

Дисциплина
«Твердотельная электроника»

ТЕМА 8: «Полупроводниковые
термоэлектрические и гальваномагнитные
приборы»



Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Терморезисторы.

Терморезистор представляет собой резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры.



Термистор – это полупроводниковый терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Позистор – это полупроводниковый терморезистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Болометр – это полупроводниковый прибор, предназначенный для индикации и измерения теплового излучения.

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Термисторы прямого подогрева.



Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Термисторы прямого подогрева.

Параметры и характеристики термисторов прямого подогрева

Температурная характеристика термистора

зависимость сопротивления термистора от температуры

Коэффициент энергетической чувствительности

определяется как мощность, которую нужно подвести к термистору для уменьшения его сопротивления на 1%; коэффициент энергетической чувствительности связан с коэффициентом рассеяния и температурным

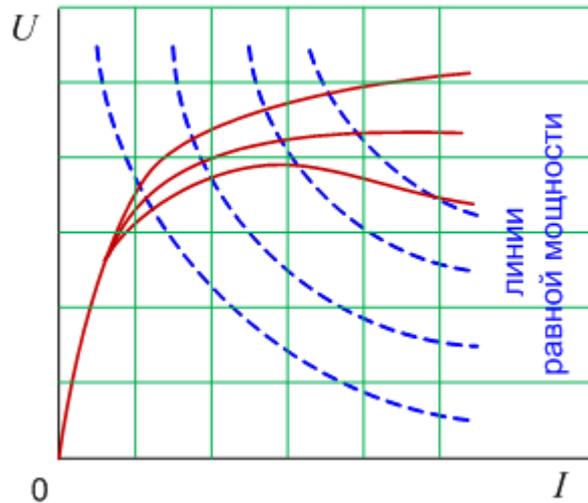
коэффициентом сопротивления $G = \frac{H}{TKR}$ и зависит

от режима работы, то есть различный в каждой точке статической ВАХ.

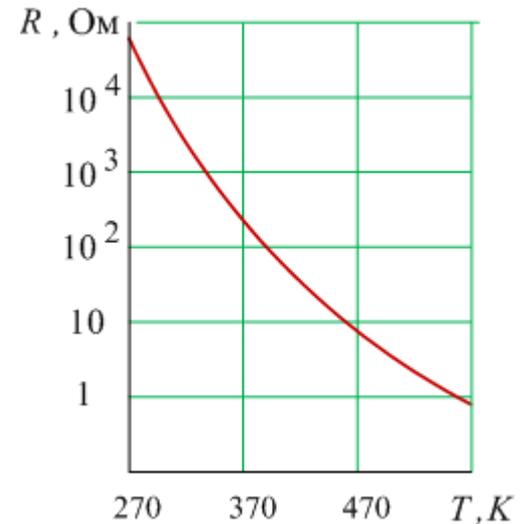
Номинальные сопротивления различных типов термисторов имеют значения от нескольких Ом до нескольких сотен кОм.

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Термисторы прямого подогрева.

Статическая вольт-амперная характеристика термистора представляет собой зависимость падения напряжения от протекающего тока в условиях теплового равновесия между термистором и окружающей средой.



Вольт-амперные характеристики термисторов прямого подогрева



Температурная характеристика термистора

Температурная характеристика термистора — это зависимость сопротивления термистора от температуры.

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Термисторы косвенного подогрева.

Термистор косвенного подогрева – это термистор, имеющий дополнительный источник теплоты – подогреватель.

Конструкции термисторов косвенного подогрева различны, однако имеют общую особенность – наличие двух электрически изолированных друг от друга цепей: управляющей и управляемой.

Помимо характеристик и параметров, общих для всех термисторов, термисторы косвенного подогрева обладают специфическими характеристиками и параметрами.

Дополнительный параметр и характеристика термисторов косвенного подогрева

Коэффициент тепловой связи

отношение мощности, необходимой для разогрева термочувствительного элемента до некоторой температуры при прямом нагреве к мощности, необходимой для разогрева до той же температуры при косвенном подогреве; коэффициент тепловой связи обычно составляет 0,5...0,97, из-за потерь теплоты, выделяемой подогревателем.

