

5092

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ

Методические указания
к лабораторной работе № 3

АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

Рязань 2016

УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 3 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о принципах действия и измерения параметров акустического датчика, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 9. Библиогр.: 2 назв.

Акустический датчик, микрофон

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Ознакомиться с принципами действия и измерения параметров акустического датчика.

Теоретическая часть

Некоторые акустические термины и единицы

Звук – волновой колебательный процесс, происходящий в упругой среде (воздухе, воде и др.) и вызывающий слуховое ощущение.

Звуковое поле – область пространства, в которой распространяются звуковые волны. Звуковое давление – разность между статическим (атмосферным) давлением и давлением в данной точке звукового поля. Различают максимальное (пиковое), минимальное, а также эффективное (среднеквадратическое) значения давления за полный период.

Звуковая волна – процесс переноса энергии механических колебаний в упругой среде. Звук невыраженной высоты – звук, который не может быть определён какой-либо высотой или неправильная последовательность звуковых волн. Звук рассеянный (диффузный) – когда плотность энергии звука равномерна во всём объёме помещения и направленность потока энергии в каждой точке равномерна.

Согласно Международной системе единиц физических величин СИ единицей звукового давления является Паскаль (Па).

Интенсивность звука (прежнее название: сила звука) – количество энергии, проходящее в секунду через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны. Единица интенсивности – ватт на квадратный метр (Вт/м^2).

Звуковая мощность – поток звуковой энергии, проходящий за 1с данную поверхность, перпендикулярно к ней. Единица измерения – ватт (Вт).

Абсолютный порог слышимости – минимальный уровень звукового давления, при котором ещё возникает слуховое ощущение.

Микрофоны: общее рассмотрение

Микрофон представляет собой датчик, преобразующий акустический сигнал в электрический. В основу микрофона могут быть положены различные принципы, в большинстве случаев используется комбинация механоакустического и электромеханического преобразования: движение молекул воздуха приводит в движение упругий элемент (мембрану), что в свою очередь вызывает электрический сигнал.

Широко распространенный микрофон, применяемый в телефонных трубках, основан на необратимом явлении: под действием давления происходит изменение сопротивления контакта частиц угля, заполняющих объем, закрытый мембраной. Микрофон этого типа, хотя и достаточно чувствителен, но не приспособлен для физических измерений, поскольку имеет гистерезис и ограниченную полосу пропускания. Для создания измерительных микрофонов (акустических датчиков) предпочтительнее методы преобразования, основанные на явлениях электромагнитного, электростатического, пьезоэлектрического или магнитострикционного типов.

Классификация акустических датчиков (АкД)

В настоящее время можно выделить две основные группы АкД. Первые из них позволяют измерять акустическое давление, вторые используются для определения градиента давления. Важным преимуществом АкД, предназначенных для измерения градиента давления, является их чувствительность к направлению распространения волны. Если требуется минимальная чувствительность к паразитным звукам и к эффектам отражения, то выделяют еще промежуточную категорию АкД. Эти АкД имеют более выраженную направленность за счет чувствительности ко второму градиенту.

АкД, чувствительные к давлению

В АкД этого типа флуктуации P акустического давления приводят к смещению диафрагмы. Напротив, изменения атмосферного давления не вызывают какого-либо эффекта из-за наличия канала для выравнивания давления.

Подобные датчики содержат три основных элемента (рис. 1): полость, диафрагму и канал для прохода воздуха, которые можно представить соответственно с помощью емкости C , импеданса реактивного типа Z_d и активного сопротивления R .

Эквивалентная схема, построенная на основе аналогии с активным и реактивным сопротивлениями, представлена на рис. 2. Предполагается, что давления, действующие на диафрагму и в отверстии, одинаковы. Значение R можно подобрать таким, чтобы оно всегда было меньше Z_d и постоянная времени RC была больше $0,1c$; этими параметрами определяется нижняя граничная частота, ниже которой ослабление достигает 6 дБ на октаву.

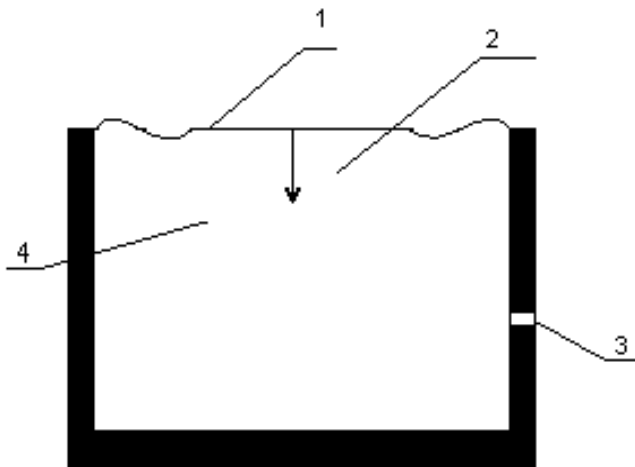


Рис. 1. АкД, чувствительные к давлению

1 – диафрагма, 2 – полость, 3 – капиллярный канал, 4 – механическая связь с преобразователем

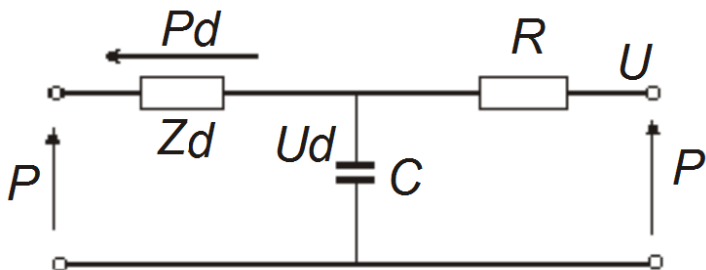


Рис. 2. Эквивалентная схема АкД, чувствительного к давлению

Конденсаторные акустические датчики

Среди всех типов АкД, используемых в настоящее время, датчики на основе конденсаторов считаются наиболее перспективными. На рис. 3 представлена конструкция конденсаторного АкД.

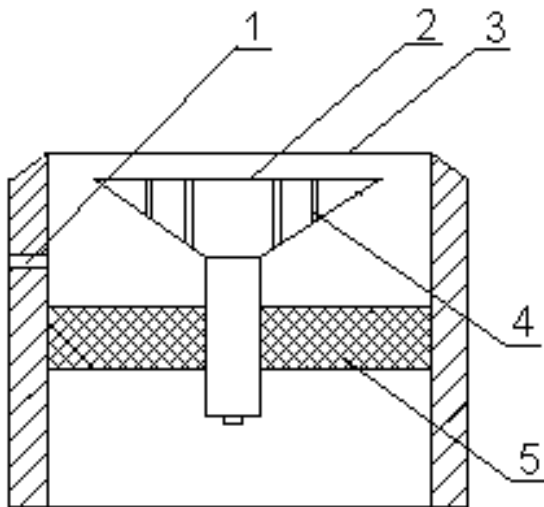


Рис. 3. Конструкция конденсаторного микрофона

1 – капиллярный канал, 2 – фиксированная обкладка, 3 – диафрагма,
4 – демпфирующие отверстия, 5 – изолятор

Измеряемое давление воздействует на гибкую и тонкую (толщиной 10-20 мкм) диафрагму, играющую роль подвижной обкладки в датчике смещения емкостного типа. Другая обкладка зафиксирована и имеет отверстие для демпфирования: при движении диафрагмы воздух протекает через эти отверстия, происходит вязкостная диссипация энергии. Это демпфирование используется для контроля резонансной амплитуды диафрагмы и позволяет скорректировать высокочастотную часть характеристики преобразования в соответствии с объектом измерения.

Капиллярный канал позволяет уравнивать среднее давление по обе стороны мембраны. Он определяет низкочастотный отклик и обеспечивает защиту по отношению к колебаниям атмосферного давления.

В зависимости от типа мембраны различают три типа емкостных АқД: измерительные АқД с использованием внешнего напряжения питания, измерительные электретные датчики и бытовые электретные микрофоны.

В первых двух типах используются предварительно напряженные металлические пластины, а в третьем – мембраны из предварительно поляризованного фторопласта. В АқД второго типа электретная мембрана плотно прилегает к фиксированной обкладке и не играет никакой механической роли.

Если исключить из рассмотрения очень низкие частоты, то поведение конденсаторного датчика характеризуется прежде всего резонансом системы *напряженная мембрана – задняя полость* (объем воздуха позади мембраны мал). В зависимости от величины ω на частотной характеристике можно выделить следующие области (рис.4).

При более высоких частотах теоретически должен существовать антирезонанс параллельного контура, и, кроме того, резонанс последовательного контура, образуемого внешней стороной мембраны и полостью, расположенной позади диафрагмы. При очень низких частотах к

влиянию капиллярного канала (ослабление 6 дБ/октава, зона 1) может добавляться электронный эффект, вызванный непостоянством заряда.

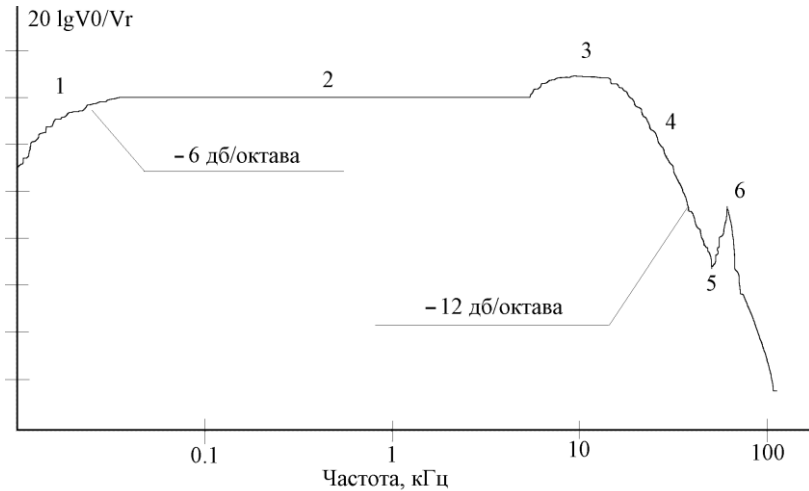


Рис. 4. Частотная характеристика АкД

Электретные микрофоны (акустические датчики)

Способность диэлектриков сохранять наэлектризованное состояние широко используется в целом ряде приложений. Электретные микрофоны являются электростатическими преобразователями, использующими в качестве чувствительного элемента заряженный твердый диэлектрик. На рис. 5 схематично показан поперечный разрез такого АкД, состоящего из металлизированной электретной диафрагмы, расположенной на металлическую плату-основание так, что между ними оставлен воздушный зазор.

В реальной ситуации указанные на рисунке размеры настолько малы, что всеми эффектами, связанными с конечностью поперечного размера можно пренебречь. Металлизированный слой соединен с основанием через нагрузочное сопротивление R . Заряд электрета, плот-

ность которого обозначена δ_l , считается неизменным. Поле этого заряда имеет напряженность E_l .

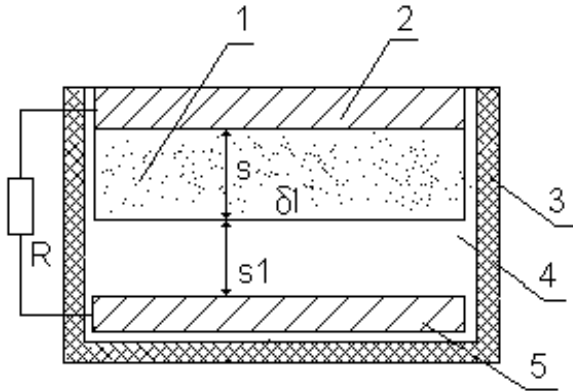


Рис. 5. Конструкция электретного микрофона

1 – диэлектрик, 2 – слой металла, 3 – корпус, 4 – воздушный зазор,
5 – металлический электрод

При падении на диафрагму звуковой волны последняя начинает колебаться с амплитудой s , меняя толщину воздушного зазора s_l . В разомкнутом режиме поле и индуцированные заряды остаются неизменными, при этом можно найти амплитуду выходного напряжения. В качестве диафрагмы используется тефлоновая пленка толщиной от 10 до 25 мкм, одна из поверхностей которой покрыта слоем металла толщиной 500 -1000 Å. Неметаллизированная поверхность электретной фольги обращена к металлической пластине, служащей основанием, причем толщина указанного воздушного зазора (10-30 мкм) контролируется выступами или бугорками на поверхности основания. В качестве заднего электрода используется или металлический диск, или покрытый металлом диэлектрик; при этом коэффициент теплового рас-

ширения этого материала подбирают по возможности близким по значению к коэффициенту материала пленки.

Для уменьшения упругости воздушного слоя и увеличения чувствительности микрофона путем понижения резонансной частоты в пластине, служащей основанием, делают маленькие отверстия, а за ней устраивают большую полость, с которой оказывается связанным воздух в зазоре.

Электретные микрофоны обладают рядом достоинств. Они имеют широкий частотный диапазон, который распространяется на интервал от 0,001 Гц до сотен МГц. Кроме того, они обладают равномерной частотной характеристикой (рис. 6), низким уровнем нелинейных искажений, низкой вибрационной чувствительностью, не подвержены действию электрического поля.

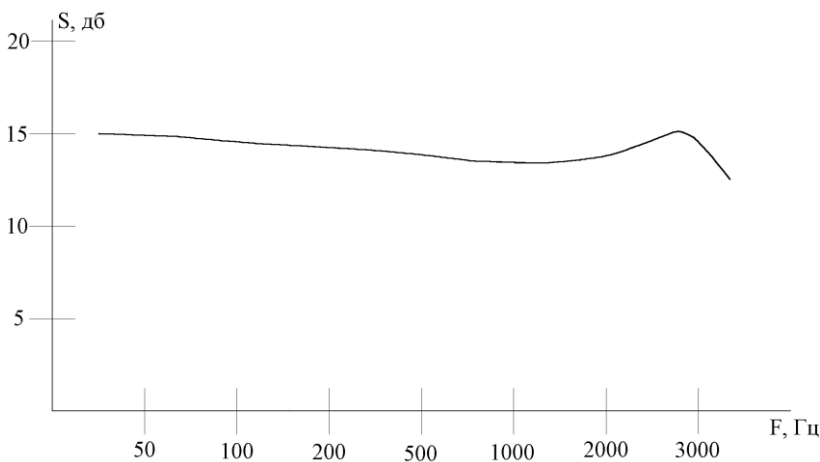


Рис. 6. Частотная характеристика электретного АкД

Электродинамические АкД

В электродинамических АкД движение диафрагмы преобразуется в электрический сигнал в результате перемещения в магнитном поле

проводника, скрепленного с этой диафрагмой. В зависимости от формы используемого проводника электродинамические микрофоны подразделяются на два основных вида: АкД с подвижной катушкой, которые можно отнести скорее к классу микрофонов, чувствительных к давлению, и ленточные АкД, которые близки к микрофонам, чувствительным к градиенту давления. Для ленточного АкД характерна лучшая характеристика преобразования в области низких частот с потерей чувствительности.

Обычно чувствительными к давлению являются АкД с подвижной катушкой (рис. 7).

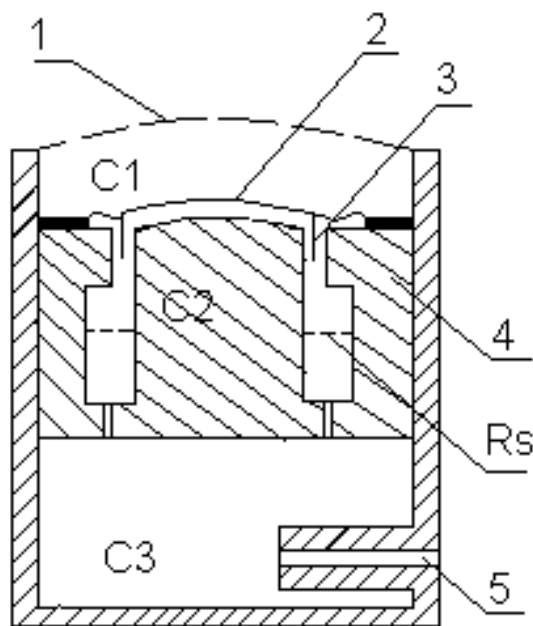


Рис. 7. Конструкция АкД с подвижной катушкой
1 – сетка, 2 – диафрагма, 3 – катушка, 4 – магнит, 5 - трубка

На частотной характеристике такого датчика (рис. 8) можно выделить четыре основные области: область 1 соответствует резонансу зад-

ней полости; область 2 отвечает резонансу диафрагмы, который должен в значительной мере ослабляться сопротивлениями R_s и R_g ; емкость C_3 (рис. 7) соответствует практически закорачиванию цепи; области 3 и 4 (рис. 8) отвечают соответственно резонансу воздуха позади диафрагмы и между диафрагмой и сеткой.

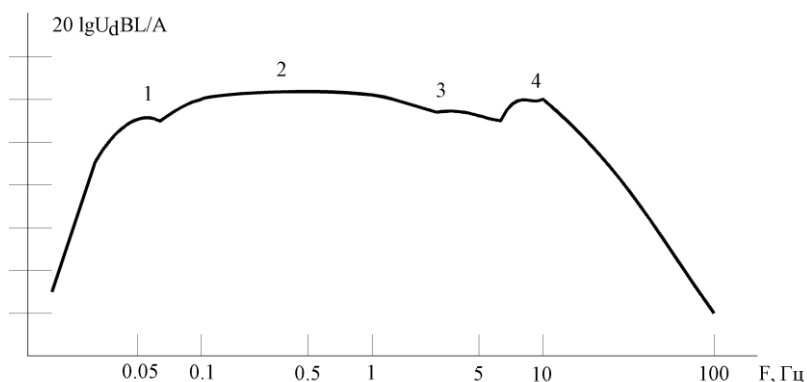


Рис. 8. Частотная характеристика АЧД с подвижной катушкой

Описание лабораторной установки

Измерительная ячейка приведена на рис. 9. Она состоит из динамика 2, на который от генератора подается низкочастотный сигнал; от динамика звуковые колебания попадают на микрофон 3, который прикреплён к подвижной стойке. Изменяя расстояние между микрофоном и динамиком, можно наблюдать различные амплитуды выходного сигнала с помощью осциллографа (или милливольтметра), при этом не меняя частоту и напряжение на генераторе.

Чтобы избежать побочных эффектов, измерительная ячейка экранирована в корпусе 1.

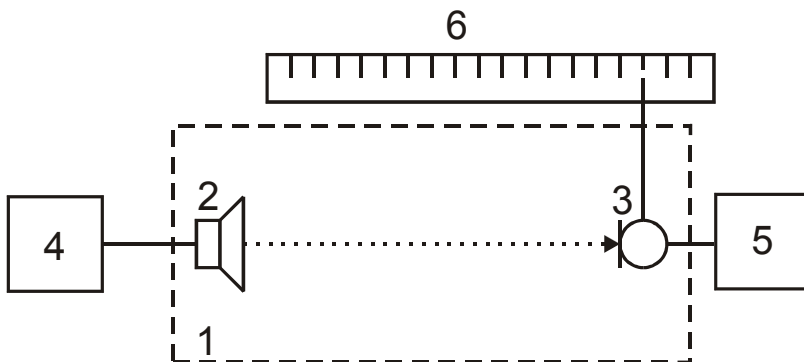


Рис. 9. Схема измерительной ячейки

1 – корпус, 2 – динамик, 3 – микрофон, 4 – генератор звуковой частоты, 5 – осциллограф, 6 – линейка

Порядок выполнения работы

1. Включить тумблеры “Сеть” на генераторе, осциллографе (или милливольтметре) и на блоке питания.
2. На выходе блока питания установить 4,5 В.
3. Установить на генераторе выходное напряжение $U_{gen1}=1,5\text{В}$.
4. На измерительной ячейке вращением ручки установить соответствие между риской 10 подвижной части и 92 шкалы линейки. Данное положение будет соответствовать расстоянию $l_1=25\text{ мм}$ между микрофоном и динамиком.
5. Произвести измерения напряжения на выходе микрофона в диапазоне частот генератора от 50 Гц до 3000 кГц.
6. Изменить напряжение на генераторе, установив его равным $U_{gen2}=1\text{ В}$, и произвести измерения по п. 5.

7. Повторить измерения по пп. 4-6, совместив риску 10 подвижной части с риской 82 на шкале линейки, при этом $l_2 = 35$ мм.

8. Установив на генераторе $f = 400$ Гц и $U_{ген} = 1$ В, произвести измерения напряжения с выхода датчика в интервале расстояний от 25 до 65 мм.

9. Установив на генераторе $U_{ген} = 1,5$ В, повторить п. 8.

10. Повторить пп. 8-9, установив $f = 600$ Гц.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Акустические термины и единицы.
2. Виды акустических датчиков. Микрофоны. Конденсаторные микрофоны. Электретные микрофоны. Электродинамические микрофоны.

Библиографический список

1. Электретный эффект и его применение: учеб. пособие/ В.И. Тимофеев, Н.В. Шемонаев. РГРТА, Рязань, 1996. 40 с.
2. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.

5091

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ

Методические указания
к лабораторной работе № 2

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ

Рязань 2016

УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о свойствах пирозлектрических материалов; градуировке пирозлектрического датчика и об измерении с помощью него температуры нагретого тела, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 8. Библиогр.: 5 назв.

Пирозлектричество, пирометр, датчик температуры

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанозлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Изучение свойств пьезоэлектрических материалов; градуировка пьезоэлектрического датчика и измерение с его помощью температуры нагретого тела.

Краткие теоретические сведения

Физика пьезоэлектричества

Пьезоэлектричество – возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых полярных диэлектриков при их нагревании или охлаждении.

Это явление связано с особенностью кристаллической структуры пьезоэлектриков. На рис. 1, *а* показано образование элементарного диполя в линейном пьезоэлектрике со структурой вюрцита, характерной для соединений типа $A^{II}B^{VI}$. Ионы А и В создают взаимное тетраэдрическое окружение. Из-за искажения тетраэдра ион А располагается ниже его геометрического центра, вследствие чего тетраэдр приобретает элементарный дипольный момент. По этому принципу элементарные диполи образуются и в более сложных структурах, содержащих десятки атомов в элементарной ячейке. Расположение элементарных диполей, цепочками пронизывающих пространство монокристалла (рис. 1, *б*), создаёт поляризацию всего объёма. Количественной мерой этого состояния принято считать спонтанную поляризацию P_s пьезоэлектрика. Основными параметрами пьезоэлектриков являются пьезоэлектрический коэффициент и вольт-ваттная чувствительность.

