

## 5. ДАТЧИКИ

### 5.1. Общий обзор

Датчики преобразуют физические величины, такие как давление, температура, напряжённость магнитного поля и др., в электрические сигналы, которые можно обработать. В зависимости от требований степень сложности выходного сигнала может варьироваться от изменения сопротивления до калиброванного выходного напряжения в цифровой форме.

В датчиках серии КТУ сопротивление изменяется с температурой с высокой воспроизводимостью. Датчики серии КР 200 содержат простой мост сопротивлений, на который подаётся входное напряжение, при этом он выдаёт выходное напряжение, пропорциональное давлению.

С другой стороны, встраивание датчика в интегральную схему открывает возможности обработки сигнала непосредственно в модуле датчика. Таким образом, становится возможным калибровать ИС датчика по заданной выходной характеристике или в диагностических целях переключать её в различные рабочие состояния. ИС датчика способны анализировать сложные входные сигналы и, как результат, переключаться между цифровыми выходными состояниями.

Технически интеграция датчиков в кремниевую технологию уже реализована в целом ряде датчиков. Среди первых интегрированных датчиков оказались датчики магнитного поля. В данном случае используется эффект Холла в кремнии. С развитием технологии микрообработки поверхности кремния датчики давления также были интегрированы в современную КМОП-технологию, что обеспечивает цифровую обработку результатов измерений.

По сравнению с датчиками на основе дискретных компонентов использование «интеллектуальных» датчиков оказалось конкурентоспособным, прежде всего, в автомобильной электронике. При этом предоставляются широкие возможности для оптимизации всей системы с точки зрения обмена данными, точности и контроля неисправностей.

Существуют полупроводниковые датчики различных физических величин для различных областей применения. Следует упомянуть датчики ускорения и скорости вращения, для которых также были проработаны варианты с использованием монолитных интегральных схем. Кремниевый микроробот также относится к полупроводниковым датчикам.

Специальный тип технического датчика — так называемый «датчик отпечатков пальцев», о котором более подробно будет рассказано в главе 8.

### 5.2. Датчики магнитного поля

#### 5.2.1. Дискретные датчики Холла

##### *Основы функционирования*

Эффект Холла, названный в 1879 году в честь Эдвина Холла, является результатом действия силы Лоренца на электроны, которые движутся в поперечном магнитном поле. На **Рис. 5.1, а** представлен ток в среде без магнитного поля. Можно видеть, что точки постоянного электрического поля располагаются вдоль прямой линии, перпендикулярной направлению протекания тока. На **Рис. 5.1, б** показано протекание тока в среде в условиях магнитного поля, направленного под прямым углом к элементу Холла.

Сила Лоренца, действующая на движущиеся электроны, определяется соотношением:

$$\vec{F} = -q \cdot \left( \vec{v} \times \vec{B} \right),$$

где  $q$  — заряд электрона,  
 $v$  — скорость электронов,  
 $B$  — магнитная индукция.

Сила Лоренца перпендикулярна как направлению протекания тока, так и магнитному полю. Следствием этого является возникновение электрического поля поперёк полупроводника, что соответствует напряжению, которое называется напряжением Холла.

При приложении магнитного поля углы между эквипотенциальными линиями (пун-

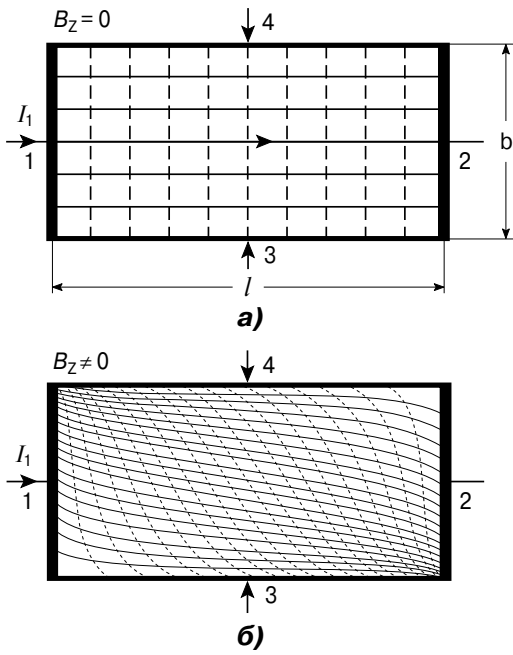


Рис. 5.1. Эквипотенциальные линии протекания тока в отсутствие поперечного магнитного поля (а) и в условиях поперечного магнитного поля (б).

ктивные линии на Рис. 5.1) и линиями протекания тока изменяются. Угол является функцией подвижности электронов  $\mu$  и, таким образом, функцией дрейфовой скорости электронов. Для большинства полупроводников  $\mu$  настолько мала, что эффект Холла не имеет практического значения. В то же время есть и ряд исключений в случае таких полупроводников, как кремний, германий и, в особенности, соединений  $A^{III}B^V$ , таких как арсенид галлия и антимонид индия.

**Конструкция датчиков Холла**

На Рис. 5.2 показано схематическое представление принципа работы датчика. Полосковая пластина из подходящего материала толщиной  $d$ , длиной  $l$  и шириной  $b$  проводит ток  $I_1$  в продольном направлении и подвергается воздействию магнитного поля  $B_z$ , перпендикулярного пластине. В этом случае между точками 3 и 4 возникает разность потенциалов, которую называют напряжением Холла  $V_{20}$ . Величина этого напряжения определяется выражением:

$$V_{20} = \frac{R_H}{d} \cdot I_1 \cdot B_z \cdot G,$$

где  $R_H$  — константа Холла полупроводника.

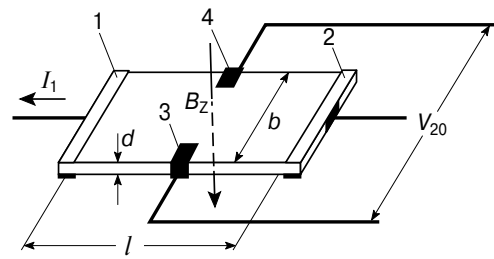


Рис. 5.2. Иллюстрация принципа работы датчика Холла.

Влияние токовых контактов и контактов, с которых снимается разность потенциалов, учитывается с помощью геометрического коэффициента  $G$ . В идеальном случае точечных контактов  $G$  равнялось бы 1. Однако из-за конечных размеров контактов на практике величина  $G$  составляет промежуточное значение между 0 и 1.

Ток вводится и выводится через контакты 1 и 2, а напряжение Холла измеряется между точками 3 и 4. Эффективная площадь датчика Холла ограничивается концами электродов. За счёт изменения размеров и геометрии датчики могут быть оптимизированы для выполнения различных функций. На Рис. 5.3, а...в приведены три наиболее распространённые формы датчиков.

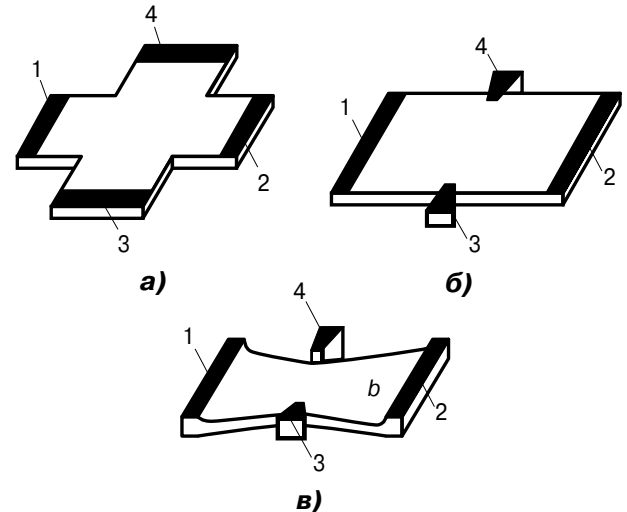
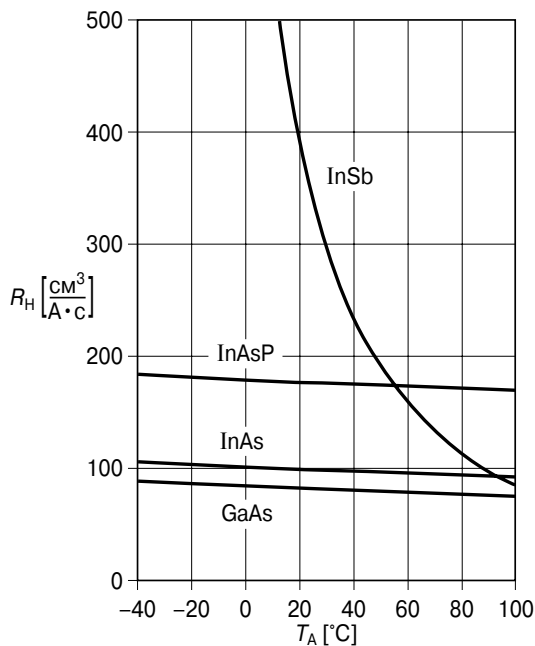


Рис. 5.3. Самые распространённые формы датчиков Холла: а — крестообразный симметричный датчик с высокой чувствительностью к магнитному полю; б — прямоугольный датчик с большим напряжением Холла; в — датчик с геометрией бабочки, который благодаря фиксации тока обладает высокой чувствительностью к магнитным полям.

### Концепции и основные технические данные

#### Номинальный ток $I_{IN}$

Номинальный ток устанавливается на таком уровне, при котором в нормальных условиях датчик приходит в равновесие с небольшим перегревом в 10...15°C. Влияние температуры на коэффициент Холла и, следовательно, на напряжение Холла показано на **Рис. 5.4**; в спецификациях это влияние определяется значением  $TC_{V_{20}}$ .



**Рис. 5.4.** Температурная зависимость постоянной Холла.

Коэффициент Холла  $R_H$  является константой материала, которая, как видно из **Рис. 5.4**, зависит от температуры. С другой стороны, в определённых пределах данный коэффициент не зависит от амплитуды магнитного поля. Для арсенида галлия этот предел располагается вблизи 1 Тл.

