с.
- 2.7. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. — М.: Мир, 1989. — 196 с.
- 2.8. Алейников А.Ф. Использование вещественных и энергетических преобразований при коррекции погрешностей датчиков // Новые методы и технические средства исследований физических процессов: Сб. науч. тр./ РАСХН. — Новосибирск, 1997 — С. 3 — 20.
- 2.9. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. — М.: Стандарт, 1970. — 258 с.
- 2.10. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 320 с.
- 2.11. Дворянkin А.М., Половинкин А.И., Соболев А.Н. Методы синтеза технических решений. — М.: Наука, 1977. — 104 с.
- 2.12. Дворянkin А.М., Половинкин А.И., Соболев А.Н. Об автоматизации поиска принципов действия технических систем на основе банка физических явлений // Кибернетика. — 1978. — № 1. — С. 80—86.
- 2.13. Алейников А. Ф., Цапенко М.П. Автоматизация выбора физических явлений многофункциональных датчиков // Приборы и системы управления. — 1990. — № 4. — С. 27—29.

2.14. Алейников А. Ф. Создание новых средств измерений для АПК. — Новосибирск : АОЗТ «Трина», 1993. — 160 с.

2.15. Зарипов М. Ф., Петрова И. Ю., Сулейманов Н. Т. Надежность элементов и средств управления с распределёнными параметрами. — М.: Наука, 1980. — 153 с.

2.16. Зарипов М. Ф., Петрова И. Ю. Энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов систем управления // Датчики и системы. — 2000. — № 1. — С.10—16.

2.17. Алейников А. Ф. Структурный синтез принципов и средств измерений // Сиб. вестн. с.-х. науки. — 1996. — № 2. — С. 124—134.

2.18. Алейников А. Ф. Элементы теории синтеза многофункциональных измерительных устройств // Автоматизация и контроль технологических процессов в сельском хозяйстве: Сб. науч. тр./ ВАСХНИЛ. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 1982. — С. 63—95.

2.19. Алейников А. Ф. К выбору структуры многофункциональных измерительных устройств // Приборы и системы управления и контроля для сельского хозяйства: Сб. науч. тр. / ВАСХНИЛ. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 1984. — С. 68—96.

2.20. Алейников А. Ф. Методика структурного синтеза принципов действия датчиков // Датчики и системы. — 1999. — № 2. С. 23—25.

2.21. Харкевич А. А. Теория электроакустических преобразователей: Избр. Тр. — М: Наука, 1973. — Т. 1: Волновые процессы. — 400 с.

2.22. Гридчин В. А. Проектирование тензопреобразователей на эффекте поперечной пьезоЭДС с учётом размера потенциальных контактов // Физические основы полупроводниковой тензометрии: Межвуз. сб. науч. тр./ Новосиб. электротехн. ин-т. — Новосибирск, 1984. — С. 109—119.

ГЛАВА 3

МНОГОМЕРНЫЕ ДАТЧИКИ

3.1. МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

Под многомерными понимаются датчики, воспринимающие и преобразующие несколько входных величин.

В них должны выполняться раздельное восприятие входных величин, а также выдача о них измерительных сигналов. Помимо того что датчики должны быть избирательными к входным величинам, они должны быть малочувствительными к помехам. Желательно, чтобы они имели малые габариты и массу, были технологичными при изготовлении, оказывали минимальное воздействие на исследуемый объект и обладали заданными метрологическими характеристиками.

Остановимся на основных методах разделения входных величин [3.1, 3.2].

Метод «приведения», заключающийся в организации селективных каналов восприятия величин. Он предусматривает объединение нескольких чувствительных селективных элементов в одном датчике и параллельное восприятие входных величин. На этом методе основано функционирование селективных многомерных датчиков не с простым объединением чувствительных элементов, а с конструктивно переработанной их комбинацией, например, для уменьшения габаритов и массы, совместного многофункционального использования выводов и материалов выводов в качестве вещества чувствительных элементов.

Метод «исключения», предусматривающий коммутацию или выборочное временное «исключение» воздействия заданных величин. При использовании этого метода восприятие входных величин происходит последовательно во времени.

Метод «воздействия», заключающийся в изменении дополнительной энергии воздействия при активном восприятии пассивных величин. В частности, к нему относятся изменения частотного спектра при изменении энергии воздействия.

Метод перестройки параметров и режимов работы датчика. При восприятии каждой из измеряемых величин у датчика искусственно изменяется режим его работы. Восприятие выходных величин при использовании этого метода происходит последовательно во времени.

На практике наиболее распространены многомерные селективные датчики. Методы «исключения», «воздействия» и «перестройки» являются основой перестраиваемых многомерных датчиков.

Итак, будем различать *селективные* и *перестраиваемые* многомерные датчики [3.3, 3.4].

Далее остановимся на описании многомерных датчиков, в которых используются рассмотренные методы разделения входных величин.

3.2. ДВУХМЕРНЫЕ ДАТЧИКИ

В работе [3.5] описан двухмерный селективный датчик для одновременного измерения усилия и температуры, основанный на использовании пассивных элементов и метода приведения. Он изготовлен на базе нитевидных кристаллов кремния диаметром 30...70 мкм с ориентацией оси роста $\langle 111 \rangle$ (см. рис. 5.1). Центральная часть такого датчика имеет электронную проводимость n -типа, а окружающий ее внешний слой p -типа (дырочная проводимость). К кристаллу с проводимостью n -типа (термоэлемент) приваривались контакты платиновой микропроволоки, легированной сурьмой, а к слою с проводимостью p -типа (тензоэлемент) — микропроволоки из чистой платины. Начальное сопротивление термоэлемента составляет 10...1000 Ом при температуре $T = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Датчик имеет малый показатель тепловой инерции (50...80 мс), высокий коэффициент тензочувствительности (около 65). Малые габариты ($1...4 \times 0,05 \times 0,05 \text{ мм}^3$) позволяют измерять деформацию и температуру малых поверхностей объекта.

Датчик температуры и пульса [3.6] основан также на методе приведения, его электрод (с термодатчиком) воспринимает температуру тела и электрическую активность сердца. Датчик фирмы Numiscar (Япония) [3.3], основанный на методе приведения, предназначен для измерения температуры от минус 4°C до плюс 80°C и относительной

влажности от 0 до 100 %. Он выполнен в виде пленочного конденсатора. Измерение влажности среды основано на сорбции полимерной пленкой влаги. В результате этого изменяется диэлектрическая проницаемость пленки. В качестве чувствительного элемента температуры применен миниатюрный полупроводниковый терморезистор.

Метод «приведения» использован и в конструкции датчика (рис. 3.1) для измерения напряженности магнитного поля и температуры [3.7]. На подложку нанесен элемент Холла, изготовленный из нитевидного монокристалла InSb, содержащего токовые и «холловские» электроды. Для измерения температуры используется сопротивление контакта структуры InSb — Au, образуемого пятым электродом. Размеры чувствительного элемента такого датчика $0,5 \times 0,0005 \times 0,02 \text{ мм}^3$. Датчик испытан в диапазоне магнитной индукции от 0 до 3 Тл и температуре от 77 до 350 К.

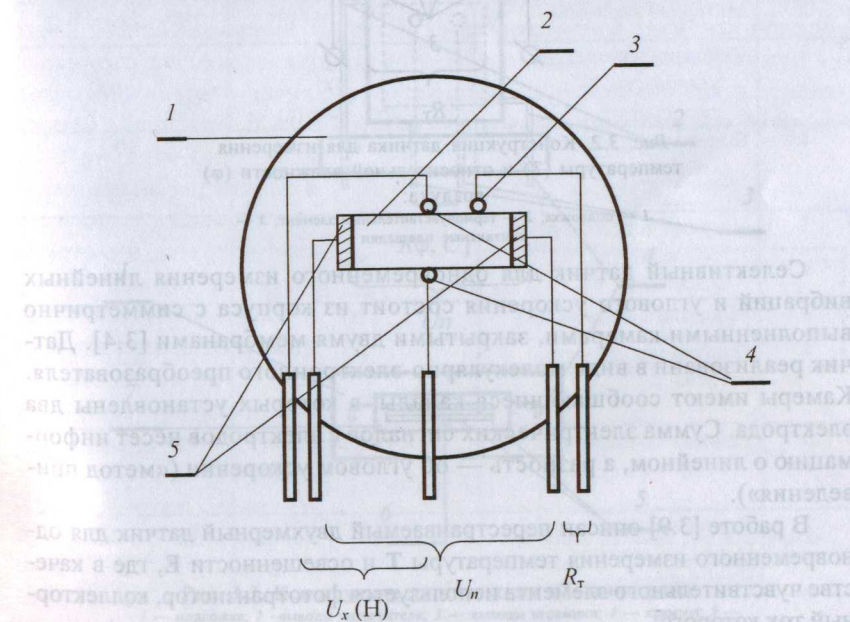


Рис. 3.1. Конструкция датчика для измерения температуры (T) и магнитного поля (H):

1 — подложка; 2 — нитевидный монокристалл; 3 — золотой электрод; 4 — токовые электроды; 5 — «холловские» электроды

Одна из японских фирм изготавливает двухмерный датчик, основанный на методе «воздействия», для измерения температуры и относительной влажности воздуха (рис. 3.2) из пористой керамической подложки с электродами (являющейся чувствительным элементом влажности). На одну из его поверхностей дополнительно нанесен термочувствительный элемент [3.8]. Измерение влажности ведется на переменном токе, а температуры — на постоянном.

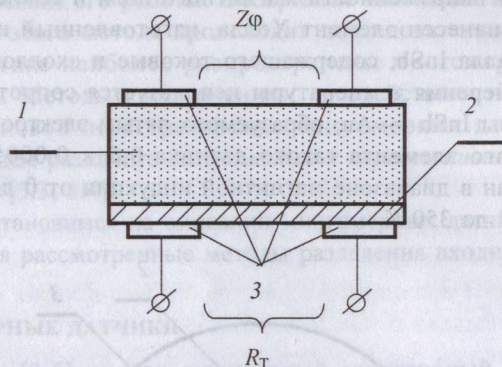


Рис. 3.2. Конструкция датчика для измерения температуры (T) и относительной влажности (ϕ) воздуха:

1 — подложка; 2 — термочувствительный элемент; 3 — контактные площадки

Селективный датчик для одновременного измерения линейных вибраций и углового ускорения состоит из корпуса с симметрично выполненными камерами, закрытыми двумя мембранами [3.4]. Датчик реализован в виде молекулярно-электронного преобразователя. Камеры имеют сообщающиеся каналы, в которых установлены два электрода. Сумма электрических сигналов с электродов несет информацию о линейном, а разность — об угловом ускорении («метод приведения»).

В работе [3.9] описан перестраиваемый двухмерный датчик для одновременного измерения температуры T и освещенности E , где в качестве чувствительного элемента используется фототранзистор, коллекторный ток которого:

$$I_k = f(T, E, U_n),$$

где U_n — напряжение питания фототранзистора.

Входную величину (метод «перестройки») выбирают с помощью изменения U_n соответствующим переключением. При этом фототранзистор при измерении влажности работает в активном режиме (открыт), а при измерении температуры — в пассивном (заперт).

Перестраиваемый двухмерный датчик фирмы Numisegam (Япония) (метод «воздействия») построен на базе керамики из пористого полупроводника p -типа [3.10]. Датчик состоит из керамики BaTiO_3 — SrTiO_3 с оксидно-рутениевыми электродами, к которым приварены выводы нагревателя и подложки (рис. 3.3). В данном случае используется явление адсорбции (концентрация вещества на поверхности раздела с твердым телом) влаги керамикой с соответственным изменением ее активного сопротивления. При измерении же температуры используется изменение емкостной составляющей.

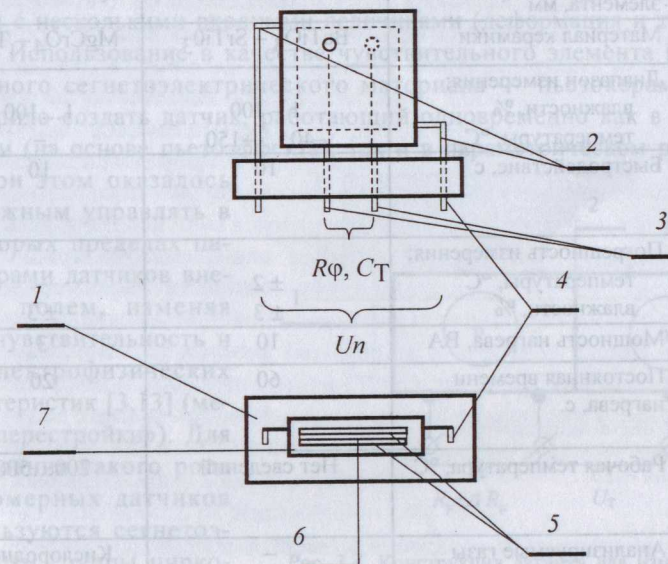


Рис. 3.3. Конструкция датчика типа «Хьюмикерам»:

1 — подложка; 2 — выводы нагревателя; 3 — выводы керамики; 4 — клеммы; 5 — оксидно-рутениевые электроды; 6 — керамика; 7 — нагреватель.

Перестраиваемый двухмерный датчик (этой же фирмы) на основе керамики MgCrO_4 — TiO_2 предназначен для измерения влажности

и концентрации кислорода. В данном случае при измерении влажности также используется явление физической адсорбции. При воздействии же окислительной и восстановительной среды в условиях повышенных температур возникает хемосорбция, приводящая к изменению электропроводности керамики, которая несет информацию о концентрации кислорода.

Основные технические характеристики керамических датчиков фирмы Numisemat приведены в таблице.

№ п/п	Параметры	Датчик температуры и влажности	Датчик влажности и кислорода*
1	Габаритные размеры чувствительного элемента, мм	$4 \times 4 \times 0,25$	$4 \times 4 \times 0,25$
2	Материал керамики	$\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3$	$\text{MgCrO}_4 - \text{TiO}_2$
3	Диапазон измерения: влажности, % температуры, °C	1 – 100 –40 ... +150	1...100 –
4	Быстродействие, с	10	10
5	Погрешность измерения: температуры, °C влажности, %	± 2 ± 3	– ± 3
6	Мощность нагрева, ВА	10	3
7	Постоянная времени нагрева, с	60	20
8	Рабочая температура, °C	Нет сведений	200...500
9	Анализируемые газы (в зависимости от модификации)	–	Кислородные соединения, дым, спирт

Параметрический двухмерный датчик (метод «воздействия»), описанный в работе [3.11], выполнен на основе пьезокерамики и позволя-

* Отсутствуют данные по диапазону и погрешности измерения кислорода.

ет воспринимать температуру и давление в диапазонах от 40 до 150 °C и от 0 до 2,42 МПа. Пьезокерамический элемент питается от источника постоянного тока, и изменение напряжения на нем несет информацию о температуре. Измерение давления основано на пьезоэффекте. Процесс измерения разделен во времени.

Схема двухмерного датчика, основанного на методе «приведения», где в качестве чувствительного элемента использован нитевидный кристалл с ориентацией роста $\langle 111 \rangle$, со сформированными на нем точечными омическими контактами, показана на рис. 3.4 [3.12]. Участок с проводимостью p -типа такого монокристалла служит тензочувствительным элементом. Участок с p - n переходом используется для измерения температуры.

Интересен перестраиваемый двухмерный датчик из материала с доменной структурой, выходной сигнал которого функционально связан с несколькими входными величинами (деформация и температура). Использование в качестве чувствительного элемента поляризованного сегнетоэлектрического материала — пьезокерамики — позволило создать датчик, работающий одновременно как в генераторном (на основе пьезоэффекта), так и в параметрическом режиме.

При этом оказалось возможным управлять в некоторых пределах параметрами датчиков внешним полем, изменяя пьезочувствительность и ряд электрофизических характеристик [3.13] (метод «перестройки»). Для построения такого рода многомерных датчиков используются сегнетоэлектрики группы цирконата титаната свинца — ЦТС и ниобата лития,

так как первые из них позволяют синтезировать разнообразные виды пьезокерамики, в том числе и пленочные [3.4], а другие, имеющие высокую точку Кюри (до 1200 °C), — разрабатывать высокотемпературные многомерные датчики.

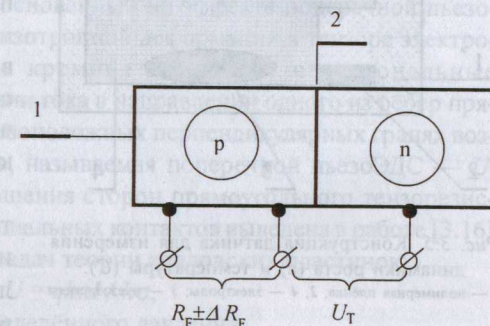


Рис. 3.4. Конструкция датчика для измерения механических усилий (F) и температуры (T): 1 — монокристалл кремния; 2 — p - n переход

На основе пленок ЦТС получены датчики температур и деформаций поверхности объектов со следующими характеристиками: начальная емкость $C_0 \approx 500$ пФ; тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta \leq 0,02$; пьезомодуль d_{33} и $8,0 \dots 10^{-12}$ Кл/Н; чувствительность 10^8 В/м; рабочий диапазон частот $10^{-1} \dots 10^8$ Гц; рабочий диапазон температур $-50 \dots 250$ °С и деформаций $10^{-8} \dots 10^{-3}$ относительных единиц деформаций; площадь $s \approx 3$ мм²; толщина $\approx 0,5$ мм.

Двухмерный датчик для наблюдения за динамикой роста и температурой растений (рис. 3.5) выполнен в виде полимерной пленки, на поверхность которой вакуумной сублимацией последовательно нанесены слои первого электрода, органического пьезоэлектрического материала (на основе полициклических соединений) и второго электрода [3.13]. Многомерный датчик с помощью клеящей структуры основания обвертывается вокруг стебля и закрепляется на нем. Прирост стебля по толщине вызывает деформацию пьезоэлемента и возникновение на нем электрического заряда.

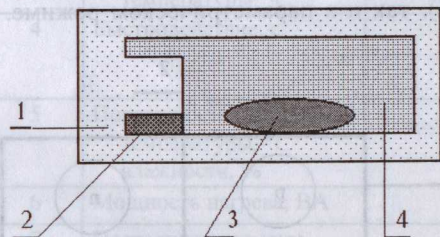


Рис. 3.5. Конструкция датчика для измерения динамики роста (ϵ) и температуры (C):

1 — полимерная пленка; 2, 4 — электроды; 3 — пьезоэлемент

- возможностью изготовления элементов с помощью интегральной технологии, в том числе и тонкопленочной;
- высокой стойкостью к воздействию агрессивной среды;
- хорошей радиационной стойкостью;
- высоким температурным диапазоном эксплуатации;
- малым уровнем шумов Найквиста и высокой помехозащищенностью;

Изменение же температуры изменяет электрическую проводимость (емкость) пьезоэлемента.

Перспективы использования пьезоматериалов при создании многомерных датчиков обусловлены их следующими достоинствами:

- высокой технологичностью, так как они могут быть изготовлены в виде элемента любой формы и любых размеров;

- отсутствием дополнительных источников энергии при преобразовании деформации в электрический сигнал;
- высокими метрологическими характеристиками при преобразовании механической энергии в электрическую.

Большие перспективы при создании многомерных датчиков имеют полупроводниковые материалы. Электрические характеристики этих материалов зависят от множества внешних факторов: температуры, влажности, освещенности, деформации, газового состава, напряженности магнитного поля, радиации и др. Датчики также можно изготавливать по отработанной интегральной технологии. В частности, использование электронной рентгеновской фотолитографии позволяет получать датчики, небольшие по размеру и массе. Миниатюрные размеры чувствительного элемента, в свою очередь, определяют их хорошие частотные свойства, а групповой способ производства, включая автоматическую настройку параметров элементов датчиков, обеспечивает низкую стоимость. Кроме того, полупроводниковые материалы имеют высокую степень чистоты, что является основой для создания многомерных датчиков с достаточно высокими метрологическими характеристиками.

Например, был создан перестраиваемый датчик атмосферного давления и температуры воздуха, основанный на эффекте поперечной пьезоЭДС (рис. 3.6) [3.15]. При анизотропной деформации в тензоре электропроводности германия для кремния возникают недиагональные компоненты, и при пропускании тока в направлении одного из ребер прямоугольного образца на противоположных перпендикулярных гранях возникает разность потенциалов, называемая поперечной пьезоЭДС — U . Эта пьезоЭДС с учетом отношения сторон прямоугольного тензорезистивного слоя и ширины потенциальных контактов выведена в работе [3.16] на основе аналогии краевых задач теории холловских пластинок:

$$U = qk\pi I / h\sigma,$$

где q — интенсивность распределенного давления;

h — толщина тензорезистивного слоя;

k — коэффициент, зависящий от соотношения размеров тензорезистивного преобразователя и контактов;

π — компонент тензора сопротивления;

σ — электропроводность материала чувствительного элемента датчика;

I — сила тока.

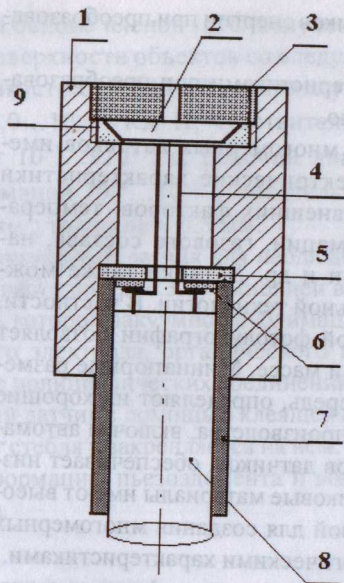


Рис. 3.6. Конструкция датчика атмосферного давления и температуры:

1 — цилиндрический корпус; 2 — воздушный промежуток; 3 — прижимная резьбовая втулка; 4 — электрические выводы интегрального пьезопреобразователя; 5 — токощетка из фольгированного стеклотекстолита с контактными площадками; 6 — ограничительная трубка; 7 — электрический выходной кабель

д) номинальная функция преобразования температуры в электрический сигнал — индивидуальная, вида:

$$R(T) = R_0 e^{\gamma(T_0 - T)/T_0^2},$$

где $R(T)$ — текущее сопротивление преобразователя при температуре T ;

R_0 — начальное сопротивление при температуре $T_0 = 0^\circ\text{C}$;

γ — постоянная определяемая свойствами материала чувствительного элемента датчика;

е) основная абсолютная погрешность измерения температуры $\pm 1,5^\circ\text{C}$;

ж) климатическое исполнение датчика УХЛЗ по ГОСТ 15150-73;

Как показали исследования, активное сопротивление такой структуры имеет ярко выраженную зависимость от температуры [3.15].

По результатам испытаний и проверки 10 образцов датчика получены следующие основные технические характеристики:

а) рабочий диапазон измерения давления от 39,2 до 9,8 кПа;

б) функция преобразования давления в электрический сигнал — индивидуальная, вида:

$$U(p) = \alpha + \beta p,$$

где $U(p)$ — выходное напряжение; α — начальная составляющая напряжения;

β — постоянный коэффициент, характеризующий чувствительность преобразователя;

p — измеряемое давление;

в) основная погрешность измерения давления в рабочем диапазоне $\pm 5\%$;

г) рабочий диапазон измерения температуры от -40 до $+40^\circ\text{C}$;

з) питание датчика — источник постоянного тока $5 \pm 0,25\text{ В}$;

и) габаритные размеры — $M12 \times 45\text{ мм}$.

Датчик можно применять для измерения и контроля параметров воздуха при агромониторинге и в других системах дистанционного контроля воздушно-газовых сред.

Кроме того, был изготовлен перестраиваемый датчик на основе серийно выпускаемого бескорпусного полупроводникового элемента — кремниевого стабилитрона [3.17], что позволило сократить затраты на изготовление. Он предназначен для измерения давления и температуры. В данном случае использовалась зависимость напряжения стабилизации от механических напряжений и температуры. При прямом включении стабилитрона падение напряжения на нем зависело от изменения температуры, т. е. стабилитрон в одном из режимов работал как термодиод. Было применено временное разделение каналов измерения (последовательное переключение режимов работы — метод «перестройки»), и не только измерялись две величины, но и выполнялась температурная коррекция при измерении давления. Датчик воспринимал давление в диапазоне от 0 до $4,8 \cdot 10^5\text{ Па}$ (погрешность 2%) и температуру от 20 до 80°C (погрешность $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Габаритные размеры чувствительного элемента составили $1 \times 1 \times 3\text{ мм}^3$.

Кроме пьезоэлектрических, керамических и полупроводниковых материалов для разработки многомерных датчиков могут быть рекомендованы волоконно-оптические преобразователи. Малые размеры световодов (диаметром до нескольких мкм), нечувствительность к электромагнитным полям, совершенная электрическая изоляция, отсутствие дополнительных источников для передачи излучения, высокие оптические и механические свойства позволяют создавать датчики с высокой чувствительностью к измеряемым величинам, надежностью и механической прочностью. Стойкость к воздействию химической среды, высокая гибкость, упругость и жесткость снижают требования к конструкции датчика и затраты на их изготовление.

3.3. ТРЕХМЕРНЫЕ ДАТЧИКИ

В литературе не было обнаружено описание конструкций трехмерных датчиков. Ниже рассматриваются датчики, разработанные на основе проведенного поиска новых совокупностей физических явлений (гл. 2, И-ИЛИ граф — рис.2.14). В результате этого поиска были

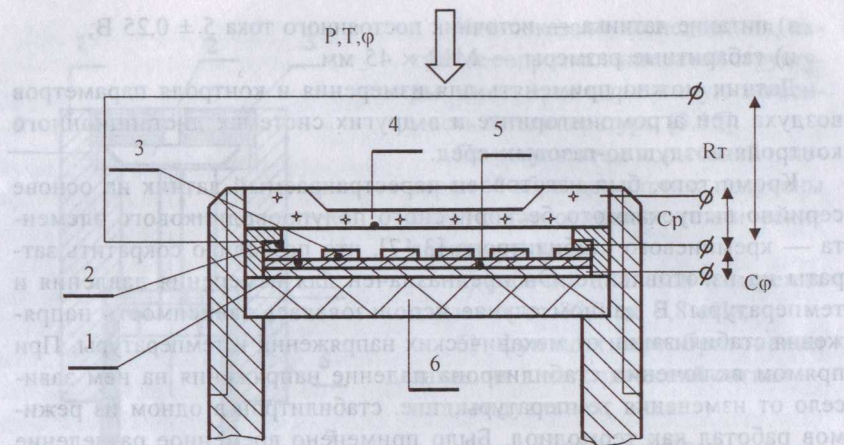


Рис. 3.7. Конструкция датчика для измерения давления (P), температуры (T) и относительной влажности воздуха (ϕ):

1 — алюминиевый электрод; 2 — контактная площадка; 3 — плёночный терморезистор; 4 — кремниевая мембрана; 5 — окись алюминия; 6 — ситалловая подложка

получены более 10 новых совокупностей физических явлений для трехмерных селективных и параметрических датчиков температуры, механических параметров и относительной влажности. При синтезе большинства новых принципов трехмерных датчиков кроме трех ограничений («ярусное», «технологическое», «приоритет по вершинам») задавался первый критерий «совместимости».

Трехмерный селективный датчик (рис. 3.7) включает в себя мембрану в виде кремниевой пластины, полученную анизотропным направленным травлением, ситалловую подложку, на которую методом вакуумного напыления нанесена слоистая структура, состоящая из металлического электрода, гигроскопического материала на основе окиси алюминия и платинового плёночного термометра сопротивления, выполненного в форме меандра [3.18]. Мембрана вместе с этой слоистой структурой закреплена в корпусе с помощью ситаллоцемента. Нижняя поверхность мембраны и верхняя поверхность термометра образуют емкостный преобразователь давления, а нижняя поверхность термометра сопротивления, гигроскопический материал и электрод — емкостный преобразователь влажности воздуха.

На рис. 3.8 показана конструкция трехмерного селективного датчика этих же величин [3.19], содержащая пьезокерамический элемент в виде полого цилиндра, на внутреннюю поверхность которого методом вжигания нанесен сплошной слой серебряного электрода, а на внешнюю — два других слоя (для обеспечения дифференциального включения пьезоэлемента в усилительно-преобразующее устройство).

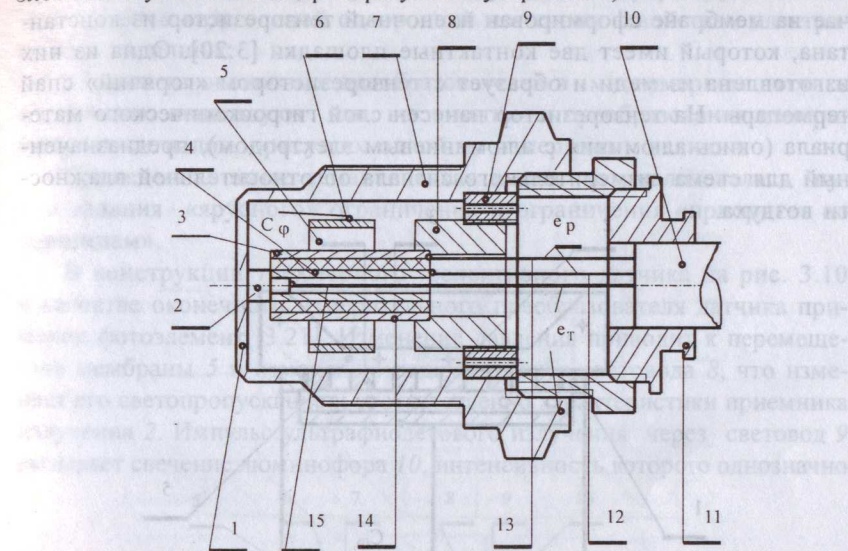


Рис. 3.8. Конструкция датчика для измерения давления (P), температуры (T) и относительной влажности воздуха (ϕ):

1 — мембрана; 2 — медный токосъемник; 3, 4, 14 — электроды преобразователя давления; 5 — чувствительный элемент влажности (окись алюминия); 6 — электрод элемента влажности; 7 — токопроводящий корпус; 8 — упорная втулка; 9 — резьбовая втулка; 10 — выходной кабель; 11 — хвостовик; 12 — переходная гайка; 13, 14 — электрические выводы элемента влажности; 15 — константовый термоэлектрод

На пьезоэлемент нанесены слой гигроскопического материала и слой токопроводящего электрода, проникаемого для молекул воды. Медный токосъемник, контактирующий с внутренней поверхностью пьезоэлемента, выполняет дополнительную функцию одного из электродов термодпары и имеет контакт с токопроводящей металлической мембраной. К нему припаян константовый термоэлектрод. Узел поджатия элемента состоит из резьбовой и упорной втулок и переходной гайки. Для измерения давления используется пьезоэлемент цилиндрической формы, работающий с деформацией сдвига. Инфор-

мация о температуре снимается с термоэлектрода и электрического вывода, соединенного с корпусом. Молекулы воды, попадая в корпус, абсорбируются гигроскопическим материалом и изменяют его электрические характеристики.