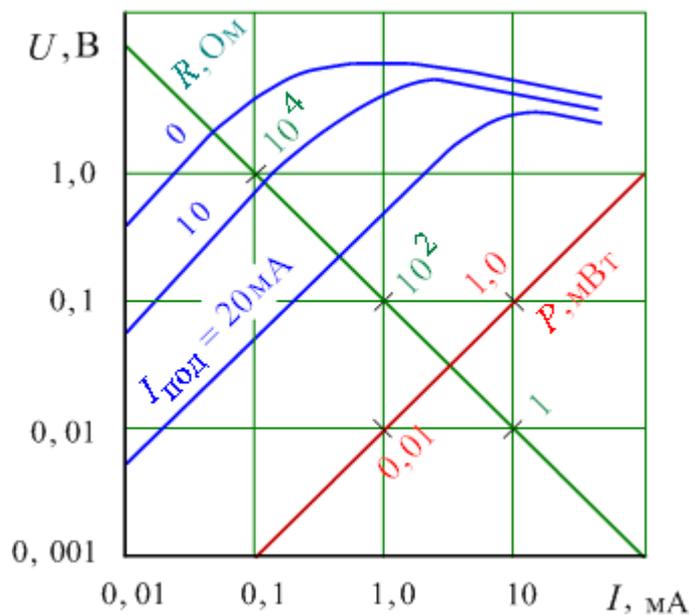
Подогревная характеристика

представляет собой зависимость сопротивления от мощности, выделяемой в спирали подогревной обмотки

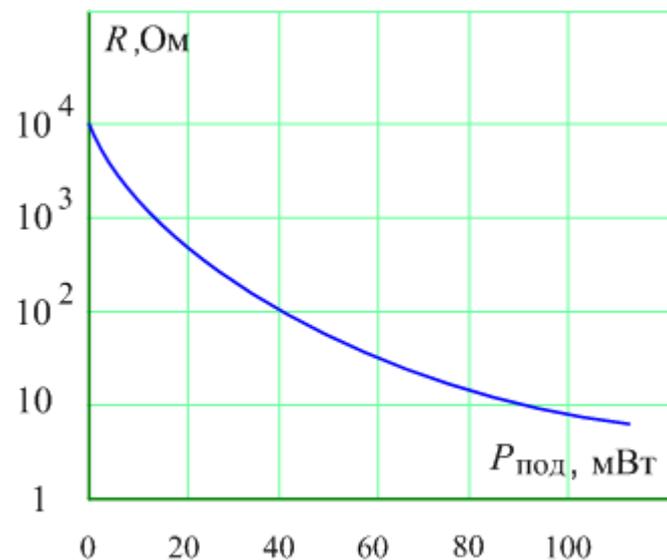
Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Термисторы косвенного подогрева.

Статическая вольт-амперная характеристика термистора представляет собой зависимость падения напряжения от протекающего тока в условиях теплового равновесия между термистором и окружающей средой.

Подогревная характеристика представляет собой зависимость сопротивления от мощности, выделяемой в спирали подогревной обмотки.



Вольт-амперные характеристики термистора косвенного подогрева



Подогревная характеристика термистора косвенного подогрева

Статические вольт-амперные характеристики термисторов косвенного подогрева приводят для различных значений тока через подогреватель.

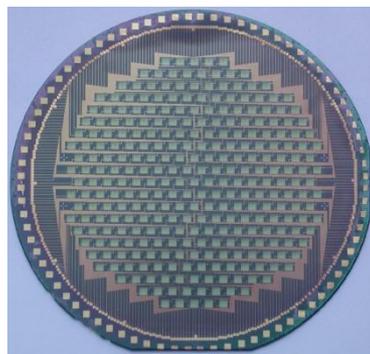
Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Болометры.