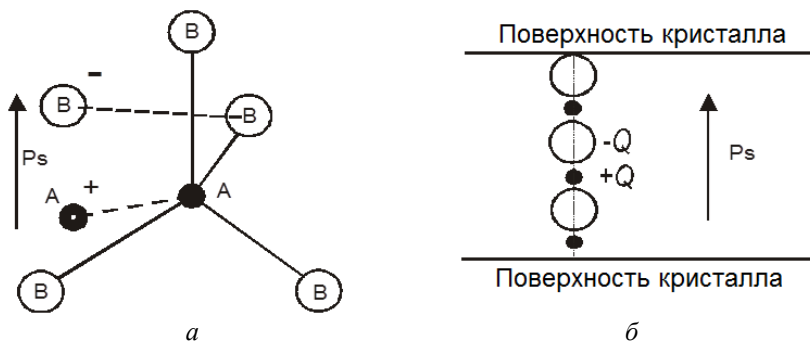


Рис. 1. Образование элементарных диполей в линейном пьезоэлектрике (*а*) и цепочечная модель пьезоэлектрического кристалла (*б*)

Напряжение U , образуемое на поверхности пироэлектрика, пропорционально полной энергии E_T , излучаемой с поверхности тела, которая пропорциональна температуре тела в четвёртой степени по закону Стефана-Больцмана.

$$U \sim E_T \sim T^4. \quad (1)$$

В дополнение к пироэлектрическим свойствам кристаллы пироэлектриков в той или иной степени являются пьезоэлектриками (ферроэлектрические кристаллы), т.е. в них появляются заряды в ответ на механическое напряжение. При температуре, превышающей точку Кюри, у кристаллитов исчезает дипольный момент, и материал теряет свои ферроэлектрические свойства. Можно выделить наиболее важные группы пироэлектриков. К первой группе относятся сегнетоэлектрики. К пироэлектрикам этого класса материалов относится триглицинсульфат (ТГС) и изоморфные ему соединения со специальными добавками для монодоменизации: ниобат и танталат лития (LiTaO_3 , LiNbO_3), тонкие пленки нитрата калия в сегнетофазе, керамические титанат свинца и цирконат-титанат свинца (ЦТС) с различными добавками. Все эти материалы являются нелинейными диэлектриками, в которых пироэлектрический коэффициент, обусловленный первичным пироэффектом, достигает максимума вблизи точки Кюри.

Вторая группа пироэлектриков – это линейные пироэлектрики, в которых направление спонтанной поляризации одинаково по всему объему кристалла и не может быть изменено электрическим полем. Спонтанная поляризация P_s в таких кристаллах не снимается до нуля, как в сегнетоэлектриках. К таким пироэлектрикам относятся соединения типа $A^{II}B^{VI}$ со структурой вюрцита, например, монокристаллы CdS , а также сульфат лития, тетраборат лития и др. В пироэлектрических коэффициентах этих кристаллов наблюдается существенный вклад не только от первичного, но и от вторичного пьезоэффекта.

К третьей группе относятся пленочные полярные полимеры типа ПВДФ, которые весьма перспективны благодаря возможности получения из них тонких, эластичных, прочных пленок. Пироэлектрические свойства пленка приобретает после ее растяжения в 3,5 раза и поляризации при температуре около 130°C в поле порядка 10^6 В/см.

Пироэлектрические приёмники излучения

Пироэлектрический детектор можно представить в виде конденсатора, электрически заряжающегося от потока тепла (рис. 2). Поэтому пироэлектрические устройства можно считать детекторами потока тепла. Их иногда называют динамическими датчиками, что соответствует их физической природе. Когда пироэлектрический кристалл подвергается воздействию потока тепла (например, от источника ИК излучения), его температура повышается, и он также становится источником тепла. Поэтому с противоположной стороны кристалла возникает отток тепла (рис. 2).

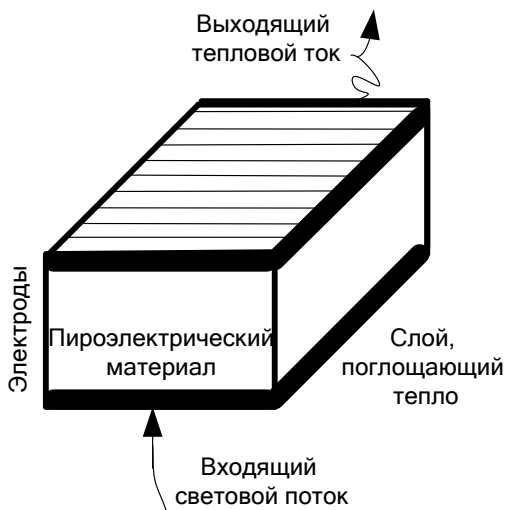


Рис. 2. Тепловые потоки в пироэлектрическом преобразователе

Существует несколько механизмов, объясняющих, почему изменение температуры приводит к возникновению пироэлектричества. Изменение температуры может привести к удлинению или укорачиванию отдельных диполей. На ориентацию диполей может повлиять их возбуждение от повышения температуры. Эти явления получили название первичного пироэлектричества. Существует также вторичное пироэлектричество, которое в упрощенном виде можно считать следствием пьезоэлектрического эффекта. На рис. 2 показан пироэлектрический датчик, имеющий одинаковую температуру T_0 в любой точке объема. Будучи электрически поляризованными, диполи ориентированы так, что одна сторона материала становится положительно заряженной, а вторая -

отрицательно. Однако в стационарных условиях свободные носители зарядов (электроны и дырки) нейтрализуют заряды, возникшие вследствие поляризации, и конденсатор, образованный электродами и пироэлектриком, разряжается, что приводит к появлению нулевого заряда на выходе датчика. Тепло на сенсор может поступать в виде теплового излучения, которое поглощается нижним электродом и распространяется по пироэлектрику, используя механизм теплопроводности. Нижний электрод иногда покрывают теплопоглощающим слоем из черного золота или органического красителя. В результате поглощения тепла нижняя часть сенсора нагревается, что приводит к его расширению, что, в свою очередь, вызывает изгиб датчика. Появившаяся деформация означает возникновение механического напряжения и, следовательно, изменение ориентации диполей. Поскольку материал сенсора также обладает и пьезоэлектрическими свойствами, его напряженное состояние приводит к появлению на электродах противоположных по знаку зарядов. Отсюда видно, что вторичный пироэлектрический эффект можно описать следующей последовательностью событий: тепловое излучение $\rightarrow$ поглощение тепла $\rightarrow$ механическое напряжение, индуцированное теплом $\rightarrow$ электрический заряд.

Дипольный момент P_s объемного пироэлектрического датчика можно найти по выражению:

$$P_s = \mu A h, \quad (2)$$

где μ – дипольный момент на единицу объема, A – площадь датчика, h – его толщина.

Заряд Q_a , собранный на электродах, приводит к появлению в материале следующего дипольного момента:

$$P_{s0} = Q_a h. \quad (3)$$

P_s из (2) должен быть равен P_{s0} из (3), поэтому

$$Q_a = \mu A. \quad (4)$$

Поскольку температура меняется, дипольный момент тоже не остается постоянным, что и приводит к индуцированию заряда на гранях кристалла.

Количество поглощенного тепла можно выразить через изменение дипольного момента, при этом μ зависит как от температуры T_a , так и от приращения тепловой энергии ΔW , поглощенной материалом:

$$\Delta Q_a = A \mu(T_a, \Delta W). \quad (5)$$

На рис. 3 показан пироэлектрический детектор, подсоединенный к нагрузочному резистору R_b , отображающему либо внутреннее

сопротивление утечки, либо входное сопротивление интерфейсной схемы, подключенной к выходу датчика. В правой части рисунка показана эквивалентная электрическая схема такого сенсора. Она состоит из следующих трех компонентов: источника тока (i), приводящего к появлению тепла, емкости детектора C и сопротивления утечки R_b .

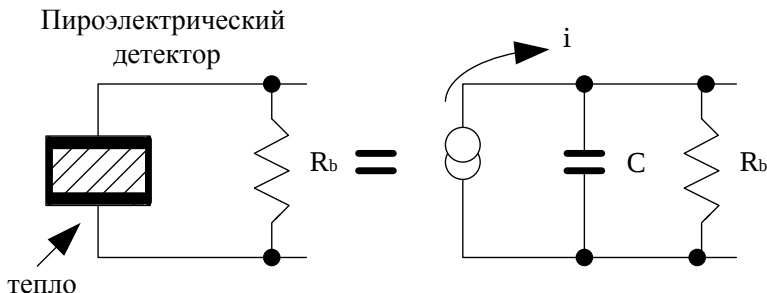


Рис. 3. Пирозлектрический детектор и его эквивалентная схема

Выходным сигналом пирозлектрического детектора в зависимости от конкретного применения может быть либо заряд (ток), либо напряжение. Поскольку пирозлектрический датчик является конденсатором, он будет разряжаться через сопротивление R_b . Величина электрического тока через этот резистор и напряжение на нем соответствуют заряду, индуцированному тепловым потоком. Пирозлектрический эффект характеризуется двумя коэффициентами:

- пирозлектрическим коэффициентом по заряду $P_Q = dP_s/dT$;
- пирозлектрическим коэффициентом по напряжению $P_V = dE/dT$,

где P_s – спонтанная поляризация, E – напряженность электрического поля, а T – температура в Кельвинах. Отношение двух коэффициентов можно выразить через диэлектрическую проницаемость ϵ_r и электрическую постоянную ϵ_0

$$\frac{P_Q}{P_V} = \frac{dP_s}{dE} = \epsilon_r \epsilon_0. \quad (6)$$

Поляризация зависит от температуры, и поэтому оба пирозлектрических коэффициента являются функциями температуры.

При воздействии источника тепла на пирозлектрик, его температура повышается на ΔT , при этом происходят соответствующие изменения заряда и напряжения:

$$\Delta Q = P_Q \Delta T, \Delta V = P_V h \Delta T. \quad (7)$$

Если емкость датчика выразить в следующем виде:

$$C_e = \Delta Q / \Delta V = \varepsilon_i \varepsilon_o A / h, \quad (8)$$

из уравнений можно вывести следующее соотношение:

$$\Delta V = P_Q \Delta T / C_e = P_Q \varepsilon_i \varepsilon_o \Delta T / h. \quad (9)$$

Отсюда видно, что выходное напряжение датчика пропорционально росту температуры и пьезоэлектрическому коэффициенту по заряду и обратно пропорционально его толщине.

Когда пьезоэлектрический чувствительный элемент подвергается воздействию перепада температур, его поляризация (индуцируемый электрический заряд внутри кристалла) также меняется с температурой. На рис. 4 показана типовая зависимость поляризации от температуры. Пьезоэлектрический коэффициент по напряжению P_V соответствует наклону кривой поляризации. Приближаясь к точке Кюри, этот коэффициент резко возрастает, что объясняется исчезновением поляризации и потерей пьезоэлектрических свойств в этом температурном диапазоне. Предполагается, что нелинейность кривой поляризации объясняется увеличением чувствительности датчика с ростом температуры.

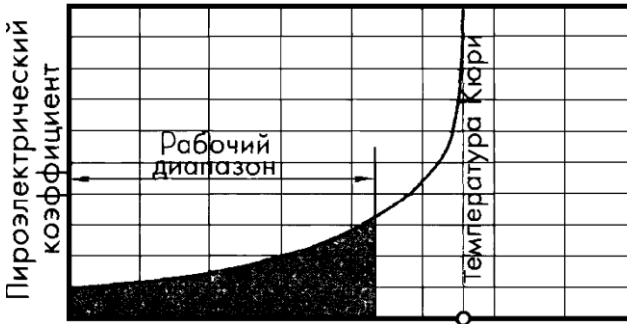


Рис. 4. Поляризация пьезоэлектрического кристалла.

Датчик должен работать и храниться при температурах, значительно меньших точки Кюри

Кристаллы три глицин сульфата (ТГС) являются самыми эффективными пьезоэлектрическими преобразователями. Но до недавнего времени из-за низкой температуры Кюри они редко применялись на практике. К тому же оказалось, что TGS датчики обладают довольно низкой стабильностью даже при температурах ниже точки Кюри. Однако было обнаружено, что при легировании

TGS кристаллов L-аланином в процессе выращивания не только повышается их стабильность, но и несколько увеличивается температура Кюри, которая после этого становится равной 60 °С, и, значит, верхний предел рабочих температур возрастает до уровня 55 °С, достаточного для многих практических применений.

На рис. 5 показаны временные диаграммы, построенные для пирозлектрического датчика при подаче на его вход ступенчатой тепловой функции. Из диаграмм видно, что электрический заряд достигает своего пикового значения практически мгновенно, а затем начинает уменьшаться с тепловой постоянной времени τ_T . Это можно объяснить следующим образом: при нагреве поляризация первоначально происходит в самых поверхностных слоях кристаллического материала толщиной в несколько атомов, температура которых мгновенно повышается до максимального значения. При этом в материалах возникает высокий градиент температур, вызывающий максимальную поляризацию. После чего происходит распространение тепла по всему пирозлектрику, часть которого поглощается его массой пропорционально значению теплоемкости C , а другая часть отдается в окружающую среду через тепловое сопротивление R_T . Все это приводит к уменьшению первоначального заряда. Тепловая постоянная времени определяется произведением теплоемкости датчика на его тепловое сопротивление:

$$\tau_T = CR_T = cAhR_T, \quad (10)$$

где c – удельная теплоемкость чувствительного элемента. Тепловое сопротивление R_T является функцией всех тепловых потерь в окружающую среду через конвекцию, теплопроводность и тепловое излучение. В низкочастотных устройствах желательно использовать датчики с большой тепловой постоянной времени, тогда как в быстродействующих системах (например, в измерителях лазерных импульсов) τ_T должно быть значительно ниже. Для уменьшения τ_T пирозлектрики иногда покрывают теплоотводами (кусочками алюминия или меди).

Предполагается, что на пирозлектрический датчик воздействует источник тепла, обладающий очень высокой теплоемкостью, поэтому его собственной теплоемкостью можно пренебречь. Тогда температура среды T_b во время проведения измерений считается постоянной, в то время как температура датчика является функцией времени и определяется плотностью, удельной теплоемкостью и толщиной детектора. Если входной тепловой поток имеет форму

ступенчатой функции, а датчик работает в воздушной среде, для выходного тока можно записать следующее выражение:

$$i = i_0 e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

где i_0 — пиковое значение тока.

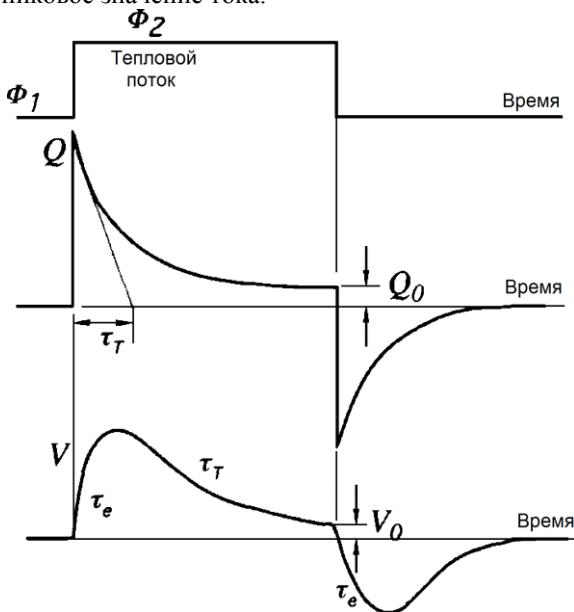


Рис. 5. Реакция пирозлектрического чувствительного элемента на тепловую ступенчатую функцию (значения заряда Q_0 и напряжения V_0 для ясности несколько увеличены)

Из рис. 5 видно, что заряд и напряжение никогда не снижаются до нуля. Это объясняется следующими причинами: пирозлектрик получает тепловую энергию со стороны датчика, за счет которой увеличивается температура материала. Рост температуры приводит к скачку заряда на электродах датчика, который со временем уменьшается с постоянной времени τ_T . Однако датчик имеет еще одну сторону, контактирующую с более холодной средой, через которую происходит потеря тепловой энергии, т.е. охлаждение датчика. Поскольку стороны чувствительного элемента подвергаются воздействию разной температуры, через пирозлектрик постоянно проходит тепловой поток. Электрический ток на выходе пирозлектрического датчика всегда повторяет форму теплового

потока, проходящего через него. Проводя точные измерения, можно убедиться в том, что выходное напряжение пироэлектрического сенсора равно постоянному значению V_0 , пропорциональному величине теплового потока.

На рис. 6, а представлена типовая конструкция твердотельных пироэлектрических детекторов. Кристалл пироэлектрика размещается в металлических корпусах ТО-5 либо ТО-39, что обеспечивает хорошее экранирование и защиту от действия окружающей среды. Оптическое окно обычно выполняется из кремния. Внутреннее пространство заполняется сухим воздухом или азотом. Обычно используется дифференциальная схема включения двух пироэлектрических элементов для лучшей компенсации быстроменяющихся тепловых потоков и акустических шумов и вибраций. Часто один из элементов покрывается красителем, имитирующим состояние абсолютно черного тела, а второй экранируется от излучения, а для улучшения его отражательной способности на него наносится слой золота. Двойной элемент изготавливается на одной подложке (рис. 6, б). Металлические электроды, нанесенные с двух сторон пластины, формируют два последовательно соединенных конденсатора C_1 и C_2 .

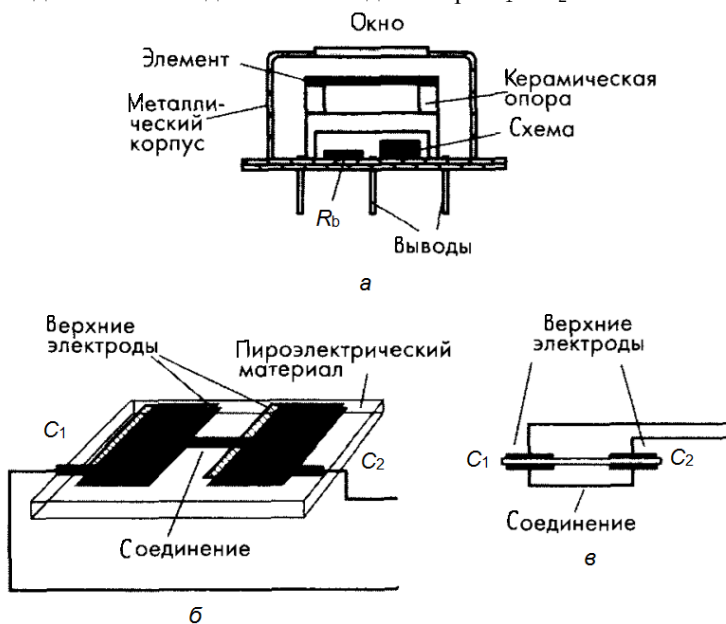


Рис. 6. Двойной пирозлектрический датчик

а – конструкция пиродатчика в металлическом корпусе ТО-5(ТО-39);
б – металлические электроды (нанесены на противоположные стороны материала); *в* – эквивалентная схема двойного элемента

На рис. 6, в представлена эквивалентная схема двойного пирозлемента. Такая конструкция обеспечивает высокий коэффициент ослабления синфазных помех, возникающих за счет механических нагрузок и вибраций. Дополнительно для уменьшения действий механических нагрузок и вибраций в конструкции датчика предусматривается «механическая развязка» между деталями корпуса и пирозлементом, а также между ним и электрическими выводами.

В настоящее время входные блоки к пирозлектрическим датчикам собираются на полевых транзисторах. Способы включения пиродатчика в схеме с полевыми транзисторами показаны на рис. 7. Наиболее распространенная схема включения пиродатчика представлена на рис. 7, *а*. При использовании датчиков на основе триглицинсульфата (с недостаточно устойчивой доменной структурой) предпочтительно включать датчик в промежуток *затвор - сток* полевого транзистора (рис. 7, *б*).

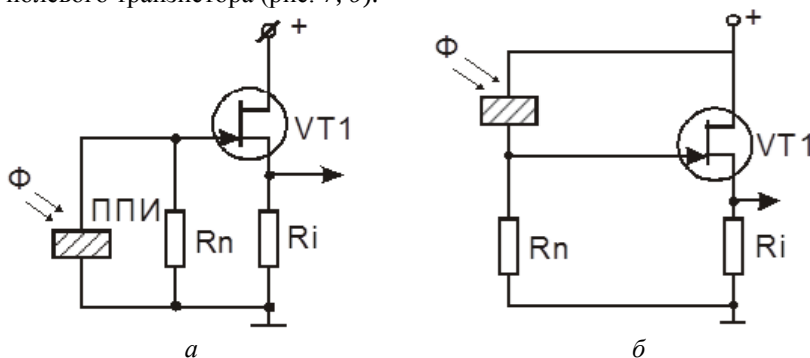


Рис. 7. Схемы включения одноэлементных пирозлектрических приемников излучения

Преимущества пиродатчиков перед другими типами тепловых приёмников:

- широкий рабочий спектральный интервал;
- достаточно большое быстродействие;
- высокая интегральная чувствительность;
- не требуется специального охлаждения;
- не требуется подача дополнительного смещения;

- реакция только на переменную составляющую падающего потока излучения;
- отсутствие токов утечки.

Отличительной особенностью пироприемников, предназначенных для регистрации теплового и электромагнитного излучений, является низкий коэффициент шумов и широкий спектральный диапазон излучений на частотах $10^{10} \dots 10^{20}$ Гц (от сантиметровых волн до γ -лучей). Так как пироэлектрики реагируют только на переменную часть потока излучения, то модуляция потока может достигать 106 Гц. Диапазон регистрируемых мощностей излучения от 10^{-9} до 10^{20} Вт.

Пироэлектрические датчики применяются в медицине, ветеринарии, агрономии, в коммунальных службах, в металлургии, в текстильной промышленности, в электроэнергетике, электронике, в военной и космической промышленности. Пироэлектрические детекторы применяются для исследования пучков нейтронов, протонов и дейтронов в экспериментах по термоядерному синтезу, для изучения импульсного и стационарного γ и рентгеновского излучений и как измерители мощности и энергии лазеров оптического диапазона, включая УФ и ИК. В измерительной технике пироэлектрические приемники применяются в виде тепловых приемников, построенных по модели абсолютно черного тела. Измерительные приемники излучений, построенные в виде матриц, состоящих из $10^3 \dots 10^5$ элементов, позволяют исследовать пространственное распределение излучений.

Пироэлектрики находят применение в тепловидении (инфракрасном или радиационном), имеющем большое значение в медицине и технике. Пироконы (пироэлектрические видиконы, тепловые передающие телевизионные трубки) применяются для контроля многообразных технологических процессов:

- оценка состояний высоковольтных линий передачи по данным вертолетной ИК - съемки;
- проверка однородности изоляции мощных электрических машин;
- автоматизированный технологический контроль электронных компонентов (конденсаторов, резисторов, СБИС) под нагрузкой;
- применение пироконов в медицине для диагностики глубоких латентных воспалительных процессов и т.п.;
- изучение характеристик излучения лазеров;
- ИК-картирование Земли с ИСЗ, планет и комет с космических зондов и т.п.

В теплотрии преобразователи на пирозлектриках для измерения температуры, теплоемкости, теплопроводности, теплообмена и т.д. имеют предельную чувствительность порядка 10^{-7} К.

Описание лабораторной установки

От источника 1 (рис. 8) излучение поступает на пирозлектрический приёмник 3. Выходной сигнал пирозлектрического приёмника 3 измеряется вольтметром 4. По показаниям датчика температуры 5 градуируется пироприёмник. Модулятор 2 служит для прерывания потока излучения, так как пиродатчик реагирует только на переменную составляющую падающего потока излучения. Питание пирозлектрического приёмника 3 осуществляется от источника питания 6. Осциллограф 7 служит для контроля сигнала пирозлектрического приёмника 3.