Другая конструкция трехмерного датчика температуры, давления и относительной влажности воздуха показана на рис. 3.9. В данном случае на мембране сформирован пленочный тензорезистор из константана, который имеет две контактные площадки [3.20]. Одна из них изготовлена из меди и образует с тензорезистором «горячий» спай термопары. На тензорезистор нанесен слой гигроскопического материала (окись алюминия с алюминиевым электродом), предназначенный для съема измерительного сигнала об относительной влажности воздуха.

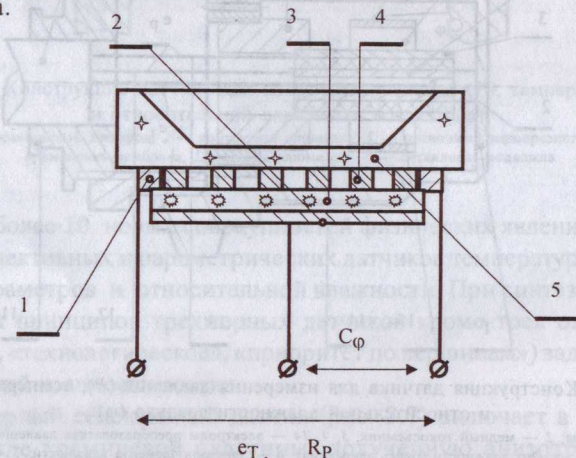


Рис. 3.9. Конструкция датчика температуры (T), давления (P) и относительной влажности воздуха (Φ):

1 — контактная медная площадка; 2 — электрод; 3 — окись алюминия; 4 — константановый электрод; 5 — мембрана

При поиске новых принципов действия трехмерных датчиков удалось формализовать и применить методы разделения входных величин путем дополнительной детализации семантической записи конкретного метода и применением в соответствии с этой детализацией критериев и ограничений.

Детализация семантической записи метода приведения при поиске совокупностей физических явлений многомерных селективных датчиков производится следующим образом:

1) чувствительные элементы для каждой измеряемой величины изготавливают в виде последовательной цепи измерительных преобразователей;

2) в качестве окончательного измерительного преобразователя для всех измеряемых величин применяют единый тип преобразователя, который использует одно физическое явление и формирует выходной сигнал в виде единой однородной по своим свойствам электрической величины;

3) один из окончательных преобразователей в многомерном датчике непременно используют для восприятия и преобразования измерительных сигналов, присущих одной из измеряемых величин.

Приведенная выше семантическая запись формализовалась путем задания «ярусного» ограничения и ограничения «приоритет по вершинам».

В конструкции трехмерного селективного датчика на рис. 3.10 в качестве окончательного измерительного преобразователя датчика применен фотозлемент [3.21]. Изменение давления приводит к перемещению мембраны 5 и изменению радиуса изгиба световода 8, что изменяет его светопропускание и соответственно характеристики приемника излучения 2. Импульс ультрафиолетового излучения через световод 9 вызывает свечение люминофора 10, интенсивность которого однозначно

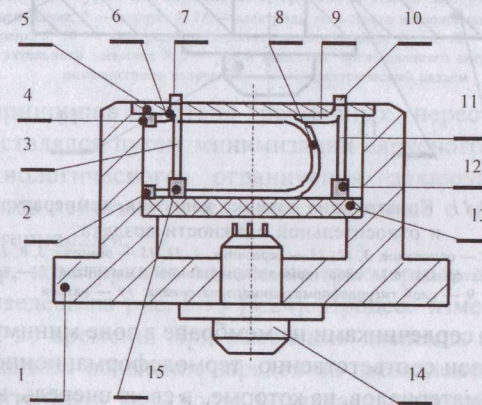


Рис. 3.10. Конструкция датчика давления, температуры и относительной влажности воздуха:

1 — корпус; 2, 12, 15 — приёмник излучения; 3, 6, 8, 9, 11 — волоконный световод; 4 — источник излучения; 5 — мембрана; 7, 10 — слой люминофора; 13 — основание; 14 — разъем

зависит от температуры. Аналогичным образом импульс излучения источника через световод 6 поступает на слой люминофора 7. Интенсивность этого импульса зависит от относительной влажности воздуха.

В трехмерном селективном датчике (рис. 3.11) в качестве оконечного измерительного преобразователя использован индуктивный преобразователь [3.22]. Мембрана такого датчика выполнена из кремниевой пластины. На основании закреплены три сердечника индуктивных преобразователей. В центральной части мембраны над сердечником первого индуктивного преобразователя на нее нанесен слой магнитного материала.

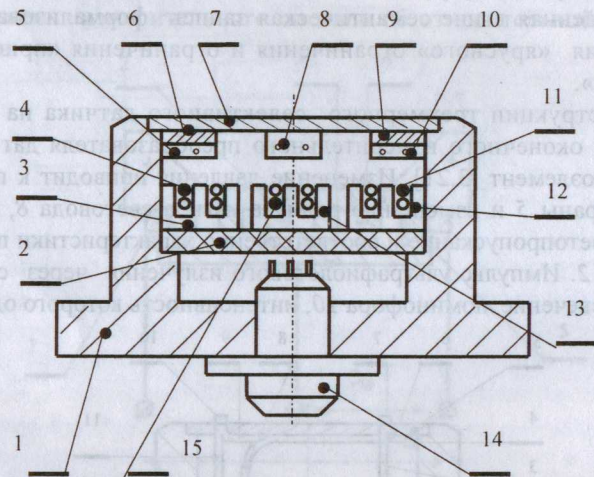


Рис. 3.11. Конструкция датчика давления, температуры и относительной влажности воздуха:

1 — корпус; 2 — основание; 3, 12, 13 — сердечник; 4, 11, 15 — обмотка; 5, 8, 10 — слой магнитного материала; 6 — слой термдеформационного материала; 7 — мембрана; 9 — слой гидродеформационного материала; 14 — разъем

Над другими сердечниками на мембране в зоне минимума деформаций нанесены слои соответственно термдеформационного и гидродеформационного материалов, на которые, в свою очередь, нанесены слои магнитного материала.

Изменение алгоритма метода «исключения» позволило найти новую совокупность физических явлений в трехмерном датчике для измерения светового потока, температуры и давления, в котором све-

товой поток «исключался» с помощью мембраны с электрооптическим затвором, а давление — с помощью введенного в датчик дополнительного пьезоэлемента, который «отгибал» мембрану (за счет обратного пьезоэффекта) от чувствительного элемента (рис. 3.12) [3.23].

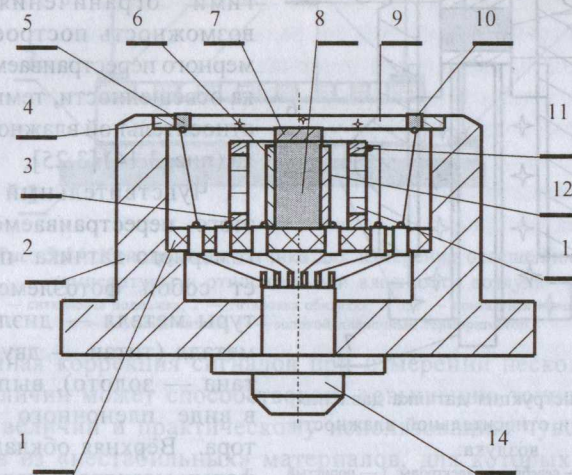


Рис. 3.12. Конструкция датчика для измерения давления, температуры и энергии электромагнитного излучения:

1 — основание; 2 — корпус; 3, 11 — электроды кольцевого пьезоэлемента; 4 — мембрана; 5, 10 — электроды электрооптического затвора; 6, 12 — электроды чувствительного элемента; 7 — слой вещества, поглощающего энергию электромагнитного излучения; 14 — электрический разъем

Синтез принципов действия трехмерных перестраиваемых датчиков осуществлялся путем минимизации «ярусного» ограничения и задания «технологического» ограничения, заключающегося в выборе принципов действия селективных датчиков с полностью идентичными материалами.

Например, конструкция одного из трехмерных перестраиваемых датчиков приведена на рис. 3.13 [3.24]. Процесс измерения трёх величин разделён во времени. При изменении давления мембрана прогибается и вызывает появление зарядов на пьезоэлементе. При измерении относительной влажности воздуха на пьезоэлемент подается стабильный переменный ток. Влага сорбируется пористым пьезоэлементом, его диэлектрические характеристики изменяются, и возникающее падение напряжения на нем зависит от относительной влажности воздуха. При измерении температуры пьезоэлемент рабо-

тает как пассивный элемент, поскольку активное его сопротивление зависит от температуры.

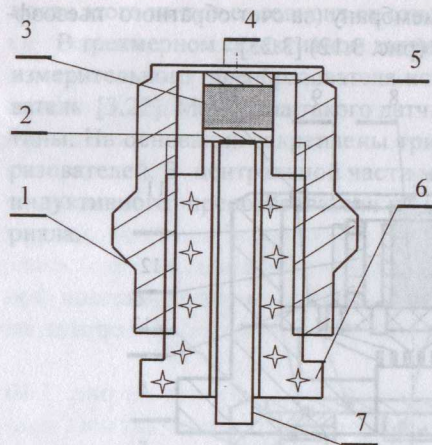


Рис. 3.13. Конструкция датчика давления, температуры и относительной влажности воздуха:

1 — корпус; 2, 5 — серебряные электроды; 3 — пористый пьезоэлектрический элемент; 4 — мембрана; 6 — узел поджата пьезоэлемента; 7 — токосъемник-электрод

ного сопротивления этой обкладки зависит от измеряемой температуры. При измерении влажности влага сорбируется двуокисью титана, его диэлектрические свойства изменяются. Изменение емкости чувствительного элемента связано с относительной влажностью воздуха. При измерении освещенности в системе металл — диэлектрик — металл возникает фотоэффект. Длина волны поглощения электронов, создающих фотоэффект, мала. Электроны, возбуждаемые у поверхности границы металла с окислом, проникают в диэлектрик (через трапецеидальный барьер этой систем), и на обкладках чувствительного элемента возникает ЭДС.

В заключение остановимся на некоторых *перспективах* использования многомерных датчиков.

Возможность получения с помощью многомерных датчиков информации о нескольких входных величинах, действие которых сосредоточено в относительно небольшом пространстве, определяет их

Сочетание критериев совместимости и обязательности с другими ограничениями дает возможность построения трехмерного перестраиваемого датчика освещенности, температуры и относительной влажности воздуха (рис. 3.14) [3.25].

Чувствительный элемент этого перестраиваемого многомерного датчика представляет собой фотоэлемент структуры металл — диэлектрик — металл (титан — двуокись титана — золото), выполненный в виде пленочного конденсатора. Верхняя обкладка имеет форму меандра и является пленочным термометром сопротивления. Изменение актив-

использование при решении ряда научно-исследовательских и производственных задач.

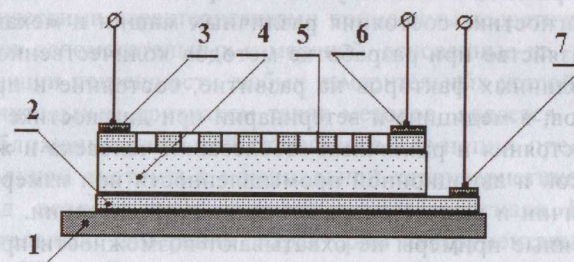


Рис. 3.14. Конструкция датчика для измерения освещенности, температуры и относительной влажности воздуха:

1 — силановая подложка; 2 — титановая обкладка; 3, 6, 7 — контактная площадка; 4 — фотоэлемент; 5 — пленочный терморезистор

Взаимная коррекция сигналов при измерении нескольких физических величин может способствовать повышению точности измерения этих величин и практическому использованию чувствительных элементов из «нестабильных» материалов, для которых характерна высокая чувствительность. Заметим, что применение таких материалов в обычных датчиках весьма ограничено. Единая технология производства чувствительного элемента и измерительно-преобразующей части многомерного датчика позволяет создать технические средства с расширенными возможностями.

В медицинских исследованиях при оценке функционального состояния пациента также возникает необходимость измерять несколько входных величин (сопротивление электрическому току, биоэлектрические потенциалы и др.). Такая проблема возникает при диагностике различных заболеваний биофизическими методами исследования, когда необходимо измерять несколько физических величин в локальной области участка исследуемой ткани [3.2].

Подобные задачи необходимо решать и при диагностике состояния различных машин и механизмов [3.2]. Например, при исследовании рабочего процесса в двигателе внутреннего сгорания необходимо измерять в камере сгорания статическое и динамическое давление, температуру в момент воспламенения топлива, концентрацию кислорода и ряд других величин. Такого рода задачи не могут быть решены с помощью традиционных датчиков и средств измерений. В этом случае необходим

многомерный датчик, элементы которого конструктивно размещаются в месте зажигания и позволяют воспринимать несколько величин.

Многомерные датчики могут найти применение в машиностроении при диагностике состояния различных машин и механизмов; в сельском хозяйстве при разработке методов количественной оценки влияния различных факторов на развитие, состояние и продуктивность посевов; в медицине и ветеринарии при диагностике функционального состояния и различных заболеваний человека и животных; в космической и авиационной промышленности при измерении различных величин и выдаче сигналов аварийной ситуации.

Приведенные примеры не охватывают возможности применения многомерных датчиков. Они подтверждают целесообразность работ, направленных на создание и использование многомерных датчиков, позволяющих получить информацию о нескольких измеряемых величинах с малых по объему участков объекта исследований, уменьшить влияние конструкции датчиков на процессы, протекающие в этом объекте, и повысить точность измерения конкретной величины за счет возможности коррекции дополнительных погрешностей от воздействия других величин.

В настоящее время многомерные датчики создаются для конкретных применений. Из анализируемых источников не выявлено их серийное изготовление. Широкому применению многомерных датчиков препятствуют невысокие метрологические характеристики созданных в практике многомерных датчиков.

3. 4. КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ МНОГОМЕРНЫХ ДАТЧИКОВ

Оценка погрешностей измерения нескольких величин с помощью многомерных датчиков имеет следующие специфические особенности:

во-первых, в этом случае измерению подлежит ряд физических величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, каждая из которых может с одной стороны, являться измеряемой величиной, а с другой — влиять на процесс измерения любой другой величины;

во-вторых, существует реальная возможность определения экспериментальным или расчетным путем зависимости погрешности каждой величины от влияния других величин;

в-третьих, восприятие всех величин может проводиться одновременно и непрерывно.

Поэтому в данном случае при создании таких датчиков с высокими метрологическими характеристиками применимы теоретические аспекты методов вспомогательных измерений, основанные на автоматической коррекции погрешности любых измерительных устройств [3.27].

Отличительным признаком таких методов является обеспечение ими приближения реальной статической функции преобразования измерительной системы к номинальной характеристике преобразования под воздействием корректирующего сигнала. Для методов вспомогательных измерений характерны инструментальные погрешности коррекции. Блок-схема системы с многомерным датчиком, содержащим автоматическое введение поправок, показана на рис. 3.15.

При рассмотрении погрешности системы с многомерным датчиком примем, что измеряемые величины $X_i = 1, 2 \dots n$ изменяются весьма медленно и поэтому динамические свойства измерительных устройств (ИУ) любой величины X_i и вычислительного устройства (ВУ) не влияют на погрешность коррекции.

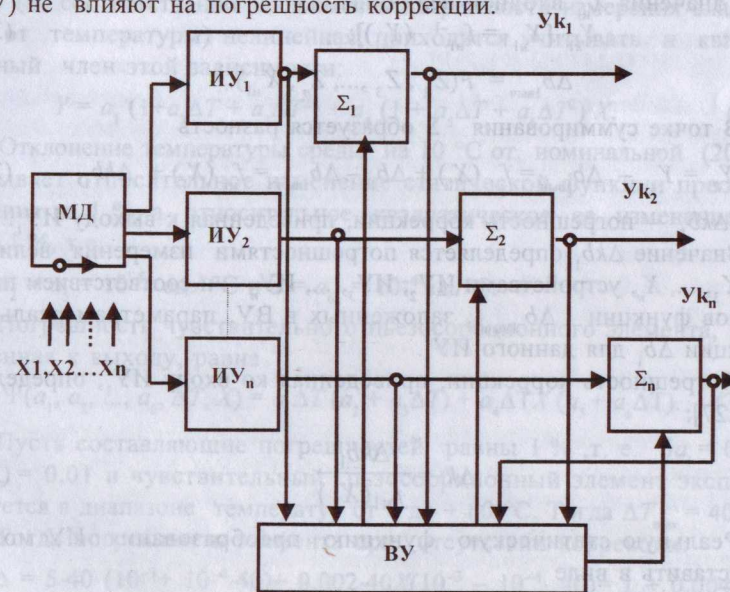


Рис. 3.15. Блок-схема измерительной системы с многомерным датчиком, содержащим автоматическое введение поправок

Рассмотрим работу системы на примере измерения определенной величины X_1 .

Влияние величин $X_2, X_3, \dots, X_n$ вызывает погрешность измерения ИУ₁, выходной сигнал которого опишется формулой

$$Y_1 = f(X_1) = f_n(X_1) + \Delta b_1, \quad (3.1)$$

где $f(X_1)$ — реальная статическая функция преобразования ИУ;

$f_n(X_1)$ — номинальная характеристика преобразования ИУ;

Δb_1 — погрешность ИУ₁, приведенная к выходу.

Пусть Δb_1 есть известная функция измеряемой величины X_1 и влияющих величин $X_2, X_3, \dots, X_n$:

$$\Delta b = F(X_2, \dots, X_n, X_1). \quad (3.2)$$

Выходные сигналы $Z_2, Z_3, \dots, Z_n$, соответствующие $X_2, X_3, \dots, X_n$, и выходной скорректированный сигнал Y_{k1} вводятся в ВУ, которое вычисляет известную функцию этих аргументов с учётом номинального значения X_{n1} входной величины:

$$Y_{k1} [X_{n1} = f_{n1}^{-1}(Y_{k1})]; \quad (3.3)$$

$$\Delta b_{\text{выч}} = F(Z_2, Z_3, \dots, Z_n, X_{n1}).$$

В точке суммирования Σ образуется разность

$$Y_{k1} = Y_1 - \Delta b_{\text{выч}} = f_{n1}(X_1) + \Delta b_1 - \Delta b_{\text{выч}} = f_{n1}(X_1) + \Delta kb_1, \quad (3.4)$$

где Δkb_1 — погрешность коррекции, приведенная к выходу ИУ₁.

Значение Δkb_1 определяется погрешностями измерения величин $X_2, X_3, \dots, X_n$, устройствами ИУ₂, ИУ₃, ..., ИУ_n и соответствием параметров функции $\Delta b_{\text{выч}}$, заложенных в ВУ, параметрам реальной функции Δb_1 для данного ИУ₁.

Погрешность коррекции, приведенная ко входу ИУ₁, определится [3.27]:

$$\Delta k_1 = \frac{\Delta kb_1}{f_{n1}(X_1)}. \quad (3.5)$$

Реальную статическую функцию преобразования ИУ можно представить в виде

$$Y_1 = f_1(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, X_2, X_3, \dots, X_n, X_1), \quad (3.6)$$

где a_{1i} — i -й параметр статической функции преобразования ИУ₁.

Номинальная же характеристика преобразования выразится в виде

$$Y_{n1} = f_{n1}(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, X_{n2}, X_{n3}, \dots, X_{nn}, X_1), \quad (3.7)$$

где X_{nj} — номинальное значение величины X_j ($j = 2, 3 \dots n$).

С целью оценки эффективности коррекции проведен расчет погрешности многомерного датчика относительной влажности и температуры воздуха, выполненного в виде чувствительного кварцевого элемента (по каналу измерения влажности).

Номинальная характеристика чувствительного пьезосорбционного элемента 5К3.184.025 ТУ в диапазоне измерения относительной влажности от 0,1 до 60 % выражается формулой

$$Y_n = a_1 + a_4 X, \quad (3.8)$$

где $a_1 \approx 5$ кГц, $a_4 \approx 0,002$ кГц %. Это означает, что при относительной влажности не более 0,1 % частота чувствительного пьезосорбционного элемента равна 5 кГц, а его номинальный коэффициент преобразования составляет 20 Гц на единицу измерения относительной влажности (%). Так как реальная статическая функция преобразования (и соответственно зависимость погрешности измерения влажности от температуры) нелинейная, приходится учитывать и квадратичный член этой зависимости:

$$Y = a_1(1 + a_2 \Delta T + a_3 \Delta T^2) + a_4(1 + a_5 \Delta T + a_6 \Delta T^2) X. \quad (3.9)$$

Отклонение температуры среды на 10 °С от номинальной (20 °С) вызывает относительное изменение статической функции преобразования на 1 %, а относительное квадратическое ее изменение — на 0,1 %, т.е.

$$a_2 = a_5 = 10^{-5} \text{ ед./}^\circ\text{С и } a_3 = a_6 = 10^{-4} \text{ ед./}^\circ\text{С}.$$

Погрешность чувствительного пьезосорбционного элемента, приведенная к выходу, равна

$$\Delta_b = \Psi(a_1, a_2, \dots, a_6, \Delta T, X) = a_1 \Delta T (a_2 + a_3 \Delta T) + a_4 \Delta T X (a_5 + a_6 \Delta T). \quad (3.10)$$

Пусть составляющие погрешностей равны 1 %, т.е. $\delta a_1 = 0,01$, $\delta \Delta X_T = 0,01$ и чувствительный пьезосорбционный элемент эксплуатируется в диапазоне температур от 0 до + 60 °С. Тогда $\Delta T_{\text{max}} = 40$ °С.

Тогда погрешность элемента при отсутствии коррекции:

$\Delta = 5 \cdot 40 (10^{-3} + 10^{-4} \cdot 40) + 0,002 \cdot 40 X (10^{-3} - 10^{-4} \cdot 40) = 1 + 0,004 X$, а при наличии коррекции эта погрешность составит:

$$\Delta' = \Delta_{\text{кр1max}} + \Delta_{\text{кр2max}} = \frac{0,001 + 0,001 + 40(0,0001 + 0,0001)0,01 + 0,001 \cdot 0,01 + 0,0001 \cdot 40 \cdot 0,01 + (0,001 + 2 \cdot 0,0001)0,01}{0,002 + 0,002 \cdot 40(0,001 + 0,0001 \cdot 40)} \times 5 \times 40 \frac{2(0,001 + 0,0001 \cdot 40)0,01 + 0,0001 \cdot 0,01 + 0,0001 \cdot 40 \cdot 0,01 + 0,001 + 2 \cdot 0,0001 \cdot 40}{1 + 40(0,001 + 0,0001 \cdot 40)} 40X = 0,01 + 0,00035X.$$

Если сравнить полученные значения, то видно, что автоматическая коррекция может существенно уменьшить погрешность чувствительного пьезосорбционного элемента. Следует заметить, что данные расчета не противоречат результатам, полученным в работе [3.27].

Таким образом, применение методов автоматической коррекции погрешности измерения любой конкретной измеряемой величины многомерного датчика позволит повысить точность измерения этой величины при условии решения задачи автономизации величин и теоретического или экспериментального выявления зависимости ее от других измеряемых величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

- 3.1. Алейников А. Ф. Методы получения информации от многофункциональных датчиков // Современные методы, средства измерений и автоматизации для исследований физических процессов в сельском хозяйстве: Сб. науч. тр. / РАСХН, Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 1993. — С. 3—16.
- 3.2. Алейников А. Ф. Автоматизация измерительных сигналов в многомерных датчиках // Вестник Россельхозакадемии. — 2000. — № 3. — С. 72—74.
- 3.3. Алейников А. Ф., Цапенко М. П. Многофункциональные датчики // Измерения, контроль, автоматизация. — 1990. — № 2. — С. 50—57.
- 3.4. Алейников А. Ф. Многофункциональные датчики: Методические рекомендации. — Новосибирск: Изд-во СО РАСХН, 1993. — 36 с.
- 3.5. Малогабаритные датчики температуры и деформации / А. И. Дрожжин, А. А. Щетинин, Н. К. Седых, Е. П. Новокрещенова, А. И. Дунаев // Приборы и техника эксперимента. — 1977. — № 5. — С. 216—218.
- 3.6. Пат. № 3916877 США, МКИ А 61 В 5/02, 5/04; G 01 К 7/12. Датчик температуры и пульса / Paul Beckman, Hutington Valley, Pa

- (USA); U. S. Surgical Corporation (USA). — № 409382; Заявлено 23.10.73; Опубл. 4.11.75 // Изобретения за рубежом. — 1976. — № 2. — С. 51.
- 3.7. Большакова И. А. Датчики для одновременного измерения магнитного поля // Приборы и техника эксперимента. — 1980. — № 2. — С. 212—214.
- 3.8. Пат. 57-56719 (Япония), МКИ G 01 D 21 / 02. Датчик температуры и влажности/ Мацусита дэнки санге К. К. (Япония). — № 53 — 9103; Заявлено 30.01.78; Опубл. 01.02.80 // Изобретения за рубежом. — 1983. — № 14. — С. 89.
- 3.9. Wiegert H. I. Unter Suchungen zur gleichzeitigen Messung mehrerer Grossen einem Aufnehmer // Mess-Steuern-Regeln. — 1976. — Vol. 20. — No. 12. — P. 426—529.
- 3.10. Нумта Цунэдзи. Керамические многофункциональные датчики // Автоматика, телемеханика и вычислительная техника: РЖ. — 1981. — № 7. — С. 12.
- 3.11. Стинсон В. Т., Хас М. Комбинированный датчик давления и температуры // Приборы и элементы автоматки и вычислительной техники: Экспресс информация. — 1988. — № 9. — С.11—18.
- 3.12. А. с. № 1024697 СССР, МКИ G 01 В 7/18. Малобазный тензотермодатчик/ А. М. Дрожжин, А. П. Ермаков (СССР) . № 3402374/ 25-28; Заявлено 22.03.83; Опубл. 23.06.85; Бюл. № 23. — 3 с.
- 3.13. Москвин В. Н., Адонин А. И., Виноградов А. В. Управляемые контрольно-измерительные преобразователи на основе сегнетоэлектрических материалов: Тез. докл. II Всесоюз. конф. по акустической эмиссии. — Кишинев: КДНТП, 1987. — С. 133—134.
- 3.14. А. С. № 1496705 СССР, МКИ А 01 G В 7/00. Устройство для измерения динамики роста и температуры растения/ А.Ф. Алейников(СССР) . № 4310487/ 30-15; Заявлено 29.09.87; Опубл. 30.07.89; Бюл. № 28. — 4 с.
- 3.15. Алейников А.Ф. Датчик атмосферного давления // Разработка новых методов и средств измерения для исследования биологических объектов: Сб. науч. тр. / РАСХН, Сиб. отд-ние. СибФТИ. — Новосибирск, 1995. — С. 3—9.
- 3.16. Гридчин В. А. Проектирование тензопреобразователей на эффекте поперечной пьезоЭДС с учётом размера потенциальных контактов // Физические основы полупроводниковой тензометрии: Межвуз. сб. науч. тр. / Новосиб. электротехн. ин-т. — Новосибирск, 1984. — С. 109—119.

3.17. *А. с. № 1812462 СССР, МКИ G 01 L 11/00. Устройство для измерения давления и температуры / А.Ф. Алейников (СССР). № 4493705 / 10; Заявлено 10.10.88; Оpubл. 30.04.93; Бюл. № 16. — 4 с.*

3.18. *А. с. 1224626 СССР, МКИ G 01 L 11/00 Датчик давления / А.Ф. Алейников (СССР). — № 3796100/24-10; Заявлено 02.10.84; Оpubл. 15.04.86; Бюл. № 14. — 4 с.*

3.19. *А. с. 1348674 СССР, МКИ G 01 L 11/00 Датчик давления / А.Ф. Алейников (СССР). — 399338/24-10; Заявлено 24.12.85; Оpubл. 30.10.87; Бюл. № 40. — 2 с.*

3.20. *А. с. 1645862 СССР, МКИ G 01 L 11/00 Устройство для измерения давления / А.Ф. Алейников (СССР). — № 4601081/10; Заявлено 01.11.88; Оpubл. 30.04.91; Бюл. № 16. — 7 с.*

3.21. *А. с. 1599684 СССР, МКИ G 01 L 11/00 Датчик давления / А.Ф. Алейников (СССР). — № 4265654 / 42-10; Заявлено 22.06.87; Оpubл. 15.10.90, Бюл. № 38. — 3 с.*

3.22. *А. с. 1610330 СССР, МКИ G 01 L 9/10 Устройство для измерения давления / А.Ф. Алейников (СССР). — № 4317106 /24-10; Заявлено 24.08.87; Оpubл. 30.11.90; Бюл. № 44. — 4 с.*

3.23. *А. с. 1642266 СССР, МКИ G 01 K 7/00 Датчик температуры / А.Ф. Алейников (СССР). — № 4324913/10; Заявлено 14.09.87; Оpubл. 15.04.91; Бюл. № 14. — 3 с.*

3.24. *А. с. 1758456 СССР, МКИ G 01 L 11/00 Устройство для измерения давления / А.Ф. Алейников (СССР). — № 4640586/10; Заявлено 24.01.89; Оpubл. 15.08.92; Бюл. № 32. — 4 с.*

3.25. *А. с. 1722299 СССР, МКИ А 0 G 7/00 Устройство для измерения температуры, относительной влажности и освещенности / А.Ф. Алейников (СССР) — № 4785861/15; Заявлено 23.01.90; Оpubл. 30.03.92; Бюл. № 12. — 4 с.*

3.26. *А. с. 1173981 СССР, МКИ А 61 В 5/04 Устройство для измерения физических параметров / А.Ф. Алейников (СССР). — № 3714939/30-15; Заявлено 06.01.84; Оpubл. 23.08.85; Бюл. № 31. — 2 с.*

3.27. *Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 197 с.*

ГЛАВА 4

БИОДАТЧИКИ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В России работы по биодатчикам ведутся в Санкт-Петербургском технологическом институте и государственной Академии аэрокосмического приборостроения, в МГУ, в Институте медицинской и биологической кибернетики Сибирского отделения медицинских наук (г. Новосибирск) [4.1,4.2].