Полупроводниковый болومتر – это прибор, предназначенный для индикации и измерения теплового излучения.

Обычно болومتر состоит из двух пленочных термисторов, один из которых является активным, а второй – компенсационным. Активный термистор непосредственно подвергается воздействию измеряемого излучения, что приводит к изменению его сопротивления. Компенсационный термистор служит для компенсации возможных изменений температуры окружающей среды и экранирован от измеряемого излучения. Оба термистора помещают в один герметичный корпус.

Болометры, как правило, имеют три внешних вывода: от активного и компенсационного термисторов и от средней точки.

Болометрическая матрица



Болометр

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Болометры.

Параметры полупроводниковых болометров

*Сопротивление
активного термистора
при комнатной
температуре*

*Рабочее
напряжение*

*Чувствительность, равная отношению
полезного сигнала, снимаемого с болометра,
к мощности падающего на болометр
излучения*

*Порог чувствительности – мощность
излучения, которая вызывает сигнал,
эквивалентный уровню собственных шумов*

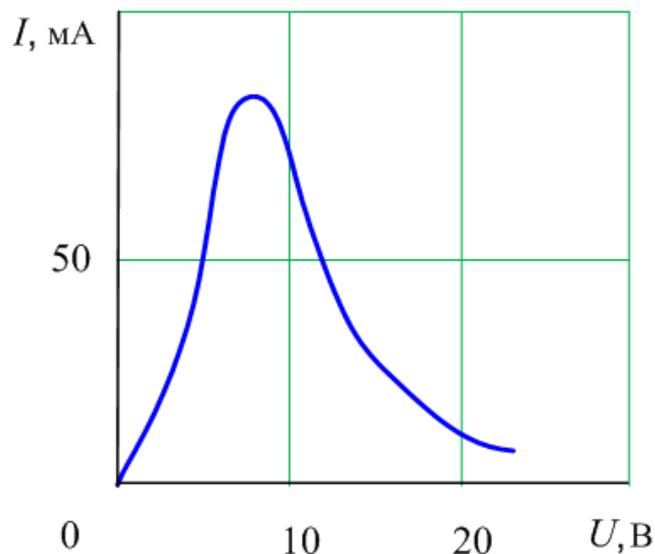
*Постоянная времени, характеризующая
тепловую инерционность активного
термистора*

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Позисторы.

Позистор – это полупроводниковый терморезистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Массовое производство позисторов основано на использовании керамики из титаната бария. Титанат бария $BaTiO_3$ – диэлектрик с удельным сопротивлением при комнатной температуре $10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·см.

Свойства позисторов оцениваются характеристиками и параметрами, аналогичными характеристикам и параметрам термисторов.



Вольт-амперная характеристика позистора представляет собой зависимость напряжения на позисторе от проходящего через него тока при условии теплового равновесия между теплотой, выделяемой в позисторе, и теплотой, отводимой от него.

Вольт-амперная характеристика позистора

Полупроводниковые термоэлектрические приборы.