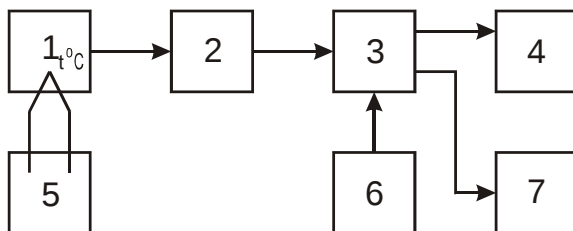


Рис. 8. Функциональная схема лабораторной измерительной установки
 1 – источник теплового излучения (имитатор абсолютно черного тела);
 2 – модулятор теплового потока; 3 – пирозлектрический приемник излучения МТ-30; 4 – вольтметр В7-39; 5 – вольтметр В7-26 для измерения ЭДС термопары хромель – копель; 6 – блок питания для МТ-30 ВИП-010; 7 – осциллограф

Порядок выполнения работы

1. Включить приборы и провести их прогрев в течение 30 минут.
2. Провести градуировку пиродатчика:
 - 2.1. Постепенно увеличивая температуру источника излучения 1 (см. рис. 3) от 20 до 300 °С, снять порядка 15 показаний вольтметра 4 и датчика 5, соответствующих одинаковым температурам.
 - 2.2. То же самое проделать при уменьшении температуры источника излучения 1.

2.3. Рассчитать средние значения показаний вольтметра 4, чтобы исключить погрешность гистерезиса зависимости напряжения от температуры.

2.4. По полученным данным построить градуировочную кривую – зависимость температуры объекта T от напряжения на пироприёмнике U . Найти функцию аппроксимации.

3. Измерить поток излучения тела, указанного преподавателем, с неизвестной температурой.

3.1. Снять показания вольтметра 4.

3.2. Определить температуру тела по градуировочной кривой.

3.3. Оценить погрешность измерения температуры тела калиброванным пиродатчиком.

Содержание отчета

1. Необходимые теоретические сведения.
2. Функциональная схема лабораторной установки.
3. Градуировочная кривая пироэлектрического датчика.
4. Функция аппроксимации и значения коэффициентов аппроксимирующей функции
5. Оценка погрешности измерений.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Принципы и методы измерения температуры бесконтактным методом.
2. Пироэлектрический эффект: физическая сущность, пироэлектрические материалы.
3. Метрологические характеристики оптических датчиков температуры.
4. Функциональная схема оптического пирометра.
5. Болометры. Принципы работы, конструкции.

Библиографический список

1. Гаврилова Н.Д., Данилычева М.Н., Новик В.К. Пироэлектричество. М.: Знание, 1989. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика», № 5).
2. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи. М.: Сов. радио, 1979. 166 с.
2. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. Москва: Радио и связь, 1989, 287 с.

3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник/ Пер. с англ. М.: Техносфера. 2006. 592 с.

4. Пироэлектрический эффект и его практические применения/ В. Ф. Косоротов и др.; под ред. Л. С. Кременчугского. Киев: Наукова думка, 1989 223 с.

5. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М: Техносфера, 2007. 384 с.

5093

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ

Методические указания
к лабораторной работе № 4

ТЕНЗОДАТЧИК

Рязань 2016

УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 4 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о преобразователях на основе тензорезистора, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине “Микро- наносенсоры”.

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

Тензорезистор, тензодатчик

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Ознакомление с преобразователями на основе тензорезистора, определение основных параметров тензорезистора.

Теоретическая часть

Знание механических напряжений, которые возникают в конструкции при определенных условиях эксплуатации, является главным условием ее функционирования. Измерение деформаций в соответствующим образом выбранных областях позволяет вычислить вызывающие их напряжения.

Тензорезисторами называют преобразователи, осуществляющие преобразование механических деформаций в изменение электрического сопротивления, т.е. преобразователи, основанные на тензоэффекте. Распространение получили проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. На рис. 1 показана конструкция проволочного тензопреобразователя.

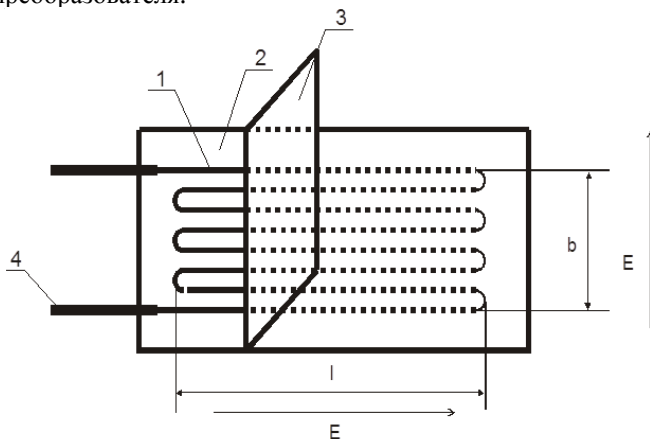


Рис. 1. Проволочный тензопреобразователь

1 – решетка, 2 - изолирующая подложка, 3 - изоляционный слой,
4 – выводы

Преобразователь наклеивается на поверхность исследуемой детали таким образом, чтобы витки обмотки были параллельны направлению вектора деформации E . При деформации детали витки обмотки удлиняются или укорачиваются, что вызывает изменение сопротивления датчика. При действии деформации E в поперечном направлении изменения не происходит, поскольку удлинения проводников не наблюдается. Деформации подвергаются участки изгибов витков решетки, размеры которых малы в сравнении с длиной решетки.

Дальнейшим развитием проволочных тензопреобразователей является конструкция фольгового тензорезистора. Решетку фольгового преобразователя получают методом вытравливания из фольги толщиной 1-12 мкм, нанесенной на лаковую основу. Технологический процесс изготовления позволяет получить практически любую форму и размеры решетки. Это является большим достоинством фольговых тензопреобразователей перед проволочными. Другим существенным достоинством является большая допустимая плотность тока по тензорезистору вследствие лучшей теплоотдачи от плоских тонких витков решетки. Фольговые датчики являются датчиками однократного действия, и повторно использовать их на другом месте уже нельзя.

В настоящее время большое распространение получили полупроводниковые тензорезисторы, благодаря высокому коэффициенту тензочувствительности (в 50 - 200 раз выше, чем у проволочных и фольговых). Это объясняется сильно выраженным тензоэффектом у германия, кремния, арсенида галлия и других полупроводниковых материалов.

Конструкция полупроводникового тензорезистора представляет собой пластину из полупроводника, к которой припаяны выводы. При деформации пластины изменяется ее сопротивление. Одной из первых конструкций датчиков с использованием тензорезистивного эффекта стали датчики на основе структур "кремний на сапфире". Они имеют широкий температурный диапазон, высокие эксплуатационные характеристики и относительно высокую стоимость.

Погрешности тензорезисторов

Погрешности измерения тензорезисторами возникают за счет следующих основных факторов:

- влияние температуры преобразователя на его сопротивление и линейное расширение;
- изменение характеристики, вызываемое остаточными деформациями в преобразователе при длительном действии нагрузок, близких к допустимым;
- невоспроизводимость характеристики при нагрузке и разгрузке;
- изменение крутизны характеристики преобразователя от времени из-за старения материалов, особенно из-за изменения свойств клеящих компонентов;
- снижение чувствительности при увеличении частоты деформаций, когда длина звуковой волны в детали становится соизмеримой с базой преобразователя;
- нелинейность коэффициента тензочувствительности в зависимости от деформации у полупроводниковых тензорезисторов.

Тензoeffект в металлах

Удельное сопротивление большинства металлов уменьшается с увеличением приложенного к ним давления. Действительно, сокращение объема и, следовательно, межатомных расстояний, вызванное давлением, приводит к уменьшению удельного сопротивления. Удельное сопротивление металла это, в частности, диффузионный отток свободных электронов сквозь атомную решетку. Возможность диффузии тем выше, чем больше амплитуды колебаний атомов. С уменьшением ячеек атомной решетки при сближении атомов возрастают силы их взаимного притяжения, из-за чего уменьшаются амплитуды атомных колебаний. При этом вероятность диффузии свободных электронов снижается, что и приводит к уменьшению удельного сопротивления.

Тензoeffект в полупроводниках

Природу тензoeffекта в примесных полупроводниках позволяет объяснить теоретическая модель, называемая “моделью долин”.

В кристалле кремния n -типа, имеющем кубическую структуру, вдоль каждой из трех осей куба есть минимальный энергетический уровень зоны проводимости, соответствующий “долине”. Из соображений симметрии все “долины” (их три) одинаковы и одинаково заполнены свободными электронами. В каждой “долине” подвижность электронов вдоль соответствующей оси минимальна, и, наоборот, в перпендикулярных направлениях подвижность этих электронов максимальна. Удельная проводимость каждой из осей имеет вид:

$$\sigma = qn(\mu_{\parallel} + \mu_{\perp}), \quad (1)$$

где n – плотность электронов в каждой “долине”; $qn\mu_{\parallel}$ – представляет вклад электронов “долины”, параллельной электрическому полю; $qn\mu_{\perp}$ – вклад каждой из “долин”, перпендикулярных к полю E (рис. 2, a). Приложение механического напряжения слегка меняет размеры кристаллической решетки и приводит к изменению в населенности “долин”. Например, при растяжении вдоль оси X n электронов “долины” X перемещается в “долины” Y и Z , так что меняется удельная проводимость. Если электрическое поле E параллельно механическому напряжению (рис. 2, b), изменение проводимости (продольный эффект) выражается формулой:

$$\Delta\sigma_{\ell} = q(-\Delta n\mu_{\parallel} + \Delta n\mu_{\perp}) = q\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_{\parallel}); \quad \Delta\sigma_{\ell} > 0. \quad (2)$$

Если же электрическое поле E перпендикулярно к механическому напряжению F (рис. 2, $в$), то изменение $\Delta\sigma_t$ удельной проводимости (поперечный эффект) записывается следующим образом:

$$\Delta\sigma_t = q\left(\frac{\Delta n}{2}\mu_{\parallel} + \frac{\Delta n}{2}\mu_{\perp}\right) = \frac{q}{2}\Delta n(\mu_{\parallel} - \mu_{\perp}); \quad \Delta\sigma_t = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{\ell}. \quad (3)$$

При сжатии электроны перемещаются в обратном направлении: $\Delta n/2$ электронов из каждой “долины” Y и Z переходят в “долину” X.

Тогда имеем для продольного и поперечного эффектов:

$$\Delta\sigma_{\ell} = q \Delta n (\mu_{\parallel} - \mu_{\perp}), \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_t = \frac{q}{2} \Delta n (\mu_{\perp} - \mu_{\parallel}). \quad (5)$$

В случае кремния p-типа продольный и поперечный эффект также наблюдаются, но они отличаются знаком от эффектов, наблюдаемых в кремнии n-типа. Этот факт не объясняется моделью “долин”.

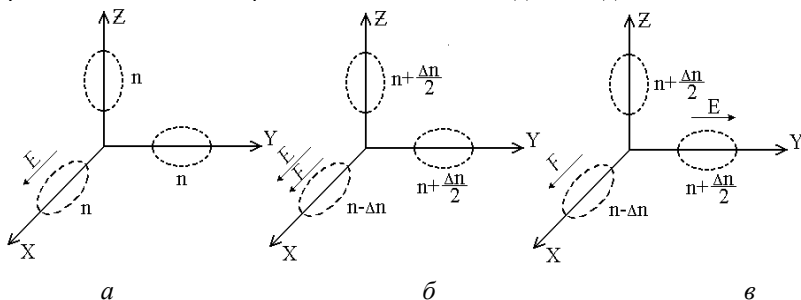


Рис. 2. Распределение электронов согласно теории “долин” в кристалле кремния p-типа (эллипсы, означают “долины”): *а* – в отсутствие механического напряжения либо при параллельном напряжении; *б* – при перпендикулярном напряжении; *в* – при перпендикулярном напряжении с приложенным электрическим полем E

Метрологические характеристики преобразователей

Резисторные датчики являются пассивными, так как они преобразуют в изменение сопротивления их собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика.

Деформации, измеряемые с погрешностью до 0,1%, лежат в области примерно от $\pm 10^{-5}$ до $\pm 2 \cdot 10^{-1}$. Нижний предел измерений определяется шумами датчика и связанной с ним электрической схемой; верхний предел зависит от упругости датчика и фиксирующего клея.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками с удельным сопротивлением ρ , площадью поперечного сечения нити S и длиной $n\ell$, где ℓ – длина одного нитевидного элемента, а n – их количество. Для металлических датчиков n обычно составляет от 10 до 20, а для полупроводниковых – равно 1.

Одной из основных характеристик тензодатчика является коэффициент преобразования K_T (коэффициент тензочувствительности):

$$K_T = \frac{\Delta\ell/\ell}{\Delta R/R}. \quad (6)$$

Сопротивление датчика определяется выражением:

$$R = \rho \frac{n \ell}{S}. \quad (7)$$

Под действием деформации сопротивление датчика изменяется на

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \ell}{\ell} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (8)$$

Предельная деформация нити приводит к изменению ее поперечных размеров - сторон a и b в случае прямоугольного сечения, диаметра d для круглого сечения. Поперечная деформация пропорциональна продольной:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (9)$$

где ν – коэффициент Пуассона, который близок к 0,3 в области упругих деформаций.

Поскольку $S = ab$ (или $S = \pi d^2/4$), имеем:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right). \quad (10)$$

Металлические и полупроводниковые датчики различаются как выражениями для изменения удельного сопротивления $\Delta \rho/\rho$, так и его величиной. Для металлических датчиков используется формула Бриджмена, связывающая изменение удельного сопротивления с изменением объема V :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \left(\frac{\Delta V}{V} \right), \quad (11)$$

где c – константа Бриджмена.

Поскольку $V = Sn \ell$,

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (12)$$

и

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c(1 - 2\nu) \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (13)$$

то отсюда следует:

$$\frac{\Delta R}{R} = \{(1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu)\} \frac{\Delta \ell}{\ell} = K_T \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (14)$$

$$K_T = 1 + 2\nu + c(1 - 2\nu). \quad (15)$$

Учитывая численные значения постоянных ($\nu=0,3$; $c\approx 1$), получаем, что для металлических датчиков $K_T \approx 2$.

Для полупроводниковых датчиков ρ зависит от напряжения σ и коэффициента пьезорезистивности π . Выражение имеет вид:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma = \pi Y \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right), \quad (16)$$

где Y – модуль Юнга материала.

Коэффициент пьезорезистивности π зависит:

■ от ориентации резистивных полосок относительно кристаллографических осей;

■ от типа (n или p) и концентрации примесей.

Таким образом, для полупроводникового датчика изменение сопротивления можно записать так:

$$\frac{\Delta R}{R} = \{(1 + 2\nu) + \pi Y\} \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad (17)$$

откуда

$$K_T = 1 + 2\nu + \pi Y. \quad (18)$$

Коэффициент преобразования полупроводниковых датчиков достигает абсолютных значений от 100 до 200, а его знак определяется типом примеси.

Линейность

Линейная зависимость между сопротивлением и деформацией обеспечивается, если нить датчика остается в пределах упругости. Как только деформация выходит за предел упругости ($|\Delta \ell / \ell|$ составляет от 0,5% до 20% в зависимости от материала), коэффициент Пуассона возрастает до 0,5, и коэффициент преобразования датчика приближается к 2. Например, для сплава “изоэластик” $K_T=3,5$ при $|\Delta \ell / \ell| < 0,65\%$, а за этим пределом $K_T=2$.

У таких сплавов, как “ферри” и константан, с коэффициентом преобразования, близким к 2, K_T почти не изменяется при выходе за предел упругости; однако при этом в нити датчика накапливается остаточная деформация и происходит необратимое изменение сопротивления (гистерезис).

Значение K_T для полупроводниковых датчиков определяется концентрацией примесей. Его абсолютная величина равномерно убывает при возрастании концентрации примесей.

Строго говоря, изменение сопротивления в зависимости от деформации не является линейным:

$$\Delta R / R = K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2 + K_3 \varepsilon^3. \quad (19)$$

Все коэффициенты K_i этого выражения зависят от концентрации примесей и обычно можно ограничиться второй степенью. Величина K_2 имеет порядок от 10^3 до 10^4 , причем датчик на полупроводнике р-типа более линеен при растяжении, а датчик на полупроводнике п-типа – при сжатии. Из предыдущего выражения получаем для коэффициента преобразования:

$$K_T = K_1 + K_2\varepsilon + K_3\varepsilon^2. \quad (20)$$

Величина K_T зависит от деформации, но всегда возможно выбрать максимальное значение ε , ниже которого K_T можно рассматривать как константу (с заданной точностью). Линейность можно повысить, увеличивая количество примесей. Так у датчиков со значительной концентрацией легирующей примеси линейность почти такая же, что и у металлических датчиков. Разумеется, в этом случае снижается K_T .

Сопротивление

Удельное сопротивление материала датчика должно быть достаточно высоким, чтобы требуемые значения сопротивления (от 100 до 5000 Ом) достигались на достаточно короткой нити и без существенного уменьшения её поперечного сечения. Чрезмерная длина приводит к завышению размера датчика; меньшей толщине нити соответствует более слабый измеряемый ток; и то, и другое уменьшает чувствительность датчика. Для полупроводников удельное сопротивление ρ уменьшается по мере повышения концентрации примесей. Это следует из общего выражения для ρ :

$$\rho = \frac{1}{q}(\mu_n n + \mu_p p), \quad (21)$$

где q – абсолютное значение заряда электрона; n и p – соответственно концентрации электронов и дырок; μ_n и μ_p – их подвижности.

$n \approx N_d$ и $p \ll n$, откуда для полупроводников п-типа с концентрацией донорных атомов N_d :

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_d}, \quad (22)$$

$p \approx N_a$ и $n \ll p$, откуда для полупроводников с акцепторными примесями N_a :

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_a}. \quad (23)$$

Изменение сопротивления от температуры происходит следующим образом: при температуре меньше 120 °С удельное сопротивление ρ увеличивается с ростом T , а температурный коэффициент, будучи

положительным, уменьшается с увеличением концентрации вводимых примесей; при высоких температурах ρ уменьшается с увеличением T , а TKC , будучи отрицательным, не зависит от концентрации примесей, а является коэффициентом самого кремния.

Характеристики тензодатчика в динамическом режиме

Характеристикой тензодатчика в динамическом режиме является максимальная допустимая частота. Существует как механическая максимальная допустимая частота, так и электрическая максимальная допустимая частота.

Механические частотные ограничения зависят от способа закрепления и размера датчика. База преобразователя должна быть гораздо меньше длины волны механических колебаний с тем, чтобы измеряемая под датчиком деформация была практически однородна. Как правило, принимают $\ell \leq 0,1\lambda$. Длина волны λ продольной вибрации, соответствующей динамической нагрузке, имеет выражение $\lambda = V/f$, где V - скорость звука в материале образца; f - частота.

$$V = \sqrt{\frac{Y}{d} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (24)$$

где Y – модуль Юнга; ν - коэффициент Пуассона; d – плотность материала образца.

Учитывая это, максимальная частота вибрации при использовании датчика длиной ℓ определяется соотношением: $f_{\max} = V/(10 \ell)$.

Электрические частотные ограничения обуславливаются тем, что у тензорезистора имеется паразитная емкость около 20-100 пФ в зависимости от конструктивных особенностей.

Схемы включения тензорезисторов

При измерении упругих деформаций наклеиваемый тензорезистор располагается на детали в направлении главной (измеряемой) деформации. Тогда относительное изменение сопротивления тензорезистора $\Delta R/R$ и относительная деформация будут связаны соотношением:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \frac{\Delta \ell}{\ell}. \quad (25)$$

В пределах упругих деформаций тензорезисторы характеризуются небольшим изменением сопротивления, которое нужно преобразовывать в большие относительные изменения выходных измерительных величин. Высокую точность при этом могут обеспечить два метода - нулевой и дифференциальный. Оба метода реализуются по одной схе-

ме включения - мостовой. Нулевому методу соответствует равновесный режим работы моста, дифференциальному - неравновесный.

Схема простейшего моста (рис. 3) содержит: R_1 , R_2 , R_3 , R_4 – резисторы отдельных плеч моста; источник питания U , характеризуемый внутренним сопротивлением R_i ; электронный вольтметр V . Источник питания подключен к так называемой диагонали питания, вольтметр – к измерительной диагонали. Тензорезистор, воспринимающий деформации, включен в одно из плеч (R_1).

Состояние моста характеризуется напряжением на измерительной диагонали (напряжение между точками a и b):

$$U_{ab} = U \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]. \quad (26)$$

В исходном состоянии мост уравновешен. Положив $U_{ab} = 0$, получим условие равновесия моста:

$$R_1 R_4 = R_3 R_2. \quad (27)$$

Под действием деформации сопротивление тензорезистора изменяется, что можно представить как приращение $R_1 + \Delta R$, где $\pm \Delta R$ – знакопеременная функция измеряемых напряжений или деформаций.

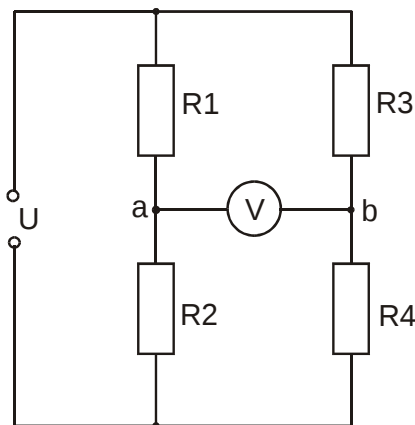


Рис. 3. Резистивный мост

Описание лабораторного макета

В состав макета для проведения лабораторной работы “Исследование метрологических параметров тензодатчиков” входят следующие элементы (рис. 4). Тензодатчик R_1 включен в мост постоянного тока. Он приклеен к пластине из оргстекла, закреплённой с помощью струбины (Ст). Пластина может изгибаться вращением барабана микромет-

ра (Мк). Резистором $R3$ устанавливается ноль на измерительной диагонали моста при отсутствии деформации пластины. Напряжение разбаланса усиливается с помощью усилителя постоянного тока (УПТ) и подаётся на вольтметр (типа В7-21). УПТ питается от источника напряжения БП (ВИП – 010). Измерительный мост и УПТ находятся внутри алюминиевого корпуса.

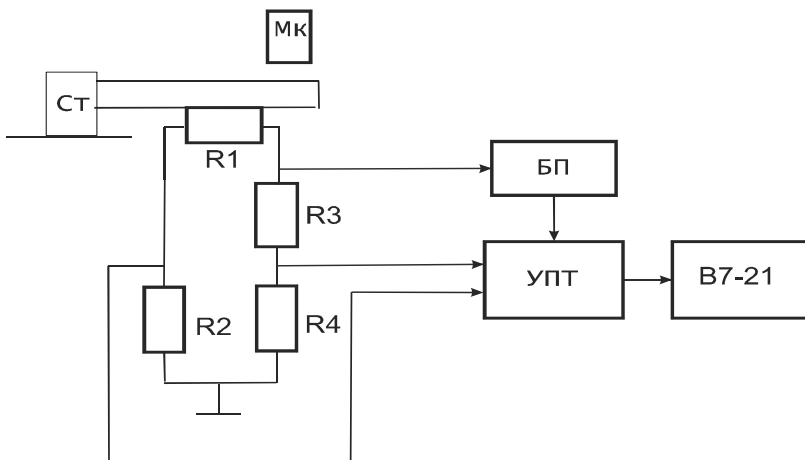


Рис. 4. Макет лабораторной установки

Порядок расчета тензодатчика

Пластина, на которую наклеен тензодатчик, претерпевает деформацию изгиба. С помощью микрометра можно измерить расстояние, которое проходит конец пластины. При этом верхний слой пластины растягивается, следовательно, тензодатчик деформируется под действием растягивающей силы. Рассчитаем относительную деформацию тензодатчика.

Как известно, удлинение балки под воздействием растягивающей силы (усилие микрометра) можно представить в виде:

$$\Delta \ell = \varepsilon \ell_0, \quad (28)$$

где ℓ_0 – первоначальная длина балки; ε – относительная деформация балки.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{Y}, \quad (29)$$

где σ – механическое напряжение, возникающее в точке приложения силы к балке при ее изгибе; Y – модуль упругости материала.