В США рынок биодатчиков начиная с 1962 года неуклонно расширяется. В 1993 году их было продано на 187 млн долларов, а в 2000 году предполагается продать их более чем на 700 млн долларов [4.2].

Область применения биодатчиков главным образом связана с определением состояния биологических объектов, с удовлетворением запросов медицины, сельскохозяйственного производства, пищевой промышленности, сферы обитания [4.3, 4.4].

В настоящее время в медицине биодатчики используются для диагностики ряда заболеваний и контроля процессов их протекания в ходе лечения. Биодатчики могут оценивать количество глюкозы в организме, и, по-видимому, результаты этих измерений могут быть применены для поддержания нормальной концентрации инсулина в крови у больных диабетом.

В сельском хозяйстве и пищевой промышленности биодатчики могут применяться для контроля качества продукции. Например, датчики на основе мембран тиллакоидов шпината используются для определения концентрации гербицидов. В Японии созданы биодатчики для определения гипотоксина в тканях рыбы.

В экологии биодатчики используются для наблюдения за химическим составом сточных вод, воздушной и водных сфер, параметрами окружающей среды и др.

В настоящее время отсутствует строгое определение биодатчиков как *средств измерений*. Под биодатчиками обычно понимают [4.5]:

- а) средства определения содержания в анализируемом объекте биологических молекул и частиц;
- б) системы, предназначенные для съёма сигналов измерительной информации с различных биологических объектов и их элементов;
- в) средства косвенного измерения концентрации различных веществ путём оценки количества продуктов ферментивной реакции;
- г) датчики, содержащие биологические элементы, тесно связанные с преобразователями его реакции на специфическое воздействие (химическое или физическое) и выдающие удобный для обработки сигнал.

Под биодатчиком, на наш взгляд, следует понимать конструктивно обособленную совокупность чувствительных биологических элементов и измерительных преобразователей, воспринимающую одну или несколько входных величин и формирующую измерительные сигналы.

Чувствительный биологический элемент — это часть первого в измерительной цепи биодатчика, воспринимающая входной измерительный сигнал. В качестве чувствительного элемента используют целые организмы, ткани, клетки, органеллы, биологические мембраны, ферменты и их компоненты, рецепторы, антитела, нуклеиновые кислоты, органические молекулы и другие вещества [4.1].

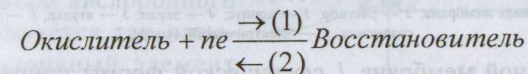
В биодатчиках широко используются электрохимические преобразователи с потенциометрическими, амперометрическими, кондуктометрическими и другими цепями.

Электрохимический преобразователь представляет собой проводник электрического тока, который помещается в исследуемую среду. При этом устанавливается электрохимический процесс, связанный с переносом зарядов между присутствующими в среде заряженными частицами и электрохимическим преобразователем. На границе раздела среда — преобразователь формируется выходной электрический сигнал (в виде тока или напряжения).

Принцип действия преобразователя с *потенциометрическим* выходом основан на определении разности потенциалов, которая устанавливается между измерительным электродом и электродом срав-

нения. Электрод сравнения имеет постоянный и воспроизводимый потенциал, не зависящий от среды, в которую он помещен. Разность потенциалов определяется активностью ионов электролита, в который помещен преобразователь. Определяются окислительно-восстановительные потенциалы, уровень pH и ионов [4.6].

Окислительно-восстановительные реакции, протекающие в растворе, сопровождаются обменом электронов (ne):



Вещество, присоединяющее электроны в направлении $\rightarrow (1)$, играет роль окислителя и восстанавливается. Вещество, которое отдаёт электроны в направлении $\rightarrow (2)$, играет роль восстановителя и окисляется. При помещении химически стойкой проводящей нити в раствор между проводником и веществами — окислителем и восстановителем — происходит обмен электронами в двух направлениях, пока проводник не приобретёт равновесный потенциал.

Обычно электроды изготавливаются из золота, платины, ртути, серебра или графита (рис.4.1) [4.6]. Например, платиновые электроды используются для измерения потенциалов от $-0,1$ до $+0,9$ В, золотые от -1 до $+0,3$ В.

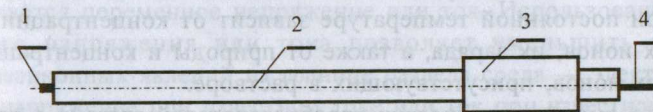


Рис. 4.1. Конструкция электрода для определения окислительно-восстановительных потенциалов:

1 — чувствительный элемент (платина, золото и др.); 2 — стеклянный корпус; 3 — головка; 4 — электрический вывод

Величина pH характеризует кислотность растворов и определяется как отрицательный логарифм ионов водорода H^+ . Принцип действия преобразователя pH основан на следующем. Некоторые типы стекол являются слабым проводником электрического тока. Потенциал, который устанавливается на границе между мембраной из такого стекла и водным раствором, зависит от кислотности раствора (уравнение Нернста) [4.6]. Конструкция pH-электрода показана на рис. 4.2.

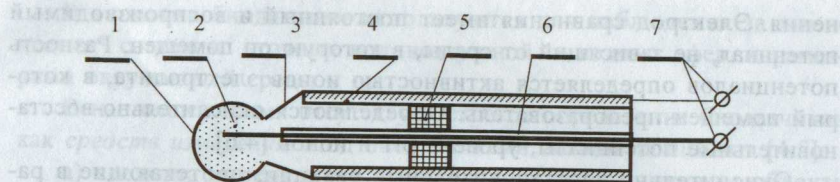


Рис. 4.2. Конструкция pH-электрода:

1 — стеклянная мембрана; 2 — раствор; 3 — корпус; 4 — экран; 5 — втулка; 6 — электрод сравнения; 7 — электрический вывод

К стеклянной мембране 1 сферической формы припаяна трубка-корпус 3 из стекла с высоким электрическим сопротивлением. Внутри электрода находится раствор 2 с известной кислотностью (обычно $\text{pH} = 7$), в который погружён электрод сравнения 6. Для измерения pH электрод погружают в исследуемый раствор и измеряют разность потенциалов между внутренним электродом сравнения 6 и рабочим электродом 1.

Принцип действия *ионоселективных преобразователей* аналогичен pH -преобразователю. Некоторые стекла, полимеры, моно- и поликристаллы проявляют особую чувствительность к активности ионов щелочных металлов и других веществ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Ag^+ , Cu^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , ClO_4^- и др.). Ионоселективные электроды формируют электрический сигнал, определяемый активностью ионов. Активность ионов при постоянной температуре зависит от концентрации определяемых ионов, их заряда, а также от природы и концентрации посторонних ионов, присутствующих в растворе.

Работа *амперометрических* преобразователей связана с прохождением электрического тока в измерительной цепи. Как правило, между двумя электродами датчика (металлический электрод и электрод сравнения) создается разность потенциалов. Концентрация исследуемых частиц пропорциональна силе тока, возникающей в электродной цепи [4.6].

Среди амперометрических преобразователей в биодатчиках распространён так называемый «кислородный электрод» (рис. 4.3). Он состоит из двух электродов различной полярности: платинового катода 1 и серебряного анода 4, покрытого хлоридом серебра. Электроды погружены в хлорид калия 3. Эта измерительная ячейка отделена от исследуемого вещества тонкой мембраной 2, проницаемой для кислорода. Электроды заряжают до разности потенциалов порядка

700 мВ. Кислород диффундирует через мембрану и восстанавливается на катоде. Ток, обусловленный этой окислительно-восстановительной реакцией, пропорционален количеству восстановленного кислорода. Разновидностью кислородного электрода является так называемый «топливный элемент (ячейка)» [4.1]. В такой ячейке электропроводящий материал с большой поверхностью расположен между электролитом и атмосферным воздухом. В присутствии кислорода происходит окисление активной поверхности этого материала с выделением тепла. В результате химической реакции с кислородом воздуха в измерительной ячейке между катодом и анодом возникает напряжение. Реакция протекает очень быстро. Температурная компенсация осуществляется внутри ячейки.

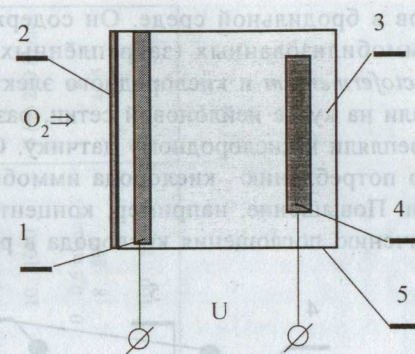


Рис. 4.3. Кислородный электрод:

1 — катод; 2 — мембрана; 3 — электролит; 4 — анод; 5 — корпус

Кондуктометрические преобразователи состоят из двух электродов, изготовленных из химически стойких материалов. На электроды подаётся переменное напряжение или ток. Использование переменного напряжения или тока позволяет уменьшить влияние поляризационных явлений на границе раздела среда — электрод. Измеряя напряжение при известном токе или ток при известном напряжении, рассчитывают проводимость исследуемой среды.

4.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тип биодатчика определяется прежде всего *биологическим материалом* его чувствительного элемента. Поэтому в первую очередь следует различать *микробные, ферментативные, клеточные и тканевые* биодатчики [4.1].

На рис. 4.4 показана конструкция *микробного датчика* для определения суммарного содержания усваиваемых сахаров в патоке. Этот биодатчик предназначен для определения общего содержания сахара

ров в бродильной среде. Он содержит чувствительный элемент из иммобилизованных (закреплённых) живых клеток *Brevibacterium lactofermentum* и кислородного электрода [4.1]. Клетки иммобилизовали на куске нейлоновой сетки, размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$, которую прикрепили к кислородному датчику. Содержание сахаров оценивается по потреблению кислорода иммобилизованными микроорганизмами. Повышение, например, концентрации глюкозы приводит к увеличению поглощения кислорода в растворе.

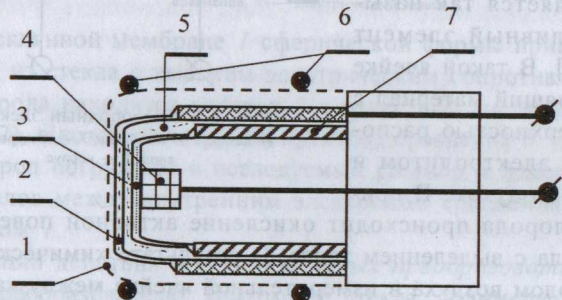


Рис. 4.4. Биодатчик сахаров (глюкозы, фруктозы и сахарозы):
1 — целлофановая мембрана; 2 — микроорганизмы, закрепленные на нейлоновой сетке; 3 — гелиевый электролит; 4 — платиновый катод; 5 — тефлоновая мембрана; 6 — резиновое кольцо; 7 — серебряный анод.

Датчики имеют линейную зависимость между уровнем выходного тока и концентрацией глюкозы (до 1 мМ — миллимоль), фруктозы (до 1 мМ) и сахарозы (до $0,8 \text{ мМ}$). Время отклика биодатчика составило 10 мин. Общее содержание усваиваемых сахаров рассчитывали, суммируя значения откликов на глюкозу, фруктозу и сахарозу. Разность истинных и расчетных концентраций не превысила 8 %. Биодатчик работал в бродильной среде для получения глутаминовой кислоты в течение 10 дней и выдержал 960 измерений.

В России создан компьютеризованный стенд с биодатчиками глюкозы, температуры [4.2]. На стенде производится экспресс-анализ в течение 50 с. Концентрация глюкозы в крови пациента определяется с погрешностью до 5 % непосредственно в кабинете врача.

Микробные биодатчики применяются для определения концентрации муравьиной, никотиновой, глутаминовой кислот, спиртов, аммиака и других веществ. Сведения о наиболее распространенных биодатчиках на основе микроорганизмов сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

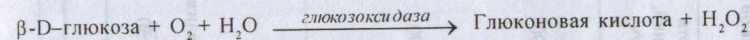
Основные характеристики биодатчиков на основе живых организмов

Определяемая величина (вещество)	Микроорганизм	Вторичный измерительный преобразователь	Время отклика, мин (стабильность)	Диапазон определяемых концентраций, мг/л	Относительная погрешность, %
Усваиваемые сахара Глюкоза	<i>Brevibacterium lactofermentum</i>	O_2 — преобразователь	10 (960 измерений)	10...200	8
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	O_2 — преобразователь	10 (150 измерений)	2...20	10
Уксусная кислота Этанол	<i>Trichosporon brassicae</i>	O_2 — преобразователь	10	3...60	10
	<i>Trichosporon brassicae</i>	O_2 — преобразователь	10 (40 измерений)	2...25	6
	Не идентифицированные бактерии	O_2 — преобразователь	10	5...20	—
Метанол	<i>Citrobacter freundii</i>	Топливный элемент	30 (20 дней)	10...1000	5 (до 200 мг/л)
Муравьиная кислота	<i>Methylobacterium flagellata</i>	O_2 — преобразователь	2	0...0,6 ммоль	5
Метан	<i>Escherichia coli</i>	CO_2 — ионоселективный преобразователь	5	8...800	4-6
Глутаминовая кислота	<i>Citrobacter freundii</i>	pH — преобразователь	10 (7 дней)	100...500	8

Окнчание табл. 4.1

Определяемая величина (вещество)	Микроорганизм	Вторичный измерительный преобразователь	Время отклика, мин (стабильность)	Диапазон определяемых концентраций, мг/л	Относительная погрешность, %
БПК (биохимическое потребление кислорода)	<i>Trichosporon brassicae</i>	O ₂ – преобразователь	15	3...60	6
Лизин	<i>Escherichia coli</i>	CO ₂ – ионоселективный преобразователь	5	10...100	—
Аммиак	Нитрофицирующие бактерии	O ₂ – преобразователь	10 (10 дней)	0,05...1	—
Диоксид азота	Нитрофицирующие бактерии	O ₂ – преобразователь	3	(0,51...255)10 ⁻⁴	—
Нистатин	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	O ₂ – преобразователь	60	0,5...54 см ⁻³	—
Никотиновая кислота	<i>Lactobacillus arabinosis</i>	pH – преобразователь	60	10 ⁻⁵ ...5	—
Витамин В1	<i>Lactobacillus fermenti</i>	Топливный элемент	360	10 ⁻³ ...10 ⁻²	—
Клеточная популяция	Нет сведений	Топливный элемент	15	10 ⁸ ...10 ⁹ клеток/см ⁻³	—
Мутаген	<i>Bacillus subtilis</i> Rec –	O ₂ – преобразователь	60	1,8...2800	—

В ферментных биодатчиках в качестве чувствительных элементов используют специальные биологические катализаторы-ферменты, обеспечивающие специфичность и высокую скорость биохимических реакций с субстратом (веществом, химическая модификация которого катализируется ферментом). В состав такого датчика входят мембрана с иммобилизованным ферментом и вторичный измерительный преобразователь (амперометрический, потенциометрический и т. п.). Одна из сторон мембраны контактирует с исследуемой средой, а другая с рабочей камерой вторичного измерительного преобразователя. Например, для измерения содержания глюкозы на мембрану нанесён фермент — глюкозооксидаза, в присутствии которой происходит окисление исследуемой глюкозы:



Выделяющаяся перекись водорода окисляется на разделе анод — мембрана в соответствии с реакцией: $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$. Возникающий при этом ток пропорционален окисленной перекиси водорода и несет информацию о концентрации глюкозы в исследуемой среде. В биодатчике приняты меры для улучшения восприятия глюкозы в сложных биологических жидкостях. Приводятся такие характеристики этого датчика: диапазон концентрации глюкозы 0,2...2,0 мл (это требует разбавления крови в 10 раз); функция преобразования — линейная; время жизни — 1 год; длительность работы с одним ферментным электродом — 2 недели; срок хранения при 4 °C — 6 месяцев; погрешность измерения $\pm 5\%$ [4.1]. В качестве ферментов используются и другие вещества: холинсоксидаза, аминокислотная оксидаза, ксантинооксидаза и др. В табл. 4.2 приведены сведения о некоторых типах ферментных датчиков для определения глюкозы в крови.

В тканевых биодатчиках используются растительные и животные ткани: листья, цветы, плоды растений, мышцы кролика, бычья печень. Из-за наличия в тканях нескольких ферментов приходится принимать меры для разделения сигналов, например, подбором pH или температурного режима. В некоторых случаях это позволит использовать один датчик для восприятия нескольких величин. Созданы биодатчики из листьев калеробы (для определения концентрации перекиси водорода), тканей баклажана, картофеля, тыквы, банана, кабачка, сахарной свеклы.

На рис. 4.5 показана конструкция биодатчика для определения глутамина с животной тканью. Концентрация глутамина служит ди-

Таблица 4.2

Основные характеристики ферментных биодатчиков глюкозы

Фирма, страна, модель	Фермент	Диапазон определяемых концентраций, мМ/л	Объем пробы, мкл	Частота измерений, проб/ч	Относительная погрешность, %	Стабильность
Yellow Springs Instruments (США), 23 А	Глюкозо оксидаза (GOD)	1...45	25	40	2,0	300 измерений
ZWG (ФРГ), Glukometer GKM 01	GOD	0,5...50,0	20...25	60...90	1,5	1000 измерений
Radekis (Венгрия), OP-G 1-7113-S	GOD	1,7...2,0	100	40	5,0...10,0	250 дней
Фермент (РФ), Аплама	GOD	2,5...30,0	—	20	3,0	—
Fuji Electric (Япония), Fuji Electric	GOD	0...27,0	20	80...90	1,7	500 измерений
Gluko 20A	GOD	1,0...22,0	200	60	—	500 измерений
Seres (Франция), Enzymat	GOD	0,5...30,0	50	60	5,0	—
Институт биохимии (Литва)	GOD	0,00001...1,0	—	—	2,0	1000 измерений
Soica - Tacussel (Франция), глюкозный электрод	GOD	2,5...27,5	100	Время анализа 60 с	1,5	8 недель
Hofman - La Roche & Co (Швейцария), 5410	GOD	0...55,5	20...40	120...150	2,0	—
Analytical Instruments (Япония), Glucororder - E	GOD					

Автоматические проточные анализаторы					
Daichi (Япония), Auto & Stat GA 1110	GOD	1,0...40,0	100...250	—	1,0
MLW (Германия), ME Glucose 6	GOD	1,0...44,0	20	80 - 120	1,2
Карлов Университет (Чехословакия), Life Science Instr., Div	GOD	0,0006...5,0	—	60	3,5
Miles (США), GCIS	GOD	0...27,5	Время отклика 2 мин.	—	5
					1000 измерений 30 дней 50 часов

агностическим критерием в медицине (критерий Рея) [4.1]. В таком датчике тонкий слой кортекса почки свиньи закрепляется на поверхности рабочей части датчика, чувствительного к газообразному аммиаку.

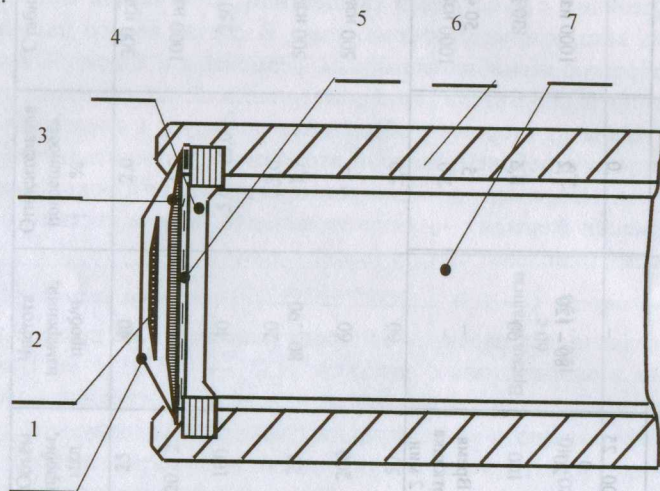
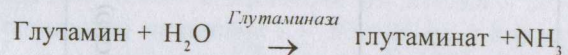


Рис. 4.5. Биодатчик с животной тканью:

1 — нейлоновая поддерживающая мембрана; 2 — ткань почки свиньи; 3 — внутренняя диализная мембрана; 4 — внутренний электролит; 5 — газопроницаемая тефлоновая мембрана; 6 — корпус; 7 — pH-электрод

Клетки почки имеют высокую концентрацию фермента глутаминазы, катализирующего реакцию:



Ткань почки 2 удерживается тканевой нейлоновой сеткой 1 с размером отверстий порядка 150 мкм. Для защиты газопроницаемой мембраны 5 от клеточных компонентов ткани 2 между ней и мембраной помещают тонкую деацетилцеллюлезную пленку 3. При взаимодействии глутамин, поступающего из анализируемого раствора, с закреплённым катализатором (ткань почки), содержащим глутаминазу, образуется аммиак.

Измеряя концентрацию аммиака, получают информацию о содержании субстрата — глутамин в растворе. Тканевые глутаминовые биодатчики по своим характеристикам превосходят ферментные и микробные биодатчики (см. табл. 4.3).

Таблица 4.3

Основные характеристики глутаминовых биодатчиков

Чувствительный элемент (биокализатор)	Чувствительность (наклон характеристики) мВ/рС	Предел обнаружения $\times 10^{-5}$, М	Диапазон линейности характеристики, мМ	Время отклика, мин	Срок службы (минимум), дни
Фермент	33...41	6,0	0,1...3,3	4...5	1
Митохондрии	53	2,2	0,11...5,5	6...7	10
Бактерии	49	5,6	0,1...10	5	20
Ткань	50	2,0	0,064...5,2	5...7	30

Характеристики тканевых биодатчиков приведены в табл.4.4.

В названии биодатчиков иногда отражается тип *формирователей выходных сигналов* (потенциометрические, амперометрические, кондуктометрические, calorиметрические и др.).

По количеству воспринимаемых и преобразуемых величин можно выделить *одномерные* и *многомерные* биодатчики, воспринимающие несколько входных величин.

Использование плодов растений (без разрушения их структуры) в качестве многомерных биодатчиков — новое перспективное направление в измерительной технике [4.5]. Необычайная чувствительность растений к различным факторам окружающей среды замечена ещё ботаниками и физиологами прошлого века.

Растения реагируют на ничтожные изменения интенсивности светового потока, обладают высокой химической чувствительностью. Реагируют на радиоактивное излучение и на малейшие изменения влажности воздуха. Высокой чувствительностью к внешним факторам обладают и семена растений.

Основные преимущества датчиков с плодами растений объясняются следующим:

- плоды обладают высокой устойчивостью к воздействию различных экстремальных факторов (они сохраняют жизнеспособность при воздействии отрицательных температур в течение длительного времени);
- при использовании плодов в качестве биодатчиков существует реальная возможность создания миниатюрных датчиков, способных конкурировать с микроэлектронными датчиками;
- при проведении процедуры измерений потребуются менее сложные технические средства, чем при решении подобных задач с применением ферментов и других биологических веществ;

Таблица 4.4
Основные характеристики тканевых биодатчиков

Субстрат	Чувствительный элемент (биокатализатор)	Измерительный преобразователь	Диапазон линейности характеристики, мМ	Чувствительность, мВ/рС	Время отклика, мин.	Относительная погрешность, %	Срок службы, дни (минимум)
Глутамин	Клетка почки свиньи	NH_3 – электрод	0,1...10,0	50	5...7	5,6	30
Аденозин – АМР	Мышца кролика	NH_3 – электрод	0,14...10	58	2,5...8,5	—	28
Глутаминат	Желтая тыква	CO_2 – электрод	0,44...0,47	48	10	—	7
Пируват	Кукурузное зерно (мука)	CO_2 – электрод	0,74...4,3	35	4...10	—	1
Мочевина	Бобы канавалии мучевидной (мука)	NH_3 – электрод	0,034...1,5	58	1...5	—	94
Фосфат/фторид ионы	Клубень картофеля	O_2 – электрод	0,2...6	—	5	—	24
Цистеин	Лист огурца	NH_3 – электрод	1...100	35	—	—	—

• проще осуществить взаимозаменяемость чувствительных элементов, так как имеется возможность отбора и сортировки по равным массе, форме, размерам и другим свойствам.

Нужно отметить, что семена арктического люпина через 5...19 тысяч лет пребывания в арктической мерзлоте в норах леммингов дали всходы; через тысячу лет возвращаются к жизни семена растений *Nelumbo nucifera*, 110...130 лет сохраняют жизнеспособность семена обыкновенных ячменя и овса [4.5]. Этот факт показывает, что срок службы биодатчиков может быть большим. Семена плодов имеют небольшую массу и размеры. Масса плода конопли составляет $22 \cdot 10^{-3}$ г, проса – $4 \cdot 10^{-3}$ – $10 \cdot 10^{-3}$ г, тмина – $2,3 \cdot 10^{-3}$ – $2,5 \cdot 10^{-3}$ г.

Приведём пример использования плода гороха в датчике влажности и температуры. Плод растения (рис.4. 6) помещался в полый цилиндрический пьезоэлемент [4.7]. Влажность среды изменяла объём семени. Это приводило к изменению заряда пьезоэлемента – выходного сигнала датчика. Кроме того, как оказалось, плоды растений реагировали на изменение температуры своей биоэлектрической активностью. Эксперимент подтвердил принципиальную возможность создания таких биодатчиков. Диапазон измерения влажности составил 0...100 %, а основная погрешность – не более 4 %. Временная нестабильность выходного сигнала в течение 48 ч не превысила 1,5 %. Нелинейность градуировочной характеристики была более 15 % в диапазоне влажности от 14 до 97 %. При измерении же температуры от 20 до 60 °С датчик позволял выполнять измерение с погрешностью ± 5 %

Большой чувствительностью к влажности обладают и плоды аистника. В сухую погоду они закручиваются в «штопор», а во влажную — распрямляются. Корпус биодатчика на рис. 4.7 имеет форму цилиндрической резьбовой втулки [4.8]. В верхнюю часть трубки вкручивалась прозрачная пробка с закреплённым на ней плодом растения. Сердечник якоря индуктивного преобразователя имеет углубление для механического крепления его к остям аистника. Обмотка, изготовленная из медного провода, дополнительно выполняет функции преобразователя температуры. При совершении гигроскопических движений (под влиянием влажности) аистника с якорем изменяется индуктивность преобразователя. Индуктивность измерялась на переменном токе (10 кГц). Температура же изменяет активное сопротивление обмотки, и процедура измерения температуры осуществляется на постоянном токе.

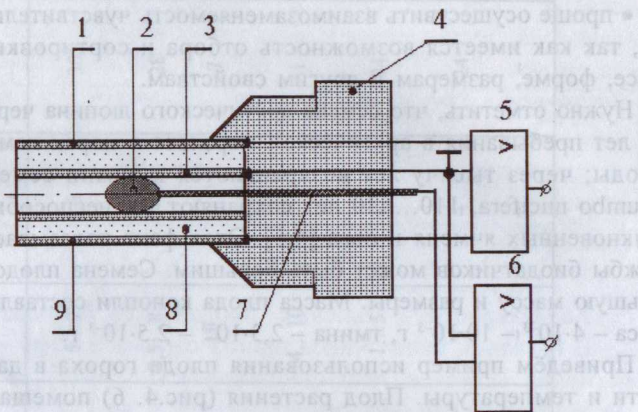


Рис. 4.6. Конструкция биодатчика температуры и влажности воздуха:

1, 3, 9 — серебряные токопроводящие электроды; 2 — плод гороха; 4 — корпус; 5 — усилитель пьезоЭДС (влажность); 6 — усилитель биопотенциалов (температура); 7 — микроэлектрод для снятия биопотенциалов; 8 — цилиндрический пьезоэлемент.

Нелинейность влажочувствительной характеристики такого датчика составила не более 5 %. При измерении же температуры датчик не уступал по точности измерения обыкновенным медным термометрам сопротивления порядка 2 %. Быстродействие биодатчика при измерении влажности не превысило 1 мин.

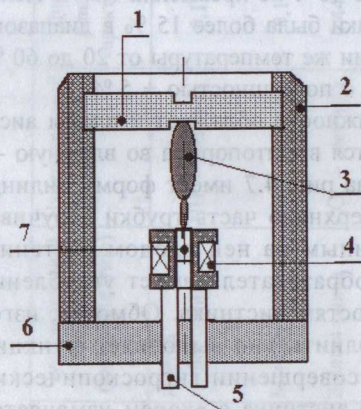


Рис. 4.7. Конструкция датчика температуры и влажности воздуха:

1 — пробка; 2 — корпус; 3 — плод аистинки; 4 — обмотка индуктивного преобразователя; 5 — электрические выводы датчика; 6 — основание; 7 — якорь индуктивного преобразователя.

Семена могут найти применение в специальных высокочувствительных средствах сигнализации и контроля: биологически активных веществ, вызывающих нежелательные реакции у растений и животных; наличия основных форм бактерий; опасных соединений некоторых химических веществ и др.

В последнее время для изготовления биодатчиков применяется интегральная технология. Например, в биодатчиках используются

плоские узлы с вакуумным напылением электродов из платины, палладия или серебра на керамическую подложку. Фермент с пастой укрывается с помощью ультразвука на поверхности пластины [4.2]. По такой технологии изготовлен биодатчик глюкозы и лактата. Биодатчик лактата использовался для определения его содержания в яйцах курицы с различным временем инкубации. Погрешность измерения лактата составила ± 5 %. На рис. 4.8 показана конструкция интегрального биодатчика для определения концентрации глутамата [4.1]. Определение концентрации L — глутаминовой кислоты — важная операция в пищевой промышленности, так как эту кислоту применяют в качестве вкусовой добавки к пищевым продуктам. Чувствительным элементом служит глутаматоксидаза, которая катализирует окисление глутамата, причём в ходе окисления расходуется кислород. Кислородный датчик состоит из газопроницаемой тефлоновой мембраны 7, двух золотых микроэлектродов 4 и раствора электролита 6 (0,1 М КОН). К золотым микроэлектродам прикладывается напряжение порядка 1 В, так как при этом напряжении наблюдается пик тока, обусловленный восстановлением кислорода в процессе работы датчика (определено экспериментальным путем). Между этим размером тока и концентрацией существует линейная зависимость.