Схемы подключения терморезисторов

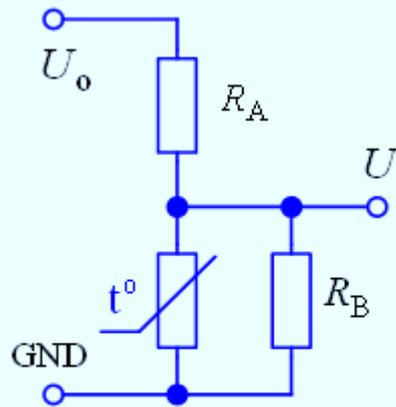


Схема 1

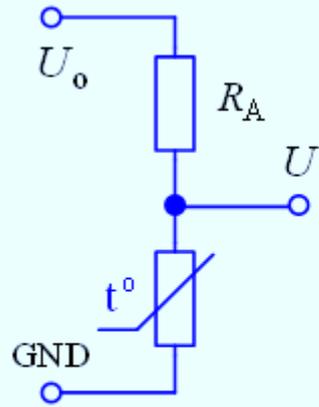


Схема 2

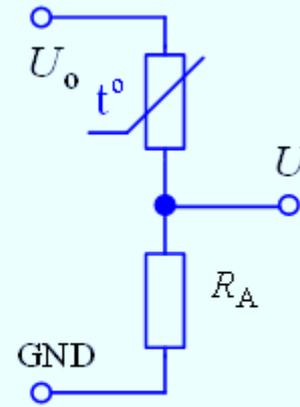


Схема 3

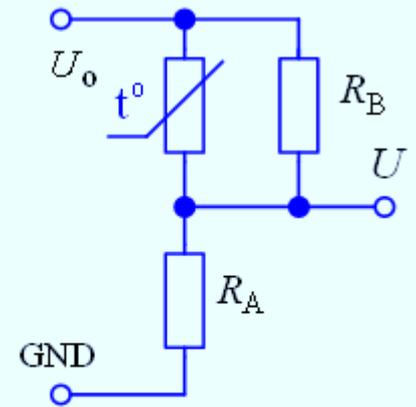


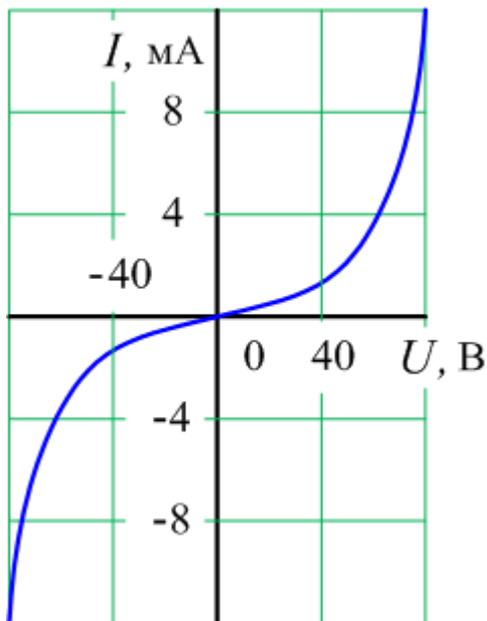
Схема 4

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Варисторы.

Варистор – это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения.

Исходными материалами для варисторов являются карбид кремния и оксид цинка ZnO, легированный висмутом, кобальтом и другими элементами.

Наибольшее распространение получили варисторы из карбида кремния, которые изготавливают методом керамической технологии, то есть путем высокотемпературного обжига заготовок из порошкообразного карбида кремния. Конструктивное исполнение варисторов может быть различным.



Варисторы находят применение в схемах регулирования и стабилизации электрических величин и в схемах защиты от перенапряжений.

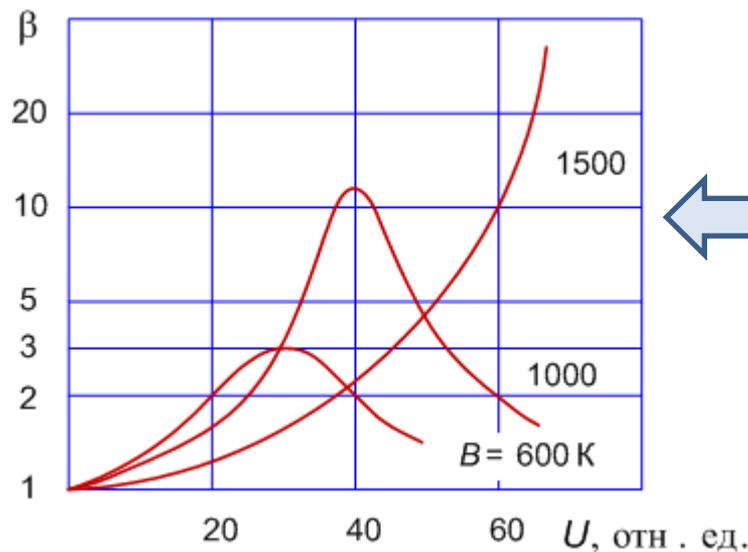
Вольт-амперная характеристика варистора

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Варисторы.