#### Ненагруженное напряжение Холла $V_{20}$ (напряжение разомкнутой цепи)

В спецификациях приводятся значения ненагруженного напряжения Холла, представляющего собой выходное напряжение  $V_{20}$ , которое генерируется между электродами ненагруженного элемента Холла при пропускании номинального тока  $I_{IN}$  и приложении поперечного магнитного поля  $B_z$ .

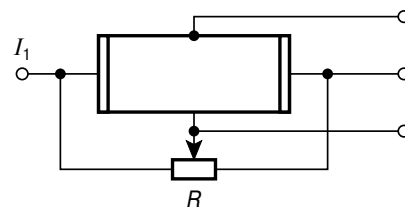
#### Чувствительность к индукции в разомкнутой цепи $K_{BO}$

Чувствительность к магнитной индукции в разомкнутой цепи определяется следующим уравнением:

$$K_{BO} = \frac{V_{20}}{(I_{IN} \cdot B_z)} [B / AT].$$

#### Омическая компонента при постоянном токе

Из-за технологических допусков по воспроизведению геометрии чипа, а также из-за неоднородности материала пластины Холла возникает дополнительное, омическое по природе напряжение, которое при  $B_z = 0$  приводит к дополнительной компоненте, перекрывающей напряжение Холла. Его величина определяется соотношением  $V_{2R0} = I_1 \cdot R_{10}$ . Максимальная величина  $R_{10}$  приводится в спецификациях и она может быть скомпенсирована потенциометром с большим сопротивлением, как это показано на **Рис. 5.5**.



**Рис. 5.5.** Схема компенсации для омической компоненты постоянного тока.

#### Индуктивная компонента $A_2$

Контактные проволоочки к электродам элемента Холла неизбежно образуют петлю, накрывающую область  $A_2$ . Эту петлю даже при тщательной трассировке невозможно свести к нулю. Как следствие, даже при проходящем токе  $I_1 = 0$  плотность флуктуирующего магнитного потока наводит в петле напряжение, которое может быть измерено между холловскими электродами и определяется следующим выражением:

$$V_{10} = A_2 \cdot \frac{dB_z}{dt}.$$

Этот параметр называется статической индуктивной компонентой и выражается как площадь петли в  $см^2$ . Он зависит от

нестационарного магнитного потока, его амплитуды и частоты.

### Температурная зависимость

Температурная зависимость датчика Холла вызывается двумя эффектами: температурной зависимостью коэффициента Холла и, соответственно, ненагруженного напряжения Холла с температурным коэффициентом  $TC_{V20}$ , а также температурной зависимостью удельного сопротивления, т.е. внутреннего сопротивления прибора с температурным коэффициентом  $TC_{R10}$ . Средние значения этих параметров приводятся в спецификациях.

В разомкнутой цепи влияние имеет только  $TC_{V20}$ , а в цепи с нагрузкой следует учитывать как  $TC_{V20}$ , так и  $TC_{R10}$ .

### Допустимая величина тока управления $I_{IM}$

Максимально допустимый ток управления сильно зависит от используемого корпуса и режима работы, т.е. от способа охлаждения и окружающей температуры. В спецификации приводится максимальное значение в спокойной атмосфере (неподвижном воздухе). Если эта величина превышает без соответствующих мер охлаждения, то может произойти перегрев с последующим повреждением датчика.

### Теплопроводность $G_{thc}$ между материалом датчика и корпусом

Для того чтобы иметь возможность рассчитать максимально возможный управляющий ток для определённых методов охлаждения, в спецификации приводятся подробные данные о теплопроводности между датчиком и поверхностью корпуса. Приводимые данные относятся к теплу, рассеиваемому обеими поверхностями корпуса.

### Практические применения

#### Датчики сигналов

Элементы Холла используются как датчики сигналов во множестве применений. В отличие от индуктивных датчиков, их выходной сигнал не зависит от рабочей частоты, поэтому их можно использовать на очень низких частотах вплоть до нулевой частоты. Основной областью применения являются бесщёточные двигатели постоянного тока, в которых датчик Холла возбуж-

дается непосредственно магнитным полем статора. В других применениях датчики Холла возбуждаются брусковыми магнитами или магнитными полосками, содержащими данные, или же токами, протекающими по расположенным рядом проводникам.

### Определение положения

При данном методе может осуществляться просто определение достигнутого положения объекта (переключатель предела), установление факта, что объект занимает какое-либо определённое положение (т.е. определение присутствия объекта), или же датчик может непрерывно сообщать о перемещении объекта с тем, чтобы определять силу, давление, изгиб или ускорение.

В общем случае измерение этого параметра не требует линейности характеристик датчика при условии, что нелинейные характеристики преобразователя (например, диафрагмы для измерения давления) могут быть скомпенсированы или приведены к линейному виду с помощью электронных методов.

### Фронтальный режим

На Рис. 5.6 показан датчик KSY-14, который возбуждается фронтально маленьким магнитом на основе SmCo диаметром 4 мм и высотой 2 мм. В данном случае датчик позиционируется перед полюсом магнита. График показывает зависимость напряжения Холла от воздушного зазора.

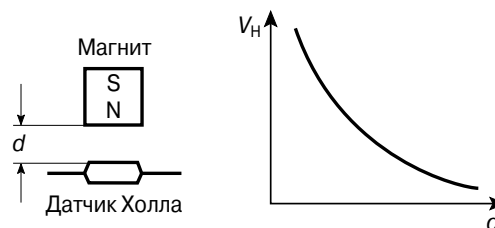


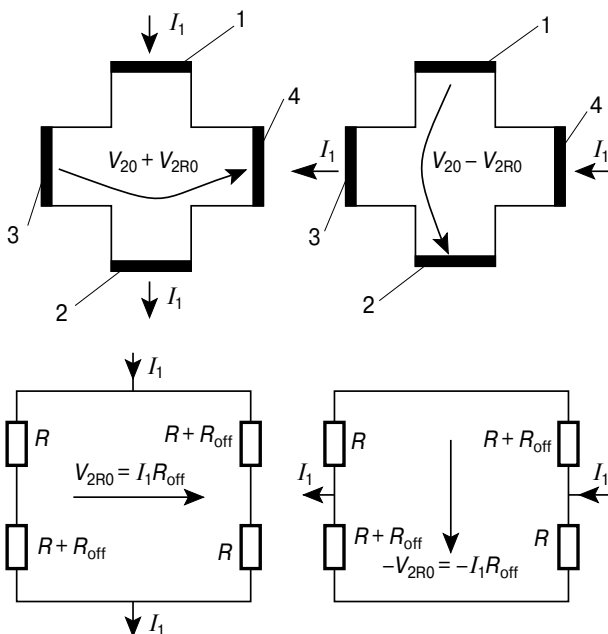
Рис. 5.6. Фронтальный режим для датчика Холла типа KSY-14.

### 5.2.2. Интегральные датчики Холла с заказными ИС (ASIC)

Датчики Холла на дискретных компонентах, описанные в разделе 5.2.1, требуют от пользователя достаточных затрат для реализации последующей обработки сигналов. По этой причине промышленности не-

обходимы, главным образом, датчики, интегрированные с заказными ИС. Эти специализированные ИС (ASIC) предлагают пользователю ряд преимуществ по сравнению с модульным подходом.

- Первым преимуществом является простое устранение сдвига рабочей точки: используя метод так называемого холловского зонда с переменной траекторией тока (SCHP), омическая компонента (сдвиг) может быть выделена из полезного сигнала, пропорционального магнитному полю, и в практических целях адекватно удалена. Данный метод, иллюстрируемый на **Рис. 5.7**, реализуется в симметричных зондах Холла, в которых входные и выходные боковые электроды могут меняться местами. Для этого в течение первой тактовой фазы ток инжектируется в зонд через контакты 1 и 2, и выходное напряжение  $V_{20} + V_{2R0}$  снимается с контактов 3, 4. Во время второй тактовой фазы ток инжектируется в зонд через контакты 3 и 4, а выходное напряжение  $V_{20} - V_{2R0}$  снимается с контактов 1 и 2. Видно, что знак смещения  $V_{2R0}$  при этом изменяется, в то время как знак сигнала  $V_{20}$ , пропорционального магнитному полю, не изменяется. Таким образом, простое усреднение позволяет устранить сдвиг.

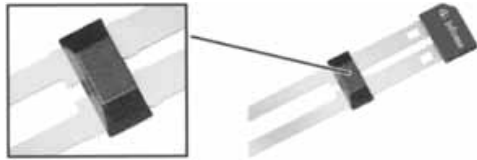


**Рис. 5.7.** Устранение омической компоненты прямого тока с помощью метода SCHP.

Хотя данный принцип был известен давно, его промышленное применение стало возможным с середины 90-х годов в результате успехов аналоговой обработки сигналов с использованием стандартной КМОП-технологии. Благодаря этой технологии оказывается возможным поддерживать магнитный сдвиг всей системы, включая холловский зонд и схему обработки сигнала, на уровне менее 50 мкТл.