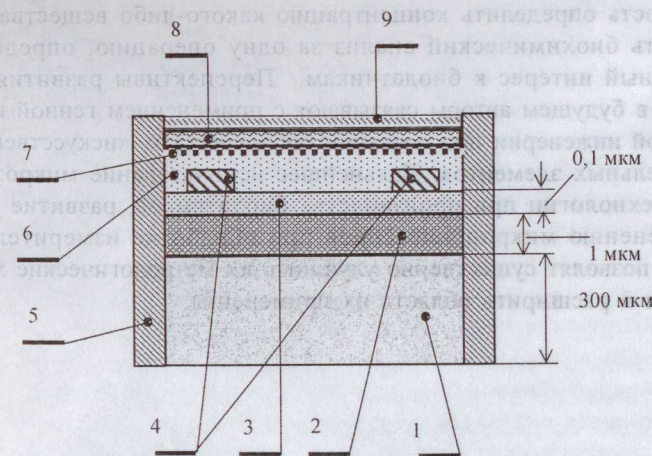


Рис. 4.8. Конструкция интегрального биодатчика для определения глутамата: 1 — кремниевая подложка; 2 — диоксид кремния; 3 — нитрид кремния; 4 — золотые электроды; 5 — корпус; 6 — электролит; 7 — тефлоновая мембрана; 8 — триацетилцеллюлозная мембрана; 9 — нейлоновая сетка.

Глутаматоксидазу закрепляли на триацетилцеллюлёзной мембране 8 и помещали на тефлоновую мембрану 7 кислородного микродатчика и защищали нейлоновой сеткой 9. Испытания биодатчика приводились при определении концентрации глутамата в диапазоне от 5 до 50 мМ. Нелинейность градуировочной характеристики не превысила 1 %.

По виду выходного сигнала биодатчики можно условно разделить на *активные* и *пассивные*. В активных биодатчиках выходные величины имеют энергетическую природу, в пассивных — неэнергетический параметр.

Созданы активные биодатчики, входящие в тестовую систему «Эколюм» с морскими люминесцентными бактериями, уровень оптического свечения которых зависит от степени токсичности среды [4.2]. Экспресс-анализ здесь занимает 5 мин. Реагенты производятся в консервированной форме сроком хранения не менее 6 месяцев. В системе с высокой чувствительностью определяется наличие тяжелых металлов, фенолов, пестицидов. Отмечено, что реакция системы на основные токсические вещества коррелируется с реакцией высших организмов.

Не только высокая чувствительность биодатчиков, но и, главное, — возможность определить концентрацию какого-либо вещества, т. е. выполнить биохимический анализ за одну операцию, определяют повышенный интерес к биодатчикам. Перспективы развития биодатчиков в будущем авторы связывают с применением генной и биологической инженерии при создании биологических «искусственных» чувствительных элементов. Дальнейшее использование микроэлектронной технологии при производстве биодатчиков, развитие работ по применению микропроцессоров при обработке измерительных сигналов позволят существенно улучшить их метрологические характеристики и расширить область их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

- 4.1. *Биосенсоры: основы и приложения*: Пер. с англ. / Под редакцией Э. Тёрнера, И. Карубе, Дж. Уилсона. — М.: Мир, 1992. — 614 с.
- 4.2. *Филаретов Г.Ф.* Биосенсоры и их применение // Приборы и системы управления. — 1997. — № 7.
- 4.3. *Тарасевич М. В., Богдановская В. А., Жултаева Г. В.* Электрохимические биосенсоры // Электрохимия. — 1993. — Т. 29 — № 12.
- 4.4. *Алейников А.Ф.* Многофункциональные датчики. — Новосибирск: СО РАСХН, 1991 — 36 с.
- 4.5. *Алейников А. Ф.* Создание новых средств измерений для АПК. — Новосибирск: АОЗТ «Трина», 1993. — 160 с.
- 4.6. *Датчики измерительных систем*: В 2 кн. Кн. 2 / Ж. Аш, П. Андре, П. Дегут и др. Пер. с франц. — М.: Мир, 1992. — 424 с.
- 4.7. *А.с. 1523111*, МКИ А 01 G 7 / 00. Устройство для измерения влажности и температуры / А.Ф. Алейников. — № 4171692/30-15; Заявл. 30.12.86; Оpubл. 23.11.89. Бюл. № 43.
- 4.8. *А.с. 1604247*, МКИ А 01 G 7 / 00. Устройство для измерения температуры и влажности воздуха / А.Ф.Алейников. — № 4389675/30-15; Заявл. 08.02.88; Оpubл. 07.11.90. Бюл. № 41.

ГЛАВА 5

МИКРОЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКОВ

5.1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ КРЕМНИЕВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В течение многих лет конструирование и производство датчиков базировалось на технологиях машиностроения и точной механики. Эти технологии, будучи достаточно гибкими и отработанными, давали разработчикам аппаратуры большую свободу в выборе принципов действия и вариантов конструкции датчиков. Книги, описывающие принципы действия, устройства и характеристики датчиков, стали напоминать энциклопедии. Как правило, каждой конструкции соответствовала своя технология изготовления датчика, причем довольно часто отдельные этапы технологического маршрута изготовления были производственным секретом. Все это привело к тому, что стоимость датчиков резко возросла по сравнению со стоимостью компонентов электронных схем. Эта разница становилась все заметнее по мере ужесточения требований к точности измерений.

Между тем в микроэлектронике — этом важнейшем секторе электроники, определяющем в значительной мере прогресс техники в целом, — ситуация оказалась противоположной. При возрастающей сложности электрических схем их относительная стоимость неуклонно падала. Это произошло благодаря применению кремния как основного элемента для производства электронных схем и использованию специальной микроэлектронной технологии.

В середине 60-х годов стала ясна перспективность применения микроэлектронной технологии и для производства датчиков. Первые новые технологии производства были успешно применены при создании датчиков механических величин — давлений и ускорений. Уже в 1974 году появился каталог фирмы National Semiconductor (USA), в котором описывались характеристики выпускаемых промышленных датчиков [5.1]. Постепенно новые технологии производства, основанные на достижениях микроэлектроники, нашли применение при создании магнитных, термических и химических датчиков.

В 80-х годах появились первые сообщения о разработке микроэлектронных датчиков радиоактивного излучения [5.2]. В 1982 году вышла большая обзорная статья К.Петерсона [5.3], которая обобщила применение микроэлектронной технологии в производстве датчиков и наметила перспективы ее дальнейшего развития.

В настоящее время темпы роста объемов производства датчиков, изготавливаемых по микроэлектронной технологии, превосходят темпы роста производства обычных интегральных схем. В значительной мере это явилось следствием существенного сокращения трудозатрат на производство одного датчика и уменьшения его стоимости.

Появление новых технологий изготовления датчиков оказало решающее влияние на их конструкции и выбор материалов. Эти конструкции и материалы должны быть, прежде всего, совместимы с микроэлектронной технологией производства чувствительных кремниевых элементов. В технологии производства датчиков различных физических величин оказалось много общих операций и приемов, что, хотя и не привело к созданию универсальной технологии изготовления, значительно уменьшило трудоемкость изготовления и стоимость датчиков.

Учитывая исключительную роль кремния как материала для датчиков, необходимо остановиться на его свойствах и характеристиках подробнее.

В настоящее время и в обозримом будущем кремний останется основным материалом микроэлектроники. Это объясняется рядом его уникальных физических и химических свойств, из которых можно выделить следующие [5.3]:

1. Кремний как исходный материал доступен и дешев, а технология его получения, очистки, обработки и легирования хорошо развита, что обеспечивает высокую степень кристаллографического совершенства

изготавливаемых структур. Необходимо специально подчеркнуть, что по этому показателю кремний намного превосходит сталь.

2. Кремний обладает хорошими механическими свойствами. По значению модуля Юнга кремний приближается к нержавеющей стали и намного превосходит кварц и различные стекла. По твердости кремний близок к кварцу и почти вдвое превосходит железо. Монокристаллы кремния имеют предел текучести, который в три раза больше, чем у нержавеющей стали. Однако при деформации он разрушается без видимых изменений размеров, тогда как металлы обычно претерпевают пластическую деформацию. Причины разрушения кремния связаны со структурными дефектами кристаллической решетки, расположенными на поверхности монокристаллов кремния. Полупроводниковая промышленность успешно решает проблему высококачественной обработки поверхности кремния, так что зачастую кремниевые механические компоненты (например, упругие элементы в датчиках давления) превосходят по прочности сталь. В табл. 5.1 указаны механические характеристики кремния и других материалов, применяющихся в датчиках.

Таблица 5.1

Сравнительные характеристики основных материалов электроники

Материал	Предел текучести, 10^9 Па	Твердость, кг/мм^2	Модуль Юнга, 10^{11} Па	Плотность, г/см^3	Теплопроводность, $\text{Вт/см}^2\text{С}$	Коэффициент теплового расширения, $10^{-6}/^\circ\text{С}$
Si	7.0	850	1.9	2.3	1.57	2.33
Сталь (высшей прочности)	4.2	1500	2.1	7.9	0.97	12
Нержавеющая сталь	2.1	660	2.0	7.9	0.329	17.3
Al	0.17	130	0.7	2.7	2.36	25

3. Микроэлектронная технология изготовления кремниевых приборов основана на применении тонких слоев, создаваемых ионной имплантацией или термической диффузией атомов легирующей примеси, что в сочетании с методами вакуумного осаждения металлов на кремниевую поверхность оказалось весьма удобно для целей миниатюризации изделий.

4. Для воспроизведения размеров и форм структур кремниевых приборов используется метод фотолитографии, обеспечивающий высокую точность изготовления.

5. Кремниевые микроэлектронные приборы изготавливаются по групповой технологии. Это означает, что все производственные процессы осуществляются для целой кремниевой пластины, которая содержит несколько сотен отдельных кристаллов («чипов»). И только на последнем этапе изготовления пластина разделяется на кристаллы, которые далее используются при сборке отдельных приборов, что в итоге резко снижает их себестоимость.

6. Для производства датчиков особенно важна способность кремния реагировать на различные виды воздействий: механические, тепловые, магнитные, химические и электрические. Универсальность применения кремния способствует снижению стоимости датчиков и унификации технологии их изготовления.

В датчиках кремний служит преобразователем, основное назначение которого — превращать измеряемое физическое или химическое воздействие в электрический сигнал. Функции кремния в датчиках оказываются значительно более широкими, чем в обычных интегральных схемах. Это обуславливает некоторые специфические особенности технологии изготовления кремниевых чувствительных элементов.

В настоящей главе рассматриваются особенности новых технологий изготовления датчиков. В первой части описаны основные этапы этих технологий, которые имеют много общего со стандартными технологическими процессами, применяемыми для производства интегральных схем.

Во второй части этой главы анализируются некоторые вопросы технологии изготовления преобразователей для датчиков, которые либо не типичны, либо вообще сейчас не применяются в стандартной микроэлектронной технологии при производстве интегральных схем. Необходимость особого рассмотрения этих вопросов связана с тем, что датчики представляют собой измерительные устройства, имеющие специфические особенности в конструкциях. Хотя микроэлектронная технология сейчас используется в большей или меньшей мере в производстве всех типов датчиков, иллюстрация отдельных технологических этапов изготовления будет проводиться применительно к датчикам давления. Именно для этих датчиков к настоящему времени накоплен наибольший опыт применения микроэлектронных технологий.

В заключительной части главы будут приведены примеры схем технологических маршрутов для конкретных видов датчиков и измерительных систем.

Рассмотрим те этапы микроэлектронной технологии кремния, которые являются общими для производства интегральных схем и чувствительных элементов датчиков.

Для производства интегральных схем и чувствительных элементов датчиков необходимы пластины монокристаллического кремния. Применение пластин является принципиальной особенностью микроэлектронной технологии, во многом предопределившей ее дальнейшие успехи. В настоящее время полупроводниковая промышленность выпускает кремниевые пластины диаметром от 76 до 200 мм, которым придана круглая форма. Имеется четко выраженная тенденция использования в производстве пластин все большего диаметра, что связано с возможностью получить на них большое число интегральных схем или чувствительных элементов.

При получении кремния исходным сырьем служит чистый песок (кварцит). Песок вместе с углеродом в виде угля, кокса и древесных опилок загружается в электродуговую печь. При пропускании сильного тока в смеси происходит ряд химических реакций, в результате которых образуется металлургический кремний со степенью чистоты 98 %. Этот процесс весьма энергоемок, а образовавшийся кремний содержит много примесей и требует очистки, которая производится химическими методами. После ряда этапов этой очистки получают поликристаллические кремниевые слитки с необходимой для дальнейшего производства степенью чистоты. Поликристаллический кремний состоит из большого числа небольших кристаллов, имеющих хаотическую угловую ориентацию.

Для производства интегральных схем и чувствительных элементов датчиков необходим монокристаллический кремний, т. е. такой, где атомы расположены строго периодически на больших расстояниях в пределах целого слитка, высота которого может достигать двух метров. Кроме того, монокристаллы кремния должны содержать малое количество примеси — не более одного атома примеси на 10^9 атомов кремния. Поскольку исходным сырьем для монокристаллического кремния является кремний поликристаллический, получение последнего с требуемой степенью чистоты — самостоятельная серьезная техническая проблема.

Обычно монокристаллический кремний в виде слитков больших размеров получают по методу Чохральского [5.4]. В этом методе на первом этапе поликристаллический кремний расплавляется с помощью высокочастотного разогрева в инертном химическом тигле. В специальном держателе укрепляется затравка — небольшой монокристалл кремния заданной кристаллографической ориентации (рис. 5.1).

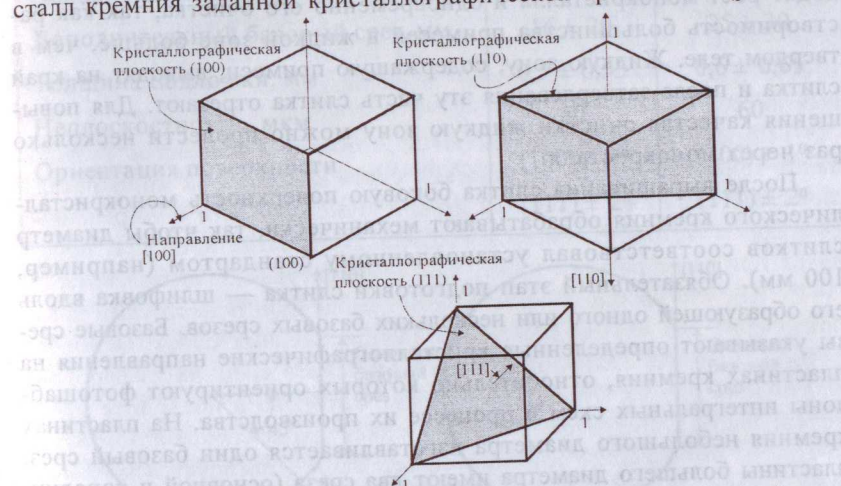


Рис. 5.1 Схематическое представление кристаллографических плоскостей и важнейших направлений в кубической элементарной ячейке

На втором этапе кристалл-затравку приводят в соприкосновение с расплавом и затем медленно вытягивают. Атомы кремния из расплава начинают кристаллизоваться на вытягиваемом кристалле-затравке, повторяя его кристаллографическую структуру. Для улучшения качества выращиваемого монокристалла держатель с затравкой вращается со скоростью несколько оборотов в минуту.

В качестве легирующей примеси для создания кремния с проводимостью p -типа обычно применяют бор, а если необходимо получить проводимость n -типа, то добавляют фосфор. Примеси вводятся в расплав в виде порошка.

В некоторых случаях, например для датчиков ядерного излучения, необходим особо чистый кремний. Для его получения используют метод зонной плавки. Слиток поликристаллического кремния устанавливают вертикально в специальном держателе, и тигель не требуется. С помощью высокочастотного разогрева в поликремне-

вом кристалле формируется зона расплава длиной около 1,5 см, которая первоначально соединяет низ кристалла-затравки и поликремниевый слиток. Конструкция установки предусматривает управляемое перемещение жидкой зоны от кристалла-затравки к противоположному краю слитка. В процессе движения зоны происходит рост монокристалла и одновременно его очистка, так как растворимость примесей в жидкой зоне больше, чем в твердом теле. Жидкую зону, содержащую примеси, выводят на край слитка и после затвердевания эту часть слитка отрезают. Для повышения качества очистки жидкую зону можно провести несколько раз через монокристалл.

После выращивания слитка боковую поверхность монокристаллического кремния обрабатывают механически, так чтобы диаметр слитков соответствовал установленному стандарту (например, 100 мм). Обязательный этап подготовки слитка — шлифовка вдоль его образующей одного или нескольких базовых срезов. Базовые срезы указывают определенные кристаллографические направления на пластинах кремния, относительно которых ориентируют фотошаблоны интегральных схем в процессе их производства. На пластинах кремния небольшого диаметра изготавливается один базовый срез, пластины большего диаметра имеют два среза (основной и дополнительный) для повышения точности размещения фотошаблонов. Для получения полупроводниковых пластин слиток кремния разрезают перпендикулярно длинной оси. Пластины шлифуют и полируют до 14 класса чистоты. При производстве интегральных схем полируется только одна сторона пластины, а для производства чувствительных элементов датчиков зачастую необходимы двусторонне полированные пластины. К пластинам кремния предъявляются жесткие требования по точности их кристаллографической ориентации. Обе поверхности пластины должны быть параллельны определенной плоскости элементарной ячейки кристалла кремния. На рис. 5.1 схематически показаны элементарная ячейка и обозначения важнейших кристаллографических плоскостей и направлений в кремнии, а в табл. 5.2 — характерные размеры кремниевых пластин.

На рис. 5.2 приведены важнейшие кристаллографические направления базовых срезов пластин кремния, выпускаемых промышленностью.

Таблица 5.2

Геометрические параметры кремниевых пластин диаметром 100 и 125 мм

Диаметр подложки, мм	100 ± 1	125 ± 0,5
Основной базовый срез, мм	30 ± 35	40 ± 45
Дополнительный базовый срез, мм	16 ± 20	25 ± 30
Толщина подложки, мм	0,5 ± 0,55	0,6 ± 0,65
Неплоскостность, мкм	50	60
Ориентация поверхности	(100) ± 1° (111) ± 2°	(100) ± 1° (111) ± 2°

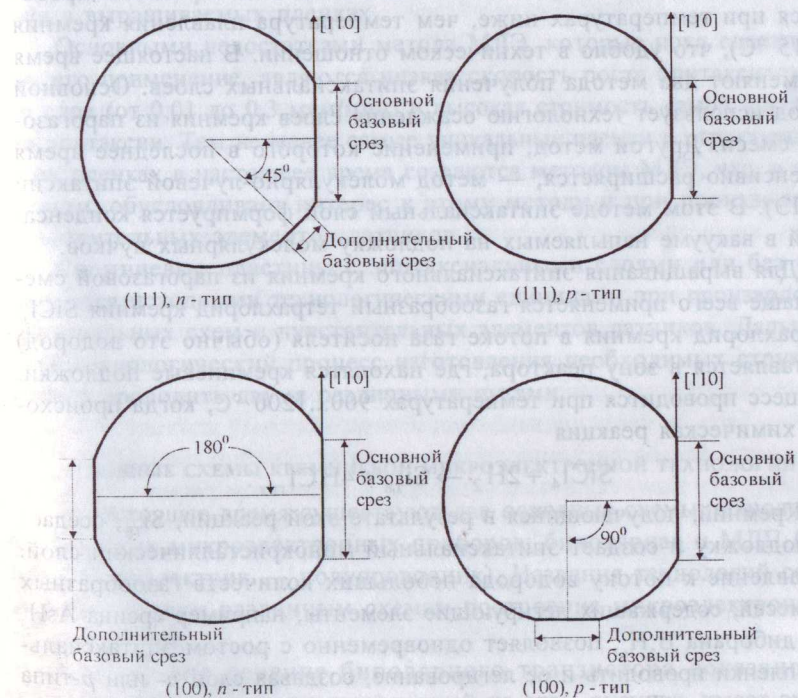


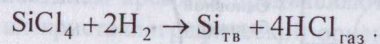
Рис. 5.2. Маркировка кремниевых пластин с помощью базовых срезов. Ориентация срезов зависит от типа проводимости пластины и ее кристаллографической ориентации

КРЕМНИЕВЫЕ ПЛАСТИНЫ С ЭПИТАКСИАЛЬНЫМ СЛОЕМ

В производстве интегральных схем и микроэлектронных датчиков широко применяются пластины с эпитаксиальными слоями, благодаря чему удается оптимизировать параметры транзисторов интегральных схем. В производстве чувствительных элементов датчиков механических величин сильнолегированные эпитаксиальные слои используются в качестве стоп-слоев для автоматической остановки процессов травления при глубоком профилировании исходных кремниевых пластин.

Термин эпитаксия применяют для описания процессов выращивания тонких монокристаллических слоев вещества на монокристаллической подложке. Подложка играет ту же роль, что и затравочный кристалл в методе Чохральского. Эпитаксиальные процессы проводятся при температурах ниже, чем температура плавления кремния (1415 °C), что удобно в техническом отношении. В настоящее время применяют два метода получения эпитаксиальных слоев. Основным методом использует технологию осаждения слоев кремния из парогазовой смеси. Другой метод, применение которого в последнее время интенсивно расширяется, — метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В этом методе эпитаксиальный слой формируется конденсацией в вакууме напыляемых на подложку молекулярных пучков.

Для выращивания эпитаксиального кремния из парогазовой смеси чаще всего применяется газообразный тетрахлорид кремния SiCl_4 . Тетрахлорид кремния в потоке газа носителя (обычно это водород) доставляется в зону реактора, где находятся кремниевые подложки. Процесс проводится при температурах 900...1200 °C, когда происходит химическая реакция



Кремний, получающийся в результате этой реакции, $\text{Si}_{\text{ТВ}}$, оседает на подложку и создает эпитаксиальный монокристаллический слой. Добавление к потоку водорода небольших количеств газообразных примесей, содержащих легирующие элементы, например арсина AsH_3 или диборана B_2H_6 , позволяет одновременно с ростом эпитаксиальной пленки проводить и ее легирование, создавая слои *n*- или *p*-типа проводимости. Типичные скорости роста эпитаксиальных пленок из парогазовой смеси составляют от 0,5 до 1,5 мкм/мин для диапазона температур 900...1250 °C. Обычный уровень легирования эпитакси-

альных слоев не превышает $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Это соответствует уровню концентрации примеси в коллекторе транзистора при изготовлении его по биполярной технологии. Толщина эпитаксиальных слоев обычно составляет 2...5 мкм, хотя в отдельных случаях может достигать и 20 мкм.

Основное преимущество метода молекулярно-лучевой эпитаксии перед эпитаксией из парогазовой смеси заключается в том, что процесс проводится при более низкой температуре. Температурный диапазон МЛЭ лежит в пределах 400...800 °C. Снижение температуры процесса уменьшает диффузию примеси из подложки в растущий слой и позволяет создавать резкие границы между слоями. Другое преимущество метода молекулярно-лучевой эпитаксии состоит в высокой точности управления молекулярными пучками и процессом легирования в целом, что позволяет создавать сложные профили легирования в выращиваемых пленках.

Основными недостатками метода МЛЭ, которые пока сдерживают его применение, являются низкая скорость роста эпитаксиального слоя (от 0,01 до 0,3 мкм/мин) и высокая стоимость самой установки эпитаксии. Тем не менее самые уникальные пленки и структуры на этих пленках в настоящее время создаются методом МЛЭ, что, в частности, обуславливает интерес к этому методу и при производстве чувствительных элементов датчиков.

Кремниевые пластины с эпитаксиальными слоями или без них являются исходными технологическими единицами при производстве интегральных схем и чувствительных элементов датчиков. Дальнейший технологический процесс изготовления необходимых структур можно проводить двумя различными путями.

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ КРЕМНИЕВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В настоящее время существуют две основные схемы технологии кремниевых микроэлектронных приборов: биполярная и МДП (металл — диэлектрик — полупроводник). Названия технологий соответствуют двум различным схемам построения микроэлектронных транзисторов.

Поперечное сечение биполярного транзистора показано на рис. 5.3. Транзистор, представленный на этом рисунке, имеет эмиттер (вывод *E*) и коллектор *n*-типа проводимости (вывод *C*) и базу *p*-типа проводимости (контакт *D*). Два *p-n* перехода эмиттер — база и

коллектор — база в нормальном режиме включены: первый — в прямом направлении, а второй — в обратном. В результате электроны инжектируются из сильно легированного эмиттера (символ n^+) в базу транзистора. Инжектированные из эмиттера электроны в базе являются неосновными носителями и движутся благодаря диффузии по направлению к коллектору.

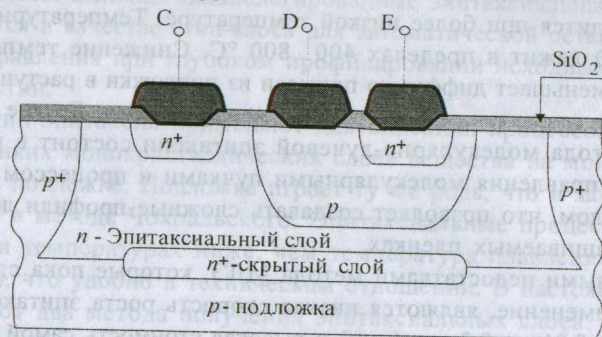


Рис. 5.3. Поперечное сечение биполярного n - p - n транзистора

Поскольку переход коллектор-база включен в обратном направлении, неосновные носители-электроны затягиваются полем p - n перехода в коллектор и определяют его ток $I_{св}$.

В процессе диффузионного движения через базу электрон может повстречаться с дыркой и рекомбинировать, в результате чего исчезнут один электрон и одна дырка. Поскольку база транзистора электрически нейтральна, исчезновение дырки в результате рекомбинации должно быть компенсировано током через базовый контакт, что создает одну из составляющих базового тока. Две другие составляющие базового тока связаны с возможным переходом дырок в область эмиттера и инжекцией дырок из коллектора в область базы. В хорошо сконструированном транзисторе базовый ток составляет не более 1 % от тока эмиттера. Для обеспечения этого базу приходится делать достаточно тонкой, чтобы вероятность рекомбинации была возможно меньшей. Процессы диффузии электронов характеризуются диффузионной длиной — расстоянием, на котором концентрация инжектированных электронов в результате рекомбинации уменьшается в e раз. Диффузионная длина L связана с коэффициентом диффузии D и временем диффузии t соотношением:

$$L = \sqrt{Dt}.$$

Для уменьшения рекомбинационных потерь размеры базы W должны удовлетворять соотношению:

$$W \ll L.$$

Исходные пластины для изготовления n - p - n транзисторов имеют подложку p -типа, на которой выращен эпитаксиальный слой слаболегированного n -кремния. Коллекторный p - n переход образуется термической диффузией примеси p -типа, в качестве которой обычно используется бор. Эмиттерный переход формируется диффузией примеси n -типа (обычно фосфор) в базовую область транзистора. Для создания эффективно работающего эмиттера уровень его легирования должен быть достаточно высок. В качестве легирующей примеси иногда применяется мышьяк.

Области p^+ (рис. 5.3) предназначены для изоляции транзисторов друг от друга, а скрытый n^+ слой — для улучшения частотных характеристик транзисторов. Обычная область применения биполярной технологии — транзисторы высокоскоростной памяти и логические приборы. В настоящее время в чувствительных элементах датчиков применяется в основном биполярная технология.

Первые биполярные транзисторы с использованием термической диффузии легирующей примеси были созданы в 1959 году. Спустя год был создан практический вариант принципиально нового транзистора, получившего название МДП-транзистор (металл — диэлектрик — полупроводник). Схема такого транзистора показана на рис. 5.4. В подложке, например p -типа, ионным легированием или термической диффузией примеси создаются две области n типа — сток и исток (контакты A и C). На тонком слое окисла между стоком и истоком располагается металлический электрод-затвор (контакт B). Области

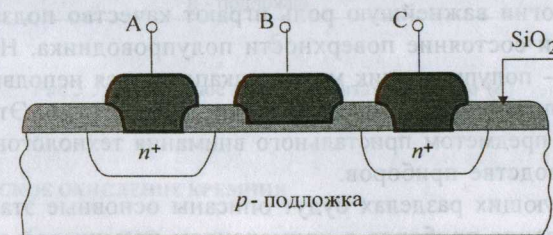


Рис. 5.4. Поперечное сечение n -канального МДП-транзистора

стока и истока образуют с подложкой два встречно включенных p - n перехода.

Работа МДП-транзистора зависит от соотношения между напряжениями на его электродах. Когда на базу не подается напряжение, ток между истоком и стоком будет мал и равен обратному току одного из двух p - n переходов. Подача на базовый электрод положительного относительно подложки потенциала приводит к тому, что неосновные носители в подложке — электроны — будут накапливаться под затвором.

Если положительное напряжение превосходит некоторую характеристическую величину, называемую пороговым напряжением, под затвором электронов собирается больше, чем средняя концентрация дырок в подложке p -типа, и возникает канал n -типа, который соединяет области истока и стока транзистора. На границе канала n -типа и подложки p -типа возникает p - n переход, который существует до тех пор, пока на базе имеется необходимый положительный потенциал.

По аналогичной схеме можно построить транзисторы, у которых канал будет p -типа. В этом случае подложка должна иметь n -тип проводимости, области истока и стока формируются термической диффузией или ионной имплантацией примеси p -типа, а на базу должен подаваться отрицательный потенциал.

Изменяя напряжение на затворе, можно эффективно управлять током, текущим в канале от истока к стоку. Описанная структура действует как твердотельный аналог вакуумного триода.

Приведенные схемы построения транзисторов, несмотря на их отличие, имеют сходные технологические операции изготовления. Различаются только число этих операций, требования к уровню легирования и качеству используемых слоев. Технология изготовления МДП транзисторов проще и дешевле, чем у биполярных. Однако в МДП технологии важнейшую роль играют качество подзатворного диэлектрика и состояние поверхности полупроводника. На границе диэлектрик — полупроводник может накапливаться неподвижный заряд, прямо влияющий на характеристики транзисторов. Эти проблемы являются предметом пристального внимания технологов при массовом производстве приборов.

В последующих разделах будут описаны основные этапы маршрута изготовления приборов с применением кремниевой интегральной технологии.

При производстве микронэлектронных датчиков по биполярной технологии особое значение имеют резисторы. Это связано с их широким применением в датчиках механических и термических величин. Наибольшее распространение получили две схемы построения резисторов, показанные на рис. 5.5. В первом варианте резистор формируется в эпитаксиальной пленке, где C и E — контакты к резистору и p -области обеспечивают изоляцию резистора от других элементов электрической схемы. Во втором варианте резистор формируется с помощью термической диффузии или ионной имплантации примеси прямо в исходной кремниевой пластине. Возникающий при этом p - n переход служит для изоляции резистора от других элементов электрической схемы.