С другой стороны, под действием деформирующей силы край балки перемещается на расстояние Δx

$$\sigma = \frac{2 \Delta x Y \frac{h}{2}}{\ell_0 \left(\ell_0 - \frac{1}{3} \ell_0 \right)}, \quad (30)$$

где Δx – перемещение конца балки; h – толщина балки.

Коэффициент удлинения:

$$\alpha = \frac{\ell' - \ell_0}{\ell'}, \quad (31)$$

где $\ell' = \ell_0 + \Delta \ell$.

Удлинение самого тензорезистора составит:

$$\Delta \ell_{\text{тр}} = S_6 \alpha, \quad (32)$$

где S_6 – база тензорезистора, наклеенного на балку.

Формула позволяет рассчитать относительное удлинение тензорезистора в зависимости от перемещения незакрепленного края балки и, как следствие, непосредственного удлинения самой балки. Она справедлива в том случае, если тензодатчик закреплён близко к закреплённому краю, а величина x – мала.

Теперь рассчитаем относительное изменение сопротивления тензодатчика. Тензодатчик (типа ПКБ – 0,2 – 200,8±0,2) является одним из плеч моста постоянного тока. Если мост сбалансирован, то напряжение на измерительной диагонали равно нулю и сопротивление датчика равно сопротивлению подстроенного резистора ($R_{01} = R_3 = 200,8 \text{ Ом}$).

При изгибе пластины датчик растягивается и его сопротивление увеличивается. Рассчитаем сопротивление тензодатчика в зависимости от напряжения, которое покажет вольтметр.

$$U = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} - \frac{ER_4}{R_3 + R_4}, \quad (33)$$

$$R_1 = \frac{ER_2(R_3 + R_4) - UR_2(R_3 + R_4) - ER_4R_2}{U(R_3 + R_4) + ER_4} = R_2 \frac{ER_3 - U(R_3 + R_4)}{ER_4 + U(R_3 + R_4)}, \quad (34)$$

$R_4 = R_2 = R$, следовательно

$$R_1 = R \frac{ER_3 - U(R_3 + R)}{ER + U(R_3 + R)}. \quad (35)$$

Теперь с учётом того, что напряжение на измерительной диагонали усиливается в $K = 20$ раз:

$$R_1 = R \frac{E R_3 - KU(R_3 + R)}{E R + KU(R_3 + R)}. \quad (36)$$

Отсюда изменение тензодатчика будет составлять:

$$\Delta R_{TP} = R_{01} - R_1. \quad (37)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Начертить таблицу в отчёте к лабораторной работе.

Экспериментальная таблица

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, мм										
V, В										
$\Delta R_{TP} 10^{-3}$, Ом										
$\Delta \ell_{TP} 10^{-3}$, мм										
K _T										

2. Установить на источнике питания ВИП - 010 напряжение 15 В (переключатель “грубо” – в положение “20 В”, ручка регулировки плавно - в среднем положении).

3. Проверить правильность подключения питания к стенду (**ВНИМАНИЕ:** если перепутаны полярности или подано напряжение только одной полярности, усилитель выйдет из строя!).

4. Подсоединить вольтметр к стенду. Включить приборы. По встроенным вольтметрам прибора ВИП-010 выставить напряжение + 15В и - 15В с помощью ручки “плавно”.

5. Произвести баланс моста с помощью подстроенного резистора (гнездо “Уст. 0” на стенде).

6. Вращая барабан микрометра, подвести подвижной шток к пластине, не изгибая ее. Записать показания микрометра X_0 .

7. Записать в таблицу результаты 10 измерений, не допускать деформаций, при которых показания вольтметра больше 0,3 В.

8. Выключить приборы.

9. Произвести расчеты по формулам (28...40) и заполнить таблицу.

10. Построить график $\Delta X = f(\Delta R)$.

Перемещение незакрепленного края балки:

$$\Delta X = X_0 - X, \quad (38)$$

$$\Delta R_{TP} = R_{01} - R \frac{E R_n - KU(R_3 + R)}{E R + KU(R_3 + R)}, \quad (39)$$

где R_{01} – начальное сопротивление тензодатчика, $R_{01} = 200,8$ Ом, R_3 – сопротивление подстроечного резистора; в момент баланса моста $R_{01} = R_3$, $K=20$, $R = 4,9 \cdot 10^3$ кОм, E – напряжение питания (± 15 В), U – показания вольтметра (из таблицы).

$$\frac{\Delta R_{\text{ТР}}}{R_{\text{ТР}}} = K_T \frac{\Delta \ell_{\text{ТР}}}{\ell_{\text{отР}}} ; \text{отсюда: } K_T = \frac{\Delta R_{\text{ТР}} / R_{\text{ТР}}}{\Delta \ell_{\text{ТР}} / \ell_{\text{отР}}}, \quad (40)$$

где K_T – коэффициент тензочувствительности.

Металлическая балка, на которую наклеен тензорезистор, сделана из стали. Модуль упругости балки тогда будет составлять $Y = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Линейные размеры балки и тензорезистора снимаются непосредственно с образцов.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Перечислить основные типы тензорезисторов и дать краткую характеристику каждого из них.
2. Объяснить природу тензоэффекта в металлах.
3. Объяснить природу тензоэффекта в полупроводниках.
4. Перечислить основные метрологические характеристики тензопреобразователей.
5. Изобразить основные схемы включения тензорезисторов и перечислить их достоинства и недостатки.

Библиографический список

1. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.
2. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин/ Под ред. П.В. Новицкого. Л.: Энергия, 1966. 690 с.
3. Осипович Л.А. Датчики для биомедицинских исследований: учеб. пособие. Л.: СЗПИ, 1978. 78 с.
4. Нуберт Т.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.

5090

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

МИКРО- НАНОСЕНСОРЫ

Методические указания
к лабораторной работе № 1

ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ АНЕМОМЕТР

Рязань 2016

УДК 681.586.2-7

Микро- наносенсоры: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о различных видах анемометров, исследование работы терморезистивного анемометра, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Микро- наносенсоры».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.04.04.

Ил. 11. Библиогр.: 3 назв.

Анемометр, виды течений, расходомеры, трубка Пито

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Микро- наносенсоры

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Ознакомление с различными видами анемометров, исследование работы терморезистивного анемометра.

Краткие теоретические сведения

В измерительной технике часто требуются точные методы определения скорости потока (течения) жидкости или газа. Измерители скорости потока называются анемометрами. По-гречески «anemos» означает «ветер», т. е. в буквальном смысле анемометр – это «измеритель ветра». Существует большое количество различных методов измерения скорости потока. При выборе конкретного метода большое значение имеет вид измеряемого течения.

Виды течений

В анемометрии используется классификация в зависимости от характера распределения скорости по площади поперечного сечения потока. Так, скорость потока по площади может быть либо постоянной, либо изменяться. В первом случае течение называется *ламинарным*, во втором – *турбулентным*.

В турбулентном течении измерение таких величин, как средняя скорость, является трудной задачей из-за наличия случайных пульсаций, амплитудой которых нельзя пренебрегать.

Для облегчения описания и сравнения различных течений в механике жидкости обычно используются безразмерными комплексами (критериями), позволяющими уменьшить число параметров, которыми определяется рассматриваемое течение. Так, в случае изотермического течения несжимаемой жидкости (плотность и температура постоянны) единственным безразмерным параметром, достаточным для определения этого течения, является число Рейнольдса:

$$\text{Re} = U \frac{D}{\nu}, \quad (1)$$

где U – характерная скорость течения (например, если речь идет о трубе, то это средняя по поперечному сечению потока скорость $U=Q/S$, Q – объемный расход, S – площадь поперечного сечения); D – характерная длина (например, в упомянутом выше случае – диаметр трубы); ν – кинематическая вязкость жидкости.

В аналогичных геометрических условиях два изотермических течения несжимаемой жидкости подобны, если их числа Рейнольдса одинаковы. Каков режим течения – ламинарный или турбулентный – зависит от величины числа Рейнольдса. Например, в трубе кругового сечения течение становится турбулентным, когда число Рейнольдса превышает 2200.

Датчики и методы измерения скорости потока

Принцип действия лазерного анемометра показан на рис. 1.

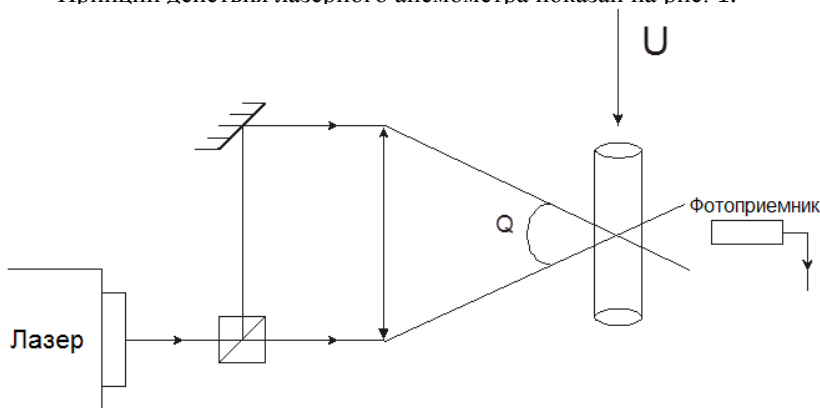


Рис. 1. Лазерный анемометр

Два лазерных луча фокусируются на одном и том же объеме жидкости ($\sim 0,1$ мм), где образуются интерференционные полосы. Выражение для ширины полосы имеет вид:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(Q/2)}, \quad (2)$$

где λ – длина световой волны; Q – угол между двумя лучами лазера.

Когда частицы, увлекаемые потоком, пересекают зону интерференции, они поочередно проходят через темные и светлые области. Поэтому рассеянный ими свет, воспринимаемый оптическим датчиком (фотодиодом или фотоумножителем), модулируется с частотой f_D (доплеровская частота), зависящей от скорости частиц и ширины интерференционных полос d :

$$f_D = \frac{U}{d} = \frac{2U}{\lambda} \sin \frac{Q}{2}, \quad (3)$$

где U – компонента скорости жидкости по нормали к полосам. Частота f_D является линейной функцией скорости U . Таким методом можно измерять скорости U в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 м/с.

Ультразвуковой анемометр

Акустическая волна распространяется в данной среде со скоростью звука c , зависящей от свойств среды и от температуры. Для воздуха $c = 331,4$ м/с при 8°C и $c = 342,9$ м/с при 20°C . Скорость звука в жидкостях больше, чем в газах. Для воды при 8°C $c = 1435$ м/с. Если среда, в которой распространяется волна, движется со скоростью U

относительно наблюдателя, то измеренная им скорость c' выражается формулой:

$$c' = c + U \cos \alpha, \quad (4)$$

где α – угол между скоростью U и направлением распространения волны (рис. 2).

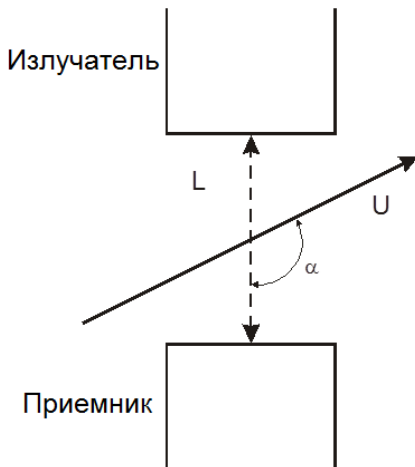


Рис. 2. Принцип действия звукового анемометра

Система для измерения скорости состоит из излучателя ультразвуковых импульсов и приемника, находящегося на расстоянии L . Длительность распространения импульсов между излучателем и приемником равна

$$t_P = \frac{L}{c + U \cos \alpha}. \quad (5)$$

Излучатель и приемник представляют собой пьезоэлектрические пластинки. Излучатель возбуждается электрическим напряжением, создающим серию волн высокой частоты (например, 1 МГц). Приемник выдает сигнал в форме изменений акустического давления, действию которого он подвергается. Такая система редко используется для измерения скорости, так как ее пространственное разрешение невелико (скорость интегрируется по расстоянию L). Такую измерительную установку чаще применяют при измерении расхода.

Крыльчатые анемометры

Анемометры этого типа снабжены чувствительным элементом в виде системы крыльчаток, приводимых во вращение движущейся жидкостью или газом. Ось крыльчатого анемометра располагается вдоль скорости течения. Скорость вращения крыльчатки, измеренная соответствующим тахометрическим устройством, пропорциональна скоро-

сти потока. Пренебрегая трением, можно приближенно оценить скорость по частоте вращения крыльчатки в потоке. Получим соотношение:

$$U = hN, \quad (6)$$

где U – скорость течения, N – число оборотов в секунду, h – постоянная, определяемая для конкретного устройства экспериментально.

Недостатком крыльчатого анемометра является то, что его характеристики могут изменяться с течением времени, например из-за износа подшипников. Кроме того, эти анемометры непригодны для измерения потоков, меняющих свое направление, и очень медленных потоков из-за наличия порога страгивания (т. е. крыльчатка начинает вращаться при достижении потоком определенной скорости).

Анемометры с тормозящим элементом

Принцип действия анемометра с тормозящим элементом показан на рис. 3. Сила торможения, действующая на подвешенный в потоке элемент, определяется выражением:

$$F_d = \frac{C_d A U^2 \rho}{2}, \quad (7)$$

где C_d – коэффициент торможения, A – площадь поперечного сечения элемента, m^2 ; ρ – плотность текучей среды, kg/m^3 ; U – скорость потока, m/s .

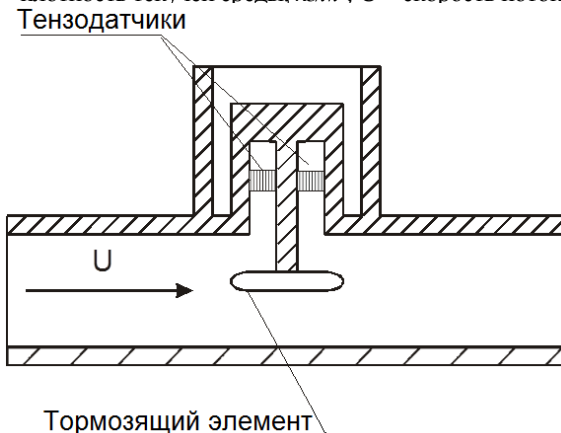


Рис. 3. Анемометр с тормозящим элементом

Коэффициент торможения зависит от формы тормозящего элемента и практически постоянен, если форма элемента была выбрана должным образом. Сила торможения чаще всего измеряется с помощью тензодатчика, закрепленного на несущем рычаге тормозящего элемента.

Электромагнитные измерители потока

Электромагнитные измерители потока используются для измерения скорости потока, усредненной по его поперечному сечению, и пригодны почти для всех проводящих жидкостей. Их работа основана на том хорошо известном факте, что в любом проводнике, движущемся перпендикулярно к направлению силовых линий магнитного поля, индуцируется напряжение, величина которого прямо пропорциональна скорости проводника (в нашем случае – скорости жидкости). Принцип работы электромагнитного измерителя потока поясняет рис. 4.

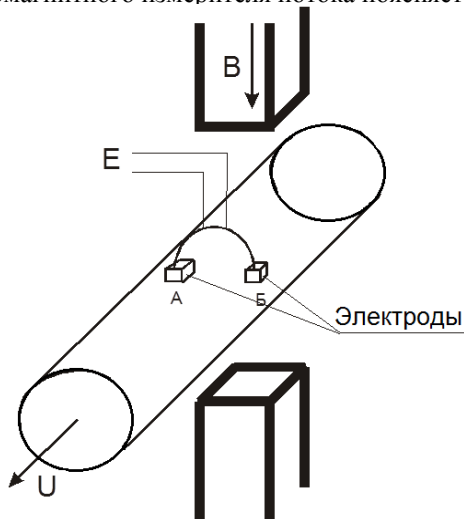


Рис. 4. Электромагнитный измеритель скорости потока

Магнитное поле B приложено перпендикулярно к направлению потока жидкости. Индуцируемое электрическое поле перпендикулярно как к направлению потока, так и к направлению магнитного поля.

Величина ЭДС определяется законом Фарадея:

$$E = \int_a^b \vec{U} \times \vec{B} d\vec{L}, \quad (8)$$

где E – индуцируемая ЭДС между точками A и B , в которых находятся электроды; B – магнитная индукция, Тл; L – расстояние между точками A и B , м; U – скорость жидкости, м/с.

Предполагая, что пространственные распределения поля B и скорости U однородны и что векторы B , U и L ортогональны, получаем следующее простое выражение для ЭДС:

$$E = BLU. \quad (9)$$

Индукцируемая ЭДС E измеряется с помощью двух электродов, контактирующих с жидкостью. Тип используемых электродов зависит от типа жидкости. Для многих жидкостей, включая жидкие металлы, используются электроды, изготавливаемые из сравнительно химически неактивных металлов, например платины.

Гидродинамические измерители потока

В измерителях этого типа используется возможность установления связи между разностью давлений в двух характерных точках потока и скоростью потока. Эта разность давлений измеряется с помощью дифференциального преобразователя давления. К гидродинамическим измерителям потока относится трубка Пито.

Трубка Пито (рис. 5) обеспечивает измерение локальных скоростей жидкости или газа в потоке.

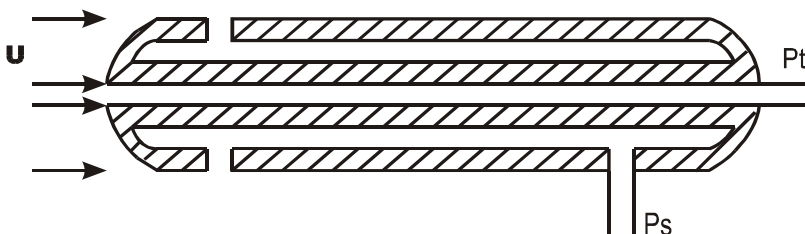


Рис. 5. Трубка Пито

В трубке имеется два типа отверстий, открытых для текущей среды. На статических входах (или входе), выполненных в виде отверстий, оси которых перпендикулярны к направлению потока, действует статическое давление текущей среды p_s . Вход (отверстие) на конце трубки собирает заторможенную массу жидкости или газа, находящуюся под полным давлением p_t . Если трубка Пито расположена параллельно потоку, то разность этих двух давлений находится из уравнения Бернулли:

$$p = p_t - p_s = \rho \frac{U^2}{2}, \quad (10)$$

где p – разность давлений, Па; p_s – давление на статическом входе, Па; p_t – полное давление, Па; ρ – плотность текущей среды, кг/м³; U – скорость потока, м/с. Отсюда для скорости потока несжимаемой текущей среды получаем

$$U = \sqrt{2 \frac{p_t - p_s}{\rho}}. \quad (11)$$

Для сжимаемой текущей среды (например, воздуха) скорость потока определяется по формуле

$$U = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_s}{\rho} \left(\left(\frac{p_t}{p_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}, \quad (12)$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ – отношение удельных теплоемкостей.

Тепловые измерители потока

В тепловых измерителях потока используется нагреваемый элемент, устанавливаемый на пути потока жидкости или газа и обтекаемый этим потоком. Тепло передается от этого элемента к текучей среде с интенсивностью P (Bm), определяемой разностью температур элемента и текучей среды, удельной теплоемкостью C ($Дж/кг \cdot K$) и скоростью U ($м/с$) последней, а также профилем потока. На принципе передачи тепла от нагреваемого элемента в поток основаны два метода измерения потока. В конвекционном методе измеряется количество тепла, рассеиваемого нагревательным элементом, тогда как в методе стационарной тепловой инъекции определяется изменение температуры текучей среды, связанное с инъекцией тепла в поток.

Инжекционные измерители потока

Средний массовый расход любой текучей среды можно определить путем инъекции в поток известного количества тепла и измерения изменения температуры этой среды за нагревателем (рис. 6).

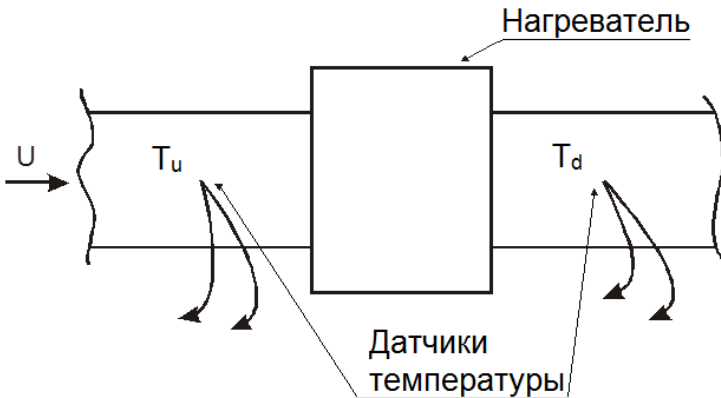


Рис. 6. Инжекционный измеритель потока

Средний массовый расход рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{q}{C_b(T_d - T_u)}, \quad (13)$$

где F – массовый расход, $кг/с$; q – скорость стационарной инъекции тепла, $Вт$; C_b – удельная теплоемкость текучей среды, $Дж/кг\cdot K$; T_u – температура текучей среды перед нагревателем (выше по течению), $^{\circ}C$; T_d – температура текучей среды за нагревателем (ниже по течению), $^{\circ}C$.

Конвекционные измерители потока

Конвекционный измеритель потока обеспечивает определение локальной скорости жидкости или газа путем измерения количества тепла, которое рассеивает нагревательный элемент, обтекаемый потоком. В качестве такого элемента можно использовать любой резистивный нагреватель: вольфрамовую проволоку, терморезистор или тонкую металлическую пленку на подложке. Элемент нагревается выше температуры текучей среды путем пропускания через него электрического тока (джоулев нагрев). Между элементом и потоком возникает конвективный теплообмен. Этот теплообмен зависит от физических свойств жидкости или газа, от скорости потока и разности температур нагретого элемента и текучей среды.

Количество джоулевой теплоты P_j , выделяемой при температуре T резистором R , через который течет постоянный ток I , выражается формулой:

$$P_j = R(T)I^2. \quad (14)$$

Полагая, что теплообмен осуществляется только конвекцией в среде, имеющей температуру T_a , количество теплоты, участвующее в теплообмене, можно представить формулой:

$$P_a = hS_l(T - T_a), \quad (15)$$

где h – коэффициент теплообмена, S_l – боковая поверхность чувствительного элемента датчика.

При тепловом равновесии $P_j = P_a$, т. е.:

$$R(T)I^2 = hS_l(T - T_a). \quad (16)$$

Скорость жидкости U входит в выражение для h , для которого предложены различные эмпирические формулы в зависимости от характера течения. Для ламинарного течения справедлива формула Кинга:

$$h = a + b\sqrt{U}, \quad (17)$$

где a и b – постоянные для конкретных жидкости (или газа) и датчика. Тогда получаем:

$$R(T)I^2 = (A + B\sqrt{U})(T - T_a), \quad (18)$$

где $A = aS_l$, $B = bS_l$

Зонды с нагреваемым элементом могут иметь различные конструкции.

Проволочный зонд (рис. 7) чаще всего используется для измерения скорости воздуха. Для обеспечения высокой чувствительности тонкая вольфрамовая проволока (диаметр 8 мкм, длина 1 мм) этого зонда накаляется практически докрасна. Проволока располагается перпендикулярно к направлению потока.

Тонкопленочный зонд (рис. 8) используется для измерения сверхзвуковых скоростей в воздушной среде. Тонкая платиновая пленка напыляется на изолирующую подложку, и в результате получается очень прочная структура.