- Вторым преимуществом является возможность усиления без смещения: амплитуда выходных сигналов с зонда Холла составляет порядка мВ. Это означает, что сигналы должны быть усилены, по крайней мере, в 1000 раз. Недостатком традиционных усилителей постоянного тока с таким большим коэффициентом усиления является проявление эффекта смещения. Однако в интегральных датчиках Холла с ASIC, использующих метод SCHP, холловский зонд уже работает в переключательном режиме, что позволяет осуществлять обработку сигнала стробируемыми усилителями без эффекта сдвига. В связи с тем, что реализация такой концепции требует опыта в проектировании аналоговых схем, потребителю было бы выгодно, чтобы изготовитель объединил в одном чипе схему обработки сигнала и интегральный зонд Холла.
- Третьим преимуществом данного метода является высокая температурная стабильность: интегральные датчики Холла часто используются в жёстких температурных условиях. Стандартным является диапазон температур от  $-40$  до  $+150^\circ\text{C}$ , а в специальных применениях верхняя граница может достигать  $+210^\circ\text{C}$ . Для минимизации тепловых токов утечки и паразитных ёмкостных петель, через которые шумовые импульсы могут проходить в схему обработки сигнала, все элементы электронной схемы, которые чувствительны к интерференционным эффектам, в особенности зонд Холла, должны быть как можно меньше. Интегральный подход обеспечивает снижение индуктивной компоненты до пренебрежимо малого уровня. Антенный эффект проволочной разводки чипа также существенно слабее по сравнению с аналогичным эффектом дискретной сборки из-за длинных выводов. В случае специ-

альных требований по электромагнитной совместимости, таких как микропробой, имеется возможность интегрировать фильтрующие ёмкости в корпус. Это демонстрируется на **Рис. 5.8** для ABS-датчика типа TLE 4942C в корпусе P-SSO-2-2. Кроме того, проходящие паразитные сигналы сильно ослабляются в кристалле за счёт применения защитных диодов и стабилизированных источников питания. Благодаря встроенной защите на основе стабилитронов, защите от перегрева и короткого замыкания, интегральные датчики Холла ASIC очень легко использовать, при этом они не будут повреждены даже при некорректной установке (например, если будут перепутаны выводы источника питания).



**Рис. 5.8.** В корпус типа P-SSO-2-2 для датчика TLE 4942C встроен фильтрующий конденсатор (деталь на вставке) на выводную рамку ИС.

- Четвёртым преимуществом является калиброванный цифровой выходной сигнал: во время сборки датчика магнитного поля в виде модуля допуски возрастают. Кроме того, источниками магнитного поля являются, как правило, недорогие постоянные магниты, подверженные существенным вариациям. Указанные эффекты делают необходимой калибровку ASIC-датчика после сборки модуля. Для этого ИС датчика содержит ЗУ для дан-

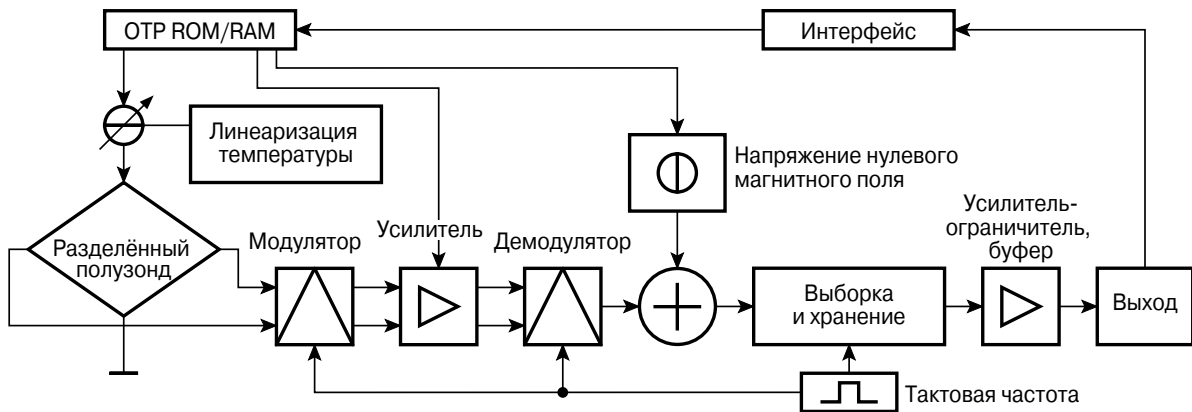
ных калибровки, а также интерфейс для обмена данными во время процедуры калибровки. В этом смысле можно говорить о приборе как об интеллектуальном датчике. Используемое ЗУ, как правило, выполняется в виде предохранителей, как это описано в разделе 5.3.2.

- Если раньше сигнал от дискретного датчика Холла должен был пройти аналоговое усиление с последующей оценкой и калибровкой микропроцессором, то современный ASIC-датчик Холла обеспечивает уже калиброванный цифровой выходной сигнал, который может содержать также информацию по сбоям (таким, как перегрев ИС датчика). Это снижает нагрузку на микропроцессор и распространяет «интеллектуальность» на целую систему, что приводит к более высокой скорости прохождения данных в сочетании с повышением надёжности.

Представителем современных интегральных датчиков Холла является линейный датчик Холла TLE 4990, который будет описан далее. Данный модуль преобразует компоненту магнитного поля, перпендикулярную поверхности чипа, в выходное напряжение  $V_{OUT}$ :

$$V_{OUT} = S \cdot B_Z + V_{ZERO}$$

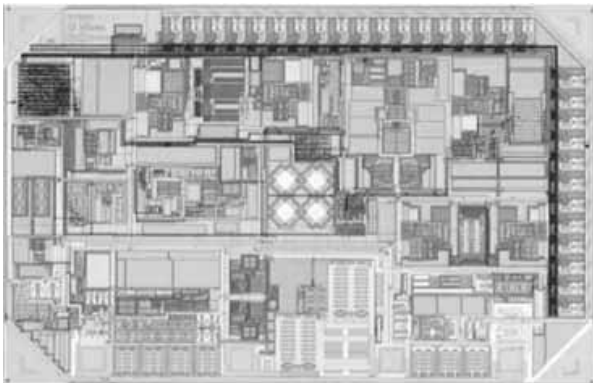
С этой целью для устранения эффекта смещения зонда Холла используется метод SCHP, рассмотренный выше (**Рис. 5.9**). Затем сигнал усиливается примерно в 5000 раз. Для этого модулю требуются 30 бит: 13 бит используются для установки магнитной чувствительности  $S$  в диапазоне 15...180 мВ/мТл, 11 бит обеспечивают установку выходного напряжения при 0 мТл ( $= V_{ZERO}$ ).



**Рис. 5.9.** Блок-схема интегрального линейного датчика Холла.

Кроме того, температурный коэффициент магнитной чувствительности может быть задан таким образом, чтобы он, например, компенсировал тепловые эффекты постоянных магнитов, используемых в модуле.

Особенностями этого модуля являются его высокое разрешение, линейность и слабый дрейф выходного напряжения при изменении температуры и в процессе наработки. В данном случае аналоговый выходной сигнал прямо пропорционален рабочему напряжению. Это особенно важно, если выходное напряжение  $V_{OUT}$  оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с рабочим напряжением датчика Холла в качестве опорной меры. Если рабочее напряжение изменяется на 10% по сравнению с номинальным значением 5 В, то ASIC выдаёт выходное напряжение, которое также изменяется на 10%. В то же время цифровой код АЦП остаётся неизменным, поскольку он рассчитывается как отношение выходного напряжения датчика и опорного напряжения.



**Рис. 5.10.** Фотография кристалла ИС линейного датчика Холла типа TLE 4990.

На **Рис. 5.10** показана фотография кристалла микросхемы TLE 4990. В середине кристалла можно увидеть 4 зонда Холла. Вдоль правого и верхнего краёв кристалла расположены 30 полостных предохранительных ячеек. Вдоль нижнего края располагаются 4 контактные площадки для подсоединения к выводам модуля: TST, OUT, GND, VDD (слева направо), при этом вывод TST используется только для тестирования. Модуль TLE 4990 поставляется в корпусе типа P-SSO-4-1. Серия корпусов типа P-SSO-4-1 была разработана компанией Infineon специально для датчиков магнитного поля таким образом, чтобы их можно

было использовать в магнитных цепях с воздушным зазором всего 1.1 мм.

### 5.2.3. Датчики на основе гигантского магниторезистивного эффекта (GMR)

Магнитные датчики прекрасно подходят для всех видов бесконтактного детектирования данных положения, зазоров, скоростей, а также детектирования вращения, бесконтактного измерения токов и мощности. При реализации этих функций гарантируется работа датчиков даже в жёстких условиях окружающей среды, связанных с наличием грязи, абразивной крошки и высокой температурой. Это обеспечивает широкое использование датчиков магнитного поля особенно в автомобильных и промышленных применениях, а также обуславливает постоянное расширение номенклатуры датчиков различных типов на рынке.

Датчики на основе гигантского магниторезистивного эффекта (GMR) устраняют слабое место обычных магниторезисторов и датчиков Холла, связанное с их высокой чувствительностью к флуктуациям воздушного зазора. В связи с тем, что все традиционные магнитные датчики реагируют на силу магнитного поля, даже малейшие изменения зазора между магнитом и датчиком будут приводить к существенным изменениям сигнала, чего можно избежать за счёт существенных затрат и усложнения обработки сигнала.

В отличие от них, GMR-датчики, которые компания Infineon специально разработала для применений, связанных с детектированием положения, измеряют только направление внешнего поля независимо от его интенсивности, благодаря чему допускаются достаточно большие зазоры и установочные допуски. В результате процедура сборки у пользователя существенно упрощается, и издержки снижаются. При соответствующем возбуждении допустимы воздушные зазоры вплоть до 25 мм, что открывает совершенно новые применения в области магнитного детектирования.

В последующих разделах сначала описываются основы эффекта GMR, конструкция и функционирование GMR-датчика. Затем следуют примеры применения, демонстрирующие разнообразие функций, которые просто и эффективно могут реализовать GMR-датчики.

### Основы гигантского магниторезистивного эффекта

В конце 1980-х годов было обнаружено изменение сопротивления более чем на 50% в магнитном поле при низких температурах в структурах, содержащих очень тонкие слои железа и хрома. Поскольку такие слоистые структуры на основе железа и других магнитных материалов реагируют на магнитное поле (Рис. 5.11), данное явление получило у специалистов название гигантского магниторезистивного эффекта (GMR).

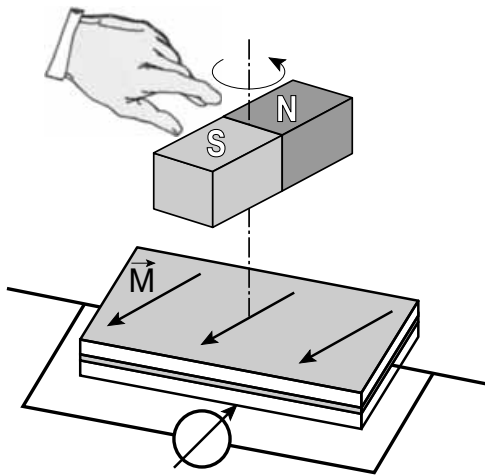


Рис. 5.11. Ориентация внешних слоёв во внешнем магнитном поле.