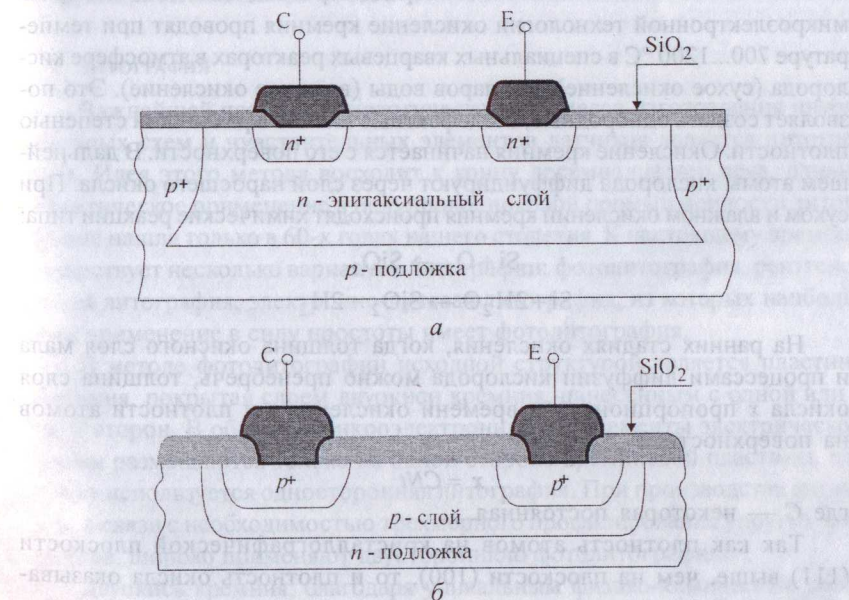


Рис. 5.5 Поперечное сечение эпитаксиального (а) и диффузионного (б) резисторов

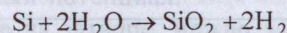
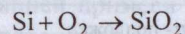
ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Двуокись кремния SiO_2 , в силу уникального сочетания физико-химических свойств, во многом предопределила широкое применение крем-

ния как материала для микроэлектроники и для производства чувствительных элементов датчиков.

Пленки двуокиси кремния служат маской при процессах диффузии и ионного легирования, могут использоваться как подзатворный диэлектрик в полевых транзисторах (рис. 5.4), а также как пассивирующий слой, защищающий элементы электрической схемы от влияния поверхностных загрязнений. Как диэлектрик, двуокись кремния обладает отличными изолирующими свойствами благодаря своему высокому удельному сопротивлению.

Двуокись кремния образуется на открытой поверхности кремния в естественных условиях при комнатной температуре. Толщина такого окисла обычно составляет 20...30 Å и редко превосходит 40 Å. Однако в микроэлектронной технологии окисление кремния проводят при температуре 700...1200 °C в специальных кварцевых реакторах в атмосфере кислорода (сухое окисление) или паров воды (влажное окисление). Это позволяет создать однородные, бездефектные пленки с различной степенью плотности. Окисление кремния начинается с его поверхности. В дальнейшем атомы кислорода диффундируют через слой выросшего окисла. При сухом и влажном окислении кремния происходят химические реакции типа:



На ранних стадиях окисления, когда толщина окисного слоя мала и процессами диффузии кислорода можно пренебречь, толщина слоя окисла x пропорциональна времени окисления t и плотности атомов на поверхности N

$$x = CNt,$$

где C — некоторая постоянная.

Так как плотность атомов на кристаллографической плоскости (111) выше, чем на плоскости (100), то и плотность окисла оказывается разной при одинаковом времени окисления.

При большой толщине окисла ($> 0,01$ мкм) скорость окисления определяется процессом диффузии кислорода через окисел. В этом случае толщина окисла x и время окисления связаны нелинейным соотношением

$$x \sim \sqrt{Dt},$$

где D — коэффициент диффузии.

Температурные коэффициенты линейного расширения кремния и двуокиси кремния отличаются довольно заметно: $2,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град и $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Поскольку процессы окисления проводятся при высоких температурах (обычно $T_{\text{ок}} > 900$ °C), вблизи границы Si – SiO₂ возникают термомеханические напряжения. Измерения, проведенные при комнатной температуре, после термического окисления кремния, показывают, что SiO₂ находится в состоянии сжатия, при этом упругие напряжения примерно равны $3 \cdot 10^8$ Н/м². Термомеханические напряжения на границе Si – SiO₂ могут привести к короблению кремниевых пластин, разрыву окисла и появлению дефектов в приповерхностном слое кремния. Эти термомеханические напряжения деформируют мембранные упругие элементы датчиков давления.

ЛИТОГРАФИЯ

Важнейшей частью технологического процесса изготовления интегральных схем и чувствительных элементов датчиков является литография. Идея этого метода восходит к концу восемнадцатого века, однако практическое применение в полупроводниковой промышленности литография нашла только в 60-х годах нашего столетия. К настоящему времени существует несколько вариантов литографии: фотолитография, рентгеновская литография, электронно-лучевая литография, из которых наибольшее применение в силу простоты имеет фотолитография.

В методе фотолитографии исходной структурой является пластина кремния, покрытая слоем двуокиси кремния, нанесенным с одной или с двух сторон. В обычной микроэлектронике все элементы электрической схемы размещаются только на одной стороне кремниевой пластины, поэтому используется односторонняя литография. При производстве датчиков, в связи с необходимостью трехмерного профилирования упругих элементов, широко применяют двустороннюю фотолитографию.

Двуокись кремния, благодаря уникальным физико-химическим свойствам, играет роль защитной маски на всех ступенях технологического процесса создания полупроводниковых структур.

На кремниевую пластину наносят тонкий однородный слой полимера, называемого фоторезистом, который обладает способностью изменять свои свойства под действием ультрафиолетового излучения. Фоторезисты делятся на два типа: позитивные и негативные. В негативном фоторезисте под действием излучения между молекулами полимера

возникают дополнительные связи, в результате чего он становится более устойчив к действию органических растворителей. В таких растворителях неэкспонированные участки фоторезиста удаляются, а экспонированные остаются на поверхности двуокиси кремния.

В позитивных фоторезистах под действием ультрафиолетового облучения связи между молекулами ослабляются, поэтому облученные участки фоторезиста удаляются в органических растворителях. На необлученных участках пластины фоторезист остается, защищая нижележащие слои.

Для формирования необходимого рисунка на фоторезисте и кремниевой пластине применяются фотошаблоны. Фотошаблоны представляют собой стеклянные пластины с хорошо обработанными поверхностями, на одну из которых напылением металла нанесен необходимый рисунок, соответствующий технологической операции. Чередование светлых и темных областей на фотошаблоне после засветки и обработки растворителями оставляет на поверхности кремниевой пластины места, защищенные фоторезистом и свободные от него.

Оптическая литография обеспечивает создание структур с размерами порядка длины волны применяемого излучения — около 1 мкм и высокую производительность — до нескольких десятков экспозиций в час. Необходимость миниатюризации отдельных элементов интегральных схем привела к возникновению вариантов литографии, где используется облучение с более короткой длиной волны.

Для увеличения разрешающей способности литографии в настоящее время стали применять рентгенолитографию и электронно-лучевую литографию. Принцип действия рентгенолитографии аналогичен фотолитографии, только вместо ультрафиолетовой засветки используется рентгеновское облучение. Уменьшение длины волны облучения требует специальных рентгенофотошаблонов и рентгенорезистов. Рентгеновская литография обеспечивает разрешение на уровне 0,5 мкм.

Электронно-лучевая литография проводится с помощью потока электронов, движением которых управляет с высокой точностью электромагнитная отклоняющая система. В этом виде литографии не требуется применять специальные шаблоны и управление электронным пучком ведется с помощью ЭВМ. Разрешение электронной литографии лежит в диапазоне 0,3...0,5 мкм. Процесс электронной литографии

по производительности значительно уступает и фото- и рентгенолитографии, поскольку электронный луч должен просканировать всю поверхность пластины. Рентгеновская и электронная литографии в производстве полупроводниковых датчиков пока широкого применения не получили.

Помимо переноса изображения, в процессе фотолитографии важную роль играет травление экспонированных участков фоторезиста и защитных пленок, находящихся под фоторезистом на поверхности кремния. Методы травления, применяемые в микроэлектронной технологии, могут быть разделены на две категории — жидкостные и сухие (плазмохимическое травление).

Любой процесс травления характеризуется скоростью травления и степенью анизотропии. Скорость травления — это глубина травления (по вертикали), деленная на время травления. Скорости травления различных веществ одним и тем же травителем могут отличаться очень сильно. Отношение скоростей травления двух разных материалов позволяет оценить селективность травителя. В микроэлектронной технологии стремятся применять травители с возможно более высокой селективностью, чтобы обеспечить резкие границы раздела между различными материалами.

Степень анизотропии процесса травления определяют сравнением вертикальной и горизонтальной (латеральной) скоростей травления. Если вертикальная скорость значительно больше латеральной, то процесс травления обладает высокой степенью анизотропии. При этом в процессе травления минимально искажаются размеры структуры относительно изображения на поверхности фоторезиста, сформированного фотошаблоном. Стенки углублений в фоторезисте или в защитной маске, сформированные в таком процессе травления, как правило, являются вертикальными. В изотропных травителях скорости травления в вертикальном и латеральном направлениях сравнимы между собой или даже равны. В результате существуют сильное боковое подтравливание и искажение размеров структуры на кремниевой пластине относительно фотошаблона.

Процесс жидкостного травления представляет многоступенчатую химическую реакцию, в которой можно выделить три этапа:

- 1) доставка компонентов реакции к поверхности, на которой происходит химическое взаимодействие;
- 2) сама химическая реакция;
- 3) удаление продуктов реакции от поверхности.

Жидкостное травление имеет высокую производительность и применяется очень широко. Его основные недостатки — это невысокая степень чистоты травителей, в результате чего поверхность полупроводниковой пластины может загрязняться, и сложность утилизации отходов травления.

В настоящее время интенсивно развиваются методы плазмохимического (сухого) травления, свободные от указанных выше недостатков. В этом методе травления в реакции участвуют ионы плазмы, которая создается воздействием высокочастотного электромагнитного поля на газовую смесь определенного состава. Упомянутые выше три этапа химической реакции в жидкости существуют и при плазмохимическом травлении. На процесс плазмохимического травления влияет много факторов: состав смеси газов, температура, мощность электромагнитного поля, подводимая к плазме, величина и распределение электрического поля в экспериментальной установке. Несмотря на сравнительно большое количество влияющих факторов, область применения сухого травления постепенно расширяется, в том числе и в производстве микроэлектронных датчиков.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ДИФфуЗИЯ

В конце 50-х и начале 60-х годов были проведены подробные исследования по введению легирующей примеси в кремний с помощью термической диффузии. Эти исследования непосредственно привели к появлению интегральных схем. Практически одновременно с интегральными схемами появились первые полупроводниковые датчики механических величин на основе интегральных тензорезисторов.

Основная причина успешного применения метода термической диффузии в микроэлектронной технологии заключается в обеспечении контролируемого изменения электропроводности кремния путем введения заданного количества примеси.

Исходными структурами для проведения процессов термической диффузии являются кремниевые пластины, покрытые защитной маской из двуокиси кремния. В этой маске предварительно с помощью фотолитографии вскрываются окна в тех частях пластины, где необходимо создать определенный тип проводимости и задать нужную концентрацию легирующей примеси в области базы, эмиттера или коллектора интегрального транзистора.

Обычными примесями, которые вводят в кремний для создания проводимости *n*-типа, являются фосфор и мышьяк, а для получения проводимости *p*-типа — бор. Легирующие атомы могут быть введены в кремниевые подложки путем диффузии:

- 1) из химического источника, находящегося в парообразной фазе;
- 2) из легированных окислов;
- 3) из ионно-имплантированных слоев.

Процесс диффузии проводится в два этапа.

На первом этапе диффузии в области кремниевой пластины, свободные от защитной маски, вводят некоторое количество примеси Q . Процесс проводится при тщательном контроле за температурой и временем диффузии t_1 .

В ходе второго этапа перераспределяется легирующая примесь. Этот этап проходит при иной температуре, чем первый, и имеет другую продолжительность t_2 . Как правило, температура второго этапа выше, а продолжительность больше, чем первого, так что $t_2 \gg t_1$.

Легирующая примесь, диффундируя от поверхности кремния в глубину, распределяется по толщине кристалла по закону:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D_2 t_2}\right),$$

где D_2 — коэффициент диффузии на втором этапе.

Процесс диффузии осуществляется в специальных диффузионных печах в чистых кварцевых реакторах, где температура поддерживается с погрешностью, не превышающей 1 °С. Обычно температура диффузии лежит в диапазоне 900...1150 °С. В зависимости от необходимой степени легирования время диффузии составляет от нескольких минут до нескольких часов.

Ионное легирование — один из самых распространенных способов введения легирующей примеси в кристалл. Здесь из ионов легирующей примеси бора или фосфора формируется ионный пучок, который направляется на кремниевую пластину. Система электромагнитного управления позволяет изменять направление движения ионов и обеспечивать сканирование пучком всей поверхности кремниевой пластины. Ионы ускоряются до энергии 50...200 кэВ и, сталкиваясь с поверхностью кремния и его атомами в его объеме, теряют свою энергию на глубине 100...10000 Å. Процесс столкновения внедренных ионов с ато-

мами кристаллической решетки носит случайный характер. Расстояние, которое проходит ион в направлении перпендикулярно поверхности кристалла до остановки, называют проецированной длиной пробега R_p . Поскольку R_p — случайная величина, для характеристики положения ионов обычно указывают флуктуацию или рассеяние проецированной длины ΔR_p .

Распределение внедренных ионов по глубине кристалла приближенно описывается выражением

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(x - R_p)^2}{(\Delta R_p)^2}\right],$$

где Q — количество ионов примеси, перенесенных к пластине ионным пучком, которое хорошо контролируется по току ионов.

Столкновение ионов пучка с атомами кремниевой подложки вызывает многочисленные нарушения кристаллической структуры. Для их устранения применяется специальный высокотемпературный отжиг при температурах 600...900 °C.

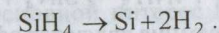
Метод введения легирующей примеси с помощью ионной имплантации в настоящее время наиболее распространен в промышленности благодаря высокой производительности и хорошей воспроизводимости процесса.

ОСАЖДЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Техника осаждения пленок широко применяется в микроэлектронном производстве. С течением времени роль пленочных технологий непрерывно возрастает. Это связано с широкими функциональными возможностями пленок, с помощью которых можно формировать проводники интегральной схемы, осуществлять диэлектрическую изоляцию между металлами, а также защищать поверхности от влияния окружающей среды. Осаждаемые пленки должны удовлетворять ряду требований, из которых самыми важными являются: воспроизводимость состава, однородность по толщине, безопасность производства и дешевизна.

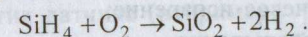
В настоящее время в качестве материалов для пленок широко используют поликристаллический кремний, нитрид кремния и двуокись кремния. Обычно эти пленки получают в специальных химических реакторах осаждением из парогазовых смесей при атмосферном или пониженном давлении.

Поликристаллический кремний формируется путем термического разложения газа силана — SiH_4 при температурах 600...650 °C. При этом происходит химическая реакция



Кремний осаждается, как правило, на диэлектрическую подложку, в результате чего растет поликристаллическая пленка. Поликремний может быть легирован путем диффузии, ионной имплантации или введением добавок в газовую смесь в ходе осаждения пленки. Таким путем формируются проводящие дорожки электрической разводки интегральных схем или затворы для МДП транзисторов. При производстве датчиков сильнолегированные поликремниевые слои служат для формирования тензорезисторов на диэлектрическом основании. Для этих целей в настоящее время применяют только поликремниевые слои p -типа проводимости. Типичная толщина осажденных поликремниевых пленок лежит в диапазоне 0.4...0.6 мкм.

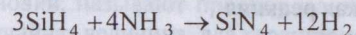
Пленки двуокиси кремния могут осаждаться как с легирующими добавками, так и без них. Наиболее распространены нелегированные пленки, которые можно использовать либо в качестве изолятора, либо как защитную маску в процессах диффузии или ионной имплантации. В настоящее время применяют несколько методов осаждения. Один из них основан на использовании химической реакции между газом силаном SiH_4 и кислородом:



Реакция протекает при температуре 300...450 °. Сравнительно низкая температура осаждения позволяет использовать слой двуокиси кремния для защиты поверхности полупроводниковых приборов от влияния окружающей среды на последнем технологическом этапе изготовления, когда электрическая разводка внутри прибора уже нанесена. Толщина окисных пленок обычно лежит в диапазоне 0.01...0.4 мкм.

Другой метод основан на создании пленок нитрида кремния Si_3N_4 . Кроме того, что пленки нитрида кремния имеют высокие электроизоляционные свойства, они представляют собой надежный барьер для диффузии молекул воды или ионов щелочных металлов, которые вызывают коррозию электрической разводки интегральных схем и нестабильность электрических характеристик полупроводниковых приборов.

Пленки нитрида кремния чаще всего получают за счет реакции между кремнием и аммиаком NH_3 при температурах 700...900 °С:



Тонкие слои нитрида кремния являются эффективной защитной маской в процессах анизотропного травления, широко применяемых при производстве датчиков для формирования трехмерных кремниевых структур.

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ И ВНУТРЕННИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Металлические пленки служат для создания проводников, объединяющих различные элементы интегральной схемы или датчика, а также для обеспечения контакта между кремнием и внешними выводными проводниками прибора. К этим пленкам предъявляются высокие требования однородности по толщине, стабильности электрических характеристик, хорошей проводимости и устойчивости против коррозии.

В подавляющем большинстве интегральных схем и микроэлектронных датчиков используются алюминиевые пленки или пленки на основе сплавов алюминия. Эти пленки обладают хорошей адгезией к подложкам из двуокиси кремния и имеют низкое значение удельного сопротивления $\rho \approx 2.7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Существует несколько технологий осаждения алюминиевых пленок:

- 1) испарение с использованием резистивного нагрева;
- 2) электронное лучевое испарение;
- 3) магнетронное распыление.

Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки и применяется в зависимости от конкретных требований к приборам.

Самый простой метод — нанесение алюминиевой пленки путем термического испарения. В этом методе на спираль из тугоплавкого металла, например вольфрама, навешивают небольшие кусочки проволоки (навески) из алюминия. Процесс испарения проходит в вакууме, а необходимая температура процесса задается нагревом вольфрамовой спирали. Преимуществами метода являются его простота и дешевизна, недостатком — возможность загрязнения осаждаемой пленки материалом нагревателя. Этот недостаток термического распыления устраняют в других методах получения металлических пленок с помощью направленного движения электронного луча по распыляемой мишени. Электронным лучом можно эффективно управлять с помощью электрического или магнитного поля.

Наряду с алюминием для создания проводников и соединений в микроэлектронной технологии применяют и другие металлы, например титан, вольфрам, молибден, а также соединения кремния с молибденом и танталом. Основной интерес к применению других металлов связан с возможностью повышения надежности работы приборов и с расширением температурного диапазона работы.

5.2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

Замечательные достижения микроэлектроники последних 20...25 лет получены, в сущности, благодаря развитию кремниевой технологии. В результате этого стоимость кремниевых интегральных схем снижалась год от года, а уровень интеграции (число транзисторов на единицу площади кристалла) неуклонно повышался.

Эти достижения микроэлектроники не могли не оказать сильного воздействия на технологию изготовления датчиков. Применение микроэлектронной технологии в производстве датчиков позволило снизить их стоимость при сохранении или повышении точности. Однако простой перенос микроэлектронной технологии производства интегральных схем в область датчиков оказался затрудненным. Отчасти это связано с необходимостью некоторой модификации биполярной или МДП технологий, для обеспечения заданных метрологических характеристик датчика (например, уровня легирования полупроводниковых слоев или применения особо чистых полупроводниковых материалов). Более существенными являются конструктивные требования, которые привели к созданию специальных технологий, нетипичных либо просто отсутствующих в производстве интегральных схем. К ним относятся операции трехмерного профилирования кристаллов кремния и бесклеевое присоединение кристалла к подложке.

Особая роль конструкции полупроводниковых датчиков в технологическом процессе их изготовления по сравнению с обычными интегральными схемами связана с разнообразием, а зачастую, и с более жесткими условиями работы датчиков. Наконец, спектр материалов для производства датчиков весьма широк. Сейчас применяют пьезоэлектрические и магнитные пленки, которые не используются в традиционной микроэлектронике.

В следующем разделе будут рассмотрены специальные вопросы технологии производства датчиков, которые имеют фундаменталь-

ное значение: трехмерное профилирование кремния и бесклеевые методы соединения элементов конструкции.

ТРЕХМЕРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

Современные микроэлектронные датчики имеют конструкции, которые существенно отличаются от конструкции интегральных схем стандартной микроэлектроники. На рис. 5.6 показана типичная конструкция тензорезистивного датчика давления. Под действием разности давлений $P - P_0$ упругий элемент датчика деформируется, что приводит к изменению сопротивлений тензорезисторов.

Корпус датчика давления должен выдерживать давление измеряемой среды, которое может доходить до нескольких сотен атмосфер. Тензорезисторы датчика сформированы, в силу особенностей микроэлектронной технологии, на одной стороне кремниевой пластины. Упругий элемент датчика представляет, как правило, профилированную кремниевую пластину. Толщина ее тонкой части (мембраны) определяет диапазон измеряемых давлений, а толстая часть кристалла является, по существу, кремниевой рамкой и обеспечивает выполнение условия жесткого защемления мембраны по контуру.

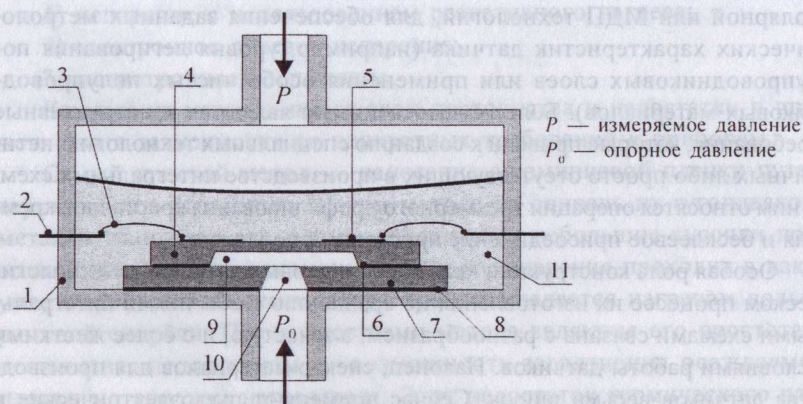


Рис. 5.6. Кремниевый датчик давления:

1 — корпус; 2 — электрические выводы; 3 — контактные проводники; 4 — кремниевый чувствительный элемент; 5 — тензорезисторы; 6 — область соединения кристалла и подложки; 7 — термокомпенсирующая подложка; 8 — область соединения подложки и корпуса; 9 — подмембранная полость; 10 — отверстие в подложке; 11 — защитный гель

В технологии производства микросхем иногда встречается мелкое (1...5 мкм) профилирование со стороны, где расположена электронная схема. Однако при изготовлении датчиков давления глубины профилирования составляют около 150...300 мкм, и травить необходимо со стороны, противоположной той, на которой находится электронная схема.

Толстая часть кристалла вместе с термокомпенсирующей подложкой играют важную роль в улучшении метрологических характеристик датчика. Они компенсируют термомеханические напряжения, возникающие из-за разницы коэффициентов линейного расширения элементов датчика.

Для уменьшения этих напряжений материал термокомпенсирующей пластины должен иметь по возможности тот же коэффициент линейного расширения, что и сам кристалл. При этом особое значение имеет способ их соединения, поскольку это влияет на уровень термомеханических напряжений.

При измерении относительного давления термокомпенсирующая пластина должна иметь сквозное отверстие, и, следовательно, его необходимо специально создавать тем или иным способом.

Перечисленные особенности конструкции микроэлектронного датчика показывают принципиальную важность методов профилирования и способов соединения в единую конструкцию различных элементов.

Кремний оказался материалом, весьма подходящим для создания разнообразных микроструктур с помощью специальных методов формообразования. Появилось специальное направление техники — кремниевая микромеханика, рассматривающая весь круг проблем создания устройств, в которых сталь заменена на кремний. Микромеханика имеет дело главным образом с кремнием или поликремнием, хотя круг дополнительно привлекаемых материалов: оксиды, нитриды, стекла, полимерные материалы и металлические пленки — тоже достаточно широк.

ЖИДКОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В настоящее время основным методом формообразования трехмерных кремниевых структур (3D-структур) является травление. Этот метод дает возможность избирательно удалять кремний с определенных участков и придавать пластине или ее отдельным частям необходимую геометрическую форму. Жидкостное травление для полупроводниковой техни-

ки играет такую же роль, как и обработка металлов резанием или ковка и штамповка металлов.

Сейчас существуют многочисленные травители для кремния, действие которых может быть изотропным (не зависящим от кристаллографической ориентации плоскостей кремния) или анизотропным. В табл. 5.2 приведены характеристики трех наиболее широко применяемых травителей [5.3]:

- 1) травитель HNA: смесь плавиковой (HF), азотной (HNO_3) и уксусной кислоты (CH_3COOH);
- 2) травитель EDP: смесь этилендиамина, пирокатехина и воды;
- 3) водный раствор едкого калия (KOH).

Травитель HNA — очень сложный травитель, скорости травления и характеристики которого могут сильно меняться в зависимости от степени легирования кремния, соотношения компонентов в растворе и даже от степени перемешивания травителя. На рис. 5.7 показаны варианты углублений в кремнии, возникающие, если защитная маска имеет круглое отверстие либо отверстие в маске имеет сильно вытянутую прямоугольную форму. Случай «а» соответствует интенсивному перемешиванию раствора, глубина травления z при этом не зависит от кристаллографического направления и определяется только скоростью v и временем травления t :

$$z = vt$$

Отсутствие перемешивания приводит к изменению профиля вытравленной структуры, (рис. 5.7, б), но даже и в этом случае фронт травления под маской, как это видно из рисунков, удовлетворительно аппроксимируется частью окружности.

При пользовании травителем HNA возникают трудности с созданием защитной маски. Самая удобная защитная маска из двуокиси кремния SiO_2 травится с довольно заметной скоростью. Поэтому при сравнительно небольших глубинах травления ее еще можно использовать, но при больших глубинах предпочтительнее защитные маски из нитрида кремния или золота.

Однако самым серьезным недостатком травителя HNA является сложная связь между профилем травления, размером окна в маскирующем слое и температурными условиями травления. Этот недостаток проявляется тем сильнее, чем глубже проводится профилирование кремния.

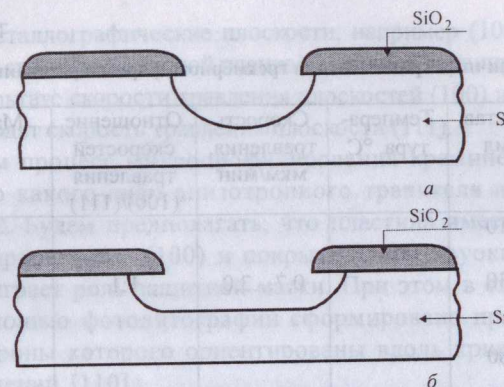


Рис. 5.7. Профиль травления при действии изотропного травителя HNA: а — с перемешиванием травителя; б — без перемешивания

Между тем глубокое профилирование как раз и представляет наибольший интерес в технологии изготовления микроэлектронных датчиков. Прогресс в технике создания трехмерных структур стал возможен только после того, как начали применяться анизотропные травители.

Анизотропное травление дает возможность избирательно удалять кремний вдоль определенных кристаллографических направлений, что позволяет придавать кремниевой пластине или отдельным ее частям разнообразную геометрическую форму и целенаправленно управлять этим процессом.

В табл. 5.3 приведены два наиболее употребительных анизотропных травителя для кремния — EDP и водный раствор едкого калия. Общее свойство всех анизотропных травителей заключается в том, что кремний в кристаллографических направлениях $[110]$ и $[100]$ травится значительно быстрее, чем в направлении $[111]$.

Разница в скоростях травления достигает 35 раз для EDP травителя и 400 раз для водных растворов KOH . Замечательной особенностью указанных травителей является возможность использования двуокиси кремния в качестве маски для процесса травления. Скорость травления SiO_2 составляет около 14 Å/мин в водных растворах KOH , что примерно в 20 раз меньше, чем для изотропного травителя HNA.

Оба типа травителей обнаруживают заметную концентрационную зависимость, и скорость травления падает практически до нуля, как только степень легирования кремния бором достигает $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таблица 5.3

Типичные травители для трехмерного формообразования

Травитель	Состав, мл	Температура, °C	Скорость травления, мкм/мин	Отношение скоростей травления (100)/(111)	Маскирующая пленка и скорость ее травления
HF	10				
HNO ₃	30		0,7...3,0	1:1	SiO ₂ , 300 Å/min
CH ₃ COOH + +H ₂ O	80				
Этилен- диамин	750				SiO ₂ , 2 Å/min
Пирокате- хин	120 г	115	0,75	35:1	Si ₃ N ₄ , 1 Å/min
Вода	100				
KOH	44 г	85	1.4	400:1	
Вода	100				SiO ₂ , 14 Å/min

Механизм анизотропного травления достаточно сложен. Сам процесс травления можно представить как поэтапное удаление атомных слоев с поверхности кристалла. Особенностью анизотропного травления является то, что в разных кристаллографических направлениях скорость удаления атомных слоев с поверхности неодинакова. Это может быть вызвано различной плотностью упаковки атомов кристалла и различной энергией связи атомов с соседними атомами на разных атомных плоскостях. В кремнии плоскость (111) имеет самую высокую плотность атомов на квадратный сантиметр по сравнению с другими кристаллографическими плоскостями. Это приводит к тому, что «вырвать» атом в процессе травления из этой плоскости труднее, чем из других плоскостей. С другой стороны, плоскость (111) наиболее интенсивно окисляется в процессе травления, и образовавшийся слой SiO₂ экранирует взаимодействие атомов кремния и травителя. В результате действия этих двух факторов скорость травления плоскости (111) оказывается наименьшей.

Другие кристаллографические плоскости, например (100) или (110), не покрываются сплошной окисной пленкой, и полной экранировки не происходит. В результате скорости травления плоскостей (100) и (110) значительно превосходят скорость травления плоскости (111).