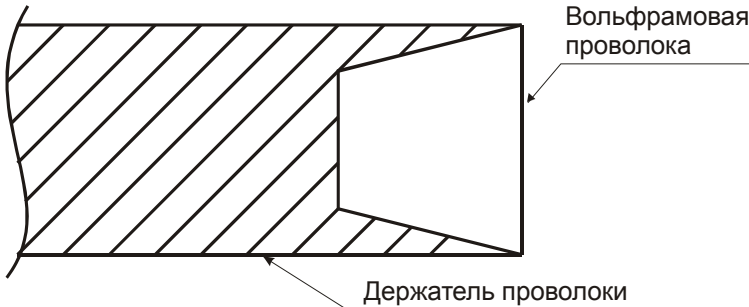


Рис. 7. Проволочный зонд

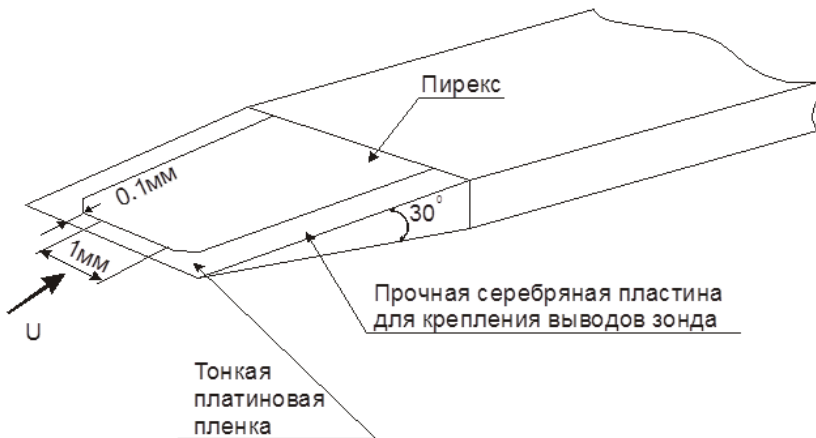


Рис. 8. Тонкопленочный зонд

Терморезисторные зонды часто применяются для измерения скорости кровотока в биологических исследованиях. Это связано, прежде всего, с высокой чувствительностью терморезистивных анемометров (из-за большого температурного коэффициента сопротивления терморезисторов), а также с тем, что существуют терморезисторы очень малых размеров. Простейшим зондом является один терморезистор, помещенный в поток. В биологических исследованиях применяют зонды с дополнительными терморезисторами для компенсации изменений температуры крови и определения направления потока.

Измерительные схемы

В термоанемометрах с резистивными нагревателями используются измерительные схемы двух типов: схема с постоянным током I и схема с постоянной температурой T .

Схема с постоянным током. Ток I , протекающий через нить, поддерживается постоянным с помощью либо балластного сопротивления, включенного последовательно с нитью, либо питающего источника тока. Так как количество теплоты, участвующей в теплообмене, зависит от скорости потока, то при изменении скорости изменяется и температура нити. Сопротивление нити зависит от ее температуры, поэтому с изменением скорости происходит изменение напряжения на ее концах. Измерительная схема такого типа упрощенно показана на рис. 9.

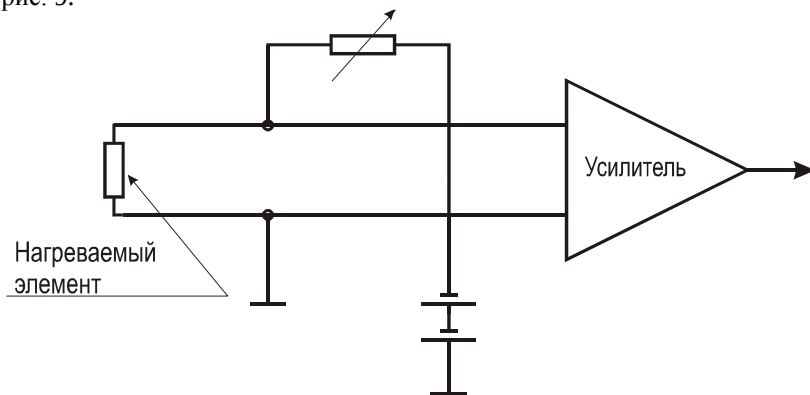


Рис. 9. Схема с постоянным током

Схема с постоянной температурой. В данной схеме температура и, следовательно, сопротивление поддерживаются постоянными. Датчик является одним из плеч моста Уитсона, и ток, необходимый для поддержания равновесия, зависит от скорости потока (рис. 10). Преимуществом этой схемы является меньшая тепловая инерция.

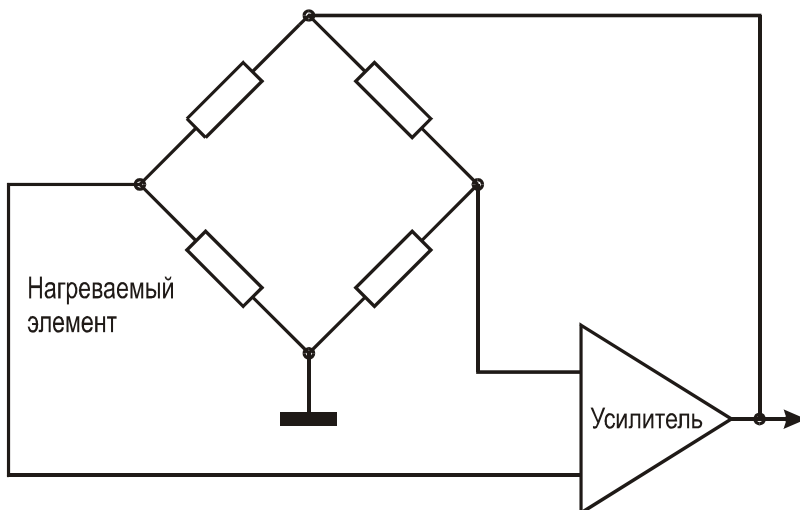


Рис. 10. Схема с постоянной температурой

Экспериментальная часть

Описание установки

Установка для проведения данной лабораторной работы состоит из стенда термоанемометра, высокостабильного источника постоянного напряжения ВИП-010 и источника регулируемого переменного напряжения ЛАТР. В стенд вмонтирован вентилятор, частота вращения которого меняется источником регулируемого переменного напряжения, и микроамперметр. Кроме того, на передней панели стенда расположены гнезда для подачи питания от прибора ВИП-010, тумблер «Сеть» включения вентилятора и регулировочная ручка «Настройка нуля». Нагреваемым элементом является терморезистор, помещенный в поток позади вентилятора.

В данной лабораторной работе применена схема с постоянным током (рис. 11). При увеличении скорости потока температура терморезистора $R(t)$ уменьшается и его сопротивление возрастает (из-за отрицательного ТК). Следовательно, ток в цепи терморезистора уменьшается. Тогда падение напряжения на резисторе R_2 также уменьшается, вследствие чего транзистор VT_1 прикрывается. Из-за этого падение напряжения на этом транзисторе увеличивается, и транзистор VT_2 приоткрывается, что вызывает увеличение тока в цепи терморезистора. Таким образом, ток через терморезистор удерживается на постоянном уровне.

Подстроечный резистор R_2 служит для регулировки рабочей точки транзистора VT_1 . В связи с тем, что у вентилятора существует порог срагивания, измерения будем начинать с определенной скорости по-

тока. Так, начнем со скорости вентилятора при 100 В. При этом переменным резистором 3,3 к выставляем нулевые показатели на измерительном приборе. К установке прилагаются градуировочные характеристики, из которых определяется скорость потока по показаниям измерительного прибора при разных температурах воздуха.

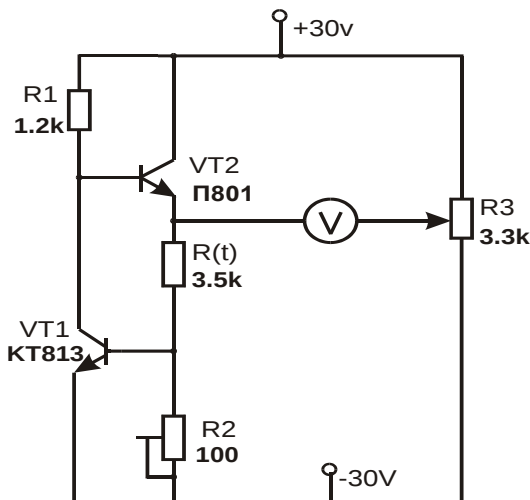


Рис. 11. Измерительная схема

Порядок выполнения работы

1. Включить прибор ВИП-010 тумблером «Сеть» и выставить на нем напряжение 30 В.
2. Подать питание с прибора ВИП-010 на клеммы стенда, строго соблюдая полярность.
3. Установить на источнике регулируемого переменного напряжения 100 В.
4. Включить вентилятор тумблером «Сеть».
5. Ручкой регулятора «Установка нуля» в течение 3-х минут, пока схема окончательно не прогреется, добиваться нулевых показаний микроамперметра. Целью является получение таких показаний микроамперметра, когда стрелка совершает минимальный дрейф около нуля (в пределах одного деления шкалы).
6. Снять зависимость показаний микроамперметра от напряжения на вентиляторе в диапазоне от 100 до 250 В.
7. По градуировочным характеристикам построить график зависимости скорости воздушного потока от напряжения питания вентилятора.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Экспериментальные результаты.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Физические принципы измерения скорости и расхода газов и биожидкостей. Сравнительная характеристика методов и датчиков скорости, расхода газов и биожидкостей.
2. Терморезистивный анемометр. Конструкция, принцип работы. Схемы измерения с постоянным током и постоянной температурой.
3. Чашечные и крыльчатые анемометры, анемометры с тормозящей механической пластиной, трубка Пито.
4. Ультразвуковые и лазерные анемометры и расходомеры.
5. Доплеровские анемометры. Ионные и параметрические анемометры.

Библиографический список

1. Аш Ж. с соавторами. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн. 2: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 424 с.
2. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.
3. Виглеб Г. Датчики: устройство и применение: пер. с нем. М.: Мир, 1989. 196 с.

5086

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 1

ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ДАТЧИКИ ХОЛЛА

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о эффекте Холла, магниторезистивном и магнитодиодном эффектах, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 7. Библиогр.: 8 назв.

Эффект Холла, магниторезистивный эффект, датчик Холла, магнитодиодный эффект

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Изучение эффекта Холла и других гальваномагнитных и магниторезистивных эффектов; исследование зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля соленоида.

1. Краткие теоретические сведения

Эффект Холла

Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов в полупроводнике, по которому проходит электрический ток, в том случае, когда есть магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока. Рассмотрим этот эффект подробнее.

Предположим, что в пластине полупроводника, находящейся в магнитном поле, идет ток, обусловленный движением только электронов (рис.1).

Пренебрежем пока статическим разбросом электронов по скоростям. Тогда сила Лоренца будет смещать электроны к нижней грани пластины полупроводника. Направление смещения определяется направлением силы Лоренца, то есть векторным произведением:

$$\vec{F}_o = q[\vec{V} \times \vec{B}], \quad (1)$$

где q - элементарный заряд, $\vec{V}$ - скорость носителя заряда, $\vec{B}$ - индукция магнитного поля.

В результате смещения движущихся электронов между верхней и нижней гранями пластины полупроводника возникает ЭДС Холла.

В полупроводнике p -типа при аналогичном направлении векторов B и I знак ЭДС Холла меняется на противоположный.

Накопление носителей заряда у нижней грани пластины полупроводника прекращается, когда сила Лоренца уравнивается силой электрического поля Холла. При перпендикулярном направлении напряженности магнитного поля к поверхности пластинки полупроводника условием такого динамического равновесия будет равенство:

$$qVB = qE_H, \quad (2)$$

где E_H – напряженность поля Холла.

Считая электрическое поле Холла однородным и учитывая геометрические размеры пластинки полупроводника, записываем уравнение для ЭДС Холла, то есть для поперечной разности потенциалов между боковыми гранями пластинки полупроводника с электропроводностью p -типа:

$$U_H = E_H a = VB, \quad (3)$$

где a – расстояние между контактами Холла.

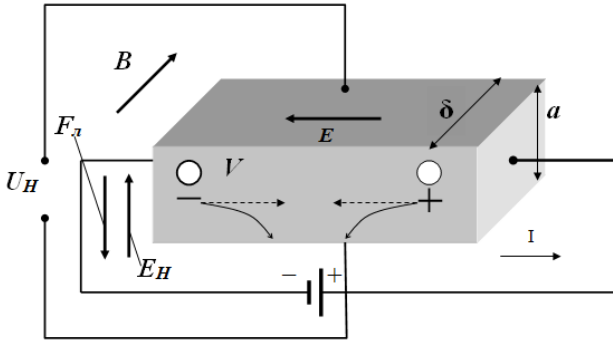


Рис. 1. Эффект Холла в кристаллическом полупроводнике

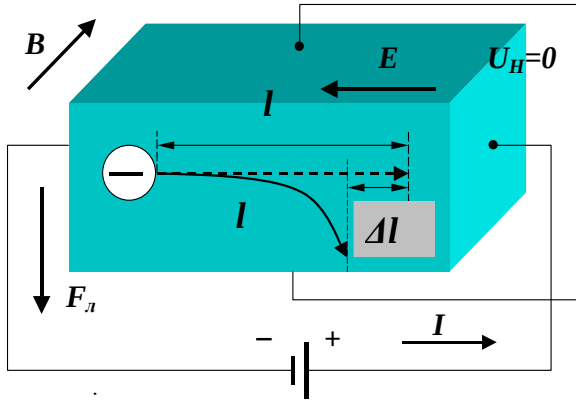


Рис. 2. Эффект магнитосопротивления

Значение скорости дырок определим из формулы для тока:

$$I = JS = q\mu_{\delta} ES = q\mu_{\delta} Va\delta, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения полупроводника, δ – толщина пленки (слоя) полупроводника, p – концентрация основных носителей заряда (дырок) в полупроводнике, μ_{δ} – дрейфовая подвижность носителей заряда (дырок).

Тогда

$$U_H = \frac{1}{qr} \frac{IB}{\delta} = R_H \frac{IB}{\delta}, \quad (5)$$

где $R_H = \frac{1}{qn}$ – коэффициент Холла для полупроводника с электропроводностью n -типа.

В действительности носители заряда в полупроводнике распределены по скоростям. Поэтому более точное значение коэффициента Холла отличается от полученного ранее выражения коэффициентом A :

$$R_H = \frac{A}{qr}. \quad (6)$$

Значение коэффициента A находится в диапазоне от 1 до 2 и зависит от механизма рассеяния носителей заряда. Так, для вырожденного полупроводника $A = 1$, для полупроводника с преобладающим рассеянием носителей на тепловых колебаниях кристаллической решетки $A = 1,18$, для полупроводника с преобладающим рассеянием на ионизированных примесях $A = 1,93$. Коэффициент Холла для полупроводника с электропроводностью n -типа имеет другой знак:

$$R_H = -\frac{A}{qr}. \quad (7)$$

В полупроводниках с приблизительно равными концентрациями электронов и дырок (например, в собственных полупроводниках) расчет коэффициента Холла получается более сложным:

$$R_H = -\frac{A}{q} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2}, \quad (8)$$

где μ_n , μ_p – дрейфовая подвижность электронов и дырок соответственно.

Из формулы (5) видно, что для повышения U_H необходимо уменьшать толщину образца δ , что в пределе приводит к пленочной конструкции датчика Холла (рис. 3, а).

Магниторезистивный эффект

В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, при прохождении электрического тока на носители заряда действует сила Лоренца, искривляющая их траекторию движения (рис. 2). Поэтому эффективная длина пробега носителей в направлении электрического

поля уменьшается на $\Delta\ell$, что проявляется в эффективном увеличении удельного сопротивления полупроводника:

$$\Delta\ell = \ell - \ell \cos\varphi, \quad (9)$$

где ℓ – длина пробега носителей, $\cos\varphi$ – косинус угла Холла.

Угол $\varphi \approx \mu_{n(p)}B$. Функцию $\cos\varphi$ можно разложить в ряд Тейлора и, ограничившись первыми двумя членами ряда, получить:

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} \approx \frac{\mu^2 B^2}{2} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho}. \quad (10)$$

Изменение удельного сопротивления или проводимости полупроводника в магнитном поле называется *эффектом Гаусса* или *магниторезистивным эффектом* (эффектом магнитосопротивления). В полупроводнике n-или p-типа проводимости отклонение носителей к одной из граней полупроводника приводит к возникновению поперечного электрического поля – поля Холла. Напряженность этого поля такова, что при параллельности граней образца и линий тока происходит полная компенсация действия силы Лоренца. Эти процессы протекают за очень короткий промежуток времени (10^{-12} с), и поэтому эффекта магнитосопротивления наблюдаться не должно было бы. Однако скорости частиц имеют дисперсионное размытие для пакета носителей, поэтому поле Холла компенсирует действие силы Лоренца только для носителей, движущихся со средней скоростью. На более медленные носители поле Холла действует сильнее, а на более быстрые преобладающее влияние оказывает сила Лоренца [формулы (3), (5)]. Поэтому вклад в проводимость носителей, движущихся со скоростью, отличной от средней в поперечном магнитном поле, оказывается меньше. Для собственного (нелегированного) полупроводника эффект магнитосопротивления выражен значительно сильнее, так как ЭДС Холла имеет очень малое значение. Исключить влияние ЭДС Холла в легированном полупроводнике можно, если на поверхность пластинки нанести узкие металлические полоски для «закорачивания» холловской разности потенциалов (рис. 3, б). Они должны располагаться перпендикулярно к линиям тока и вектору индукции магнитного поля. Вместо нанесенных на поверхность полосок могут использоваться монокристаллы с пронизывающими их металлическими иглами.

Такой вариант используется при создании магниторезисторов из сплава InSb+NiSb. При выращивании монокристаллов из этого материала NiSb образует иглы высокой проводимости, которые при выборе соответствующей ориентации практически полностью исключают поле Холла. Исключить ЭДС Холла для повышения чувствительности магниторезистора можно с помощью специальных

конструкций, например так называемого диска Корбино (рис. 3, в). В данном случае датчик представляет собой пластину полупроводника в форме диска с концентрическим расположением контактов: один в центре на оси диска, а другой по окружности на равных расстояниях от первого. В этом случае линии тока будут расположены радиально. При помещении в магнитное поле, пронизывающее пластину перпендикулярно, носители будут отклоняться вдоль поверхности. Линии тока удлинятся, но накопления холловских зарядов происходить не будет. В такой структуре наблюдается максимальный эффект магнитосопротивления [4].

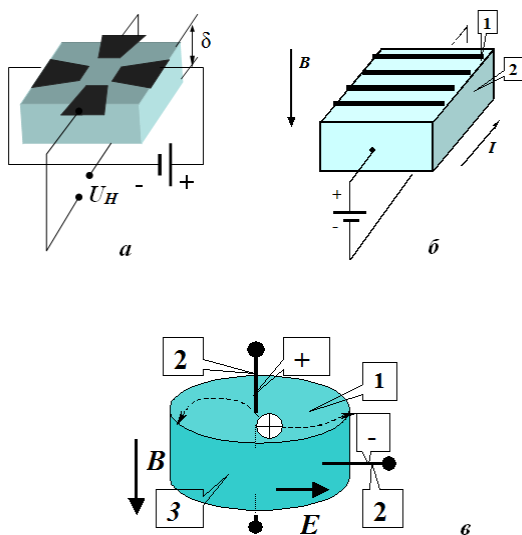


Рис. 3. Конструкции гальваномагнитных и магниторезистивных датчиков: а – пленочный датчик Холла (δ – толщина пленки полупроводника); б – пленочный магниторезистор с закорачивающими контактами Холла перемычками (1 – металлические пленочные перемычки, 2 – холловские контакты); в – диск Корбино (1 – диск полупроводника, 2 – выводы осевого и концентрического электродов, 3 – концентрический электрод)

В настоящее время для создания магниторезисторов наиболее широко используется антимонид индия InSb с металлическими закорачивающими полосками. Поскольку эффект магнитосопротивления тем больше, чем выше подвижность носителей, то для создания магниторезисторов наиболее перспективно

использование полупроводниковых материалов с узкой запрещенной зоной или бесщелевых составов. В последнее время предложено использовать твердый раствор теллуридов кадмия и ртути $(\text{HgTe})_{1-x}\text{CdTe}_x$. Состав раствора выбирается в зависимости от требуемой рабочей температуры. Магниточувствительность данного раствора независимо от рабочей температуры значительно выше, чем у InSb , однако сопротивление образца без магнитного поля оказывается значительно меньше, что усложняет их практическое использование. Для повышения начального сопротивления магниторезисторы изготавливаются в виде змейки. При малых магнитных полях зависимость сопротивления от индукции магнитного поля носит параболический характер, а при больших – становится линейной.

Магнитодиодный эффект

Магнитодиодный эффект заключается в относительно резком возрастании сопротивления полупроводникового диода в прямом направлении под воздействием поперечного магнитного поля. Рост сопротивления такого диода вызван уменьшением подвижности носителей заряда, приводящим к росту сопротивления базы [5, 6].

Одним из видов преобразователей магнитного поля, работающих благодаря магнитодиодному эффекту, являются *магнитодиоды (МД)*.

Конструктивно магнитодиод состоит из *p-n*-перехода с невыпрямляющими контактами, между которыми находится область высокоомного полупроводника (рис. 4, а). От обычных полупроводниковых диодов магнитодиод отличается тем, что изготавливается из высокоомного полупроводникового материала с проводимостью близкой к собственной, а шириной базы d в несколько раз большей диффузионной длины пробега носителей заряда L , в то время как в обычных диодах $d < L$.

При прохождении электрического тока в таких «длинных» диодах определяющими становятся процессы, зависящие от рекомбинации и движения неравновесных носителей заряда в базе и на поверхности. Проводимость магнитодиода в прямом смещении напряжения при высоких уровнях инжекции определяется инжектированными в базу неравновесными носителями заряда. Падение напряжения происходит на высокоомной базе, а не на *p-n*-переходе как в обычном диоде. Если пропустить через магнитодиод электрический ток и поместить в поперечное магнитное поле, то сопротивление базы возрастет. Также сопротивление базы увеличивается за счет повышения роли поверхностной рекомбинации отклоняющихся к поверхности полупроводника носителей заряда [7]. Эквивалентная схема

магнитодиода представляет собой магниторезистор с последовательно включенным усилителем (рис. 4, в). Стандартная вольт-амперная характеристика «торцевого» магнитодиода приведена на рис. 4, б.