Толщина отдельных слоёв в структуре составляет несколько нанометров. Немагнитная медь разделяет слои железа и ферромагнитного кобальта (Рис. 5.12). Слои меди настолько тонки, что слои кобальта взаимодействуют с образованием искусственной антиферромагнитной среды (ААР). Внешние слои образуют магнито-мягкое железо, при этом они ориентируются по внешнему магнитному полю, тогда как магнито-жесткий кобальт сохраняет свою постоянную намагниченность.

Спины электронов во внешних слоях также ориентируются по магнитному полю. Средняя длина свободного пробега электронов со спинами параллельно намагниченности в искусственном антиферромагнетике превышает толщину набора слоёв, что приводит лишь к слабым потерям на рассеяние. С другой стороны, электроны с антипараллельной ориентацией спинов дают вклад в возрастание сопротивления, поскольку они в большей степени рассеива-

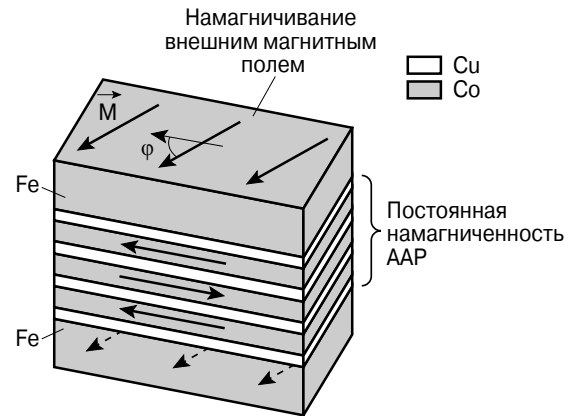


Рис. 5.12. Последовательность слоёв: внешние слои железа, структура искусственного антиферромагнетика (ААР) на основе слоёв меди и кобальта.

ются в слоистой структуре. Если магнитная ориентация магнито-мягких и жестких слоёв одна и та же, то электроны испытывают рассеяние в меньшей степени, и проявление эффекта минимально; если же ориентация полностью противоположна, то сопротивление достигает максимального значения (Рис. 5.13). Эффект GMR не зависит от направления тока; угол между ориентацией намагниченности в магнито-жестких и мягких слоях является единственным фактором, определяющим полное сопротивление системы.

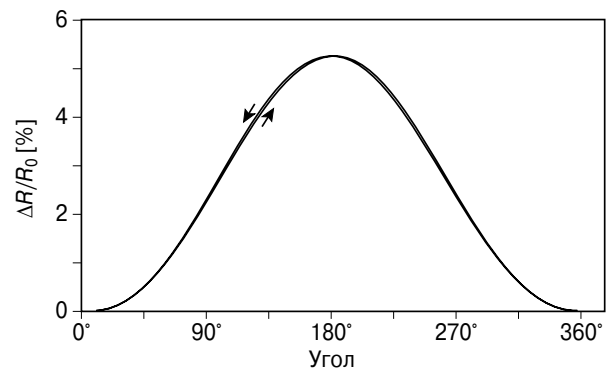


Рис. 5.13. Относительное изменение сопротивления как функция угла между намагниченностью магнито-жестких и мягких слоёв.

В пределах широкого магнитного окна, в котором намагниченность магнито-мягких слоёв вращается с внешним полем, в то время как в магнито-жестких слоях она остаётся неизменной, сопротивление зависит лишь от направления внешнего магнитного поля (режим насыщения).



С увеличением температуры эффективность GMR  $\Delta R/R_0$  падает из-за теплового возбуждения колебаний решётки и спиновых волн, из-за возрастания исходного сопротивления  $R_0$ , а также из-за ослабления общей ориентации спинов. Экспериментально было установлено постоянство температурного коэффициента GMR.

### Конструкция

Ультратонкие слои, обеспечивающие антиферромагнитное взаимодействие, требуют самых современных методов технологии напыления. Система, используемая компанией Infineon, содержит одиннадцать слоёв общей толщиной 25 нм. Магнитные слои кобальта и немагнитные медные слои в качестве прокладок образуют искусственный антиферромагнетик.

Для того чтобы гарантировать номинальное сопротивление величиной более 700 Ом, на планарной стороне вытравливаются токовые дорожки в виде меандра (Рис. 5.14). Изменение вследствие эффекта GMR превышает 4%.

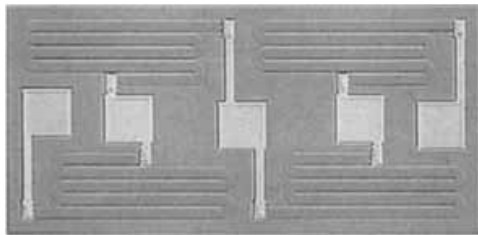


Рис. 5.14. Кристалл мостовой схемы датчика В6 на основе GMR.

Сильное внешнее поле, прикладываемое в процессе изготовления, ориентирует искусственный антиферромагнетик и устанавливает жёсткую намагниченность индивидуальных токовых дорожек. GMR-резисторы могут использоваться и как самостоятельные датчики, и как интегральные мосты (Табл. 5.1).

Полумосты содержат два резистора с антипараллельной намагниченностью, соединённые последовательно. Датчик типа GMR В6 (Рис. 5.15, а) содержит два полумоста, соединённые параллельно и имеющие противоположную ориентацию намагниченности; эти же элементы могут быть соединены и по полной мостовой схеме. Скрещённые полумосты датчика GMR С6 (Рис. 5.15, б) имеют жёсткую намагничен-

Таблица 5.1. Варианты GMR-датчиков

Тип		Ме- анд- ры	Ориента- ция намаг- ниченности		Корпус
S4, S6	Отдельный датчик	1	0°		SOH SMT (MW6)
В6	1 полный мост/ 2 включённых встречно- параллельно полумоста	2 + 2	0° 180°	180° 0°	SMT (MW6)
С6	2 скрещённых полумоста	2 + 2	0° 180°	90° 270°	SMT (MW6)

ность в 90° по отношению друг к другу. Стрелки на рисунке показывают направление внутренней намагниченности.

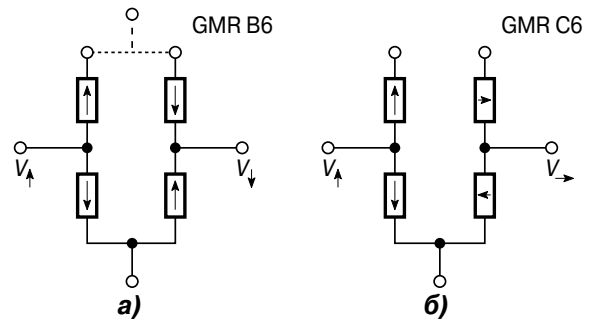


Рис. 5.15. Конфигурация элементов датчика на мостовых кристаллах. GMR В6 (а): 2 встречно-параллельных полумоста или 1 мост; GMR С6 (б): 2 скрещённых полумоста.

### Функционирование

В условиях приложенного внешнего поля сопротивление GMR-резистора изменяется в зависимости от угла между направлениями фиксированной внутренней жёсткой намагниченности и направлением намагниченности мягкого магнитного слоя (Рис. 5.13), позволяя отслеживать магнитное поле с гистерезисом амплитудой менее 2°. Изменение детектируется в виде изменения напряжения отдельного датчика или мостовой схемы. Форма сигнала имеет вид косинусной функции с протяжённой линейной областью.

### Мостовые схемы

В то время как сопротивление отдельных резисторов изменяется в магнитном поле всего на несколько процентов по сравнению со своей полной величиной, с мостовой схе-

мы может быть снято разностное напряжение, что соответствует изменению только сопротивления без какого-либо сдвига. Величины, зарегистрированные в точках Sens 1 и Sens 2 (Рис. 5.16, в), оцениваются непосредственно или после усиления.

Мостовые датчики GMR B6 и GMR C6 содержат по 4 индивидуальных датчика, интегрированных в одном чипе, в конфигурации двух полумостов с различной исходной намагниченностью. Каждый полумост содержит два индивидуальных датчика с антипараллельной ориентацией (Рис. 5.16). Сигнал от полумоста снимается как разность двух фиксированных сопротивлений, и он изменяется симметрично относительно нулевой точки. Различные предустановочные ориентации фиксированной намагниченности индицируются фазовым соотношением сигналов.

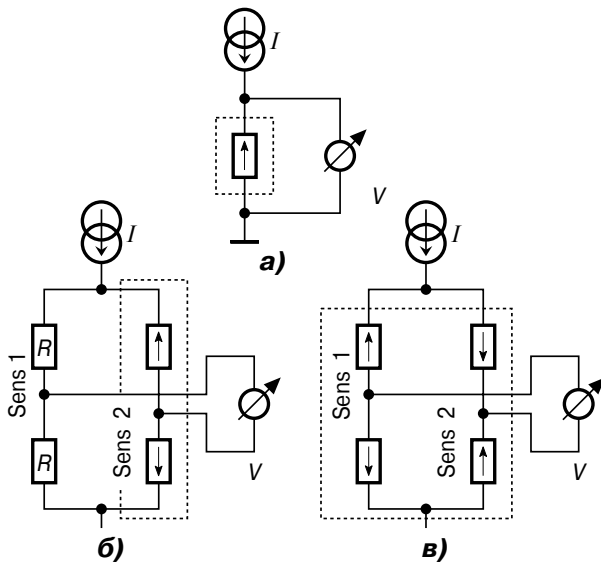


Рис. 5.16. Измерение напряжения моста: а — на отдельном датчике; б — на полумосте с делителем; в — на полном мосте.

Два сигнала от скрещённых полумостов (GMR C6) сдвинуты друг относительно друга на 90°, что позволяет однозначно определить направление магнитного поля по всем ориентациям (нижняя осциллограмма на Рис. 5.17).