Важным параметром варистора является коэффициент нелинейности – отношение статического и дифференциального сопротивлений при заданном постоянном напряжении:

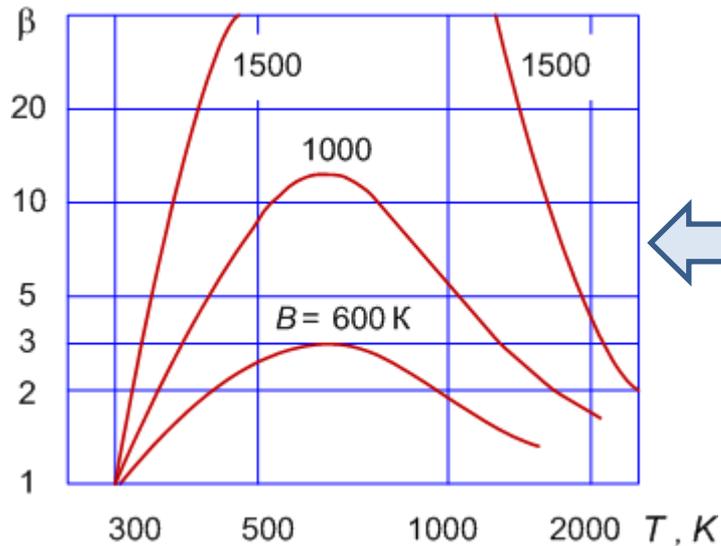
$$\beta = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU} = \frac{T^2 + B(T - T_{\text{окр}})}{T^2 - B(T - T_{\text{окр}})},$$

где B – коэффициент температурной чувствительности; T – температура варистора; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.



Зависимости коэффициента нелинейности от напряжения активных областей варисторов из материалов с различными значениями коэффициента температурной чувствительности поверхностных слоев кристаллов

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Варисторы.

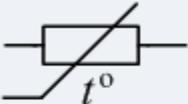
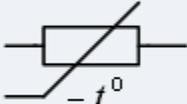
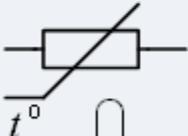
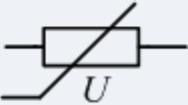


Зависимости коэффициента нелинейности от температуры активных областей варисторов из материалов с различными значениями коэффициента температурной чувствительности поверхностных слоев кристаллов

Температура активных областей варистора может превышать температуру окружающей среды *на несколько сотен градусов*, поэтому для обеспечения стабильных параметров необходим термостойкий материал, что и объясняет применение карбида кремния. Основными примесями в карбиде кремния являются *азот* и *алюминий*, обладающие малой энергией ионизации. Следовательно, значение коэффициента температурной чувствительности также мало. Поэтому коэффициент нелинейности варисторов не превышает 6, что ограничивает их применение.

Полупроводниковые термоэлектрические приборы. Условные графические обозначения.

ГОСТ 2.728-74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы.

<p><i>Терморезистор прямого подогрева с положительным температурным коэффициентом</i></p>	
<p><i>Терморезистор прямого подогрева с отрицательным температурным коэффициентом</i></p>	
<p><i>Терморезистор косвенного подогрева</i></p>	
<p><i>Варистор</i></p>	

Полупроводниковые термоэлектрические устройства. Конструкция и принцип действия.

Полупроводниковое термоэлектрическое устройство – это устройство, действие которого основано на использовании термоэлектрических эффектов Пельтье или Зеебека в полупроводниках, предназначенное для получения теплоты или холода с использованием электрической энергии или получения электрической энергии с использованием тепловой.