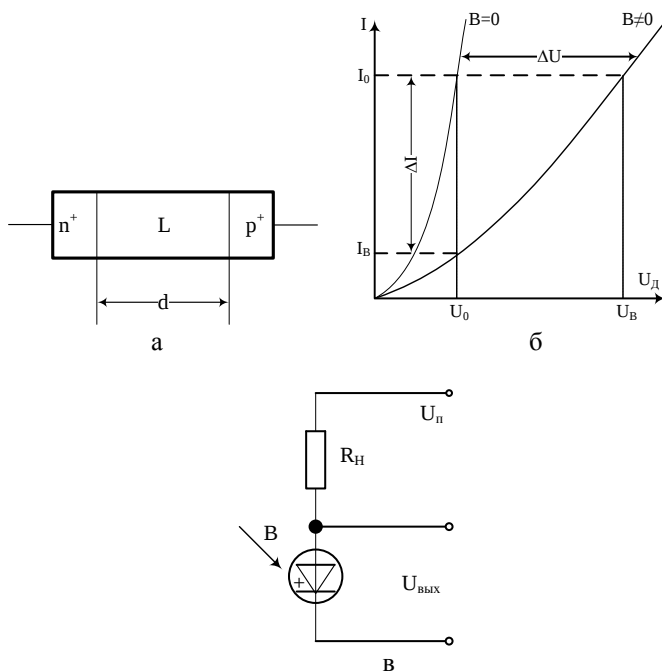


Рис. 4. К пояснению принципа действия магнитодиода: а – конструкция перехода; б – вольт – амперная характеристика; в – схема включения

Германий (Ge) и кремний (Si) являются основными материалами для изготовления магнитодиодов. Сейчас существует много разновидностей магнитодиодов, производимых по различным технологиям и в разных конструктивных формах. При изготовлении магнитодиодов применяется сплавная, биполярная, МОП и другие различные технологии. Конструктивно магнитодиоды и обычные диоды во многом схожи. Принципиальная разница заключается в том, что корпус магнитодиодов выполняется из немагнитного материала.

Магниточувствительные транзисторы среди широкого разнообразия полупроводниковых преобразователей магнитного поля

зарекомендовали себя как наиболее перспективные приборы, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Магнитотранзисторы (МТ) - это транзисторы, у которых конструктивные и рабочие параметры оптимизированы таким образом, что достигается максимальная чувствительность коллекторного тока при изменении магнитного поля. По направлению протекания рабочего тока относительно технологической поверхности кристалла магнитотранзисторы подразделяются на две группы: вертикальные (ток протекает параллельно) и горизонтальные (ток протекает перпендикулярно). Вертикальные магнитотранзисторы (ВМТ) способны реагировать лишь на лежащую в плоскости кристалла (продольную) компоненту магнитного поля, а горизонтальные (ГМТ) – также и на перпендикулярную к этой плоскости поперечную компоненту. В зависимости от того, к перпендикулярной или параллельной составляющей (относительно технологической поверхности) магнитного поля чувствительны магнитотранзисторы, они делятся соответственно на поперечные и продольные. В зависимости от природы переноса неосновных носителей заряда в базе, магнитотранзисторы, в свою очередь, делятся на диффузионные и дрейфовые.

Основное предназначение магнитотранзисторов – это применение их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей.

Рассмотрим на примере *полярный магнитотранзистор*, у которого знак изменения выходного тока зависит от направления магнитного поля [8]. На рис. 5 представлены конструкция и вольт-амперная характеристика полярного магнитотранзистора. Устройство сконструировано на основе магнитодиода КД304 и имеет $n-p-p^+$ структуру. Коллектор (К) и база (Б) равнозначны по выполняемой функции (инжекторы дырок в диодных прямосмещенных структурах Б-Э и К-Э, электрически соединенных с общим эмиттером (Э)).

Без магнитного поля при росте базового тока I_b напряжение $U_{КЭ}$ уменьшается из-за введения в область базы между К и Э из базового контакта дополнительных носителей заряда. При воздействии управляющего магнитного поля и при нулевом токе базы $I_b = 0$ наблюдается рост напряжения, обусловленный магнитодиодным эффектом. При этом в направлении B^+ падение напряжения больше, чем в направлении B^- . Это связано с магнитодиодным эффектом и наличием захвата дырок обедненной областью у контакта металл–полупроводник.

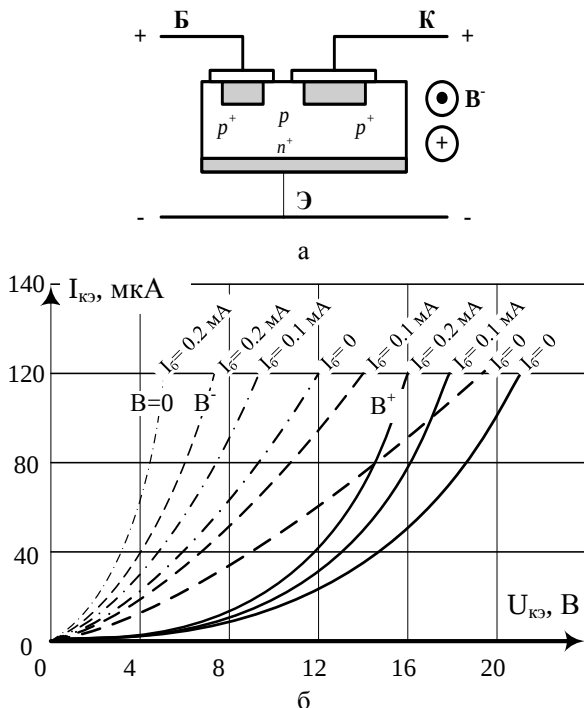


Рис. 5. Полярный магнитотранзистор: а – конструкция; б – ВАХ при изменении значений базового тока и магнитной индукции: $B = 0$; $B^+ = 0,2$ Тл; $B^- = 0,2$ Тл

На рис. 6 показана зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля. В магнитном поле с B^- при $I_Б \neq 0$ отклоняющиеся носители зарядов обогащают базовую область с между Э и К носителями заряда и таким образом уменьшают сопротивление этой области. При этом сопротивление оказывается значительно меньше, чем при нулевом токе базы $I_Б = 0$.

При значениях тока базы, не равных нулю $I_Б \neq 0$, напряжение $U_{К-Э}$ уменьшается, появляется полярная магниточувствительность, которая с ростом тока $I_Б$ вначале возрастает, а затем достигает насыщения. Таким образом, полярная магниточувствительность управляется током базы $I_Б$. С ростом индукции управляющего магнитного поля чувствительность в поле B^+ возрастает линейно, а в поле B^- она меньше и с увеличением индукции стремится к насыщению.

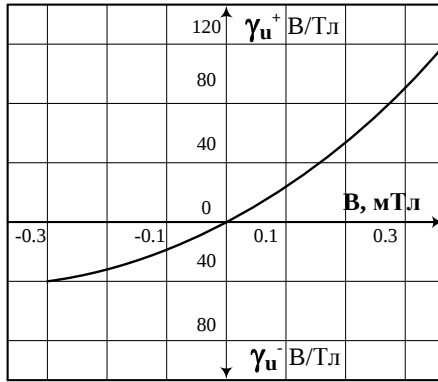


Рис. 6. Зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля при $I_b = 0,2$ мА и $I_{К-Э} = 120$ мкА

2. Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используются (см. рис. 7):

- 1 – соленоид с С-образным сердечником,
- 2 – полупроводниковый датчик Холла,
- 3 – усилительный каскад на операционных усилителях,
- 4 – блок питания соленоида,
- 5 – генератор тока,
- 6 – цифровой вольтметр.

Соленоид имеет длину 0,025 м и состоит из 6300 витков. Отсюда удельная плотность намотки:

$$n = \frac{6300}{0,025} = 252000 \cdot \quad (11)$$

Датчик Холла крепится в зазоре этого соленоида. Таким образом, линии магнитной индукции, сосредоточенные в сердечнике, проходят через датчик Холла перпендикулярно к его плоскости и можно приблизительно считать, что индукция магнитного поля в зазоре равна индукции на оси соленоида.

Сердечник имеет магнитную проницаемость $\mu = 5000$, магнитную постоянную $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ [Гн /м].

Считая соленоид бесконечным, можно записать для продольного вектора индукции:

$$B_z = \mu \mu_0 I_c n = \mu \mu_0 \frac{U_{BX}}{R} n, \quad \dots \quad (12)$$

где $U_{\text{вх}}$ – напряжение, прикладываемое к обмотке соленоида, $R=6,6$ кОм – активное сопротивление обмотки соленоида, I_C – ток через соленоид, $n=252000$ – удельная плотность намотки.

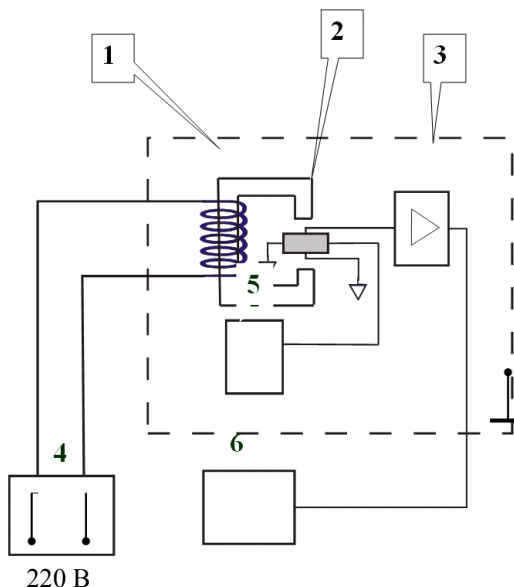


Рис. 7. Структурная схема лабораторной установки для исследования датчиков магнитного поля: 1 – соленоид; 2 – датчик Холла (магниторезистор); 3 – усилительный каскад; 4 – блок питания соленоида; 5 – генератор тока для датчика магнитного поля; 6 – цифровой вольтметр

3. Порядок выполнения работы

При отсутствии магнитного поля ЭДС Холла равно нулю. Однако вследствие различных побочных явлений (например, недостаточно точная установка нуля на выходе операционного усилителя) измерительный прибор может показать некоторую разность потенциалов даже при отсутствии тока в соленоиде. Для исключения этой ошибки измерения необходимо проводить дважды при двух противоположных направлениях тока в соленоиде. Тогда

$$\varepsilon_H = \frac{1}{2}(|\varepsilon_{H1}| + |\varepsilon_{H2}|). \quad (13)$$

3.1. Установить с помощью источника питания на входе соленоида $U = 10 \text{ В}$ и измерить ЭДС Холла. Данные занести в таблицу.

Таблица экспериментальных результатов

№ п/п	U, В	B, Тл	$\mathcal{E}_{\text{НИЗМ}}$, мВ	$\mathcal{E}_{\text{НИСТ}}$, мВ	$R_{\text{H}}, \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}$
1					
2					

3.2. Увеличивая напряжение на входе соленоида через несколько вольт до максимального (50 В), провести измерения и занести соответствующие данные в таблицу.

3.3. Вычислить индукцию магнитного поля В для заданных значений $U_{\text{вх}}$ по формуле (3). Занести их в таблицу.

3.4. Вычислить истинное значение ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_{\text{НИСТ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{НИЗМ}}}{K_U}, \quad (14)$$

где K_U – коэффициент усиления усилительного каскада ($K_U = 830$).

Полученные значения $\mathcal{E}_{\text{НИСТ}}$ занести в таблицу.

3.5. Вычислить постоянную Холла R_{H} для каждого измерения:

$$R_{\text{H}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{НИСТ}} \delta}{BI_{\text{H}}}, \quad (15)$$

где δ – толщина пленки датчика Холла ($\delta = 2 \text{ мкм}$), I_{H} – ток, проходящий через датчик Холла ($I_{\text{H}} = 2,5 \text{ мА}$).

Полученные значения R занести в таблицу.

3.6. По табличным данным построить графики зависимостей: $B = f(I_c)$, $\mathcal{E}_{\text{НИСТ}} = f(B)$, $\mathcal{E}_{\text{НИСТ}} = f(I_c)$.

4. Содержание отчета

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Функциональная схема лабораторного макета.
- 4.3. Экспериментальные зависимости.
- 4.4. Сводная таблица.
- 4.5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Физические принципы, законы, используемые для измерения величины и направления вектора магнитной индукции (напряженности магнитного поля).

2. Датчики Холла. Метрологические и конструктивные характеристики.

3. Магнитодиоды, магниторезисторы, магнитотранзисторы. Принципы работы, характеристики.

4. Индуктивные, индукционные датчики магнитных полей. Датчики Виганда. Датчики Джозефсона.

5. Применение датчиков магнитного поля в биомедицинских и технических системах.

Библиографический список

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.

2. Елизарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. М.: Радио и связь, 1987. 88 с.

3. Гуменюк С.В., Подлепецкий В.И. Интегральные полупроводниковые магниточувствительные датчики // Зарубежная электронная техника. 1989. Вып.12. С. 3-49.

4. Котенко Г.И. Магниторезисторы. Л.: Энергия, 1972. 81 с.

5. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.

6. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М: ДМК Пресс, 2001. – 544 с.

7. Егизарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.

8. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.

5087

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 2

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы интегральных датчиков температуры, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 7. Библиогр.: 3 назв.

Интегральный датчик температуры, преобразователь температура - напряжение, датчик температур на p-n-переходе

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Исследование линейности и градуировка полупроводниковых датчиков температуры на основе биполярных транзисторов и ИМС КР1017ПП1.

1. Краткие теоретические сведения

Температурная зависимость напряжения на р-п-переходе (при фиксированном токе через него) обуславливает широкое применение полупроводниковых диодов и транзисторов в качестве датчиков температуры в электронных термометрах и других устройствах. Другими температурно-чувствительными параметрами р-п-перехода являются тепловой ток обратно смещенного перехода (J_0 или J_{k0}) и его дифференциальное сопротивление (R_d). Однако температурная зависимость прямого напряжения на переходе отличается меньшей нелинейностью. Чувствительность к температуре S диода или транзистора, включённого по схеме диода (рис. 1), определяется как $S = dU/dT$. Ее величина имеет порядок -2.5 мВ/°С, но она не является совершенно независимой от температуры. Кроме того, S , как и U , зависит от обратного тока J_0 , который может быть разным у различных элементов. Поэтому взаимозаменяемость можно обеспечить только посредством отбора элементов, имеющих одинаковые определяющие параметры. Ток I диода или транзистора в диодном включении связан с напряжением U следующим соотношением:

$$I = I_0 \exp (qU/kT), \quad (1)$$

$$I_0 = CT^m \exp \left(- \frac{q\Delta E_g}{kT} \right), \quad (2)$$

где ΔE_g – ширина запрещенной зоны, В, равная для кремния 1,12 В; $m \approx 3$; C – константа, независимая от T , но зависящая от геометрии перехода и уровней легирования.

Тогда

$$U = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln I + \Delta E_g - m \left(\frac{kT}{q} \right) \ln(T) - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln C. \quad (3)$$

Константу C и ток I можно исключить, если известно напряжение U_1 при таком же токе I . При температуре T_1 имеем:

$$U = U_1 \left(\frac{T}{T_1} \right) + \Delta E_g \left(1 - \frac{T}{T_1} \right) + m \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{T}{T_1} \right), \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dT} = (U_1 - \Delta E_g) \left(\frac{1}{T_1} \right) - \left(\frac{mk}{q} \right) \left[1 + \ln \left(\frac{T}{T_1} \right) \right], \quad (5)$$

$$\frac{dU}{dT} = -\frac{mk}{q} + (U - \Delta E_g) \left(\frac{1}{T} \right). \quad (6)$$

Практическая схема преобразователя «температура-напряжение» (с датчиком на транзисторе), предназначенного для использования с цифровым вольтметром, показана на рис. 2.

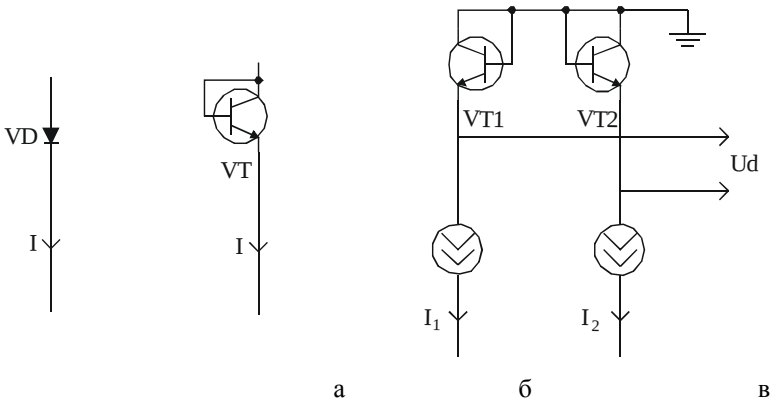


Рис. 1. Варианты полупроводниковых датчиков температур на р-п-переходе: а – диод; б – эмиттерный переход; в – согласованная пара транзисторов

На операционном усилителе DA1 выполнен повторитель напряжения, DA2 – масштабирующий усилитель. Подстроечными резисторами R5 и R4 устанавливаются нулевое выходное напряжение, когда датчик находится при температуре 0°C , и выходное напряжение $+0,5\text{ В}$ при температуре датчика $+50^{\circ}\text{C}$. При начальной установке большой крутизны резистором R4 можно значительно снизить

погрешности, связанные с разбросом параметров резисторов, используемых в схеме.

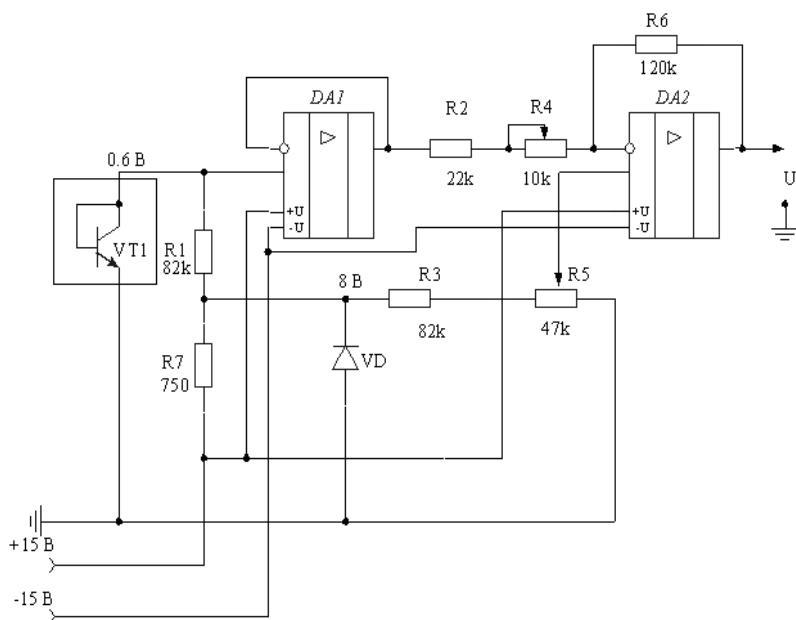


Рис. 2. Практическая схема преобразователя температура - напряжение

Значительное улучшение линейности и взаимозаменяемости достигается посредством использования спаренных транзисторов, включенных по схеме диода и питаемых постоянными токами I_1 и I_2 , на которых изменяется разность напряжений между базой и эмиттером (рис.1, в). Это позволяет исключить влияние тока I_0 . Чувствительность такой схемы выражается формулой:

$$S = \frac{d(u_1 - u_2)}{dT}, \quad (7)$$

$$S = 86,66 \ln(I_1/I_2), \text{ мкВ} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (8)$$

Это обычно больше чувствительности термопар, и для измерения не требуется знать температуру опорного спая. Но, тем не менее,

указанное значение ниже чувствительности термометров сопротивления с устройством формирования сигнала. Изменение электрических параметров при высоких и низких температурах определяет рабочий диапазон измеряемых температур, который охватывает температуры от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$. В этом диапазоне датчики отличаются высокой стабильностью. Два транзистора $VT1$ и $VT2$ (рис.3, б) с одинаковыми значениями тока I_0 питаются параллельно постоянными токами I_1 и I_2 . Для этой схемы справедливы соотношения:

$$I_1 = I_0 \exp\left(\frac{qU_1}{kT}\right) \quad \text{или} \quad U_1 = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right), \quad (9)$$

$$I_2 = I_0 \exp\left(\frac{qU_2}{kT}\right) \quad \text{или} \quad U_2 = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_2}{I_0}\right). \quad (10)$$

Измерение разности напряжений $U_d = U_1 - U_2$ позволяет исключить влияние I_0 :

$$U_d = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln n, \quad (11)$$

где n – отношение величин постоянных токов. С числовыми коэффициентами эта формула имеет следующий вид:

$$u_d = 86,56 \cdot T \lg n, \text{ где } [u_d] = \text{мВ}, [T] = \text{К}. \quad (12)$$

Чувствительность к температуре выражается формулой:

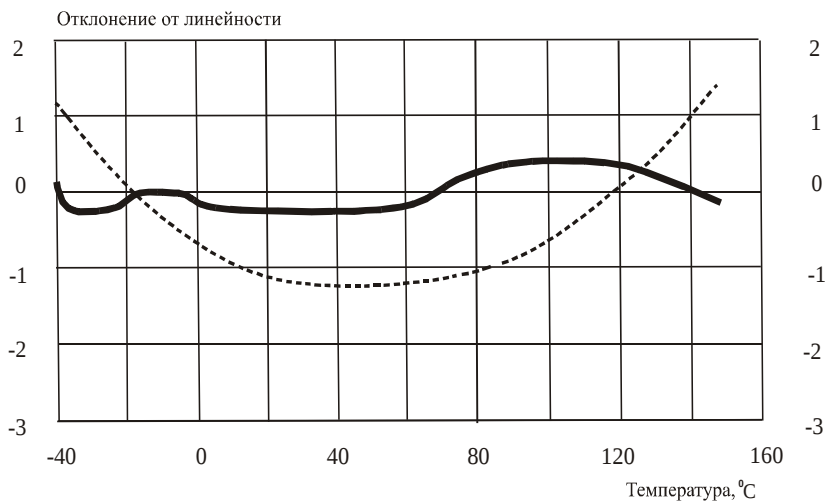
$$S = \frac{du}{dT} = \left(\frac{k}{q}\right) \lg n, \quad (13)$$

$$\text{или численно: } S = 86,66 \cdot \lg(n), \text{ мВ} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (14)$$

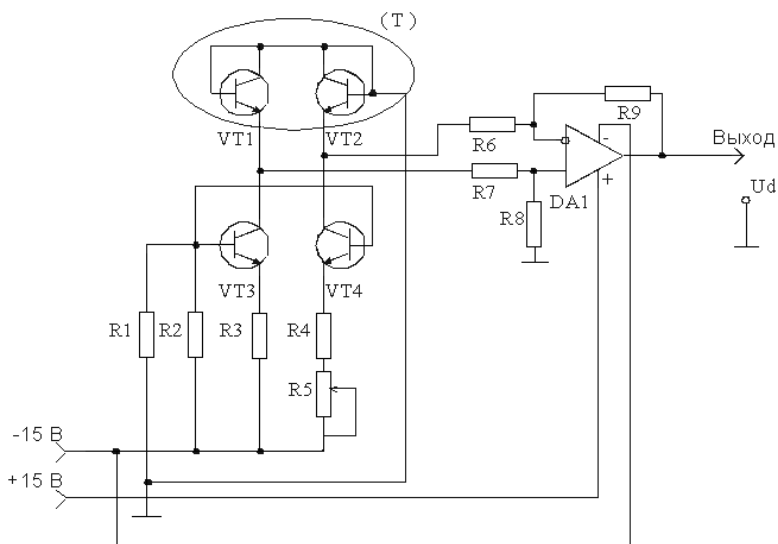
Чувствительность к температуре данной дифференциальной схемы меньше чувствительности схемы с одним диодом или транзистором, но она существенно меньше зависит от T . Линейность значительно улучшается, как это показано на рис. 3, а.

Интегральные датчики температуры

Интегральные датчики температуры (ИТД) разрабатываются и выпускаются фирмами Analog Devices (AD580, AD590), National Semiconductor (LM135). Отечественной промышленностью был налажен выпуск ИТД серии 1017ПП1.