Мост, образованный двумя встречно-параллельными полумостами (GMR B6), не требует внешних опорных сопротивлений. Два полумоста вырабатывают противоположенные сигналы так, что их разность обеспечивает двойную амплитуду полного сигнала (верхняя осциллограмма на Рис. 5.17).

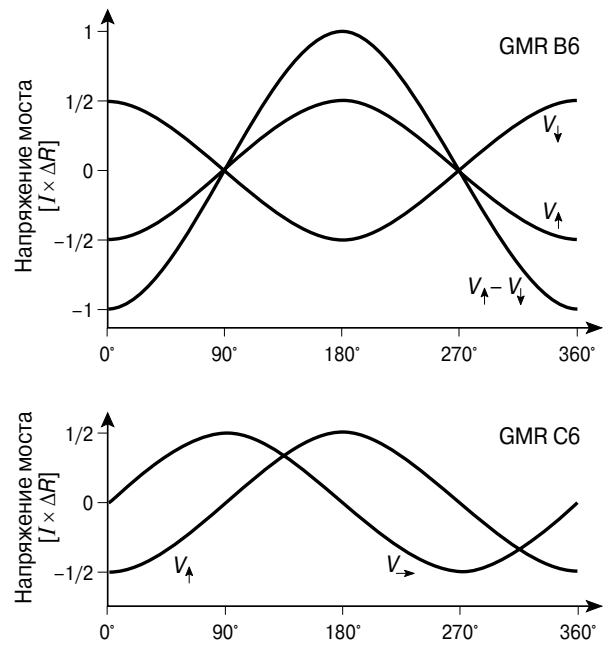


Рис. 5.17. Мостовое напряжение на полумостах ( $V_{\uparrow}$ ,  $V_{\downarrow}$ ,  $V_{\rightarrow}$ ) и на полном мосте ( $V_{\uparrow}$ ,  $-V_{\downarrow}$ ) при вращении внешнего магнитного поля.

### Пространственные характеристики

Максимальный уровень сигнала устанавливается, как только внешнее магнитное поле достигает уровня, достаточного для того, чтобы поддерживать слой мягкой намагниченности в состоянии, обеспечивающем вращение ориентации намагниченности с внешним полем (Рис. 5.18). Рабочий режим заканчивается в точке, где внешнее магнитное поле настолько сильно, что оно начинает влиять на слой жёсткой намагниченности и необратимо уменьшает чувствительность.

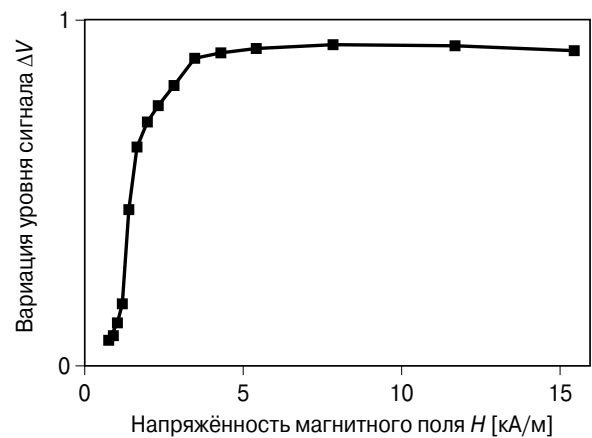


Рис. 5.18. Максимальное изменение уровня сигнала  $\Delta V$  как функция уровня магнитного поля.

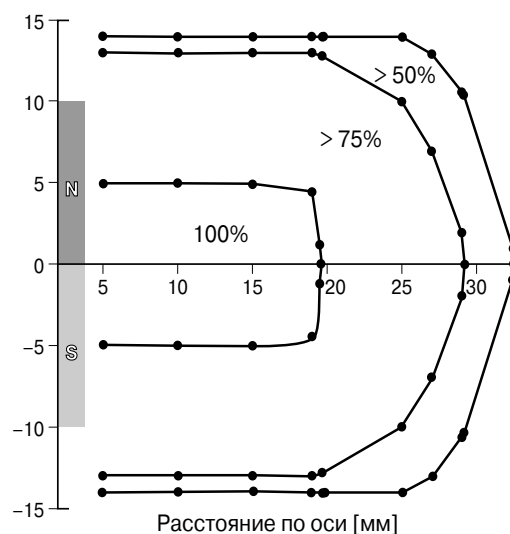
В пределах «магнитного окна» от 5 до 15 кА/м изменение уровня сигнала не зависит от силы поля; GMR-датчик определяет только направление приложенного поля.

Расстояние между магнитом и датчиком не играет никакой роли до тех пор, пока интенсивность поля находится в пределах окна. Например, на **Рис. 5.19** показаны расстояния от магнита на основе самария-кобальта в аксиальном и поперечном направлении, при которых изменение сигнала составляет 100%, 75% и 50% от максимального значения. Допустимая длина воздушного зазора необычно велика для магнитного датчика, что обеспечивает очень большие конструкционные допуски.

### Первичные магнитные элементы

По мере движения датчика или магнита направление магнитного поля, регистрируемое GMR-датчиком, изменяется. В зависимости от характера движения, размера зазора и требуемого разрешения в качестве магнитного источника может использоваться постоянный магнит простой стержневой (диполь на **Рис. 5.11**) или роторной формы.

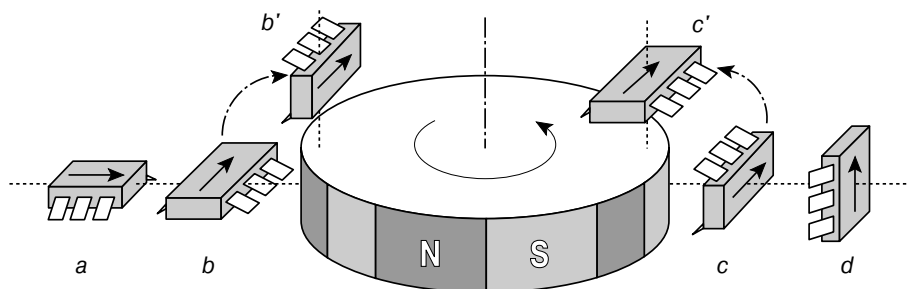
Как правило, магнитные роторы содержат наборы северных и южных полюсов, расположенных по периферии. Одно полное вращение магнитного ротора генерирует полный цикл цифровых сигналов для



**Рис. 5.19.** Относительная эффективность GMR вблизи постоянного магнита размерами  $20 \times 10 \times 5$  мм на основе самария-кобальта.

каждой пары полюсов. Обращение обеспечивает более высокое разрешение.

Расположение датчика по отношению к магнитному ротору задаёт форму выходного сигнала (**Рис. 5.20**, **Табл. 5.2**). Возможны разнообразные формы сигнала, поскольку волновая форма магнитного поля в пространстве изменяется, а датчик регистрирует только ту компоненту поля, которая вращается в плоскости чипа.



**Рис. 5.20.** Варианты ориентации и намагничивания (показаны стрелками) датчика в плоскости магнитного ротора ( $a...d$ ) и по одной стороне в пределах окружности магнитного ротора ( $b', c'$ ).

**Таблица 5.2.** Форма сигнала для различных конфигураций датчика (см. **Рис. 5.20**), намагниченного в направлении стрелки

	Перпендикулярно поверхности	Намагниченность	Примерная форма сигнала
$a$	Параллельно оси вращения	Радиальная	Синусоидальная
$b$		Тангенциальная	Треугольная
$c$	По радиусу	Тангенциальная	Прямоугольная
$d$		Параллельно оси вращения	—
$b'$	Перпендикулярно оси вращения	Тангенциальная	Такая же, как для $b$
$c'$	Параллельно оси вращения	Тангенциальная	Такая же, как для $c$

В зависимости от требований форма сигнала может варьироваться от синусоидальной к треугольной и до последовательности пиков. Прямоугольная форма (Табл. 5.2, с) возникает тогда, когда поле вращается перпендикулярно датчику, а не в плоскости датчика, при этом детектируется только компонента, параллельная намагниченности. Вращение датчика вокруг периметра магнитного ротора и вне плоскости датчика ( $b \rightarrow b'$ ,  $c \rightarrow c'$ ) задаёт форму сигнала.

В отдельных случаях магнитные роторы с другими вариантами намагниченности могут обеспечивать особенно эффективную конфигурацию.

**Применение**

Датчики на основе эффекта GMR, разработанные компанией Infineon, имеют самое широкое применение в области детектирования положения, линейного и вращательного движения. В пределах широкого диапазона напряженности магнитного поля датчик определяет только направление приложенного поля, при этом возможны широкие зазоры и большие допуски регулировки. В зависимости от конкретного применения используются постоянные магниты стержневой либо роторной формы (см. подраздел о первичных магнитных элементах).

Обратите внимание: для того чтобы избежать повреждения жёсткого магнитного слоя, сильные магниты должны располагаться на небольшом расстоянии от GMR-датчиков. Напряжённость магнитного поля в кристалле GMR не должна превышать 15 кА/м.

**Датчик абсолютного угла**

Сопrotивление GMR-датчика изменяется в зависимости от внешнего магнитного поля, что обеспечивает абсолютное измерение угла. Угловой диапазон детектирования и разрешение зависят от первичного магнитного элемента (число пар полюсов), от типа GMR-датчика (скрещённая полумостовая или мостовая конфигурация), а также от специфики обработки сигнала. Датчик типа GMR C6 со скрещёнными полумостами однозначно детектирует вращение простого стержневого магнита в пределах 360° (Рис. 5.21).

Сигналы двух полумостов (Рис. 5.17) смещены по фазе на 90° и могут быть дешифрованы из простого сравнения 4 квадрантов (Рис. 5.22).

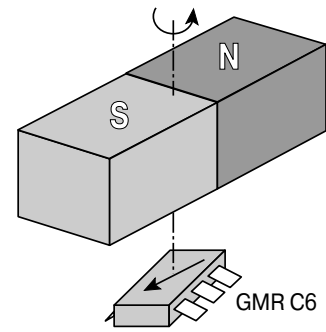


Рис. 5.21. Вращение первичного магнитного элемента над GMR-датчиком.