Рассмотрим процесс микропрофилирования кремниевой пластины с помощью какого-либо анизотропного травителя из приведенных в табл. 5.2. Будем предполагать, что пластина имеет кристаллографическую ориентацию (100) и покрыта слоем двуокиси кремния SiO₂, которая играет роль защитной маски. При этом в слое двуокиси кремния с помощью фотолитографии сформировано прямоугольное отверстие, стороны которого ориентированы вдоль кристаллографических направлений [110].

Анизотропные травители растворяют кремний в плоскости (100), и формируются ямки пирамидальной формы, стенки которых ограничены кристаллографическими плоскостями (111), имеющими самую низкую скорость травления. Окончание травления происходит тогда, когда плоскости (111) пересекутся между собой так, что образуется V-образный профиль (рис. 5.8).

Глубина V-образной канавки зависит от ширины окна в окисле на поверхности кремния.

Поскольку плоскости (111) пересекают плоскости (100) под углом $\alpha = 54^\circ.74$, при ширине окна в маске a и глубине травления h , размеры нижнего основания L будут равны:

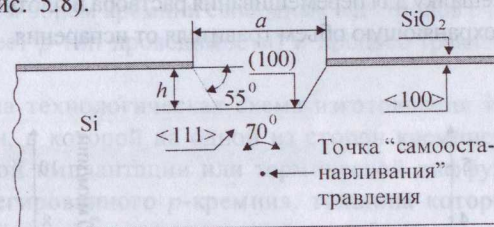


Рис. 5.8. Поперечное сечение V-канавки

$$L = a - 2 \frac{h}{\sqrt{2}}.$$

Когда $L = 0$, происходит пересечение плоскостей (111) и травление останавливается. Это происходит при глубине V-канавки

$$h = \frac{a}{\sqrt{2}}.$$

Таким образом, профиль травления можно менять от трапециевидного до V-образного.

Управление процессом травления идет путем задания скорости и времени травления. На скорость травления влияют процентный состав травителя и температура проведения процесса. На рис. 5.9 показаны зависимости скорости травления плоскости (100) кремния для водного раствора едкого калия при различных температурах.

Из экспериментальных данных очевидно сильное влияние температуры и относительно слабое влияние концентрации КОН в травителе. Обычно травление проводят при температурах 80...90 °С, при этом значения скорости травления составляют 0.8...1.0 мкм/мин. На рис. 5.10 приведены зависимости скорости травления пленки двуокиси кремния, зная которые, можно определить необходимую толщину защитной маски, обеспечивающей формирование углубления заданных размеров [5.5].

Для обеспечения необходимой точности профилирования следует сохранять постоянной температуру и концентрацию травителя. Практически травление ведут в термостате, который поддерживает температуру с погрешностью не хуже 1 °С. Само устройство для травления должно иметь мешалку для перемешивания раствора и плотно прилегающую крышку, предохраняющую объем травителя от испарения.

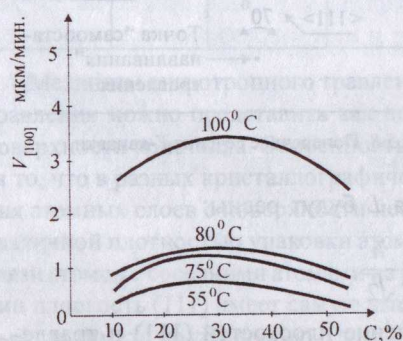


Рис. 5.9. Зависимости скорости травления кремния (100) от концентрации травителя и температуры для водных растворов КОН

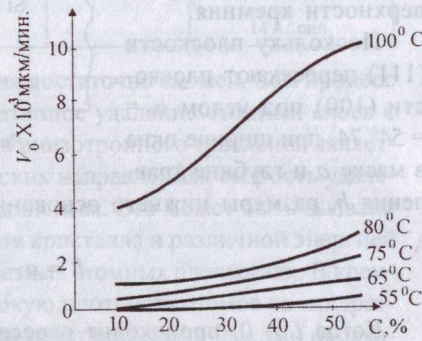


Рис. 5.10. Зависимости скорости травления двуокиси кремния от концентрации травителя и температуры для водных растворов КОН

При постоянстве температуры и концентрации глубину травления можно контролировать по времени травления. Точность такого способа будет зависеть от точности измерения скорости травления. По мере увеличения глубины профилирования погрешность определения глубины возрастает. Для ее уменьшения практически приходится использовать контрольную кремниевую пластину (пластину-спутник), находящуюся в тех же условиях травления, что и основная пластина. Периодическое измерение глубины травления по пластине-спутнику позволяет более точно контролировать толщину травленного слоя.

При массовом производстве микрoeлектронных датчиков метод контроля глубины травления по времени дает большую погрешность. В этом случае можно воспользоваться свойством анизотропных травителей, заключающимся в остановке процесса травления на слоях кремния с большой концентрацией ($N > 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) легирующей примеси бора (метод стоп-слоя). Причина резкого уменьшения скорости травления кремния на таких слоях заключается в том, что для протекания процесса травления требуется обмен свободными электронами между кремнием и травителем. В сильнолегированном боровом кремнии свободных электронов очень мало (полупроводник имеет p -тип проводимости) и процесс травления из-за этого тормозится.

На рис. 5.11 показана технологическая схема изготовления тонких кремниевых мембран, в которой на одной из сторон кремниевой пластины методом ионной имплантации или термической диффузии создается слой сильнолегированного p -кремния, толщина которого x_i определяет в дальнейшем толщину кремниевых мембран.

После нанесения слоя двуокиси кремния на обе стороны пластины выполняют операцию фотолитографии и вскрывают окно в окисной пленке со стороны, противоположной p -слою. Затем проводят анизотропное травление, которое автоматически останавливается, как только достигается глубина сильнолегированного p -слоя. Ширина мембраны оказывается равной $L_2 = L_1 - \sqrt{2}h$, где L — размер окна в окисной маске, а толщина оставшегося кремния определяется технологическими условиями создания сильнолегированного слоя, которые обеспечивают погрешность около 1 мкм.

Метод позволяет хорошо воспроизводить размеры. Недостатками метода самоостанавливающегося травления являются:

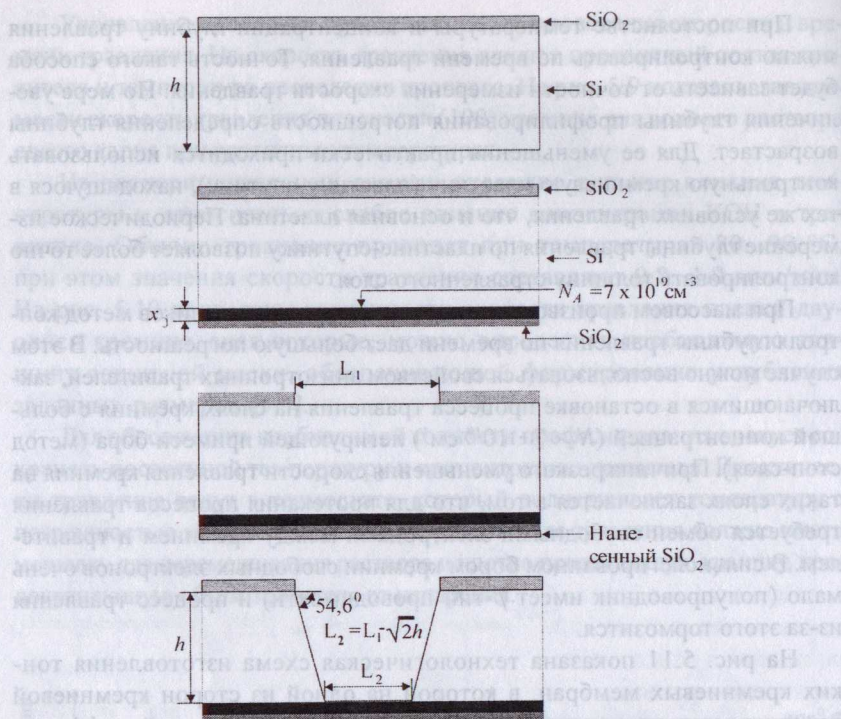


Рис. 5.11. Технологическая схема изготовления тонких кремниевых мембран методом самоостанавливающего травления

1. Сильное легирование p -слоя приводит к деформации кремния из-за того, что размер атома бора меньше, чем размер атома кремния. В итоге плоская форма мембраны может быть искажена.

2. При заданной толщине стоп слоя получаются мембраны только одной толщины. Изменение толщины требует подготовки новых пластин.

3. На сильнолегированном p -слое невозможно формировать элементы электрической схемы, обладающие хорошей изоляцией. Поэтому приходится эпитаксиально выращивать на слое p -кремния слой слаболегированного n -кремния, а уже в нем формировать все элементы электрической схемы датчика, в том числе и тензорезисторы p -типа. Это значительно удорожает технологию изготовления приборов.

Более перспективной для целей создания профилированных кремниевых структур представляется технология электрохимической остановки травления. В этой технологии применяют подложки p -кремния или n -кремния со степенями легирования, типичными для микроэлектроники. На этих подложках выращивают эпитаксиальный слой слаболегированного n -кремния желаемой толщины, в котором формируется электрическая схема. На рис. 5.12 показано экспериментальное устройство для электрохимического травления кремния.

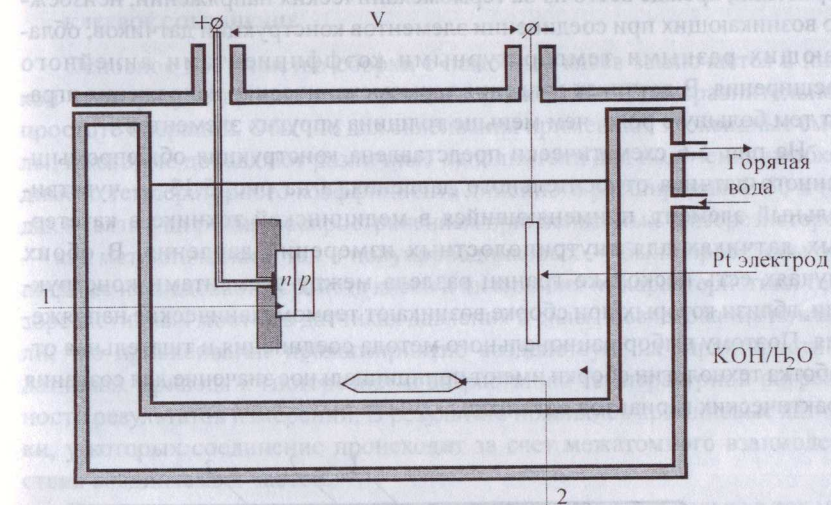


Рис. 5.12. Устройство для электрохимического травления кремния: 1 — кремниевая пластина с эпитаксиальным слоем; 2 — магнитная мешалка

Травитель перемешивают с помощью магнитной мешалки, а водяная рубашка позволяет поддерживать постоянную температуру травителя. В растворе находятся пластина p -кремния с эпитаксиальным слоем n -типа, играющая роль анода, и платиновая фольга в качестве катода. При включении между анодом и катодом разности потенциалов больше 0.6 В происходит процесс травления p -подложки. В момент, когда подложка p -типа стравливается и травление доходит до n -эпитаксиального слоя, изменяется ток, текущий между анодом и катодом, после чего травление прекращается. Достоинство этого метода заключается в возможности применять для изготовления датчиков крем-

ниевые пластины со стандартными характеристиками, что удешевляет стоимость производства при одновременном улучшении воспроизводимости толщины упругих элементов.

5.3. ТЕХНОЛОГИЯ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКА

Технология сборки кремниевых датчиков заметно влияет на их характеристики, прежде всего из-за термомеханических напряжений, неизбежно возникающих при соединении элементов конструкции датчиков, обладающих разными температурными коэффициентами линейного расширения. В датчиках давления термомеханические напряжения играют тем большую роль, чем меньше толщина упругих элементов.

На рис. 5.6 схематически представлена конструкция общепромышленного датчика относительного давления, а на рис. 5.13 — чувствительный элемент, применяющийся в медицинской технике в катетерных датчиках для внутрисосудистых измерений давления. В обоих случаях есть несколько границ раздела между элементами конструкции, вблизи которых при сборке возникают термомеханические напряжения. Поэтому выбор рационального метода соединения и тщательная отработка технологии сборки имеют принципиальное значение для создания практических вариантов датчиков.

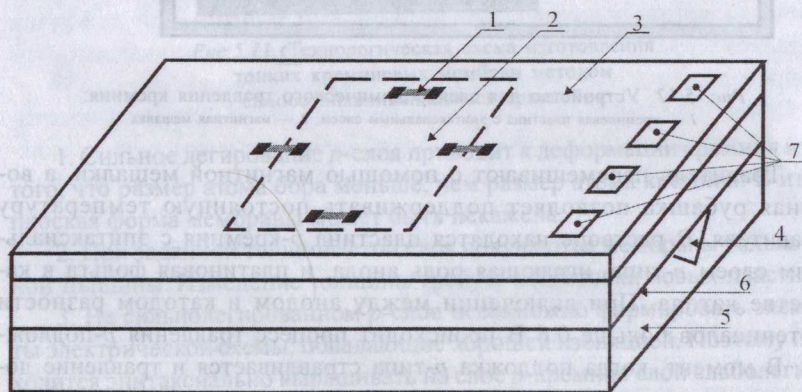


Рис. 5.13. Конструкция чувствительного элемента катетерного датчика давления: 1 — тензорезисторы; 2 — мембрана упругого элемента; 3 — кольцо жесткости упругого элемента; 4 — канал для подачи опорного давления; 5 — кремниевая подложка; 6 — полоска соединения тензопреобразователя и подложки; 7 — контактные площадки

Для соединения элементов конструкции датчика в настоящее время используются различные способы:

- 1) клеевое соединение;
- 2) пайка с помощью легкоплавких стекол;
- 3) пайка с применением эвтектического сплава золото-кремний;
- 4) электростатическое соединение;
- 5) прямое соединение кремний-кремний.

КЛЕЕВОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Основное достоинство сборки с помощью клеев заключается в низкой температуре проведения процесса (ниже 130 °С) и сравнительной простоте операций. Обычно для склеивания применяют эпоксидные смолы, в которые добавляют различные наполнители для получения необходимого температурного коэффициента линейного расширения. В 60-х годах в связи с широким распространением приклеиваемых тензорезисторов — как металлических, так и полупроводниковых — были проведены обширные исследования свойств клеев и их влияния на характеристики тензорезистивных мостов в датчиках давления и силы. Исследования показали, что приклеивание неблагоприятно воздействует на характеристики датчиков, приводя к гистерезису и возрастанию температурной погрешности результатов измерений. В результате появились кремниевые датчики, у которых соединение происходит за счет межатомного взаимодействия соединяемых частей.

В настоящее время клеевое соединение применяется только в тех местах, где оно заведомо не сможет заметно повлиять на характеристики прибора. В конструкции датчика давления, приведенной на рис. 5.6, клей можно применять для присоединения подложки к корпусу.

ПАЙКА С ПОМОЩЬЮ ЛЕГКОПЛАВКИХ СТЕКОЛ

В электронной технике стеклянная пайка широко применяется для соединения металлов, керамики и кремния. Слой стекла на одной из соединяемых поверхностей можно создавать вакуумным напылением или нанесением суспензии стеклянного припоя. При производстве датчиков используются низкотемпературные процессы пайки, с температурами ниже 450 °С. Основное требование в проведении этих процессов связано с минимизацией внутренних механических напряжений в соединяемых структурах. Это достигается, с одной стороны, уменьшением тол-

щины слоя, а с другой — применением стекол с температурным коэффициентом линейного расширения, мало отличающимся от соответствующих коэффициентов соединяемых материалов. Однако практически стеклянные слои с толщиной менее 7...10 мкм применять нецелесообразно, поскольку стекло перестает равномерно покрывать соединяемые поверхности. В технологии сборки датчиков давления фирмы «Моторола» соединение кристалла тензопреобразователя и кремниевой подложки осуществляется через слой легкоплавкого стекла. Рациональный выбор сорта стекла и тщательная обработка технологии соединения позволяют создавать датчики с хорошими метрологическими характеристиками.

ПАЙКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЛАВА ЗОЛОТО-КРЕМНИЙ

Разновидностью метода пайки, нашедшей широкое применение и в микроэлектронике и в производстве кремниевых датчиков, является пайка с использованием эвтектического соединения золото-кремний. Эти два материала образуют эвтектический сплав со сравнительно низкой температурой плавления ($\sim 370^\circ\text{C}$), что чрезвычайно удобно для сборки полупроводниковых конструкций.

Практически для создания прочного эвтектического соединения необходимо на посадочное место нанести, например напылением, слой золота толщиной 5...7 мкм. Обычно температура пайки составляет $400\ldots 450^\circ\text{C}$, и для улучшения качества соединения к кристаллу прикладывают давление около 1 МПа. При пайке кристаллов больших размеров в зазор между кристаллом и подложкой дополнительно вводится фольга из золота толщиной 20 мкм.

При правильной отработке технологии соединения внутренние механические напряжения в этом способе соединения оказываются меньше, чем в предыдущих двух методах.

МЕТОДЫ БЕСКЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

В последние 10...15 лет получил широкое распространение метод прямого соединения разнородных материалов, в котором не применяются клеи или иные соединительные материалы типа эвтектических сплавов, как это описывалось в предыдущих частях раздела. Формально прямое соединение происходит при повышенной температуре между плоскими полированными поверхностями двух пластин кремния, приведенных в тесный контакт друг с другом. При этом пласти-

ны могут подвергаться либо не подвергаться внешнему воздействию, например электростатическому притяжению, а поверхности соединяемых пластин могут или быть чистыми, или же содержать тонкий слой специального вещества, которое увеличивает силу предварительного контактного взаимодействия. В зависимости от особенностей процесса соединения различают несколько вариантов технологии соединения, из которых далее будут рассмотрены два — метод электростатического соединения и метод прямого срачивания.

Главная причина, заставляющая две пластины соединяться друг с другом при прямом контакте, заключается в разнице энергий атомов на поверхности отдельных соединяемых структур и энергий этих же атомов после объединения пластин в единую структуру. Эта разница в энергиях является мерой связи соединяемых пластин. Для успешной реализации этого процесса необходимо сближение атомов контактирующих поверхностей на малые расстояния, причем число взаимодействующих атомов должно быть возможно большим. Выполнить это условие проще всего можно для плоских полированных поверхностей. Именно такие пластины, полированные до 13-14 класса чистоты, применяются для соединения. К счастью, точно такой же класс чистоты требуется при производстве стандартных интегральных схем и поэтому можно использовать уже имеющиеся технологии обработки поверхностей полупроводниковых пластин. Единственное отличие заключается в том, что в производстве датчиков иногда необходима двусторонняя полировка пластин: одна сторона для формирования электрических цепей, а другая для присоединения, например, к корпусу.

СОЕДИНЕНИЕ ПЛАСТИН В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В 1969 году Уоллис и Померанц впервые подробно описали технику соединения пластин, в процессе которой применялись электростатическое поле и низкотемпературный отжиг ($300\ldots 500^\circ\text{C}$) [5.6]. Они назвали свой способ соединения «электростатическим». Впоследствии этот же метод стали часто называть «анодным соединением» или «анодной посадкой».

Предложенный метод успешно применялся для соединения различных комбинаций стекол и металлов, включая и такие полупроводники, как кремний, германий и арсенид галлия. Уоллис и Померанц сообщили также

об успешном соединении стекла и полупроводника, на поверхности которых имеется окисный слой.

Металлы с большими коэффициентами линейного расширения, такие как алюминий, никель, хром, железо, могут быть соединены со стеклом только в виде тонких пленок. Это оказалось вполне приемлемо для практических целей, поскольку все металлы в микроэлектронной технологии используются как раз в такой форме.

Рис. 5.14 показывает экспериментальное устройство для соединения стекла и кремния электростатическим методом.

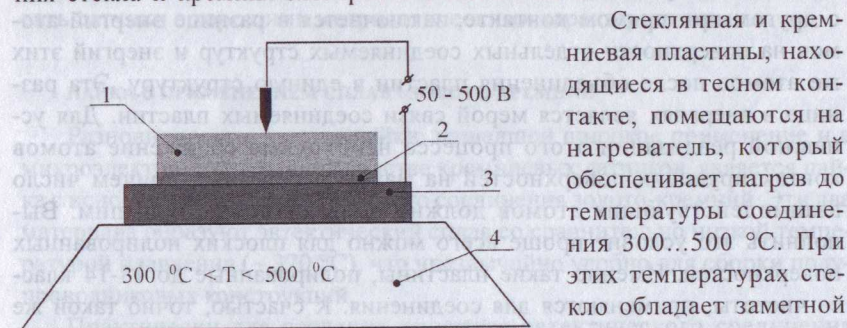


Рис. 5.14. Схематическое изображение приспособления для соединения в электростатическом поле: 1 — кремниевая пластина, 2 — стекло, 3 — анод, 4 — нагреватель

Потенциалы до 1000 В между стеклом и кремнием приводят в движение положительные ионы Na^+ в стекле. При правильной полярности включения (минус — на стекле) эти ионы уходят от поверхности раздела стекло-кремний в глубь стекла, а остающиеся неподвижные отрицательно заряженные ионы приводят к возникновению электростатического поля в воздушном зазоре между стеклом и кремнием. Этот зазор, размер которого около 1 мкм, можно наблюдать по интерференционным кольцам. Происхождение его связано с наличием микронеровностей на границе раздела соединяемых пластин.

Электростатическое взаимодействие положительного заряда на кремниевой пластине и отрицательного на стекле уменьшает воздушный зазор и сглаживает микронеровности. Возникающий тесный контакт обеспечивает установление межатомных связей, объединяющих атомы стекла и полупроводника. Процесс соединения можно контролировать по току, протекающему в цепи. В первоначальный мо-

мент, когда только начинается движение ионов Na и формирование областей пространственного заряда, ток имеет максимальное значение, а затем постепенно уменьшается.

Когда формирование области пространственного заряда завершается, протекающий ток достигает минимума и процесс соединения заканчивается. В зависимости от температуры и приложенной разности потенциалов процесс соединения длится от единиц до десятков минут.

Силы электростатического взаимодействия играют существенную роль в обеспечении прочного соединения и начала электрохимических реакций между стеклом и кремнием. Если на поверхность кремния или стекла нанести тонкую и узкую полоску металла, например алюминия, электростатическое взаимодействие обеспечит прочное герметическое соединение между стеклом и кремнием даже в этом случае.

В современных конструкциях датчиков механических величин стекло широко применяется в качестве подложки, что обусловлено хорошими прочностными характеристиками соединения кремний-стекло, невысокой стоимостью стекла и возможностью управления его свойствами путем изменения состава. Принципиально важно при выборе сорта стекла, чтобы его температурный коэффициент линейного расширения как можно лучше соответствовал аналогичному коэффициенту кремния. При выполнении этого условия внутренние термомеханические напряжения и соответствующие им деформации, вызванные различием указанных коэффициентов, будут меньше. В настоящее время в качестве наиболее приемлемого сорта стекла для подложек широко применяется стекло марки Pigex-7740.

Для уменьшения термомеханических напряжений в системе кремний-подложка в последнее десятилетие стали все шире применять соединение кремний-кремний. Чтобы реализовать такое соединение электростатическим методом, на каждую кремниевую пластину необходимо нанести слой боросиликатного стекла толщиной не менее 4 мкм, который при контакте действует подобно слою стекла в описанной выше схеме соединения. Поскольку слой стекла после соединения имеет толщину значительно меньшую, чем толщина соединяемых кремниевых пластин, термомеханические напряжения оказываются много меньшими, чем при соединении кремния со стеклянной подложкой.

Совершенно иной путь для соединения кремниевых пластин предложен в работе [5.7]. Вместо нанесения слоев стекла на первом этапе проводилось окисление соединяемых поверхностей кремниевых пластин в

атмосфере кислорода, содержащего пары воды. На втором этапе к пластинам прикладывалась разность потенциалов около 20 В и пластины нагревались в инертной атмосфере до температуры 1100...1200 °С. Электростатическое поле концентрируется в основном в тонком слое двуокиси кремния с общей толщиной около двух микрон и способствует тесному контакту пластин между собой.

В этом способе соединения в электростатическом поле происходит миграция ионов водорода H^+ и гидроксильных групп OH^- , что перераспределяет электрические заряды, увеличивает силу притяжения пластин между собой и облегчает дальнейшее установление атомных связей между соединяемыми структурами.

Важным достоинством описанного способа является отсутствие в технологическом процессе соединения высокоподвижных ионов натрия, которые приводят к нестабильности работы электрических цепей датчиков. Недостаток способа связан с высокой температурой проведения процесса из-за возможности разрушения пленочных проводников, выполняемых обычно из алюминия. Во многих случаях, особенно в емкостных датчиках, это препятствие удается обойти разумной организацией технологического процесса изготовления прибора.

ПРЯМОЕ СОЕДИНЕНИЕ КРЕМНИЙ-КРЕМНИЙ

Широкое применение в производстве полупроводниковых датчиков электростатического метода соединения привело исследователей и разработчиков к попыткам прямого соединения кремниевых пластин без какого-либо промежуточного слоя и без приложения электрического поля. Первое упоминание о таком способе соединения относится к 1966 году и описано в патенте США № 3288656 Т.Накамуры. Подробные исследования механизма соединения относятся к более позднему периоду, начиная с 1986 года [5.8].

В технике прямого срачивания особую роль играют чистота и плоскопараллельность соединяемых поверхностей, поскольку это обеспечивает плотный контакт. Связь между пластинами устанавливается благодаря химическим реакциям на поверхности с участием атомов кремния и молекул воды.

Процесс прямого срачивания кремниевых пластин проходит в несколько этапов. На первом этапе поверхность кремниевой пластины становится гидрофильной, т. е. активно взаимодействующей с

молекулами воды. Гидрофильного состояния поверхности можно достигнуть обработкой в растворах, содержащих воду, перекись водорода H_2O_2 и соляную кислоту HCl в пропорции 6 : 1 : 1 или в травителе, содержащем перекись водорода и серную кислоту, или в горячей азотной кислоте и т.д.

Реальная поверхность кремния всегда содержит тонкий слой двуокиси кремния толщиной около 30 Å, который образуется при комнатной температуре естественным путем от взаимодействия с кислородом воздуха.

На гидрофильной поверхности капелька воды хорошо растекается по пластине и поверхностные атомы кремния, входящие в состав естественного окисла SiO_2 , активно взаимодействуют с молекулами воды.

При приведении в контакт двух гидрофильных поверхностей при комнатной температуре возникают связи между силанольными группами ($Si - OH$) противоположных поверхностей. Эти связи относительно слабые, и для их упрочнения проводят температурную обработку (отжиг). Диапазон температур, используемых при отжиге, достаточно широк — от 300 до 1000 °С.

В процессе отжига происходит замена относительно слабых связей между силанольными группами $Si-OH - Si-OH$ на более прочные $Si-O-Si$. Прочность соединения тем выше, чем выше температура отжига. Конкретное значение последней выбирается в зависимости от требований к прочности соединения, которое, в свою очередь, определяется условиями работы датчика. В настоящее время метод прямого срачивания получает все большее распространение, что вызвано практически полным отсутствием термомеханических напряжений у соединяемых пластин.

5.4. ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ

КРЕМНИЕВЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Самое первое и коммерчески наиболее успешное применение микроэлектронных технологий, описанные в предыдущих разделах, нашли в производстве кремниевых датчиков давления на тензорезистивном эффекте. В простейшем случае электрическая схема такого датчика представляет собой полный мост Уитстона, образованный четырьмя тензорезисторами, расположенными специальным образом на кремниевой пластине (рис. 5.15).

Кремниевая пластина играет роль упругого элемента, деформация которого под воздействием измеряемого давления приводит к изменению сопротивления тензорезистора

$$\frac{\Delta R}{R_0} = S_p \varepsilon_l + S_t \varepsilon_t,$$

где R_0 — сопротивление недеформированного тензорезистора;

ΔR — изменение сопротивления тензорезистора под действием деформации упругого элемента;

S_p, S_t — продольная и поперечная тензочувствительности;

$\varepsilon_p, \varepsilon_t$ — продольные и поперечные деформации тензорезистора.

Тензочувствительность зависит от степени легирования и кристаллографической ориентации тензорезистора.

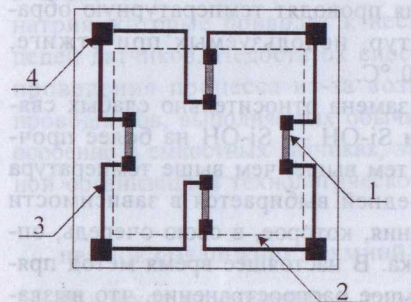


Рис. 5.15. Схема включения тензорезисторов датчика давления:

1 — тензорезисторы; 2 — край упругого элемента;
3 — межконтактные соединения; 4 — контактные площадки

Сам тензорезистор формируется в кремниевой пластине методами термической диффузии или ионной имплантации примеси. В подавляющем большинстве современных датчиков давления тензорезисторы создаются легированием бором исходной кремниевой пластины n -типа. Поэтому тензорезисторы имеют p -тип проводимости и изолированы от остальной кремниевой пластины с помощью p - n перехода. Поверхность исходной кремниевой пластины

совпадает с кристаллографической плоскостью (100). Пластины с такой ориентацией широко применяют как в обычной микроэлектронике для производства интегральных схем, так и для производства датчиков давления, что удешевляет их стоимость. Тензорезисторы располагаются в тех местах кремниевой пластины, где их деформация под действием измеряемого давления достигает максимального значения. Поскольку тензорезистор составляет часть кремниевой пластины, ее деформации полностью передаются на тензорезистор, а не теряются частично в клеевом слое, как это имеет место в случае приклеиваемых тензорезисторов.

Для повышения чувствительности датчика к измеряемому давлению тензорезисторы придают определенную кристаллографическую ориентацию. Тензорезисторы p -типа на пластинах с ориентацией плоскости (100) располагают вдоль кристаллографических направлений [110]. В микроэлектронных датчиках кремниевая пластина играет двойную роль: во-первых, в ней формируется электрическая схема датчика, а во-вторых, пластина выполняет функцию упругого элемента, в котором измеряемое механическое воздействие превращается в деформацию. В датчиках давления 70-х годов упругие элементы имели круглую, плоскую форму и приклеивались по контуру корпуса датчика. К клеевому соединению предъявлялись жесткие требования: оно должно быть герметичным, обеспечивать жесткое закрепление (защемление) краев упругого элемента, сохранять работоспособность в широком интервале температур и не вносить термомеханических напряжений. Этим противоречивым требованиям удовлетворить оказалось очень сложно, и с начала 80-х годов в датчиках давления стали широко применяться профилированные упругие элементы, которые создавались с помощью техники жидкостного анизотропного травления.