а



б

Рис. 3. Датчик температуры на спаренных транзисторах:
а – сравнение линейности (--- одиночный транзистор, — — пара транзисторов); б – схема включения

Схемотехнические, параметрические и конструктивные особенности интегрального температурного датчика КР1017ПП1

На рис. 4 представлена принципиальная схема ИТД КР1017ПП1, которая состоит из двух основных структурных единиц:

I – усилительный каскад, содержащий п-р-п транзисторы VT4, VT6, р-п-р транзисторы VT3, VT5;

II –термодатчик, включающий в себя п-р-п транзисторы VT2 (многоэмиттерный), VT7 и резистор R2.

Все элементы принципиальной схемы размещены на одной кристаллической подложке из кремния. Между резисторами R2 и R4 поддерживается соотношение:

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{kT_0 \lg A}{0,25E_g}, \quad (15)$$

где k – постоянная Больцмана, T_0 – абсолютная температура равенства токов I_1 и I_2 , E_g – ширина запрещенной зоны кремния, A – отношение инжектирующих площадей транзисторов VT2 и VT7.

Принцип работы ИТД КР1017ПП1 заключается в следующем. Для транзисторов п-р-п коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ близок к 1, а для р-п-р транзисторов он заметно отличается от 1. Поэтому в дальнейшем базовыми токами в расчетах для п-р-п транзисторов (по сравнению с токами эмиттера) можно пренебречь. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$I_1 = I_6 + I_7, \quad (16)$$

$$I_2 = I_4 + I_5 = I_8, \quad (17)$$

$$I_3 = I_6 + I_7 + I_8 = I_1 + I_2. \quad (18)$$

Переходы эмиттер-база транзисторов VT4 и VT6 являются цепями отрицательной обратной связи для соответствующих транзисторов VT2 и VT7. В свою очередь VT2 и VT7 работают при различных плотностях эмиттерного тока, различающихся в A раз и выравнивающих значения токов I_6 и I_7 . Поэтому:

$$I_6 = AI_7 \exp\left(-\frac{I_6 R_2}{\varphi_t}\right), \quad (19)$$

где $\varphi_t = kT/q$ - тепловой потенциал. Если $I_6 = I_7$, то

$$I_6 = I_7 = \frac{\varphi_t \lg A}{R_2}. \quad (20)$$

Напряжение на базе VT1 пропорционально разности токов $\gamma I_4 - I_5$; величина $\gamma < 1$ учитывает влияние отклонения коэффициентов передачи по току р-п-р транзисторов на передачу тока I_5 . Следящий режим транзисторов VT4, VT5 и VT6 обеспечивается наличием ООС и ПОС усилителя II. ООС по базе VT4 обеспечивается через резистор R1, ПОС по базе VT6 – через R3.

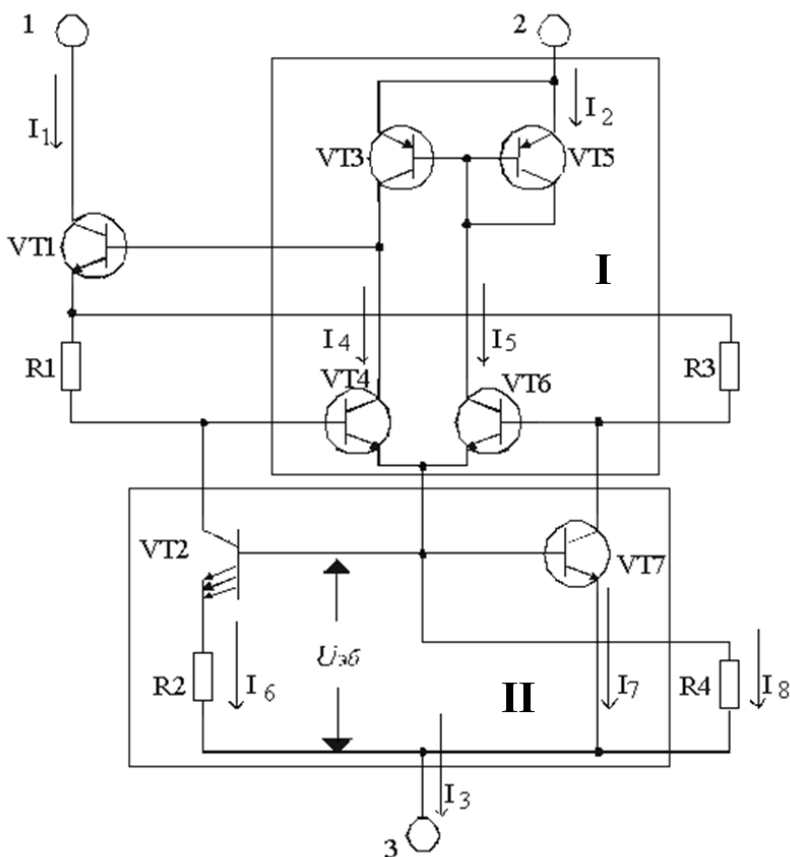


Рис. 4. Принципиальная схема ИТД КР1017ПП1

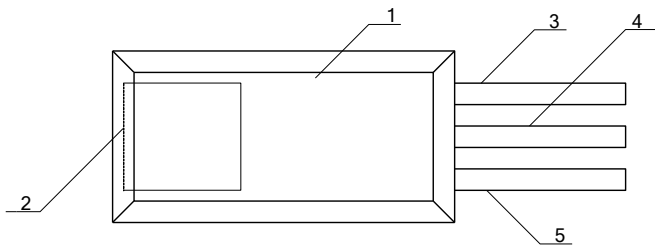


Рис. 5. Конструкция датчика КР1017ПП1:

1 – пластмассовая опрессовка; 2 – термоввод; 3 – вывод тока I_1 ;
4 – вывод тока I_3 ; 5 – вывод тока I_2

При условии $R1 = R3$ усилитель **I** устойчив, так как глубина ПОС в γ раз меньше глубины ООС. В результате усилитель **I** обеспечивает для $VT1$ такое рабочее смещение, при котором он суммирует протекающие через $R1$ и $R3$ токи I_6 и I_7 и на выводе 1 согласно (16) и (19):

$$I_1 = \frac{2\varphi_t \lg A}{R_2} = \frac{2k \lg A}{R_2} T, \quad (21)$$

$$I_8 = \frac{U_{\text{эб}}}{R_4}. \quad (22)$$

Температурный коэффициент тока I_8 :

$$\frac{dI_8}{dT} = \frac{U_{\text{эб}} - \frac{E_g}{q}}{TR_4}, \quad (23)$$

$dI_8/dT < 0$, так как рабочее напряжение $U_{\text{эб}} \approx 0.6...0.7$ В, а E_g/q для кремния равно 1,2 В. Этот факт позволяет установить условия стабильности тока I_3 , когда I_1 и I_8 имеют противоположные по знаку температурные коэффициенты. Анализ неустойчивости тока $I_3(\Delta I_3)$ при изменении температуры ΔT с погрешностью до величин второго порядка можно представить выражением:

$$\Delta I_3(\Delta T) = \frac{2kT_0 \lg A \Delta T}{qR_2 T} + \frac{2kT_0 \lg A \Delta T^2}{qR_2 T^2} + \frac{U_{\text{зб}} - \frac{E_g}{q} \Delta T}{R_4 T} + \frac{U_{\text{зб}} - \frac{E_g}{q} \Delta T^2}{R_4 T^2} + \dots \quad (24)$$

При условии

$$U_{\text{зб}}(T_0) = U_{\text{зб}0} = \frac{E_g}{2q}, \quad (25)$$

$$I_6(T_0) + I_7(T_0) = I_8(T_0). \quad (26)$$

Из (25) и (26) вытекает параметрическое соотношение (15). При этом ток I_1 является линейной функцией T с положительным температурным коэффициентом, а ток $I_2 = I_3 - I_1$ – линейной функцией T с таким же отрицательным температурным коэффициентом, причем при температуре T_0 $I_1 - I_2 = 0$. При подаче напряжения питания отрицательной полярности на вывод 3 и при съеме тока I_1 получаем преобразователь с абсолютной температурной шкалой, а при использовании разности токов I_1 и I_2 – со шкалой Цельсия. Другими словами, при использовании арифметических операций с токами I_1 , I_2 и I_3 можно получить следующую характеристику ИТД:

$$\gamma_{(T)} = \frac{I_{1(T)} - I_{2(T)}}{I_{3(T)}} = \frac{t^0 C}{173,2} \quad (27)$$

Конструкция датчика KP1017ПП1 представлена на рис. 5. Интегральная схема датчика выполнена на кристалле кремния 3 площадью $1,8 \times 1,8$ мм². Внешнее оформление датчика представляет собой пластмассовую опрессовку 4 в форме параллелепипеда размерами $8 \times 3,6 \times 2$ мм. На задней торцевой плоскости расположены три коваровых вывода 6-8. На тыльной стороне датчика имеется коваровый термоввод 5 для ускорения передачи измеряемой температуры на кристалл. Типовая схема включения ИТД представлена на рис. 6.

Метрологические характеристики ИТД КР1017ПП1

Напряжение питания	9 В
Диапазон измеряемых температур	0...+100 °С
Нелинейность преобразования температуры:	
– в диапазоне 0...100 °С	$\leq 0,5$ °С
– в диапазоне 36...47 °С	$\leq 0,05$ °С
Разрешающая способность	не хуже 0,05 °С
Полоса пропускания в рабочем диапазоне температур	0,02 Гц

2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис. 7) состоит: из источника питания типа ВИП-010 (2-канальный); макета, где монтируются измерительная схема 1 (ИС-1) и измерительная схема 2 (ИС-2), для удобства в макете предусмотрен стабилизатор напряжения на 9 В для ИС-2. На макете расположены клеммы питания, выходные клеммы, тумблер переключения выходов ИС-1 и ИС-2, имеется выходное отверстие для датчиков температуры, цифрового вольтметра, термостата с опорным термометром. На рис. 7: ТДТ – транзисторный датчик температуры, ИТД – интегральный датчик температуры.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Подключить источник питания к макету с измерительными схемами. Установить двухполярное питание ± 15 В согласно рис. 7.

3.2. Подключить вольтметр к выходным клеммам макета.

3.3. Отградуировать транзисторный датчик температуры. Для этого установить тумблер в положение ТДТ, подстроечным резистором установить 0 В при 0 °С и 0,5 В при 50 °С.

3.4. Поместить датчики в термостат.

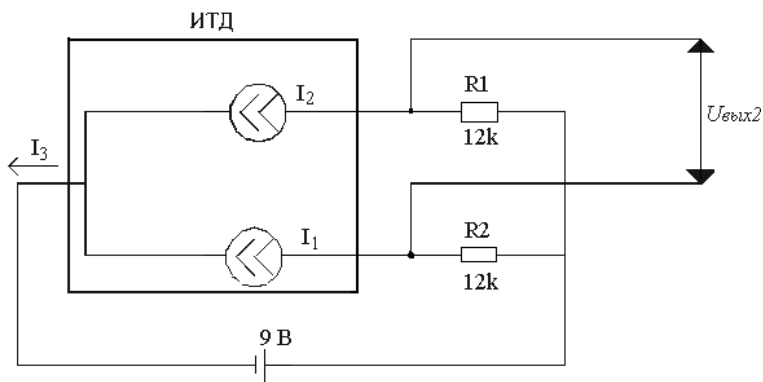


Рис. 6. Типовая схема включения КР1017ПП1

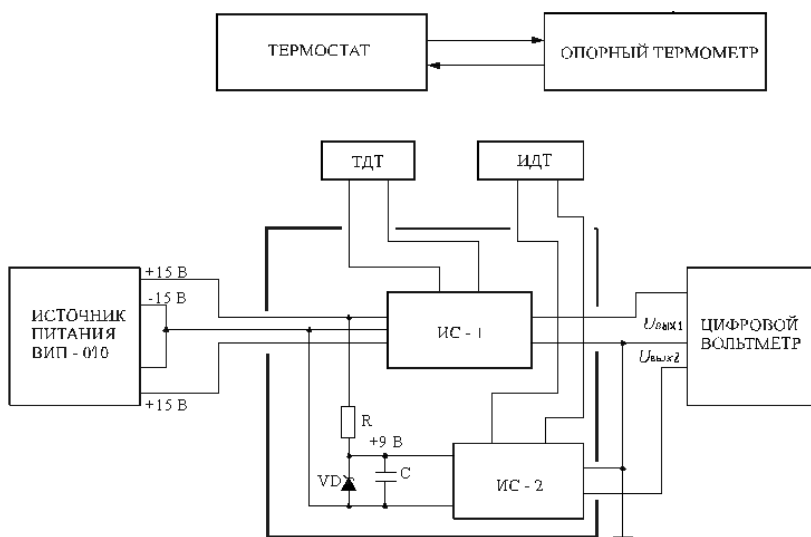


Рис. 7. Лабораторный стенд

3.5. Попеременно переключая тумблер, измерить выходные напряжения в диапазоне температур от 0 до 100 °С. Результаты измерения занести в таблицу.

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U _{вых1} ТДТ											
U _{вых2} ИДТ											

3.6. Построить зависимость $U_{\text{вых}}(T)$ для обоих датчиков.

3.7. Оценить линейность характеристик.

4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Функциональная схема лабораторного макета.

4.3. Градуировочные зависимости.

4.4. Расчет линейности и способы улучшения линейности.

4.5. Выводы.

Контрольные вопросы и темы

1. Общая характеристика температурных датчиков.

2. Характеристика ДТ на основе биполярных транзисторов.

3. Интегральные датчики температуры.

4. Законы и физические принципы, используемые для измерения температуры.

5. Сравнение метрологических характеристик полупроводниковых и других классов температурных датчиков.

Библиографический список

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М: Мир, 1992. 480 с.

2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.

3. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики Л.: Энергия, 1965. 240 с.

5088

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 3

ПОРОГОВЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 3 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы пороговых датчиков температуры, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.

Пороговый датчик температуры, S-диод, однопереходный транзистор, тиристор

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А.Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Ознакомление с принципами работы приборов с отрицательным сопротивлением, экспериментальные исследования зависимости их характеристик от температуры, освоение методики работы с приборами.

1. Краткие теоретическая часть

В основе работы пороговых датчиков температуры (переключателей) лежит эффект температурной зависимости параметров участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике. На этом участке с ростом напряжения ток уменьшается, т.е. положительному приращению напряжения соответствует отрицательное приращение тока и $R_d = dU/dI < 0$ (рис. 1).

Как известно, отрицательное сопротивление возникает в цепи при наличии положительной обратной связи между входом и выходом. Этот закон справедлив и для полупроводниковых приборов. Однако отличаются они тем, что обратная связь в них внутренняя, т.е. создается процессами, протекающими внутри прибора, а не передачей сигнала с выхода на вход по внешней цепи.

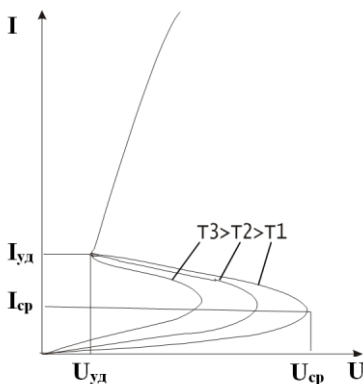


Рис.1. ВАХ термистора

S-диод

У простых диодов считается, что всё внешнее напряжение падает на *p-n*-переходе. Падение напряжения на омическом сопротивлении

базовой области сравнительно мало и принимается равным нулю. Однако в “длинных” диодах, в которых толщина базовой области больше длины диффузионного смещения носителей зарядов $W > L_{p,n}$ (на основе высокоомных полупроводников), падением напряжения на базе пренебрегать нельзя.

В этом случае приложенное к диоду напряжение U распределяется между областью объёмного заряда p - n -перехода и базой (на примере p^+ - n - p^+ структуры, рис. 2):

$$U = U_0 + U_b. \quad (1)$$

Физический механизм возникновения отрицательного сопротивления заключается в перераспределении внешнего напряжения между p - n -переходом и базой. С увеличением тока через диод растет инжекция носителей заряда в базу и уменьшается её сопротивление. По этой причине внешнее напряжение, приложенное к диоду, перераспределяется, а именно: часть напряжения, падающая на базе, уменьшается, а часть, падающая на p - n -переходе, увеличивается. Увеличение напряжения на p - n -переходе приводит к увеличению концентрации инжектированных носителей в базе диода, к дальнейшему уменьшению сопротивления базы, перераспределению напряжения и т.д. Это и есть положительная обратная связь, необходимая для появления отрицательного сопротивления. Однако сопротивление p - n -перехода с ростом тока также уменьшается, поэтому такой процесс возможен только в том случае, если сопротивление базы сильнее уменьшается с ростом тока, чем сопротивление p - n -перехода. Для этого необходимо, чтобы проводимость базы увеличивалась не только за счет инжекции, но и за счет какого-то дополнительного механизма. К основным дополнительным механизмам относят увеличение времени жизни или подвижности инжектированных носителей в компенсированном проводнике, возрастание биполярной подвижности (скорости и направления движения неравновесных носителей в электрическом поле), изменение коэффициента инжекции p - n -перехода. Однако в данной ситуации наибольший интерес представляет собой тепловой

механизм образования отрицательного сопротивления. При протекании тока через диод в нём выделяется тепло. Это также может быть причиной усиления положительной обратной связи и образования отрицательного сопротивления. Разогрев базы приводит к увеличению концентрации носителей заряда в ней. Сопротивление базы уменьшается. Происходит перераспределение напряжения между p - n -переходом и базой в сторону увеличения напряжения на p - n -переходе. Вследствие этого увеличивается инжекция носителей заряда через p - n -переход, сопротивление базы уменьшается ещё больше, что ведёт к дальнейшему перераспределению напряжения и т.д. Следует также иметь в виду, что разогрев базы зависит от температуры внешней среды. Кроме того, с ростом температуры меняются подвижности носителей заряда, отношение подвижностей и время их жизни. Очевидно, соответствующие изменения этих величин в зависимости от температуры могут также приводить к образованию участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике диода.

Однопереходный транзистор

Однопереходный транзистор, часто называемый также двухбазовым диодом, состоит из стержня полупроводника с омическими контактами на концах и p - n -переходом между ними. В однопереходном транзисторе p - n -переход, выполняемый на боковой поверхности, занимает меньшую часть и включается в прямом направлении (рис. 3).

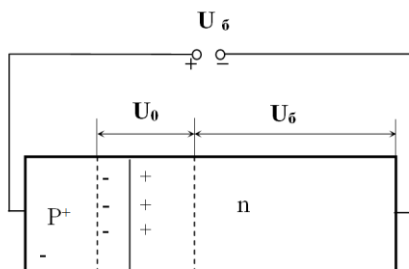


Рис. 2. Структурная схема диода

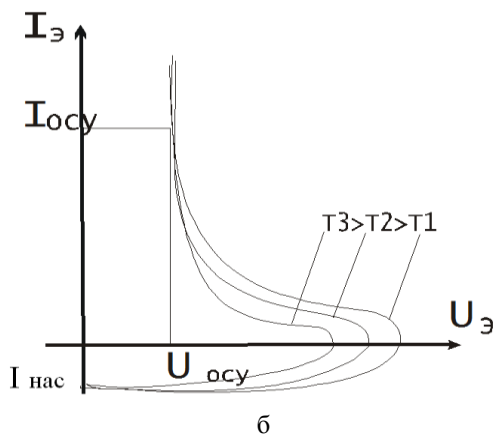
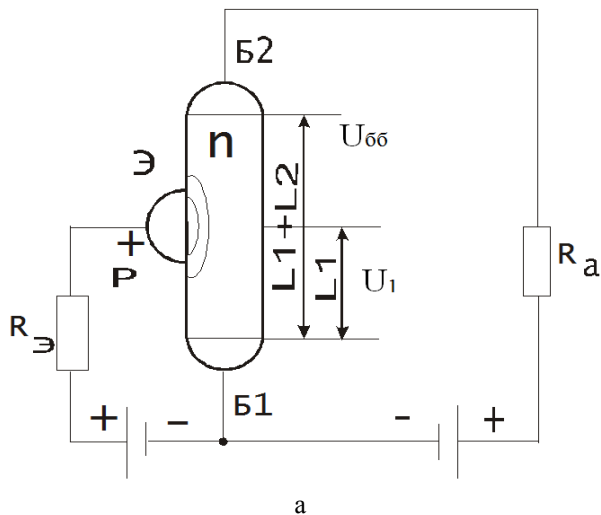


Рис. 3. Функциональная схема (а) и ВАХ (б) однопереходного транзистора

Пусть к базам однопереходного транзистора приложено напряжение $U_{бб}$. Для простоты будем считать эмиттер точечным, тогда падение напряжения на нижней части базы длиной l_1 равно

$U_1 = U_{66} l_1 / (l_1 + l_2)$. Напряжение на p - n переходе $U_{p-n} = U_3 + U_1$. При увеличении U_3 в интервале $0 < U_3 < U_b$, $U_{p-n} < 0$ и через p - n -переход протекает малый обратный ток $I_{нас}$. При $U_3 = U_b$ напряжение на p - n -переходе равно нулю, однако это состояние равновесия является неустойчивым. Вследствие различных флуктуаций, например тепловых, сопротивление нижней части базы может оказаться немного меньше своего стационарного значения. Напряжение U_1 при этом также уменьшится, что приведет к тому, что $U_3 > U_b$, эмиттерный переход окажется смещенным в прямом направлении и будет инжектировать в базу дырки.

Под действием электрического поля в базе, создаваемого напряжением U_{66} , инжектированные дырки уносятся в нижнюю часть базы, вследствие чего её сопротивление ещё больше уменьшается. Уменьшение сопротивления нижней части базы приводит к дальнейшему уменьшению напряжения U_1 и увеличению U_{p-n} , вследствие чего инжекция носителей и ток через p - n -переход продолжают расти. Такой самоускоряющийся процесс приводит к лавинному нарастанию тока через p - n -переход и к уменьшению падения напряжения на последовательно включенных сопротивлениях p - n -перехода и нижней части базы. Таким образом, входная характеристика однопереходного транзистора относится к S-типу. Ее существенным отличием от аналогичных характеристик других приборов является то, что включение происходит при практически нулевых токах эмиттера.

Тиристоры

Тиристорами называются полупроводниковые приборы с тремя (и более) p - n -переходами, предназначенными для использования в качестве электронных ключей в схемах переключения электрических токов.

Простейшие диодные тиристоры, запираемые в обратном направлении, обычно изготавливаются из кремния и содержат четыре чередующихся p - и n -области (рис. 4, а). Область p_1 , в которую попадает ток из внешней цепи, называют анодом, область n_2 —

катодом; области n_1, p_2 – базами. Если к аноду p_1 подключить плюс источника напряжения, а к катоду n_2 – минус, то переходы p_1-n_1 и p_2-n_2 окажутся открытыми, а переход n_1-p_2 – закрытым. Его называют коллекторным переходом.