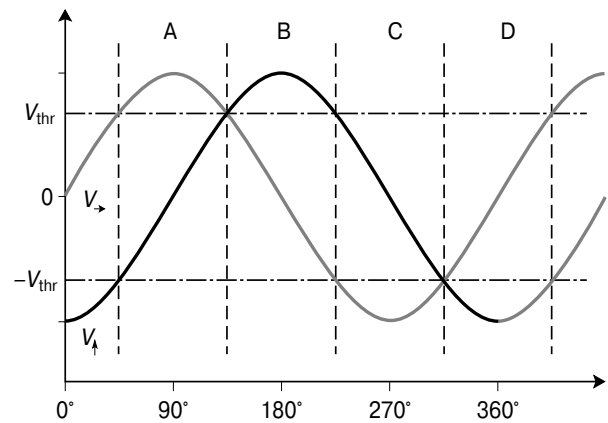


Рис. 5.22. Сигнал в 4 квадрантах от скрещённых полумостов (GMR C6).

В пределах квадранта сигнал с большей крутизной ( $V_{\uparrow}$  — в А и С,  $V_{\rightarrow}$  — в В и D) позволяет определить угол путём линейной интерполяции или лучше из табличных данных (Табл. 5.3).

Таблица 5.3. Обработка сигнала для скрещённых полумостов GMR C6

Квадрант	Условие	Угол (линейная аппроксимация)
A	$V_{\rightarrow} > V_{thr}$	$90^\circ + V_{\uparrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
B	$V_{\uparrow} > V_{thr}$	$180^\circ - V_{\rightarrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
C	$V_{\rightarrow} > V_{thr}$	$270^\circ - V_{\uparrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
D	$V_{\uparrow} > V_{thr}$	$360^\circ + V_{\rightarrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$

При напряжении источника питания  $V_{IN} = 5$  В и эффективности GMR  $\Delta R/R_0 > 4\%$  флуктуация уровня неусиленного сигнала достигает по крайней мере 200 мВ. Точка пересечения двух измерительных кривых определяет пороговое значение

$$V_{thr} = \frac{200 \text{ мВ}}{\sqrt{2}}$$

Угловое разрешение в  $2^\circ$  соответствует 180 точкам в пределах всей окружности или 45 точкам на квадрант, для чего требуется разрешение электрического сигнала

$$\frac{200 \text{ мВ}}{45\sqrt{2}} = 3 \text{ мВ}.$$

Разрешение в 1.5% ограничивается температурным коэффициентом эффекта GMR, который составляет около 0.1%/K. При температурных флуктуациях более  $7^\circ\text{C}$  для достижения требуемого разрешения необходимо использование схем компенсации.

### Варианты

Использование магнитного ротора с  $N$  парами полюсов увеличивает разрешение в  $N$  раз и ограничивает угловой диапазон до  $360^\circ/N$ .

Мостовой датчик типа GMR В6 может однозначно распознавать сигналы только в диапазоне  $180^\circ$ , но выдаёт сигнал вдвое большей амплитуды.

### Типичные применения

К типичным применениям относятся педаль газа, рулевое управление, регулятор положения сидения, потенциометр.

## 5.3. Датчики давления

### 5.3.1. Микромеханика поверхности, датчики давления с цифровым выходом (КР 100)

С учётом возрастающей потребности в интеллектуальной электронике, увеличивается необходимость применения всё более сложных датчиков не только в промышленности, но и в домашнем хозяйстве и автомобильной электронике. В этих областях кремниевые датчики давления стали доминировать в устройствах измерения давления благодаря своим малым размерам и замечательным свойствам кремния как материала. Современные датчики имеют значительный потенциал развития с возможностью интеграции в одном кристалле собственно элементов датчика и электронных схем обработки сигналов (компенсация температуры, аналого-цифровое преобразование и т.д.).

Решающим шагом в этом направлении явилось овладение технологией микромеханики поверхности. В рамках данной техно-

логии полный набор элементов датчика формируется в поверхностной области пластин кремния, что позволяет проводить технологический маршрут с использованием стандартной технологической БиКМОП-линейки. Благодаря этому можно формировать в одном кристалле не только ячейки датчика, но и схемы обработки сигнала и оцифровки. С точки зрения применения это приводит к сокращению числа требуемых компонентов, что положительно отражается на сложности схем и их надёжности.

Датчик давления типа КР 100 (Рис. 5.23) был первым видом такой продукции, серийно освоенной в 1998 году. Этот датчик давления используется в спутниковых системах, в боковых подушках безопасности, а также в дверях автомобилей. Благодаря тому, что выходной сигнал является цифровым, микропроцессор может обмениваться данными непосредственно с датчиком. В случае аварии датчик детектирует волну давления на двери и запускает рутинную процедуру. При использовании определённого алгоритма анализа микропроцессор гарантирует предотвращение некорректного срабатывания подушек безопасности, например, в случае слишком резкого закрывания двери или удара по ней. Решение о надуве подушек безопасности может быть принято значительно быстрее по сигналу давления, чем по сигналу ускорения. Это является критическим преимуществом с точки зрения ограниченных боковых зон сжатия при боковом ударе.

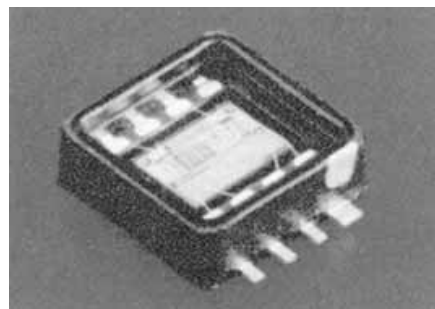
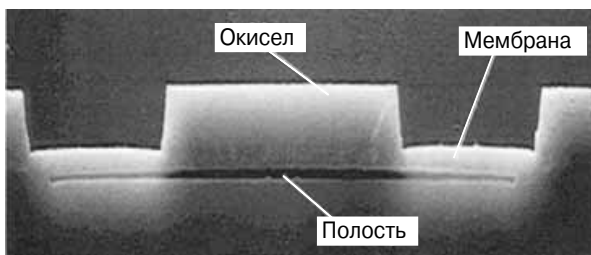


Рис. 5.23. Внешний вид датчика давления типа КР 100 в SMD-корпусе P-DSOF-8.

Работа датчика КР 100 основана на ёмкостном принципе, когда изменение давления окружающей среды приводит к изменению ёмкости кристалла. Для такого преобразования физической величины, над герметично закрытой полостью формируется

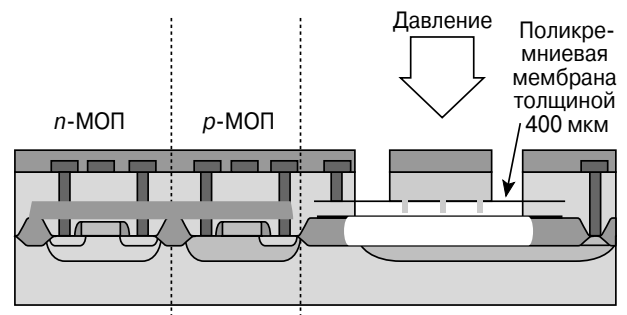
чувствительная к давлению мембрана. Эта мембрана образует верхнюю обкладку конденсатора, в то время как нижний электрод формируется на подложке.

Изготовление такой мембраны (см. **Рис. 5.24**) размерами  $70 \times 70$  мкм и толщиной около 400 мкм является фундаментальной особенностью этого датчика, поскольку, в отличие от традиционных кремниевых датчиков давления, в данном случае используется стандартная 6-дюймовая БИКМОП технологическая линейка. Для реализации поставленной цели полевой окисел формируется над нижним электродом конденсатора (подложка), который на следующем этапе покрывается слоем легированного поликремния, после чего он сначала перфорируется с использованием сухого травления. Через эти поры лежащий ниже окисел (жертвенный слой) вытравливается с использованием травления в плавиковой кислоте. Это приводит к формированию свободно висящей кремниевой мембраны. Окисный купол в центре мембраны усиливает жёсткость мембраны. Благодаря этому лежащая ниже полость герметизируется при требуемом давлении (**Рис. 5.25**). Чувствительность датчика в значительной степени определяется геометрическими параметрами (площадью и толщиной структуры). Поскольку все технологические операции хорошо контролируются, датчики могут быть изготовлены с высокой воспроизводимостью.



**Рис. 5.24.** Изображение поперечного сечения ячейки датчика в сканирующем электронном микроскопе.

При возникновении импульса давления мембрана смещается, что приводит к изменению ёмкости. Для увеличения уровня сигнала формируется матрица из 4 панелей, в каждой из которой 14 мембран соединены параллельно; две из этих панелей предназначены для детектирования давления, а две других используются как опорные. Выходной сигнал формируется как разность



**Рис. 5.25.** Схематическое представление структуры ячейки датчика, соответствующей приведённому на **Рис. 5.24** поперечному сечению.

сигналов, чувствительных к давлению, и сигналов опорных панелей.

Полученный сигнал претерпевает аналого-цифровое преобразование в самом чипе благодаря интеграции АЦП. Это гарантирует как очень хорошее отношение сигнал/шум, так и высокую точность. На модуль поступает внешний тактовый сигнал с возможностью выбора тактовой частоты 4 МГц или 8 МГц. С помощью сигма-дельта-модулятора аналоговый ёмкостной сигнал сначала преобразуется в поток цифровых данных. Фильтр децимации придаёт потоку вид последовательности 16-битных слов. Высокочастотный шум устраняется из сигнала давления с помощью фильтра с верхней граничной частотой 360 Гц. Затем данные записываются в последовательный сдвиговый регистр (SPI — последовательный периферийный интерфейс) со скоростью 7.8 кГц, откуда в конце концов он может быть считан с помощью микропроцессора со скоростью 500 кГц. Последующий сдвиговый регистр может быть использован микропроцессором для определения режима функционирования (штатный или диагностический).