Для этого со стороны кремниевой пластины, противоположной поверхности, на которой находятся тензорезисторы, производят анизотропное травление, в ходе которого кремний послойно удаляется и формируется упругий элемент с заданной толщиной и размерами. На рис. 5.16 показаны типичные формы кремниевых упругих элементов — квадратная и прямоугольная.

В упругом элементе имеются тонкая часть (мембрана) 2 и кольцо жесткости 3 толщиной, равной толщине исходной кремниевой пластины. Благодаря большому различию по толщине между мембраной и кольцом жесткости (обычно не менее 10 раз), под действием измеряемого давления наибольшие деформации возникают в мембране у ее краев. Кольцо жесткости обеспечивает фиксированное положение краев мембраны и служит для присоединения кристалла к остальным частям датчика. Благодаря тому что области размещения тензорезисторов 1 и плоскость присоединения упругого элемента 4 пространственно разделены, происходит развязка по механическим напряжениям, возникающим при сборке датчика.

Операция изготовления упругого элемента анизотропным травлением не типична для микроэлектроники, производящей интеграль-

ные схемы. В современных датчиках размеры мембраны лежат в диапазоне $a = 2,5 \dots 0,5$ мм, а толщина $h = 20 \dots 100$ мкм.

Поскольку стандартная толщина исходных кремниевых пластин составляет около 500 мкм, при создании профилированного упругого элемента требуется удалить слой кремния толщиной 400...480 мкм, что требует длительного времени травления. Поэтому операция формирования упругого элемента является очень ответственной и выполняется на заключительном этапе технологического процесса изготовления кристалла датчика давления.

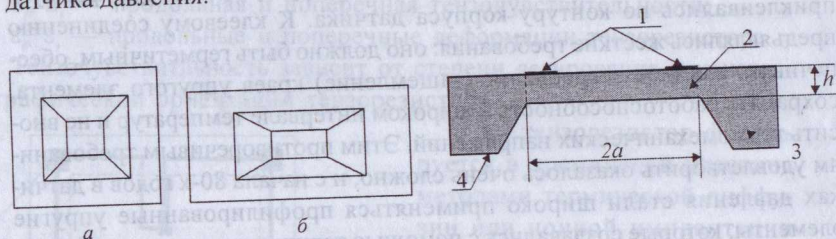


Рис. 5.16 Основные формы кремниевых упругих элементов, получаемых анизотропным травлением:

a — квадратная; b — прямоугольная; 1 — тензорезисторы; 2 — мембрана; 3 — кольцо жесткости; 4 — плоскость присоединения упругого элемента к остальным частям датчика

Технологический маршрут изготовления кристалла датчика давления включает несколько этапов.

Первый этап. На кремниевой пластине, полированной с двух сторон, путем термической диффузии создают слой двуокиси кремния, выполняющие на последующих этапах изготовления роль защитной маски.

Второй этап. На стороне, где предполагается создать электрическую цепь, с помощью фотолитографии удаляют слой двуокиси кремния в тех местах пластины, где должны находиться тензорезисторы. В этих местах поверхность кремния оказывается открытой.

Третий этап. С помощью метода ионной имплантации атомов бора проводят легирование областей тензорезисторов. Этот процесс происходит при комнатной температуре. Для устранения дефектов, возникших в кристаллической решетке во время процесса имплантации, выполняют высокотемпературный отжиг. При этом на поверхности тензорезистора образуется новый тонкий слой двуокиси кремния, который играет роль защитной маски, предохраняющий тензорезистор от неблагоприятного воздействия окружающей среды. В этом слое с по-

мощью специальной фотолитографии удаляют двуокись кремния в тех местах, где должны быть металлические контакты тензорезисторов.

Четвертый этап. На пластину напыляют пленку алюминия толщиной 0.1...0.2 мкм. С помощью еще одной фотолитографии формируют металлическую разводку, объединяющую отдельные тензорезисторы в мостовую схему.

Пятый этап. На поверхность пластины наносят еще один защитный слой двуокиси кремния, в котором методом фотолитографии открываются окна под контакты для электрического присоединения кристалла к выводным контактам датчика.

Шестой этап. Это наиболее ответственный этап производства кристалла для датчиков давления. На стороне кремниевой пластины, противоположной той, где создана электрическая схема, с помощью фотолитографии вскрывается окно в SiO_2 для травления кремния. Далее проводится анизотропное травление, например, в 30 % водном растворе КОН, в результате чего формируется упругий элемент необходимой толщины.

Седьмой этап. Пластина кремния разделяется резкой, например, с помощью лазера, на отдельные кристаллы.

Процесс изготовления кристалла датчика давления заканчивают контролем сопротивления тензорезисторов и толщины упругого элемента. При производстве датчиков предъявляются жесткие требования к равенству сопротивления тензорезисторов мостовой схемы. Разброс по сопротивлению между тензорезисторами, как правило, не должен превышать $\pm 0,2$ %. Еще более жесткие требования предъявляются к качеству анизотропного травления при формировании упругого элемента. Заданная толщина упругого элемента должна воспроизводиться с абсолютной погрешностью не хуже 1 мкм, что при средней глубине травления в 450 мкм представляет сложную задачу.

В современных датчиках давления обязательным элементом конструкции является термокомпенсирующая пластина. Именно к ней крепят кристалл датчика давления. В свою очередь термокомпенсирующую пластину тем или иным способом присоединяют к корпусу датчика. Пластина предназначена для уменьшения термомеханических напряжений, возникающих из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения кремния и материала корпуса (обычно это металл или пластмасса). Кроме того, термокомпенсирующая пластина ослабляет механические напряжения от установки кристалла в корпус датчика.

Термокомпенсирующая пластина изготавливается либо из стекла, либо из кремния. К пластине из стекла кристалл присоединяется электростатическим методом, описанным выше.

Наиболее привлекателен в качестве материала компенсирующей пластины кремний. В этом случае термомеханические напряжения сводятся к минимуму. Основной проблемой, возникающей при использовании кремния для термокомпенсирующей пластины, является способ соединения с кристаллом. Наиболее естественно прямое сращивание кремния. Однако из-за того, что на кристалле датчика уже сформирована электрическая схема, температура в процессе сращивания не должна превышать 400 °С, а прямое сращивание требует более высоких температур. Поэтому наибольшее практическое значение получил метод соединения через тонкий стеклянный слой, для чего на кремниевую термокомпенсирующую подложку наносится слой легкоплавкого стекла толщиной 15...100 мкм. При повышении температуры до 400 °С стекло плавится и прочно соединяет части датчика между собой. Соединение можно проводить с применением электростатического поля.

Для датчиков абсолютного давления термокомпенсирующая пластина — сплошная, а процесс соединения происходит в вакууме. Для датчиков относительного давления в термокомпенсирующей пластине предварительно изготавливают отверстие для подачи опорного давления.

Тензопреобразователь вместе с термокомпенсирующей пластиной присоединяют к корпусу датчика обычно с помощью клея или легкоплавкого стекла. На рис. 5.17 показана схема конструкции датчика абсолютного давления типа МХ фирмы Motorola [5.9].

Внешние металлические контактные проводники 5 находятся в одной плоскости и на такой же высоте, что и кристалл 1. Это позволяет с помощью стандартного оборудования для производства интегральных схем соединять контакты кристалла с внешними электрическими выводами датчика, что удешевляет стоимость производства.

На кристаллах датчиков давления, кроме тензорезисторов, обычно создаются дополнительные резисторы для балансировки мостовой схемы и компенсации температурной зависимости тензочувствительности. Эти резисторы, как правило, создаются после того как сформирована тензорезистивная схема, а балансировка нуля и тензочувствительности проводится путем лазерной подгонки сопротивлений дополнительных резисторов.

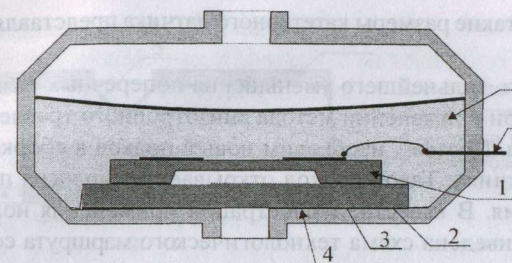


Рис. 5.17. Конструкция датчика абсолютного давления типа МХ [5.9]:

1 — кристалл датчика давления; 2 — соединение кремния с термокомпенсирующей пластиной; 3 — термокомпенсирующая пластина; 4 — соединение термокомпенсирующей пластины с корпусом; 5 — внешние выводы; 6 — защитное покрытие

На заключительном этапе сборки на поверхность кристалла датчика давления наносят защитное покрытие, предохраняющее кристалл от воздействия влаги и агрессивных веществ окружающей среды. Защитное покрытие должно обладать хорошей эластичностью, чтобы не создавать дополнительных термомеханических напряжений в упругом элементе. Для этих целей хорошо подходят кремнийорганические гели.

В существующих датчиках измеряемое давление подается в основном со стороны вытравленной полости, возникшей при формировании упругого элемента и иногда с противоположной стороны. Если измеряемое давление подается со стороны тензорезисторов, то это предъявляет особенно высокие требования к качеству и надежности защитной пленки.

Специфические проблемы возникают при создании катетерных датчиков давления. Такие датчики предназначены для измерений в полых органах или кровеносной системе человека или животных. Особенностью конструкции этих датчиков являются сверхмалые габаритные размеры, особенно в поперечном направлении. При уменьшении габаритных размеров кристалла датчика возникают конструктивные ограничения, связанные с применением анизотропного травления при формировании упругого элемента. В ходе травления образуются боковые скосы, размеры которых примерно равны глубине травления. Поперечный размер кристалла датчика давления складывается из размеров кольца жесткости, боковых скосов упругого элемента и мембраны. При глубине травления 450 мкм размеры кольца жесткости и боковых скосов составляют около 2000 мкм и к этой величине необходимо добавить еще размеры мембраны. Во

многих случаях такие размеры катетерного датчика представляются слишком большими.

Возможность дальнейшего уменьшения поперечных размеров кристалла датчика при применении метода анизотропного травления практически исчерпана. Поэтому необходим новый подход к сборке элементов конструкции датчика. Такой подход открывает технология прямого сращивания кремния. В качестве иллюстрации применения нового метода сборки ниже приведена схема технологического маршрута создания чувствительного элемента датчика давления катетерного типа с рекордно малыми габаритами: длиной 900 мкм, шириной 400 мкм и толщиной 150 мкм и мембраной размером 250 мкм. Датчик разработан в американской фирме Лукас Нова Сенсор [5.10].

На первом этапе изготовления (рис. 5.18) используют стандартные кремниевые пластины *n*-типа, которые имеют высококачественную полировку только с одной стороны. На пластине создается с двух сторон защитная маска из двуокиси кремния. Затем проводят двустороннюю фотолитографию, в результате чего на полированной стороне пластины в защитной маске открывается система полосок шириной 100 мкм. На противоположной стороне пластины в слое двуокиси кремния формируются углубления, которые используют как знаки совмещения для последующих операций сборки.

После операции фотолитографии производят анизотропное травление кремния в водном растворе КОН до глубины, где происходит самоостановка процесса травления из-за смыкания плоскостей (111). При ширине полоски у поверхности в 100 мкм самоостановка произойдет на глубине $h = 100/\sqrt{2}$ мкм. В результате этой операции на пластине возникает система канавок с треугольным сечением, через которые впоследствии подмембранные полости упругих элементов сообщаются с атмосферой.

На втором этапе изготовления окисную маску на полированной стороне пластины удаляют и поверхность кремния обрабатывают в гидрофильном растворе. После этого при температуре 900 °С производят прямое сращивание со второй пластиной, которая закрывает треугольные углубления первой пластины. Образовавшееся прочное соединение между пластинами позволяет в последующем технологическом процессе оперировать со сдвоенной пластиной как с единой монокристаллической структурой. Далее шлифуют и полируют верхнюю присоединенную пластину. В результате этой операций толщина второй пластины доводится до 60 мкм (рис. 5.18, б).

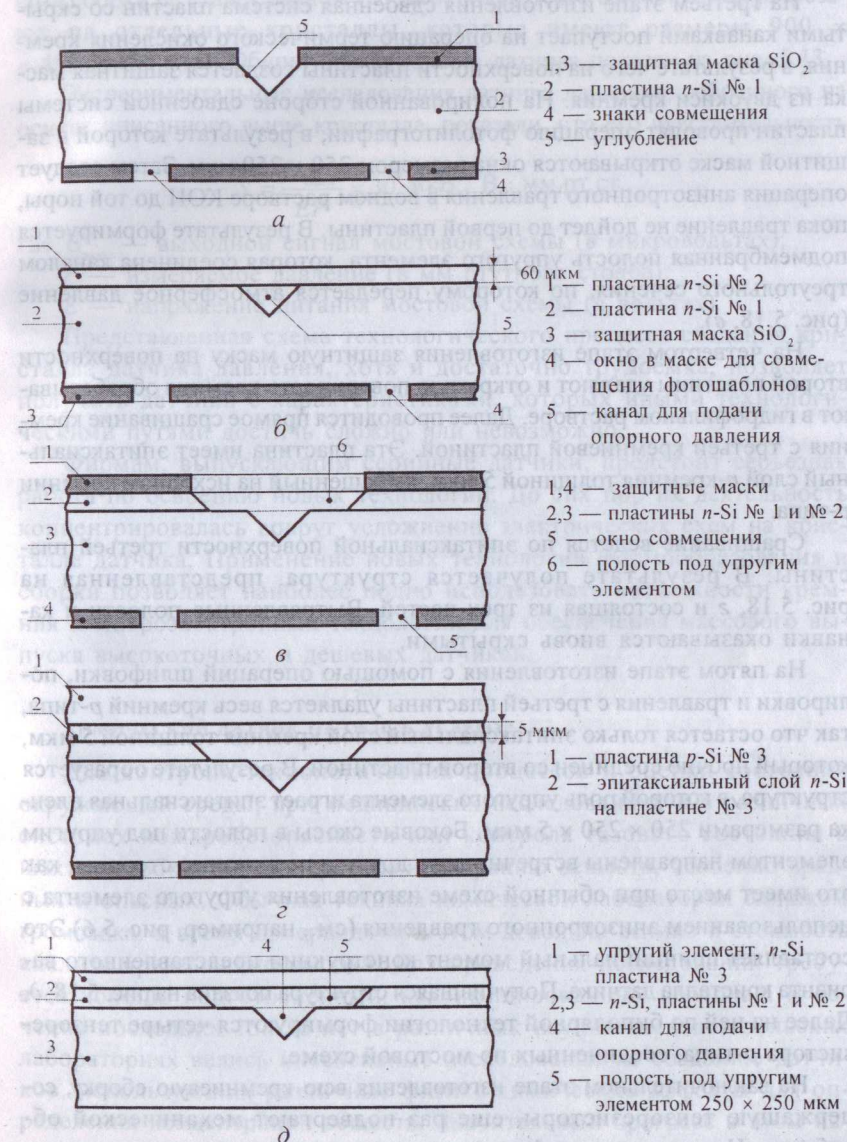


Рис. 5.18. Схема технологического маршрута изготовления катетерного датчика давления

На третьем этапе изготовления сдвоенная система пластин со скрытыми канавками поступает на операцию термического окисления кремния, в результате чего на поверхности пластины создается защитная маска из двуокиси кремния. На полированной стороне сдвоенной системы пластин проводят операцию фотолитографии, в результате которой в защитной маске открываются окна размером 250×250 мкм. Затем следует операция анизотропного травления в водном растворе КОН до той поры, пока травление не дойдет до первой пластины. В результате формируется подмембранная полость упругого элемента, которая соединена каналом треугольного сечения, по которому передается атмосферное давление (рис. 5.18, в).

На четвертом этапе изготовления защитную маску на поверхности второй пластины удаляют и открытую поверхность кремния обрабатывают в гидрофильном растворе. Далее проводится прямое сращивание кремния с третьей кремниевой пластиной. Эта пластина имеет эпитаксиальный слой *n*-кремния толщиной 5 мкм, выращенный на исходном кремнии *p*-типа.

Сращивание ведется по эпитаксиальной поверхности третьей пластины. В результате получается структура, представленная на рис. 5.18, г и состоящая из трех частей. Вытравленные полости и канавки оказываются вновь скрытыми.

На пятом этапе изготовления с помощью операций шлифовки, полировки и травления с третьей пластины удаляется весь кремний *p*-типа, так что остается только эпитаксиальный слой кремния толщиной 5 мкм, который прочно соединен со второй пластиной. В результате образуется структура, в которой роль упругого элемента играет эпитаксиальная пленка размерами $250 \times 250 \times 5$ мкм. Боковые скосы в полости под упругим элементом направлены встречно друг другу, а не в разные стороны, как это имеет место при обычной схеме изготовления упругого элемента с использованием анизотропного травления (см., например, рис. 5.6) Это составляет принципиальный момент конструкции представленного варианта кристалла датчика. Получившаяся структура показана на рис. 5.18, д. Далее на ней по биполярной технологии формируются четыре тензорезистора *p*-типа, соединенных по мостовой схеме.

На заключительном этапе изготовления всю кремниевую сборку, содержащую тензорезисторы, еще раз подвергают механической обработке. На этот раз шлифуется первая пластина, служившая до тех пор основанием сборки. Шлифовку производят до тех пор, пока общая вы-

сота сборки не станет равной 150 мкм. После этого всю пластину разрезают на отдельные кристаллы, которые имеют размеры $900 \times 400 \times 150$ мкм. Общий вид кристалла датчика показан на рис. 5.13.

Экспериментальные исследования датчика давления, собранного на основе описанного выше кристалла, показали, что его чувствительность

$$S = \frac{U_{\text{вых}}}{EP} = 30 \text{ мкВ} / \text{В} \cdot \text{мм.рт.ст.},$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходной сигнал мостовой схемы (в микровольтах);

P — измеряемое давление (в мм ртутного столба);

E — напряжение питания мостовой схемы (в вольтах).

Представленная схема технологического процесса создания кристалла датчика давления, хотя и достаточно трудоемка, позволяет получить датчики с характеристиками, которых иными технологическими путями достичь сложно или невозможно.

Фирмам, выпускающим серийные датчики, предстоит серьезная работа по освоению новых технологий. До сих пор их деятельность концентрировалась вокруг усложнения электрических схем на кристалле датчика. Применение новых технологий формообразования и сборки позволяет наиболее полно использовать возможности кремния и микроэлектронных технологий для обеспечения массового выпуска высокоточных и дешевых датчиков.

ХИМИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОКИСЬ УГЛЕРОДА

Для контроля технологических процессов и оценки состояния окружающей среды, при медицинских исследованиях и в различных системах пожаробезопасности или контроля газового состояния в шахтах необходимо измерять концентрацию веществ, особенно вредных и опасных. Обычная техника химической лаборатории слишком громоздка, а время измерения при этом довольно велико и стоимость анализа чрезвычайно высока. Для проведения исследований требуется хорошо подготовленный, квалифицированный персонал. В течение последних 15...20 лет в различных научно-исследовательских лабораториях велись интенсивные исследования по созданию датчиков, использующих различные физико-химические эффекты для определения концентрации веществ. Значительный прогресс в этом направлении достигнут благодаря применению микроэлектронной технологии.

Среди различных эффектов, которые можно применять для определения концентрации веществ, особое место занимает эффект изменения проводимости полупроводниковых пленок при изменении состава атмосферы, окружающей пленку. В этом эффекте молекулы исследуемого вещества адсорбируются на поверхности и обмениваются электронами с полупроводниковой пленкой и тем самым изменяют ее проводимость. К числу таких полупроводниковых материалов, в которых эффект изменения проводимости ярко выражен, относится двуокись олова SnO_2 .

Чувствительность пленки двуокиси олова к концентрации химических веществ в окружающей атмосфере увеличивается по мере роста температуры пленки. Повышение температуры облегчает обмен электронами между адсорбированными молекулами химического вещества и полупроводником. Такой же особенностью обладают окислы цинка, железа, титана. Пленки двуокиси олова получили наибольшее применение из-за удобства обращения с ними и воспроизводимости параметров материала при его изготовлении.

Эксперименты показывают, что проводимость этих пленок при наличии в воздухе, например, окиси углерода (угарный газ) изменяется по закону:

$$G = G_0 + k(P_{\text{CO}})^m$$

где G_0 — проводимость пленки SnO_2 в чистой атмосфере (без CO);

G — проводимость пленки при наличии CO ;

P_{CO} — концентрация окиси углерода;

k и m — численные параметры, зависящие от типа определяемого химического вещества.

Наилучшие результаты при измерении концентрации CO достигаются, если температура пленки SnO_2 около 300°C . В этом случае $m \approx 0.5$, а $k \approx 0.65$, при условии, что концентрацию окиси углерода измерять в миллионных долях на единицу объема.

Из пленки двуокиси олова методом фотолитографии можно сформировать резистор, и по изменению его сопротивления относительно сопротивления в чистом воздухе судить о концентрации окиси углерода. С помощью микроэлектронной технологии удалось создать практические варианты датчиков с малыми габаритами, невысоким потреблением энергии, хорошей воспроизводимостью параметров и высокой чувствительностью.

На рис. 5.19 схематически показана конструкция чувствительного элемента датчика окиси углерода. Основу чувствительного элемента составляет кремниевая структура, аналогичная по форме упругому элементу кремния датчика давления. Кольцо жесткости служит для присоединения кристалла к корпусу датчика. На тонкой части (мембране) располагаются элементы электрической цепи датчика.

На поверхности кристалла путем термического окисления создается слой двуокиси кремния. Он предназначен для электрической изоляции элементов электрической цепи от кремниевой подложки.

На поверхность изолирующей пленки SiO_2 напыляют слой золота, из которого затем с помощью операции фотолитографии формируют резистивный нагреватель. Нагреватель можно сделать и из поликристаллического кремния, который предварительно должен быть выращен на пленке двуокиси кремния.

Следующим шагом технологического процесса является нанесение второго слоя двуокиси кремния. На этот раз диэлектрическую пленку получают осаждением из газовой фазы (см. п. 5.1). Второй слой двуокиси кремния, так же как и первый, предназначен для изоляции элементов электрической цепи между собой.

На полученный слой двуокиси кремния осаждается пленка двуокиси олова и методом фотолитографии формируются резистор, на поверхности которого происходит адсорбция молекул окиси углерода (хеморезистор).

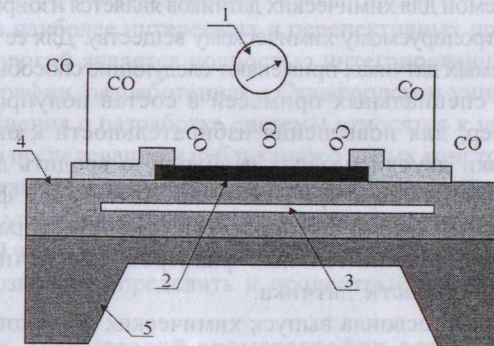


Рис. 5.19. Схема газового датчика:

1 — измерение проводимости; 2 — SnO_2 ; 3 — резистивный нагреватель; 4 — SiO_2 ; 5 — Si

Для присоединения контактных проводников на концы хеморезистора из SnO_2 необходимо напылить слой проводящего металла. Поскольку датчик работает при температурах кристалла около 300°C , материал проводника должен быть устойчивым к температурным воздействиям. В качестве такого металла обычно используется хром — материал, получивший широкое применение в микроэлектронике. Схема разводки проводников на кристалле формируется с помощью специальной фотолитографии.

Для обеспечения высокой температуры резистора из SnO_2 необходимо уменьшить теплоемкость области кристалла под резистором и сократить теплопотери. Для уменьшения теплоемкости резисторы располагают на тонкой кремниевой мембране, которая формируется с помощью метода жидкостного анизотропного травления. Обычно толщина кремниевой мембраны составляет $5\text{--}10\text{ мкм}$.

Теплоемкость кристалла датчика можно дополнительно уменьшить, если удалить кремний из области под резистором, так что в итоге и нагревающий резистор и резистор из SnO_2 будут находиться на пленке из двуокиси кремния. В этом случае для обеспечения рабочей температуры 300°C к разогреваемому резистору достаточно подводить мощность $100\text{--}200\text{ мВт}$.

На кремниевой пластине одновременно изготавливают несколько сотен кристаллов, что снижает их стоимость. Площадь тонкой части кристалла (мембраны) составляет около $1,5\text{ мм}^2$. После изготовления кристалл монтируется в корпусе датчика.

Общей проблемой для химических датчиков является избирательность по отношению к контролируемому химическому веществу. Для ее повышения в серийно выпускаемых датчиках применяют следующие способы.

1. Введение специальных примесей в состав полупроводниковой пленки. Например, для повышения избирательности к окиси углерода в состав пленки двуокиси олова необходимо вводить дополнительные атомы кислорода сверх требуемых по химической формуле.
2. Рациональный выбор температуры хеморезистора.
3. Применение дополнительных фильтров, обеспечивающих повышение избирательности датчика.

Фирма Моторола освоила выпуск химических датчиков окиси углерода типа MGS.

На рис. 5.20 приведена конструкция датчика, на котором указано расположение дополнительного фильтра, повышающего избирательность к окиси углерода [5.12].

Чувствительность химических датчиков определяется как отношение сопротивления хеморезистора из SnO_2 в чистом воздухе R_B к его сопротивлению, когда в воздухе присутствует окись углерода: $S = R_B / R_{\text{всо}}$. Если концентрация окиси углерода составляет $60 \cdot 10^{-6}$, то $S \approx 6$. При этом сопротивление хеморезистора в чистом воздухе $R_B \approx 1 \cdot 10^6\text{ Ом}$, сопротивление нагревателя $R_H \approx 300\text{ Ом}$, а максимальное падение напряжения на нагревателе не превышает 5 В . По своим характеристикам химические датчики фирмы Моторола позволяют производить измерения с погрешностью, не превышающей 1% .

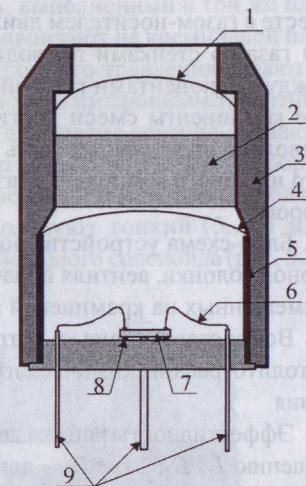


Рис. 5.20. Схема конструкции газового датчика на окись углерода типа MGS:

1 — защитная сетка; 2 — селективный фильтр; 3 — нейлоновый корпус; 4 — защитная сетка; 5 — металлический каркас; 6 — золотая проволока; 7 — кремниевая пластина; 8 — соединение; 9 — электрические контакты

ГАЗОВЫЙ ХРОМАТОГРАФ НА КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

Одним из наиболее интересных и перспективных применений кремниевых технологий является полностью интегрированная система газовой хроматографии, разработанная в Стэнфордском университете США. Первые сообщения о разработке системы относятся к началу 80-х годов [5.13], однако исследования и публикации о новых конструктивных решениях продолжают и до настоящего времени. Газовый хроматограф дает возможность установить наличие тех или иных веществ в газовой пробе, пропускаемой через хроматограф. Математическая обработка сигнала хроматографа позволяет определить и процентный состав анализируемой смеси.

Основная идея газовой хроматографии состоит в следующем. Смесь газов (газовую пробу) пропускают сквозь колонку, имеющую поверхность с известными характеристиками. Когда газовая проба

изменению локальной температуры терморезистора и его сопротивления. Предварительная градуировка термодатчика позволяет по изменению его сопротивления установить наличие того или иного компонента газовой смеси. Этому способствует высокий температурный коэффициент сопротивления никеля — около $0.55\% \text{ град}^{-1}$.

Газовый хроматограф работает следующим образом. После полной продувки системы инертным газом-носителем, который поступает на вход 2 под избыточным давлением 0,2 атм, клапан 3 открывается и через вход 1 в колонку поступает проба неизвестного газа под давлением несколько выше, чем 0,2 атм. После введения пробы объемом около 5 нл клапан снова закрывается и газ-носитель переносит пробу через капиллярную колонку 6. Поскольку вытравленный капилляр имеет наполнитель для газовой хроматографии, входящие в состав пробы компоненты разного молекулярного веса проходят через колонку с разной скоростью и поэтому выходят из системы последовательно. Терморезистор 5 воспринимает колебания теплопроводности газового потока, и изменение его сопротивления приводит к изменению падения напряжения на нем. Типичный вид сигнала с хроматографа показан на рис. 5.23.

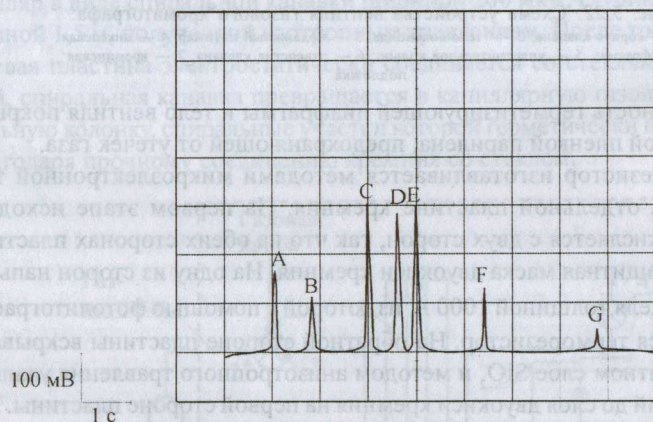


Рис. 5.23. Выходной сигнал миниатюрного газового хроматографа:

A — азот, B — пентан, C — дихлорметан, D — хлороформ, E — 111-трихлорэтан, F — трихлорэтилен, G — толуол

В состав хроматографа входит несколько клапанов и вспомогательных газовых каналов, обеспечивающих предварительную подготовку при-

бора к работе, например блок продувки, канал выброса неиспользованной пробы, автоматический измеритель интервалов времени.

В настоящее время имеются сообщения о разработке вариантов газового хроматографа, способного определить наличие в пробе газа восьми составляющих в течение трех минут с абсолютной погрешностью до $1 \cdot 10^{-5}$.

5.5. ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

Микроэлектронная технология позволяет создавать датчики с хорошими метрологическими характеристиками и низкой стоимостью, причем последняя имеет четко выраженную тенденцию к снижению. Высокое качество кремния и других материалов, применяемых в микроэлектронной технологии, обеспечивает производство датчиков давления с погрешностью измерений 0.02% [5.15].