Так как коллекторный p - n -переход смещен в обратном направлении, то до определённого значения почти всё приложенное напряжение падает на нём. Такая структура легко может быть представлена в виде двух транзисторов разной электропроводности, соединённых между собой так, как показано на рис. 4, б. Ток цепи определяется током коллекторного перехода n_1-p_2 . Он однозначно зависит от потока дырок из эмиттера транзистора p - n - p типа и потока электронов из эмиттера транзистора n - p - n типа, а также от обратного тока p - n -перехода. Так как переходы p_1-n_1 и p_2-n_2 смещены в прямом направлении, из них в области баз инжектируются носители заряда: дырки – из области p_1 , электроны – из области n_2 . Эти носители заряда, диффундируя в областях баз n_1, p_2 , приближаются к коллекторному переходу и его полем перебрасываются через p - n -переход. Дырки, инжектированные из области p_1 , и электроны из n_2 движутся через переход n_1-p_2 в противоположных направлениях, создавая общий ток I . При малых значениях внешнего напряжения практически всё оно падает на коллекторном переходе n_1-p_2 . Поэтому к переходам p_1-n_1, p_2-n_2 , имеющим малое сопротивление, приложена малая разность потенциалов, и инжекция носителей зарядов невелика. В этом случае ток I мал и равен обратному току через переход n_1-p_2 , т.е. $I_{к0}$. При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала меняется незначительно. При дальнейшем возрастании напряжения, по мере увеличения ширины перехода n_1-p_2 , всё большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации. При определенном напряжении носители заряда ускоряются настолько, что при столкновении с атомами в области p - n -перехода ионизируют их, вызывая лавинное размножение носителей заряда. Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля переходят в область p_2 , а электроны – в область n_1 . Ток через

переход n_1 - p_2 увеличивается, а его сопротивление и падение напряжения на нем уменьшаются. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам p_1 - n_1 , p_2 - n_2 , и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока и увеличение токов инжекции. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода n_1 - p_2 становится малым.

Носители заряда, появившиеся в областях вследствие инжекции и лавинного размножения, приводят к уменьшению сопротивления всех областей тиристора, и падение напряжения на приборе становится незначительным. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении. Начальный участок ВАХ соответствует закрытому состоянию тиристора.

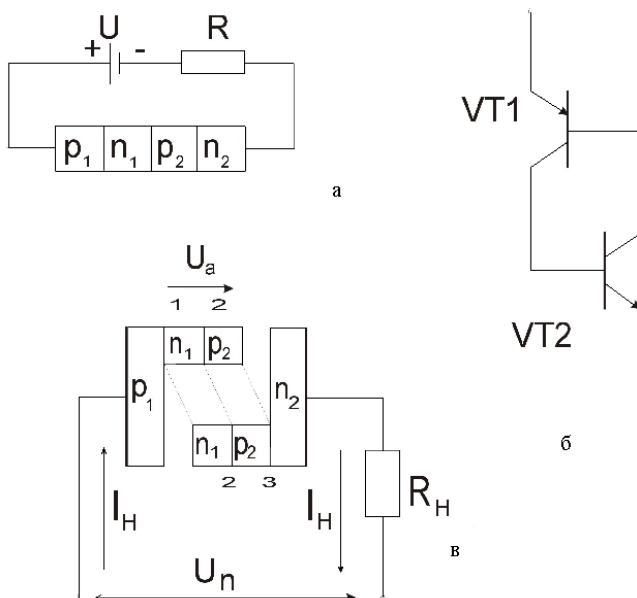


Рис. 4. Структура тиристора

Триодные тиристоры отличаются от диодных тем, что одна из баз имеет внешний вывод, который называют управляющим электродом. При подаче в цепь управляющего электрода тока управления I_y ток через p_2-n_2 -переход увеличивается. Дополнительная инжекция носителей заряда через p - n -переход приводит к увеличению тока I_k . Увеличение тока через закрытый коллекторный p - n -переход в первом приближении аналогично увеличению приложенного напряжения, так как в обоих случаях увеличивается вероятность лавинного размножения носителей заряда. Поэтому, изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и, тем самым, управлять моментом его включения.

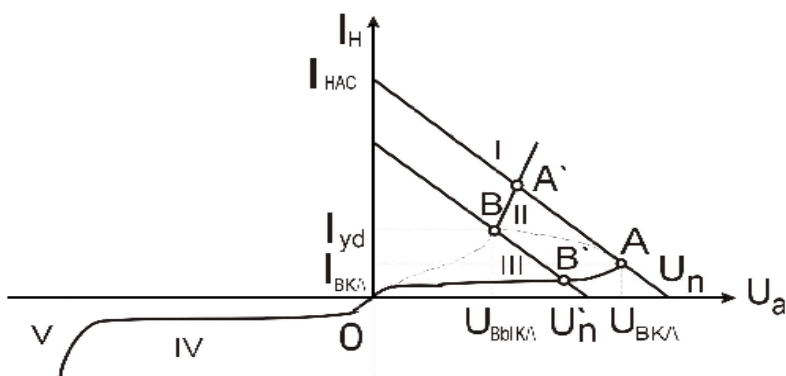


Рис. 5. ВАХ тиристора

Наибольший интерес с точки зрения применения полупроводниковых приборов в качестве пороговых датчиков температуры представляет зависимость напряжения включения U_{cp} от температуры. Таким датчиком может быть любой прибор с участком отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике. С точки зрения применения разница между этими приборами не существенна. Поэтому достаточно рассмотреть более подробно

работу тиристоров как датчиков температуры. Напряжение включения у них определяется формулой:

$$U_{CP} = U_{KBПРОб} \cdot \sqrt{1 - h_{21Б} - \left(A \cdot \frac{\partial h_{21Б}}{\partial I} \right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $A = I_{КБО} + h_{21Б2} I_Y$.

При $I_Y = 0$ основными зависящими от температуры величинами в этой формуле являются $U_{KBПРОб}$ и $I_{КБО}$. В настоящее время выпускаются в основном кремниевые тиристоры. Напряжение лавинного пробоя кремниевых p - n -переходов слабо увеличивается с ростом температуры (порядка 0.3 %/град) за счет уменьшения длины свободного пробега носителей заряда.

Однако в кремниевых p - n -переходах мало как абсолютное значение $I_{КБО}$, так и его относительное изменение с ростом температуры. Таким образом, небольшое увеличение U_{CP} за счет роста с температурой $U_{ПРОб}$ компенсируется уменьшением U_{CP} за счет увеличения $I_{КБО}$. Соответственно напряжение включения не меняется с температурой до высоких температур (120 °C), когда $I_{КБО}$ становится достаточно большим (см. рис. 5). В германиевых p - n -переходах $I_{КБО}$ значительно больше, и его увеличение с температурой должно приводить к заметному уменьшению напряжения включения. Кроме того, напряжение пробоя германиевых p - n -переходов с ростом температуры уменьшается, что обуславливает дополнительное уменьшение U_{CP} . Эксперименты с германиевыми тиристорами показали, что напряжение включения линейно уменьшается (0,5 В/град) с ростом температуры до 30...35, после чего уменьшение становится сверхлинейным.

Следует отметить, что на основе пороговых датчиков могут быть построены реле, реагирующие на изменение не только температуры, но и влажности, скорости потока, уровня жидкости и т.д., так как при повышении температуры окружающей среды или при уменьшении коэффициента рассеяния (при помещении датчика в среду с меньшей теплопроводностью, а также при снижении скорости потока

окружающего воздуха или другой среды) уменьшается напряжение срыва датчиков, что легко фиксируется релейными элементами.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Изучите измерительный прибор Л2–56 и включите его тумблером “Сеть”, при этом должна загореться сигнальная лампа.

2.2. Тиристор, характеристика которого измеряется, установлен в печь, а выводы провода прикреплены к клеммам колодки. Эту колодку необходимо установить в блоке испытаний прибора Л2–56 и закрыть защитной крышкой.

2.3. На экране прибора расположите луч в левом нижнем углу соответствующими ручками. При этом переключатели Л2–56 должны быть установлены так:

режим	норм.
максимальное пиковое напряжение	80 В
полярность	~
предел тока	20 мА
количество ступенек	1
регулировка напряжения	до упора против часовой стрелки
калиброванное перемещение (смещение)	0

2.4. Для получения ВАХ тиристора, пользуясь справочными данными, задайте необходимый масштаб с помощью переключателей "Горизонталь" и "Вертикаль". Управляя ручками "Регулировка напряжения" и "Амплитуда ступенек", добейтесь чёткого изображения S-образной характеристики. Зарисуйте эту характеристику и зафиксируйте значения напряжения срыва при комнатной температуре.

2.5. Переключателями смещения изображения по горизонтали и вертикали точку срыва характеристики поместите в левый нижний

угол экрана. Увеличивайте масштаб по горизонтали до той поры, пока точка срыва из левого угла не переместится в правый.

2.6. Включите в работу печь и нагревайте тиристор, следя за ходом изменения напряжения срыва. Проводите измерения напряжения срыва через каждые 10°C до температуры 140°C . Результаты измерений занесите в таблицу и постройте график экспериментальной зависимости.

Температура, $^{\circ}\text{C}$	20	30	...	...	...	140
$U_{\text{ср}}$, В						

2.7. Аналогично измерьте температурную зависимость $U_{\text{ср}}$ для S-диода и однопереходного транзистора.

3. Содержание отчета

- 3.1. Название и цель работы.
- 3.2. Функциональная схема лабораторного макета.
- 3.3. Экспериментальные таблицы, зависимости.
- 3.4. Расчет чувствительности.

3.5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Вольт-амперные характеристики S-типа и N-типа.
2. S-диод, его ВАХ, зависимость характеристик от температуры, физический механизм возникновения отрицательного сопротивления.
3. Однопереходный транзистор, его схемы включения и ВАХ.
4. Тиристор, его структура и принцип действия.
5. ВАХ тиристора, зависимость напряжения включения от температуры.
6. Практическое применение пороговых датчиков температуры.

Библиографический список

1. Виглеб Г. Датчики: пер. с нем. М.: Мир, 1989. 196 с.
2. Осипович Л.А Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979. 159 с.
3. Удалов И.П. Полупроводниковые датчики. Л.: Энергия, 1965. 240 с.
4. Викулин И.М, Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.

5089

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 4

РЕЗИСТИВНЫЕ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОДАТЧИКИ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 4 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы резистивных и гальванических термодатчиков, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

Активный полупроводниковый датчик, резистивный температурный датчик, термопара

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы

Ознакомление с основными классами и принципами работы датчиков температуры, изучение работы термисторных, термопарных и на основе р-п-перехода датчиков температуры; их простая косвенная градуировка.

1. Краткие теоретические сведения

Резистивные температурные датчики

В общем случае на резистивный преобразователь влияют различные по физической природе величины: электрические, магнитные, механические, тепловые и т.д. Одним из наиболее существенно влияющих факторов является температура. Для чистых металлов и большинства сплавов сопротивление повышается с ростом температуры и приблизительно определяется формулой:

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha(T_2 - T_1)), \quad (1)$$

где R_2 и R_1 - сопротивления при температурах T_2 и T_1 , α - температурный коэффициент сопротивления (ТКС), составляющий для большинства металлов $0,004 \text{ K}^{-1}$.

Удельное сопротивление полупроводников с ростом температуры падает, зависимость сопротивления от температуры нелинейная, но в диапазоне температур $10 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

можно приближенно считать ТКС равным $0,03 \text{ K}^{-1}$. Для уменьшения температурных погрешностей применяются термостирование и температурная коррекция. В полупроводниковых резисторах при температурах, близких к комнатной, кроме того, меняется концентрация носителей заряда. Это происходит в основном за счет собственных носителей, в связи с чем для увеличения относительного изменения концентрации с изменением температуры необходимо использовать полупроводники с проводимостью, близкой к собственной. Электропроводность собственного полупроводника:

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p), \quad (2)$$

где

$$n_i = \sqrt{(N_c \cdot N_v)} \exp(-\Delta E/2kT). \quad (3)$$

Пренебрегая более слабыми зависимостями от температуры, нежели экспоненциальные, можно записать выражение для сопротивления полупроводника:

$$R = R_0 \exp(\Delta E/2kT) \quad (4)$$

или

$$R = R_0 \exp \left[\frac{\Delta E}{2k} \frac{T_0 - T}{T_0 T} \right], \quad (5)$$

где R_0 – сопротивление при $T=293$ К.

Выражая из (5) температуру, получаем:

$$T = T_0 \left[1 + \frac{2kT_0}{\Delta E} \cdot \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Термистор характеризуется следующими параметрами:

– температурный коэффициент сопротивления α_T , %/°C

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = - \frac{\Delta E}{2kT^2} \cdot 100; \quad (7)$$

– максимально допустимая мощность рассеяния P_{max} и максимально допустимая температура T_{max} , при которых не происходят необратимые изменения характеристик термистора;

– коэффициент рассеяния H , численно равный мощности, отводимой от термистора в окружающую среду при разности температур поверхности термистора и окружающей среды 1 град;

– постоянная времени τ , равная времени, за которое превышение температуры рабочего тела термистора над окружающей средой при охлаждении его в спокойном воздухе уменьшается в 2,7 раза.

При малых напряжениях соблюдается закон Ома, и в этом режиме термистор используется в качестве датчика температуры, а также в схемах температурной компенсации. Как всякий прибор с ВАХ S-типа (рис. 1), термистор может использоваться в схемах переключателей – это второй режим работы термистора.

Изготавливаются термисторы из поликристаллических полупроводников с большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Чаще всего это окислы металлов переходного ряда периодической системы элементов или их смеси.

Активные полупроводниковые датчики

В качестве датчика температуры применяют также полупроводниковый диод. Термочувствительным параметром в этом случае может быть зависимость обратного тока p - n -перехода, падения напряжения на прямосмещенном p - n -переходе и его сопротивления от температуры. На рис. 2 показаны прямые ВАХ p - n -перехода при различных температурах.

Статическое сопротивление диода, как и для монокристаллического терморезистора, можно записать в виде:

$$R = R_0 \exp(\Delta E/kT), \quad (8)$$

но в данном случае $\Delta E/kT$ в 2 раза больше, чем для терморезистора.

На практике для расчета зависимости $I_{\text{нас}}(T)$ удобно пользоваться формулой:

$$I_o = I_o \exp \left[\frac{\Delta E}{kT} \frac{T - T_0}{T_0} \right], \quad (9)$$

где I_o – экспериментально измеряемый обратный ток при T_0 ; $T=293$ К.

Преимуществом диодных датчиков являются высокая чувствительность и малый потребляемый ток. Германиевые диоды используются для измерения температур не выше $90-100$ °С, а кремниевые – до $150-170$ °С. Для измерения более высоких температур можно применять диоды из арсенида галлия.

При выборе в качестве термочувствительного параметра обратного тока диода чувствительность максимальна, однако характеристика нелинейная. Для получения линейной зависимости напряжения с датчика температуры используется зависимость прямого напряжения на р-п-переходе от температуры:

$$U_F \approx \frac{kT}{q}. \quad (10)$$

На практике в качестве термочувствительного диода часто используется эмиттерный переход биполярного транзистора с коллектором, замкнутым с базой.

Кроме рассмотренных, применяют также и другие приборы в качестве термодатчиков: среди них S-диоды, тиристоры, полевые и однопереходные транзисторы.

Термопары

Широкое распространение получила идея использовать для измерения температуры термоэлектрический эффект, или эффект Зеебека, который заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рис. 3, а), причем температуру T_1 одного места соединения сделать отличной от температуры T_0 другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников:

$$E_{AB}(T_1, T_0) = f(T_1) - f(T_0). \quad (11)$$

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или термопарой; проводники, составляющие термопару, - термоэлектродами, а места их соединения - спаями.

Термо-ЭДС при небольшом перепаде температур между спаями E_{AB} можно считать пропорциональной разности температур:

$$E_{AB} = S_{AB} \Delta T \quad (12)$$

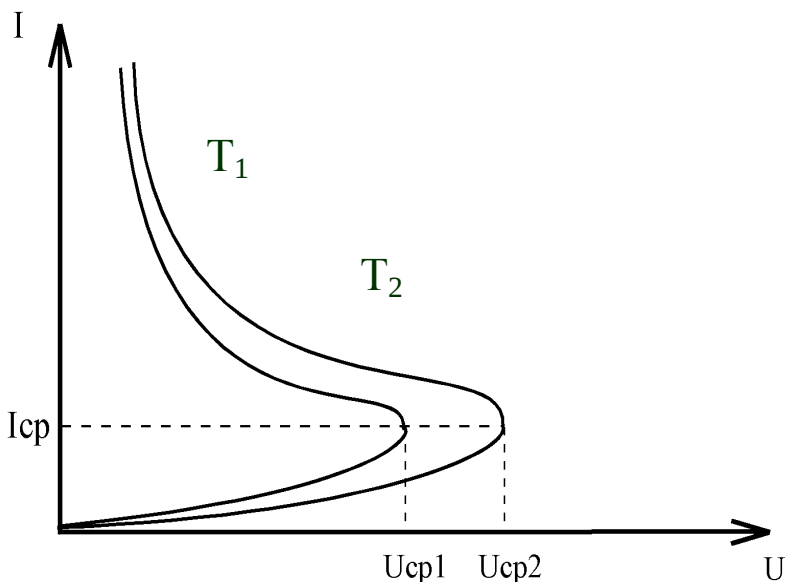


Рис. 1. ВАХ термистора при различных значениях температуры ($T_2 > T_1$)

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников значение термо-ЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температур вдоль проводников. Термoeлектрический контур разомкнуть можно в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников (рис.3, б, в). Если все появившиеся при этом места соединений находятся при одинаковой температуре, то не возникает никаких паразитных ЭДС (закон последовательности металлов).

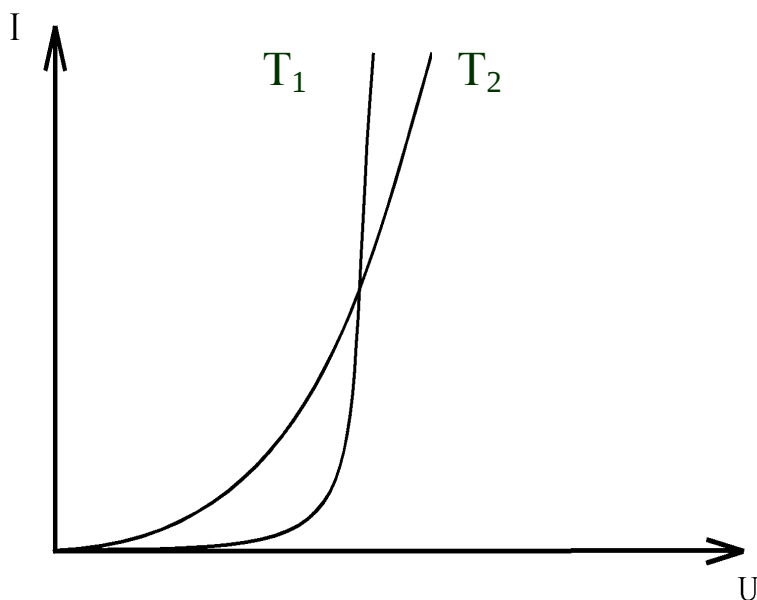


Рис. 2. Зависимость прямой ВАХ р-п-перехода от температуры
($T_2 > T_1$)

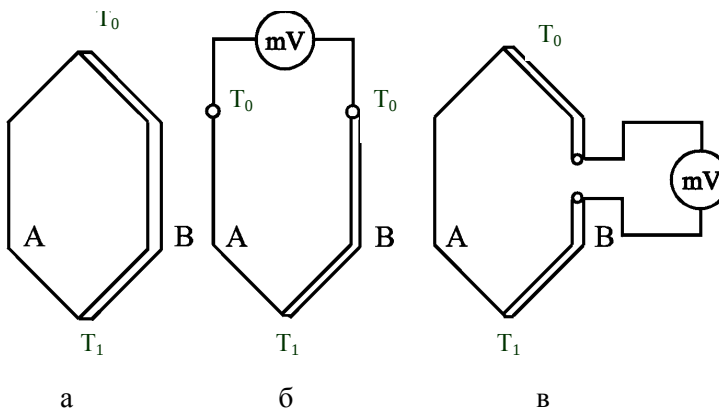


Рис. 3. Термопара: а – замкнутый контур из различных проводников (полупроводников) А и В; б - разомкнутый контур с одной парой разнородных проводников; в – двумя парами проводников

2. Описание лабораторной установки

В работе используются четыре термочувствительных элемента: ртутный термометр, терморезистор (марки ММТ-4, $R_{T_0}=1\text{кОм}$), термопара “хромель-копель“, полупроводниковый диод, которые помещены в печку. $R_0=500\text{ Ом}$ - прецизионный резистор, падение напряжения на котором пропорционально протекающему в цепи току. Это падение напряжения, а также термо-ЭДС термопары контролируются универсальным цифровым вольтметром В7-21. Напряжение на диод и терморезистор подается от источника питания ВИП-009. Термопара подключается к основному вольтметру В7-21, диод и

терморезистор через соединительный блок – к блоку измерения токов и напряжений этого же вольтметра (рис. 4).

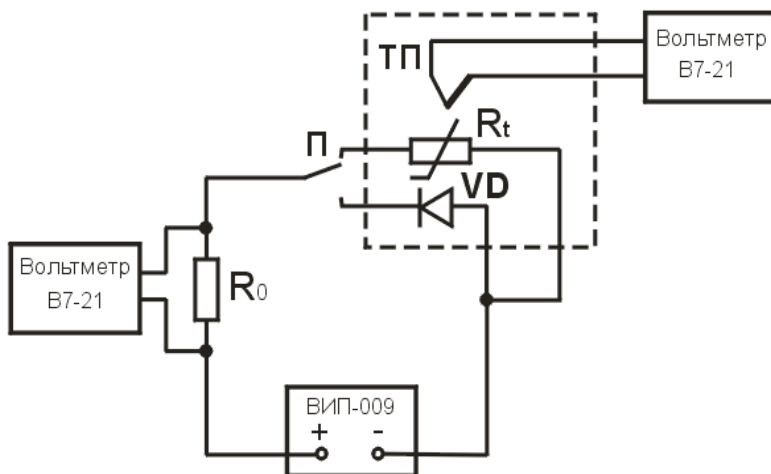
Выбор текущего датчика (терморезистор или диод) осуществляется переключателем Π_1 .

3. Порядок выполнения работы

- 3.1. Произвести коммутацию схемы.
- 3.2. Включить источник питания и вольтметр.
- 3.3. Снять ВАХ термистора при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить R_T при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3.4. Определить I_o диода по той же схеме.
- 3.5. Установить $U_{\text{ПР}}=10\text{ В}$; $U_{\text{ПД}}=10\text{ В}$.
- 3.6. Включить печь. Снять зависимости $R(T)$, $I_o(T)$, $E(T)$, I_R для термистора, диода и термопары соответственно. Температура определяется по прецизионному ртутному термометру.
- 3.7. Выключить печь, вольтметр, источник питания.

4. Содержание отчета

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Экспериментальные таблицы, градуировочные зависимости.
- 4.3. Расчет чувствительности, коэффициента нелинейности.
- 4.4. Выводы.



R_0 – образцовый резистор,
 ТП – термопара,
 R_t – терморезистор,
 VD – диод (датчик температуры).

Рис. 4. Функциональная схема лабораторной установки

Контрольные вопросы

1. Термоэлектрический эффект: эффект Томсона, Пельтье, Зеебека.
2. Термогальванические законы: закон последовательности температур, промежуточных металлов, закон Вольта и правило Магнуса.
3. Температура опорного спая. Методы компенсации температуры рабочего спая.

4. Металлические и полупроводниковые термометры. Линейность и термочувствительность. Конструктивное исполнение.

5. Термисторы с отрицательным и положительным ТКС.

6. Сравнительная характеристика гальванических и терморезистивных датчиков.

Библиографический список

1. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики. Л.: Энергия, 1965. 240 с.

2. Фогельсон И.Б. Транзисторные термодатчики. М.: Сов.Радио, 1972. 122 с.

3. Линевиц Ф. Измерение температуры в технике: справочник. М.: Металлургия, 1980. 549 с.

4. Викулин И.М, Стафеев В.И Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., пререраб. и доп. М.: Радио и связь. 1990. 224 с.