Датчик рассчитан на диапазон давлений 60...130 кПа, значения определяются с точностью в 12 бит.

Датчик работает в диапазоне температур  $-40...+90^\circ\text{C}$  при номинальном рабочем напряжении 5 В и максимальном токе от источника питания 2.5 мА.

Для того чтобы соответствовать жёстким требованиям автомобильной электроники, в датчике используются три различных диагностических режима. Это позволяет осуществлять различные варианты автотестирования датчика и непрерывно проверять его работоспособность. Диагностические

режимы позволяют проверять мембранные матрицы, полное прохождение сигнала или только цифровую секцию.

При проверке секции полного сигнала вместо считывания сигнала детекторной ёмкости по сигнальному каналу считывается сигнал с фиксированной ёмкости, интегрированной в кристалле. Поскольку эта ёмкость не зависит от давления при адекватной работе электроники, устройство выдаст на выход определённый цифровой сигнал.

При проверке цифровой секции генерируются определённые цифровые коды, которые проходят цифровой фильтр децимации. Появляющиеся на выходе 16-битные слова должны быть идентичны словам, предписанным в спецификации.

При проверке мембранных матриц устанавливается определённая величина разбаланса сигналов между мембранами датчика и опорными мембранами, специфичная для каждого датчика. Этот разбаланс может быть считан и сохранён. Любое изменение разбаланса свидетельствует о возможном механическом повреждении мембраны.

Используя указанные диагностические режимы, можно контролировать правильное функционирование датчика во время работы, например в случае модуля боковых подушек безопасности, когда ключ зажигания уже повернут. Кроме того, путём контроля бита чётности может быть проверено прохождение данных.

Для того чтобы сборка датчика была максимально экономичной, был разработан специальный SMD-корпус. Этот пластмассовый корпус типа P-DSOF8-1 имеет 8 выводов и открыт с верхней стороны. После посадки чипа и его проволочной разводки он покрывается силикагелем. Внешнее давление передаётся на поверхность датчика через этот гель. Кроме того, покрытие защищает кристалл от влияния внешней среды.

Этот корпус предназначен для автоматической установки на печатные платы, что является его принципиальным (с точки зрения стоимости) преимуществом по сравнению с традиционными корпусами.

### 5.3.2. Датчик давления с аналоговым выходом (КР 120)

В настоящее время в большинстве применений используются датчики с аналоговым выходом, например, когда на выходе

датчика вырабатывается сигнал, пропорциональный давлению. К их числу относится и датчик типа КР 120, используемый, в частности, в системах управления двигателем. В рассматриваемом случае детектируется как давление окружающей среды (Barometric Air Pressure — ВАР), так и внутреннее давление (Manifold Air Pressure — МАР). Для расчёта оптимального количества горючего во время передвижения необходимо точно знать отношение этих двух параметров.

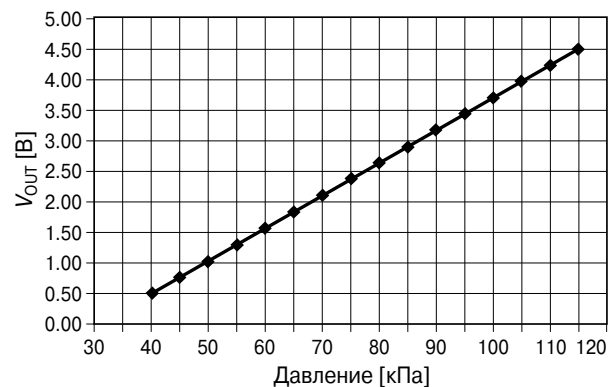


Рис. 5.26. Выходная характеристика датчика типа КР 100.

Такое использование датчика требует прецизионной калибровки выходного сигнала, который пропорционален доминирующему давлению (Рис. 5.26). Сдвиг, чувствительность и линейность ячеек датчика варьируются вследствие производственных разбросов, в связи с чем необходимо калибровать каждый датчик (в качестве иллюстрации см. Рис. 5.27).

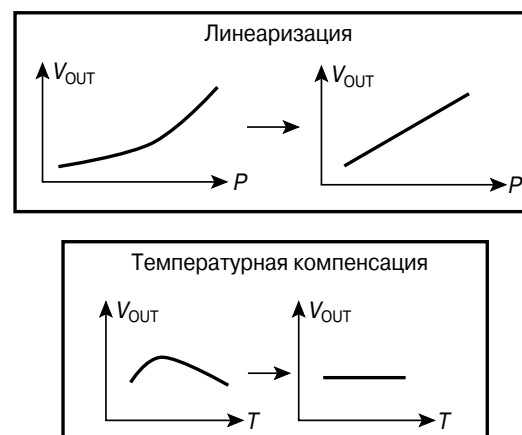


Рис. 5.27. Линеаризация и температурная компенсация.

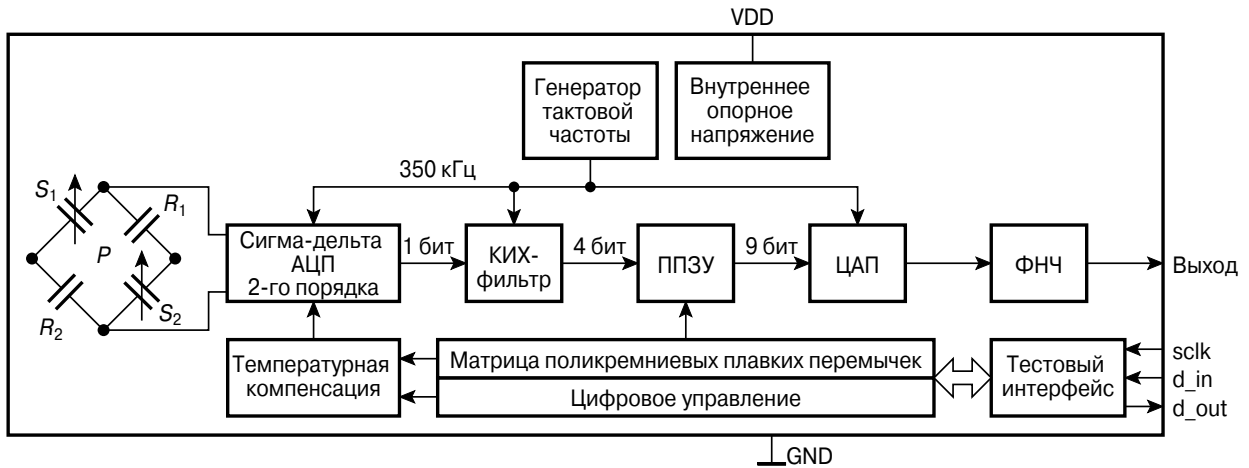


Рис. 5.28. Тракт сигнала датчика давления с аналоговым выходом.

С целью такой калибровки производитель проводит измерения при различных давлениях и температурах. На основе проведённых измерений определяются параметры каждого датчика, которые затем сам прибор использует в процессе функционирования для «расчёта» выходного напряжения, связанного с измеренным давлением.

Это осуществляется либо подсоединением ёмкостей к схеме (например, для компенсации сдвига или температурной зависимости) или в случае линеаризации характеристики за счёт обращения к табличным данным. Параметры, необходимые для данной процедуры, определённые в результате калибровки, записываются в чип через цифровой интерфейс и хранятся в ППЗУ датчика. После того как данные были записаны в ППЗУ, тестовые параметры для анализа датчика также могут быть введены через этот интерфейс.

Архитектура чипа КР 120 аналогична архитектуре датчика КР 100, предназначенного для контроля боковой подушки безопасности (Рис. 5.28). И вновь ячейки датчика, работающие на ёмкостном принципе (ёмкость  $C_S$ ), соединяются по мостовой схеме вместе с опорными ёмкостями, нечувствительными к давлению ( $C_R$ ). При приложении напряжения  $V_{ref}$  возникает заряд  $(C_S - C_R) \cdot V_{ref}$  на входе сигма-дельта-преобразователя.

Для компенсации сдвига и температурных зависимостей сдвига и чувствительности, в нижнюю часть схемы вводятся конденсаторы (на рисунке не показаны). Изменения заряда (как суммы зарядов, приходящих вместе к узлу схемы), преобразуются в

4-битные цифровые сигналы с помощью сигма-дельта-модулятора и последующего фильтра децимации. Этот сигнал корректируется по сдвигу и является уже температурно компенсированным. С помощью параметров из таблицы линеаризации, хранящихся в ППЗУ, генерируется программируемая характеристика, и, наконец, поток данных преобразуется в аналоговый сигнал.

Конструктивно ППЗУ датчика состоит из так называемых полостных плавких перемычек (Рис. 5.29). Они представляют собой

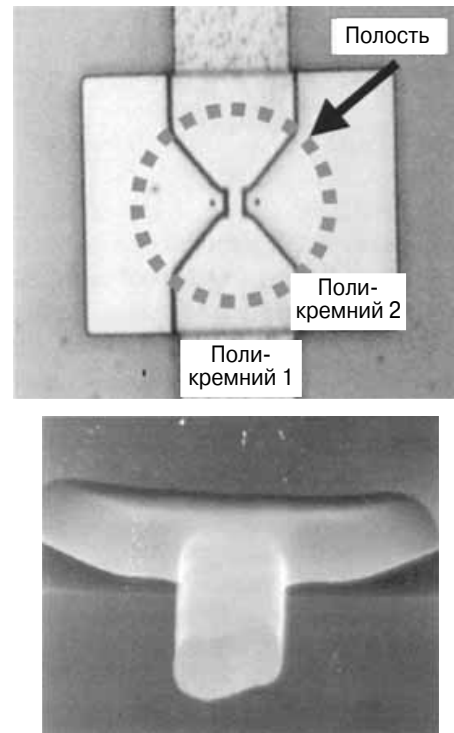


Рис. 5.29. Фотография полостного предохранителя.