С другой стороны, низкая стоимость датчиков определяется прежде всего большим числом кристаллов, которые можно получить с одной пластины. Если кремниевая пластина имеет диаметр 100 мм, а размер кристалла датчика давления $1 \times 1 \text{ мм}^2$, то с одной пластины можно получить около 6000 кристаллов. Обычно технологические операции производятся не с одной пластиной, а с партией, содержащей 25 пластин. В результате после окончания технологического цикла производства из партии пластин можно получить до 15000 кристаллов. Стоимость датчиков будет определяться индивидуальной сборкой, настройкой, испытаниями и метрологической аттестацией. При массовом производстве стоимость датчиков составляет от одного до нескольких долларов.

По этим причинам датчики на основе микроэлектронной технологии широко применяются в технике и научных исследованиях. Общий объем продаж датчиков в мире в 1995 году составил 6 миллиардов долларов, и из них не менее 25% приходится на долю датчиков, производимых по микроэлектронным технологиям. По оценкам экспертов объем продаж всевозможных микроэлектронных датчиков достигнет 10 миллиардов долларов к 2005 году.

В настоящее время из общего объема производства датчиков 40% приходится на долю датчиков давления, 25% — температуры, 13% — ускорения, 9% — потоков газа и жидкости, 5% — силы. Наибольшие темпы роста применения микроэлектронных датчиков наблюдаются в автомобильной промышленности и робототехнике. Средний годовой темп

прироста объема производства датчиков составляет 6 %, хотя для отдельных секторов производства достигает 20 %, как, например, для датчиков перемещения и интеллектуальных датчиков [5.15]. Столь значительные темпы роста связаны с большой практической значимостью применения датчиков. Так широкое использование датчиков давления для контроля сгорания топлива в автомобилях привело к существенному сокращению объемов расхода горючего на 100 км пробега: в 1974 году расход составлял 20 л на 100 км, а в 1994 году — 8,5 л на 100 км [5.15].

Широкие возможности микроэлектронных технологий дали мощный импульс развитию микроэлектромеханических систем нового класса приборов, интенсивно развивающихся в последнее десятилетие. В микроэлектромеханических системах на одной кремниевой пластине формируется несколько датчиков различных физических и химических величин вместе с электроникой, обрабатывающей и преобразующей сигналы с датчиков. И хотя до сих пор ведутся споры о целесообразности объединения на одной кремниевой пластине нескольких датчиков, новое направление уже заявило о себе рядом интересных технических разработок [5.16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

- 5.1. *Pressure and temperature transducers*. Каталог / National Semiconductors / Б.И., 1980.
- 5.2. *E.M. Schooneveld, C.W.E. Van Ejik, R.W. Hollander, S.A. Audet-Silicon strip detector for β -radiochromatography* — Nucl. Instrum. Meth., (1988), A275, P. 597-602.
- 5.3. *Петерсен К.Э.* — Кремний как механический материал // ТИИЭР, 1982. — Т. 70, № 5.
- 5.4. *Технология СБИС* / Под ред. С. Зи. — Москва: Мир, 1986.
- 5.5. *Бачурин В.В., Полехов В.В., Пыхтунова А.И.* Применение анизотропного травления кремния в технологии изготовления полупроводниковых приборов // Обз. по электронной технике. Сер. 2. Полупровод. приборы. 1982. — Вып. 3 (859).
- 5.6. *G. Wallis, D.I. Pomerantz* — Field assisted glass-metal sealing — J. Applied Phys, 1969. — V. 40, № 10. — P. 3946-3949.
- 5.7. *R.C. Frye, J.E. Griffith, Y.H. Wang* A field-assisted bonding process for silicon dielectric isolation. — J. Electrochem. Soc., 133 (1986), 1673.

- 5.8. *J.B. Lasty* Wafer bonding for silicon on insulator technology — J. Appl. Phys. Lett., 48, (1986), 78.
- 5.9. *Sensor, Device Data*, Motorola, 3Ed, (1995).
- 5.10. *L. Christel, K. Petersen*, The Proceedings of the 7-th Int. Conf. on Solid St. Sensors and Actuators., (1996).
- 5.11. *V. Demarne, A. Grissel*, An integrated low-power thin-film CO gas sensor on silicon, Sensors and Actuators. V. 13 (1988). — P. 301-314.
- 5.12. *Chemical sensor products*, Motorola Sensor Device Data, 1992, Section 3.
- 5.13. *S.C. Terry, J.H. Jermen, J.B. Augell* — A gas chromatographic air analyser fabricated on silicon wafer — IEEE Trans. Electron Devices, 26, (1979). — P. 1888-1896.
- 5.14. *Полищук В.П.* Как исследуют вещества // Библиотечка «Квант». — М.: Наука, 1989. — Вып. 72.
- 5.15. *I. Brysek* — Impact of MEMS technology on society — Sensors and actuators, A 56 (1996). P. 1-9.
- 5.16. *K.D. Wise* — Microelectromechanical SYSTEMS: Interfacing Electronics to a Non — Electronic world — Technical Digest Int. Electron Devices meeting, 1996, San-Francisco, 1996, December 8-11. — P. 11-18.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДАТЧИКАХ

Самая важная часть науки о восприятии входных величин связана с выбором соответствующих физических явлений, подготовкой для их использования, с разработкой методик применения, с расчетом измерительных схем, оценкой и доведением метрологических характеристик чувствительных элементов до требуемых норм.

Количество физических явлений и эффектов, которые используются при измерении различных величин, огромно и составляет несколько тысяч. Остановимся лишь на некоторых физических явлениях, применяемых для восприятия температуры, относительной влажности воздуха, магнитной индукции, светового потока, радиационной и световой энергии. Выбор этих величин обусловлен их широким распространением в различных областях науки и техники, в жизни человеческого общества.

Действительно, свойства около 60 % физических величин и параметров связаны с температурой. Температура как функция состояния определяется энергией её молекул. Через эту энергию может быть получена информация о других характеристиках веществ. Так, с учетом температуры определяются плотность вещества, твердость, вязкость, химический состав, объём, расход и многие другие величины.

Влажность сырья, полуфабрикатов и конечного продукта является характеристикой, влияющей на стоимость, производительность оборудования и т. п. При аттестации продукции электронной, химической, фармакологической, пищевой и других отраслей производства обязательны измерения влажности. Температура и концентрация влаги, например, в сельском хозяйстве являются определяющими измеряемыми величинами при первичной обработке и хранении зерна, сушке и консервировании зелёной массы, тепловой обработке кормов, семян и молочной продукции, при создании микроклиматических условий в теплицах и хранилищах, в мелиорации, при санитарно-гигиенической обработке животных и др.

Особый интерес к измерению деформаций обусловлен тем, что многие физические величины могут относительно легко быть преобразованы в эквивалентные им в информационном смысле перемещения.

Выбор именно названных величин обусловлен также их влиянием на жизнедеятельность и здоровье человека.

Датчики в большинстве случаев основываются на применении одного физического эффекта. Далее приводятся: краткое описание физических эффектов, название основных материалов чувствительных элементов, ориентировочные сведения о диапазонах измерений, погрешностях и быстродействии восприятия входных величин. Этот материал пригоден для предварительного выбора типа датчиков. Для детального рассмотрения особенностей применения выбранного датчика необходимо пользоваться справочной литературой, так как приведённые здесь данные ориентировочные.

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

а) Эффект Зеебека. Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Зависимость между термоэлектродвижущей силой E_T , возникающей в цепи, составленной из разнородных проводников, и температурой T места соединений этих проводников (горячий спай): $E_T = aT + bT^2$, где a, b — константы.

Термопары: платинородий — платина, диапазон от 0 до 1600 °С, погрешность $\approx 0,1...0,5$ %; хромель — алюмель, диапазон от -200 до 1100 °С, погрешность $\approx 2...3$ %; медь — константан, диапазон от -200 до 200 °С, погрешность ≈ 1 %. Быстродействие зависит от конструкции термопары и толщины проводов. Оно может находиться в диапазоне от миллисекунд до минут.

Один из вариантов конструкции термопары приведен на рис. П.1.

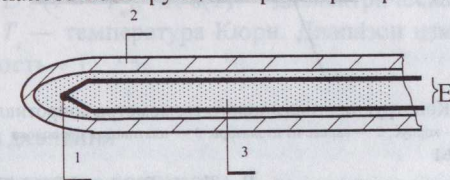


Рис. П.1. Конструкция термопары:

1 — спай 2 проводников (хромель-алюмель); 2 — корпус (нержавеющая сталь); 3 — изолятор (окись алюминия)

б) Шум Найквиста

На металлических проводниках возникают тепловые шумы, вызванные тепловым движением носителей заряда. Эти шумы не зависят от материала проводников. $U_{\text{эф}} = 4kTR\Delta f$ — напряжение шума; k — постоянная Больцмана; R — электрическое сопротивление; Δf — полоса частот.

Диапазон температур широк. Существуют термометры, измеряющие температуру от -270 до 3000 °C, с погрешностью менее 1 %.

в) Термопреобразователи сопротивления

Зависимость электрического сопротивления от температуры

$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$, где A, B, C — коэффициенты, зависящие от свойств применяемых металлов, R_0 — сопротивление термометра при начальной температуре, например 0 °C. Для отечественных термометров (платина, медь): $R_0 = 10; 50; 100; 500$ Ом. Полупроводники: германий (Ge, монокристалл, поликристалл, нитевидный кристалл); кремний (Si, монокристалл, поликристалл, нитевидный кристалл) и др. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) металлов от 0,2 до 0,6 % на 1 °C. Широко применяется медь. Сопротивление из меди имеет практически линейную температурную зависимость.

Один из вариантов конструкции металлического термометра сопротивления приведён на рис. П.2.

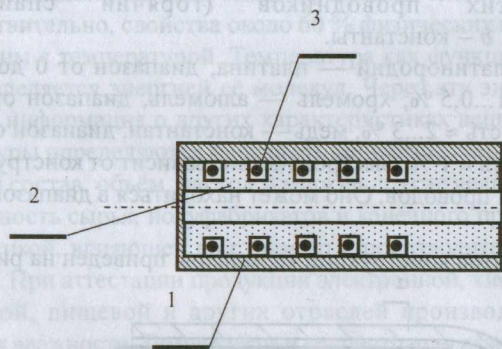


Рис. П.2. Конструкция платинового термометра сопротивления:

1 — корпус; 2 — каркас из изолятора; 3 — платиновая проволока

г) Термисторы

Сопротивление термисторов $R(T) = R_0 \exp [B(1/T - 1/T_0)]$, где R_0 — сопротивление при начальной температуре окружающей среды T_0 .

ТКС отечественных термисторов от 2 до 4 % на 1 °C; номинальное значение R_0 при $T_0 = 20$ °C от 0,1 до 10^7 Ом; допуск на R_0 от 10 до 20 %, диапазон от -100 до 300 °C, погрешность — 1...2 %. Материал — смеси окисей марганца, кобальта, железа, никеля и меди; сапфир и др.

д) Кварцевые датчики

Зависимость частоты кварцевого резонатора от температуры: $f(T) = f_0(1 + aT + bT^2 + cT^3)$, где f_0 — частота при начальной температуре; a, b, c — коэффициенты, зависящие от направления среза пластины. Кварц (SiO_2): температура плавления 1470 °C, коэффициент термочувствительности $\approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Диапазон от -360 до 500 °C, погрешность 0,01...0,1 %. Кварцевые датчики обладают высокой стабильностью и чувствительностью (порог чувствительности 0,00001 °C).

е) Дилатометрические, биметаллические и жидкостные датчики

Эффект теплового расширения тел. Зависимость расширения твёрдых тел, жидкостей и газов от изменения температуры:

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где l_1, l_2 — размеры нагреваемого тела при температурах T_1, T_2 ; α — коэффициент теплового расширения.

Дилатометрические датчики: диапазон от -50 до 300 K $^{-1}$, погрешность ≈ 3 %. Коэффициент линейного расширения пластмасс $\approx 80 \cdot 10^{-6}$, стали $\approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Жидкостные датчики: диапазон от -70 до 300 °C.

Манометрические датчики: диапазон от -150 до 650 °C, погрешность $\approx 1...5$ %. Коэффициент объёмного расширения этилового спирта $110 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, керосина $96 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, глицерина $49 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ртути $18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

ж) Емкостные датчики

В них используется термочувствительный конденсатор из сегнетоэлектрика $\epsilon(T) = D / (T - T_k)$, где $\epsilon(T)$ — диэлектрическая проницаемость; D — константа; T_k — температура Кюри. Диапазон измерения от -90 до 50 °C, погрешность $\approx 1...2$ %.

ДАТЧИКИ СИЛЫ И ДАВЛЕНИЯ

а) Магнитоупругие датчики

Изменение магнитной проницаемости ферромагнитных тел под воздействием приложенных сил (рис. П.3). Материал: железо и его сплавы, сталь

электротехническая марки Э, сталь 3 и др., сплавы Ю — 12, никель — цинковый феррит и др. Диапазон от 0 до 150 МПа, погрешность $\approx 5\%$. Погрешность от влияния температуры — до 3% на 10 °С, погрешность от гистерезиса 1...4%.

В датчике изменение магнитной проницаемости сердечника под воздействием механического напряжения (F) приводит к изменению индуктивности (ΔL).

б) Пьезоэлектрические датчики

Способность диэлектрических кристаллов генерировать электрические заряды q при воздействии на них силой F (рис. П. 4). Материал: кварц; титанат бария; сегнетовая соль, турмалин. Диапазон от 13,3 Па до 689,5 МПа, погрешность $\approx 0,1\%$.

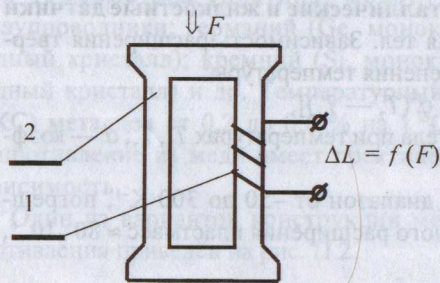


Рис. П.3. Датчик силы:

1 — обмотка индуктивности, 2 — сердечник

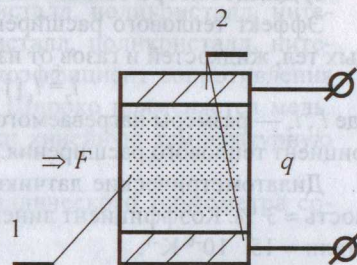


Рис. П.4. Датчик силы:

1 — кристалл кварца, 2 — электроды

в) Пьезорезонансные датчики

Изменение частоты измерительного кварцевого резонатора от действия приложенной силы. Диапазон от 0 до 138 кПа, погрешность $\approx 0,1\%$.

датчики перемещений и деформаций

а) Индукционные датчики

Генерирование ЭДС (E) в проводнике, движущемся в магнитном поле постоянного магнита $E = -w (d\Phi/dt)$, где w — число витков; Φ — магнитный поток. Погрешность $\approx 1\%$.

б) Тензосопротивления

Изменение геометрических размеров и соответственно сопротивления при воздействии механических деформаций $-\varepsilon = \Delta l / l = \Delta R / R$, где $\Delta l / l$ — относительное изменение длины проводящего элемента тензорезистора; $\Delta R / R$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора; k — коэффициент тензочувствительности. Материал: константан, никель, нихром, кремний, арсенид галлия и др. Тензочувствительность полупроводниковых датчиков в 50...100 раз больше, чем у металлических. Сопротивление проволоочных датчиков — десятки и сотни Ом, полупроводниковых — тысячи Ом, погрешность 1% и менее.

в) Реостатные датчики

Линейные или угловые перемещения движка реостата влекут за собой изменения сопротивления реостата (рис. П.5). Материал реостата: константан, манганин, нихром. Материал щеток: платина, палладий и др. Число витков реостата обычно не менее 100.

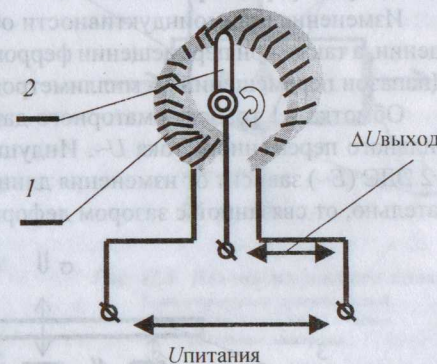


Рис. П.5. Реостатный датчик углового перемещения:

1 — кольцевой реостат, 2 — скользящий контакт (щетка)

г) Ёмкостные датчики

Могут изменяться зазор между обкладками конденсатора, площадь обкладок, диэлектрическая проницаемость. Датчики сил должны дополняться преобразователями сил в перемещение (обычно в виде упругих элементов). Датчики обладают высокой чувствительностью. Имеются хорошо разработанные измерители ёмкости.

е) Индуктивные датчики

Изменение индуктивности дросселя ΔL при изменении зазора или площади сечения магнитопровода (рис. П.6). Наиболее распространён миллиметровый диапазон, погрешность $\approx 1\%$.

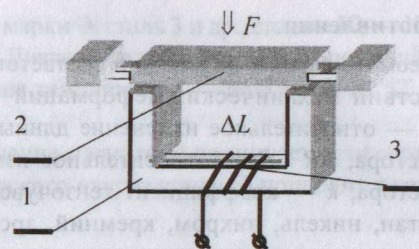


Рис. П.6. Индуктивный датчик перемещения:

1 — дроссель, 2 — подвижный сердечник, 3 — обмотка индуктивности

ж) Трансформаторные датчики

Изменение взаимной индуктивности обмоток при их взаимном перемещении, а также при перемещении ферромагнитного сердечника (рис. П.7). Диапазон перемещений — миллиметровый, погрешность $\approx 1\%$.

Обмотка w_1 трансформаторного датчика питается от источника стабильного переменного тока $U_{\sim}$. Индуцированная во вторичной обмотке w_2 ЭДС ($E_{\sim}$) зависит от изменения длины воздушного зазора Δl и, следовательно, от связанной с зазором деформации σ .

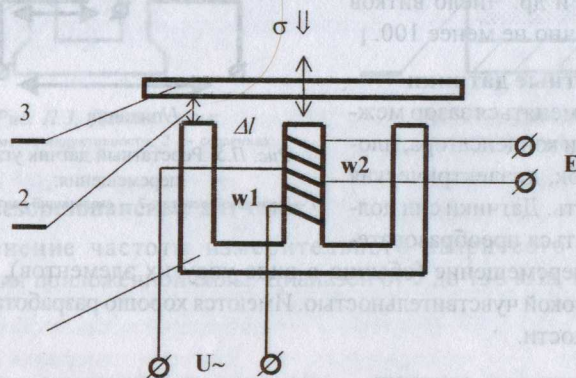


Рис. П.7. Датчик перемещения и деформации:

1 — сердечник трансформатора с первичной w_1 и вторичной обмотками w_2 ; 2 — воздушный зазор Δl ; 3 — подвижный сердечник

датчики магнитной индукции

а) Датчики Холла

Возникновение электрического напряжения U в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока $U = \gamma \cdot I \cdot B$, где γ — коэффициент (рис. П.8). Материал: кремний, германий, арсенид индия и др. Диапазон: $10^{-5} \dots 10^2$ Тл; погрешность 0,1...2,5 % (частота 0...200 кГц). Нестабильность чувствительности — 0,1...1 % в год. Нужно учитывать влияние механических напряжений и температурных деформаций. Рабочий температурный диапазон до 300 °С.

Под действием тока I и измеряемой магнитной индукции B , векторы которых взаимно перпендикулярны, на измерительных электродах датчика возникает напряжение U . Значение этого напряжения зависит от геометрии датчика (длина, толщина), тока, коэффициента Холла и магнитной индукции.

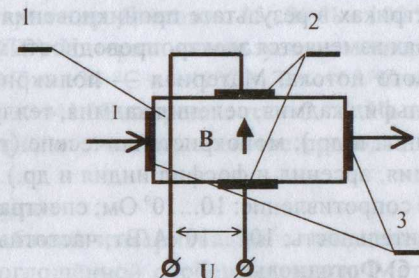


Рис. П.8. Датчик магнитного поля:

1 — полупроводник (арсенид индия); 2 — токовые электроды; 3 — измерительные электроды

б) Датчики на основе эффекта Гаусса

Изменение электрического сопротивления вещества при воздействии магнитного поля вследствие изменения подвижности носителей заряда, их средней концентрации и соотношения размеров проводящего канала (рис. П.9). Материал: висмут, кристаллы антимонида индия, ферромагнетики. Диапазон: $10^{-2} \dots 10^2$ Тл; погрешность 0,5...2,5 % (частота 0...20 кГц). Малый абсолютный размер сопротивления.

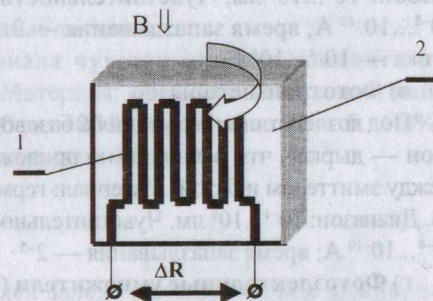


Рис. П.9. Датчик магнитного поля:

1 — плёночный резистор из ферромагнитного материала; 2 — подложка

в) Индуктивные датчики

При изменении магнитного поля в замкнутом проводнике возникает ЭДС индукции $E = -w \, dF / dt$, где w — число витков; F — магнитный поток. Материал сердечника — феррит, проводника — медь. Диапазоны: $10^{-7} \dots 10^2$ Тл (постоянное магнитное поле), $10^{-10} \dots 10^2$ Тл (частота от 20 Гц до 30 МГц); погрешность $\approx 0,5 \dots 2,5$ % (частота $0 \dots 20$ кГц).

датчики светового потока

а) Фоторезисторы

Появление свободных носителей зарядов в полупроводниках и диэлектриках в результате проникновения внутрь вещества. В фоторезисторах изменяется электропроводность материалов при воздействии светового потока. Материал — поликристаллические полупроводники (сульфид кадмия, селенид кадмия, теллурид кадмия, сульфид и селенид свинца и др.); монокристаллические (германий и кремний, антимонид индия, арсенид и фосфид индия и др.). Диапазон: $10^{-2} \dots 10^5$ лм. Темновое сопротивление: $10 \dots 10^9$ Ом; спектральная область: $0,3 \dots 30$ мкм; чувствительность: $10^{-1} \dots 10^2$ А/Вт; частотный диапазон: $10^{-2} \dots 10^5$ Гц.

б) Фотодиоды

Энергия излучения вызывает перенос носителей заряда через p - n -переход, в результате на нём образуется разность потенциалов. Материалы: германий, кремний (в видимой и ближайшей инфракрасной областях), антимонид и арсенид индия (в инфракрасной области). Диапазон: $10^2 \dots 10^6$ лм. Чувствительность — 10^{-2} А/лм; темновой ток — $10^{-8} \dots 10^{-10}$ А; время запаздывания — $2 \dots 5 \cdot 10^{-7}$ с; частотная характеристика — $10^{-1} \dots 10^6$ Гц.

в) Фототранзисторы

Под воздействием излучения в базовой области образуются пары «электрон — дырка», что равносильно приложению управляющего напряжения между эмиттером и базой. Материал: германий, кремний, сульфид кадмия и др. Диапазон: $10^{-1} \dots 10^6$ лм. Чувствительность — 10^{-1} А/лм; темновой ток — $10^{-8} \dots 10^{-10}$ А; время запаздывания — $2 \dots 5 \cdot 10^{-7}$ с.

г) Фотоэлектронные умножители (ФЭУ)

В ФЭУ используется принцип многократного усиления фототока с помощью вторичной эмиссии электронов эмиттерами, находящимися в самом умножителе. Материал баллона: стекло, кварц. Диапазон: $10^{-3} \dots 10^4$ лм. Чувствительность — 10^{-3} А/лм ($10 \dots 100$ мкА/Вт); темновой ток — $10^{-8} \dots 10^{-13}$ А; время запаздывания — $10^{-6} \dots 10^{-8}$ с.

датчики влажности

а) Сорбционно-электролитические датчики

Основаны на концентрации растворённого или газообразного вещества на поверхности твёрдого тела или жидкости. Чувствительный элемент датчика представляет собой комбинированный электрический нагреватель с изменяющимся от влажности сопротивлением. Устанавливается равновесное состояние между давлением водяного пара, который образуется над поверхностью получившегося раствора, и давлением пара окружающей среды. Установившаяся при этом температура служит оценкой влажности. Материал: соль хлористого лития, полиэлектролиты, сульфированный полистирол и др. Диапазон: $15 \dots 20$ % ÷ 100 %, погрешность: ± 1 °С точки росы (ТР). Интервал используемых температур T : $-10 \dots +60$ °С. При -10 °С $< T < +34$ °С и $+41$ °С $< T < +65$ °С погрешность ± 1 °С; при $+34$ °С $< T < +41$ °С погрешность ± 2 °С. На погрешность влияют скорость воздушного потока, наличие проводящих частиц и температура.

б) Сорбционно-весовые датчики

Частота механических колебаний измерительного кварцевого резонатора зависит от массы поглощённой сорбентом влаги. Материал сорбента — окись кремния, плёнки из поликапроамида, силикагеля и др. Диапазон — $0 \dots 100$ %; $1,5 \dots 2$ %. Температурный диапазон: $0 \dots 50$ °С. Датчики высокочувствительны — $0,1$ ppm (промилле). Источники погрешностей: температура среды, гистерезис, газы сорбирующиеся на плёнку.

в) Сорбционно-деформационные датчики

Изменение размеров материала чувствительного элемента от влажности окружающей среды. Материал: обезжиренный волос, нейлон, капрон и др. Диапазон: от 0 до 100 %, погрешность — $5 \dots 10$ %. Датчики применяются в метеорологии и быту.

радиационные датчики

а) Ионизационная камера

Появление свободных носителей заряда в веществах под действием радиоактивного излучения изменяет состояние ионизационной камеры.

Ионизационная камера (рис. П.10): герметичный цилиндрический конденсатор (полая обкладка и центральный электрод, заполненный газом). Конденсатор подключён к источнику электрического тока.

Конденсатор заряжают от источника; после пролета частицы происходит ионизация газа, что приводит к уменьшению заряда конденсатора и, следовательно, к уменьшению разности потенциалов между его пластинами. Имеется окно для прохождения излучения из алюминия или бериллия. Максимальная мощность дозы: $10^8 \text{ Р} \cdot \text{ч}^{-1}$; чувствительность: $1 \dots 2 \cdot 10^{-12} \text{ А/Р} \cdot \text{ч}^{-1}$; давление: $1 \dots 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$; напряжение: $600 \dots 1000 \text{ В}$; ионизационный ток: $10^{-9} \dots 10^{-12} \text{ А}$.

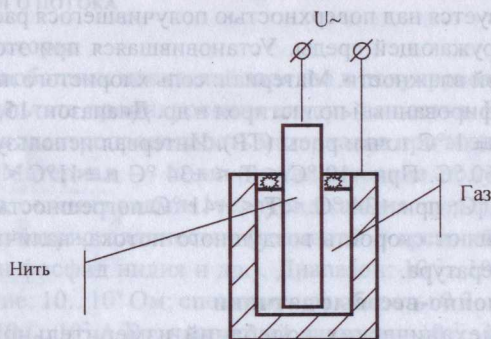


Рис. П.10. Конструкция ионизационной камеры

б) Счётчик Гейгера — Мюллера

При интенсивном электрическом поле первичные ионы, образуемые излучением, приобретают энергию, достаточную для того, чтобы вторичные ионы, возникающие в результате соударений, перевести в возбужденное состояние. Эти ионы испускают фотоны в ультрафиолетовой области спектра. Возникает лавинообразный процесс.

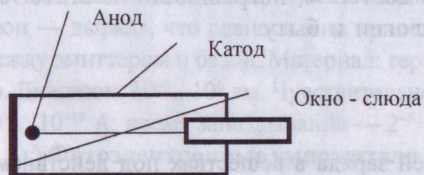


Рис. П.11. Конструкция счётчика радиоактивных частиц

Трубка Гейгера — Мюллера состоит из герметичного баллона с анодом, катодом и окном для восприятия излучения (рис. П.11). Лавинообразный процесс распространяется вдоль нити — анода, расположенного в центре трубки. Это приводит к образованию выходного сигнала, амплитуда которого не зависит от числа первичных ионов, образованных радиоактивной частицей.

Счетчики используют для детектирования частиц и измерения их энергии. Для остановки процесса смешивают инертный газ счетчика с другим газом (галогеном), который поглощает ультрафиолетовое излучение и прекращает распространения лавины.

Материал анода: вольфрам; вольфрам-гафниевый сплав; алюмосиликат бария. Катод: сплав железа с хромом. Окно: слюда. Заполняющий газ: неон — галогеновая смесь, включающая фтор, бром, хлор, йод и астат.

Максимальная мощность дозы (α , β , γ частицы): $10^{-4} \dots 10 \text{ Р/ч}$; мертвое время, в течение которого после начального импульса трубка не чувствительна к другим ионизирующим излучениям: $10 \dots 200 \text{ мкс}$; давление: $1,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$; напряжение $300 \dots 900 \text{ В}$.

в) Сцинтилляционные детекторы

Превращение веществом чувствительного элемента энергии активной частицы в кванты света. Они поступают на фотомножитель, их число увеличивается за счёт испускания динодами вторичного излучения. Материал: сульфид цинка, йодит натрия, йодит цезия, антрацен, толуол и др.

Средняя энергия, необходимая для возбуждения атома веществ, испускающего фотон: $10 \dots 70 \text{ эВ}$; эффективность сцинтиллятора: 28% ; квантовый выход фотокатода: $10 \dots 30\%$. Достоинства: высокий процент регистрируемых частиц и эффективность детектирования γ -излучения.

г) Полупроводниковые детекторы

Детектор — конденсатор с твердым диэлектриком — полупроводником, в котором образуются пары электрон — дырка при воздействии радиоактивного излучения. Материал — высокочистые германий или кремний, легированные литием. Постоянная времени 10^{-9} с ; средняя энергия, необходимая для возбуждения атома полупроводника: $3 \dots 4 \text{ эВ}$. Преимущества: малые размеры, прочность; линейность выходного сигнала.



ЦАПЕНКО

Михаил Петрович

доктор технических наук,
профессор,
заслуженный деятель
науки и техники РСФСР,
академик Международной
академии информатизации,
Почетный академик
Российской академии
метрологии



АЛЕЙНИКОВ

Александр Федорович

доктор технических наук,
заслуженный
изобретатель РФ,
чл.-корр. Международной
академии информатизации
и Российской академии
естественных наук



ГРИДЧИН

Виктор Алексеевич

доктор технических наук,
профессор