поликремниевые проводящие дорожки, проходящие через закрытые полости. Эти полостные плавкие переключатели содержат суженную область и в значительной степени термоизолированы в полости. Короткого токового импульса (как правило, 50 мА, 10 мс) достаточно для плавления предохранителя и, таким образом, для изменения битового состояния. В отличие от обычной лазерной подгонки такая малая мощность позволяет программировать датчики прямо через выводы даже после того, как они были собраны в корпусе. В свою очередь, это обеспечивает увеличение точности прибора, поскольку сборка обычно приводит к малым, но ощутимым изменениям рабочей характеристики. Другим дополнительным преимуществом данного типа ЗУ по сравнению со стандартными СППЗУ является высокая надёжность и теплостойкость.

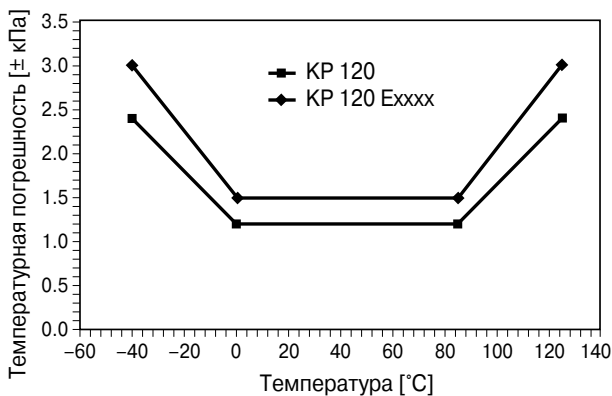


Рис. 5.30. Кривая температурной погрешности KP 120.

Серия датчиков KP 120 обладает особенно высокой точностью (Рис. 5.30). Их ха-

рактеристическая кривая может быть запрограммирована на диапазон 40...115 кПа (0.4...1.15 бар). Они монтируются в тот же самый корпус, что и KP 110, и могут работать при температуре вплоть до +125°C.

### 5.3.3. Пьезорезистивный датчик давления в SMD-корпусе (KP 200)

В дешёвом SMD-корпусе предлагаются также пьезорезистивные датчики давления, хорошо показавшие себя в наиболее требовательных промышленных применениях.

В отличие от ёмкостных датчиков, пьезорезистивные датчики давления выдают большой первичный сигнал. Пьезорезистивный эффект (изменение электрического сопротивления вследствие механического напряжения) сильно проявляется в кремнии. В связи с этим он используется в большинстве современных полупроводниковых датчиков давления. Физические свойства монокристаллического кремния дают существенное преимущество, поскольку этот материал не обладает усталостью вплоть до точки раскалывания. Благодаря своей точности и долговременной стабильности датчики давления данного типа (серия КРУ компании Infineon) используются, в основном, в промышленной метрологии.

В отличие от поверхностной микромеханики, в случае объёмной микромеханики пластина Si протравливается с тыльной стороны (Рис. 5.31). В результате формируются мембраны монокристаллического кремния. В зависимости от диапазона давлений, чувствительности и сопротивления раскалыванию оптимизируется выбор толщины и диаметра мембраны. В типичном случае мемб-

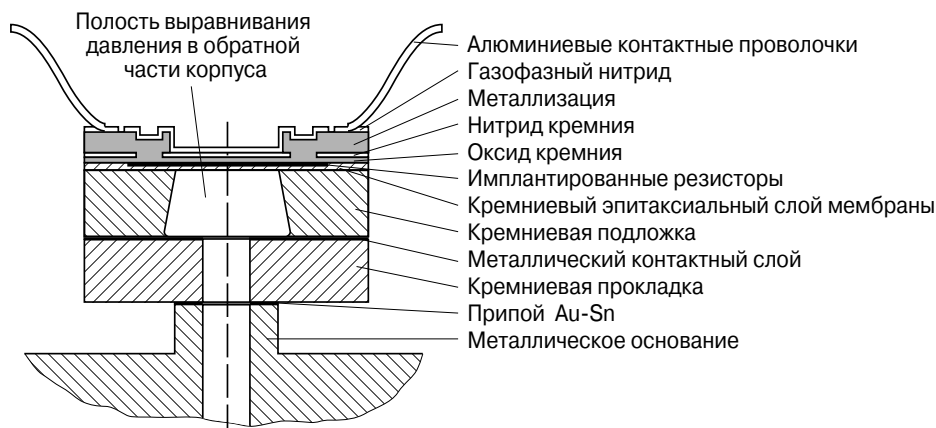


Рис. 5.31. Конструкция пьезорезистивного датчика давления.

раны имеют толщину 20 мкм при диаметре 1.5 мм. Под давлением мембрана слегка изгибается. Пьезорезисторы, встроенные в мембрану, чувствуют механическое напряжение, что приводит к изменению сопротивления. Резисторы формируют с помощью стандартной биполярной технологии, при этом для защиты от влияния окружающей среды (например, электрических зарядов) на них наносятся пассивирующие слои. Мост Уитстона из четырёх пьезорезисторов выдаёт линейный выходной сигнал. При номинальном давлении и напряжении источника питания 5 В типичный выходной сигнал имеет амплитуду 100...200 мВ.

Во избежание нежелательного влияния корпуса детекторный чип монтируется на чипе подложки с герметичным уплотнением по технологии сцепления подложек с использованием Au/Si. Это позволяет поддерживать погрешности, возникающие за счёт изменения температуры и из-за гистерезиса, на низком уровне. Для изготовления датчиков относительного давления в подложке чипа вытравливается окно таким образом, чтобы можно было детектировать разность давлений с нижней и верхней сторон мембраны. В датчиках абсолютного давления давление окружающей среды измеряется по сравнению с внутренним опорным вакуумом.

Новая особенность датчика КР 200 — его сборка в корпусе типа P-DSOF-8. Оптимизированная сборка с использованием специальных силиконовых клеев является экономичной и предохраняет от потери качества. Для защиты от механической нагрузки на выводные проволочки датчик покрывается гелем. Кроме того, температурно чувствительный резистор, интегрированный в корпус, обеспечивает очень простую температурную компенсацию с погрешностью в несколько процентов. С этой целью датчик включается в схему с двумя резисторами. Если сопротивление резисторов имеет фиксированную величину (как это требуется для автоматизированной сборки), то можно добиться погрешности около 2% в диапазоне температур  $-20...+60^{\circ}\text{C}$ . Величина сопротивления компенсирующих резисторов может быть подобрана в соответствии с индивидуальными температурными характеристиками датчика, что дополнительно улучшает его температурную компенсацию.

Датчик КР 200 является наиболее дешёвым вариантом прецизионных датчиков давления с большой долговременной стабильностью и предназначен для массового производства и экономических применений. Целевой рынок таких приборов включает в себя товары бытовой техники, например пылесосы (контроль тяги) и стиральные машины (контроль уровня воды).

#### 5.4. Датчики температуры

Как альтернатива металлическим резисторам из никеля и платины широко используются и кремниевые датчики температуры. Они более дешёвы, обеспечивают более высокую чувствительность, а по допускам и воспроизводимости характеристик близко подходят к металлическим датчикам температуры.

Чип так называемого термистора очень прост и, по сути, состоит из кристалла, облучённого нейтронами кремния, с двумя контактами. Базовый материал получают облучением в реакторе нейтронами, что приводит к трансформации части атомов кремния в атомы фосфора. Этот процесс задаёт определённый уровень легирования донорной примесью фосфора. Сопротивление облучённого нейтронами кремния обеспечивает хорошо воспроизводимую температурную характеристику, что используется в базовой серии датчиков типа КТУ. Кремниевый датчик обладает следующими характеристиками:

- диапазон температур от  $-50$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ ;
- сопротивление при  $+25^{\circ}\text{C}$  —  $2\text{ кОм} \pm 2\%$ ;
- долговременная стабильность  $\pm 0.2\%$ ;
- отношение сопротивлений  $R_{(105^{\circ}\text{C})}/R_{(25^{\circ}\text{C})} = 1.67 \pm 1.2\%$ .

В пределах группы с допуском сопротивления  $\pm 2\%$  с помощью измерений могут быть выделены и поставлены подгруппы приборов с допуском  $\pm 0.5\%$ , что обеспечивает погрешность измерений в  $1^{\circ}\text{C}$  без необходимости проведения дополнительных проверок компонентов.

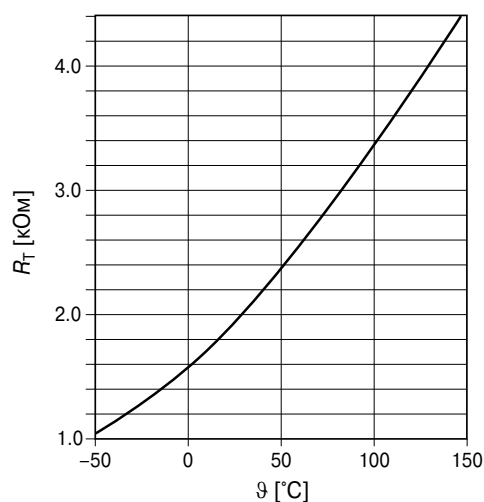
Зависимость величины сопротивления от направления протекания тока, часто вызывающая проблемы с полупроводниковыми датчиками температуры, с помощью технологических мер была сведена к допуску менее 2 Ом.

Таким образом, если необходимо измерять температуру в широком диапазоне с

точностью в несколько десятых долей градуса, то серия кремниевых датчиков типа КТУ является экономичным решением. Элементы датчиков изготавливают в различных типах корпусов (от КТУ10 до КТУ16), и они делятся на группы в зависимости от величины сопротивления (от КТУ10-3 до КТУ10-9). Из-за производственного разброса значение номинального сопротивления может изменяться примерно на  $\pm 30$  Ом при среднем значении 2000 Ом. Могут быть осуществлены поставки датчиков с номиналом допусков 0,5, 1, 2, 5 и 10% при температуре  $+25^\circ\text{C}$ .

На **Рис. 5.32** показана типичная температурная характеристика датчика КТУ10-6.

Примеры применений датчиков температуры будут приведены в главе 9.



**Рис. 5.32.** Типичная характеристика датчика КТУ10-6.