В полупроводниковых термоэлектрических устройствах используют полупроводниковые термоэлементы, каждый из которых состоит из двух ветвей, обладающих разным типом электропроводности. Ветвь термоэлемента, материал которой имеет электропроводность р-типа, называют **положительной ветвью**, а ветвь термоэлемента с электропроводностью n-типа – **отрицательной ветвью**. Положительную и отрицательную ветви полупроводникового термоэлемента соединяют между собой последовательно контактной пластиной. Зону электрического соединения ветвей полупроводникового термоэлемента называют спаем. **При работе термоэлемента его спаи имеют различную температуру: один из них является теплопоглощающим, другой – тепловыделяющим.**

Полупроводниковые термоэлектрические устройства. Эффект Зеебека (возникновение термо-ЭДС). Эффект Пельтье (поглощение и выделение теплоты в спаях термоэлемента)

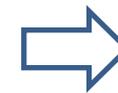
При наличии разности температур спаев в цепи с термоэлементом возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС). Данный эффект носит название эффекта Зеебека или термоэлектрического эффекта.

Термо-ЭДС зависит от разности температур спаев термоэлемента и от электрофизических свойств полупроводниковых материалов, образующих ветви термоэлемента:

$$E_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT.$$

$\alpha_{12}(T)$ – коэффициент термо-ЭДС.

При протекании постоянного тока через термоэлемент в его спаях, в зависимости от направления тока, поглощается или выделяется теплота. Количество теплоты при эффекте Пельтье пропорционально времени и силе тока.



$$Q_{\text{П}} = \Pi_{12} I T.$$

Эффект Пельтье является обратным эффектом Зеебека, поэтому для одного и того же термоэлемента существует связь между коэффициентом Пельтье и коэффициентом термо-ЭДС:



$$\Pi_{12} = \alpha_{12} \cdot T.$$

Полупроводниковые термоэлектрические устройства. Термоэлектрические генераторы.

Термоэлектрический генератор – это полупроводниковое термоэлектрическое устройство, состоящее из полупроводникового термоэлектрического блока и предназначенное для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую энергию.

Одним из основных параметров термоэлектрического генератора является *коэффициент полезного действия* – отношение полезной мощности, выделяемой в нагрузку, к количеству теплоты, поступающей в единицу времени на теплопоглощающие спаи.

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{Q_{\text{к}} + Q_{\text{п}} - \frac{1}{2}Q_{\text{дж}}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \times \frac{m(m+1)^{-1}}{1 + \frac{KR(m+1)}{\alpha_{12}^2 T_2} - \frac{T_2 - T_1}{2(m+1)T_2}}$$

$$m = \frac{R_{\text{н}}}{R}$$

$P_{\text{н}}$ – полезная мощность в нагрузке; $Q_{\text{к}}$ – количество теплоты, переданной в единицу времени от теплопоглощающего спаи термоэлемента к его тепловыделяющему спаю; $Q_{\text{п}}$ – количество теплоты, поглощаемой в спае в единицу времени вследствие эффекта Пельтье; $Q_{\text{дж}}$ – теплота, которая выделяется в ветвях термоэлемента; T_2, T_1 – температура теплопоглощающего и тепловыделяющего спаев соответственно; K – полная теплопроводность элемента; R – полное сопротивление термоэлемента; α_{12} – коэффициент термо-ЭДС.

Полупроводниковые термоэлектрические устройства. Термоэлектрические генераторы.

КПД термоэлемента оптимальных размеров зависит от эффективности термоэлемента, разности температур спаев термоэлемента и отношения сопротивления нагрузки к сопротивлению термоэлемента.

Коэффициент термо-ЭДС большинства термоэлементов составляет $(300 - 500) \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{К}^{-1}$. Учитывая, что почти все термоэлектрические генераторы работают при разности температур спаев, не превышающих 600 К , от одного термоэлемента можно получить термо-ЭДС $E_T = 0,3 \text{ В}$.

Оптимальные условия получения электрической мощности в нагрузке достигаются при соотношении сопротивления нагрузки, сравнимом с сопротивлением термоэлемента, то есть около нескольких мОм.

Задача: Разность температур между холодным и горячим концами полупроводникового термоэлемента равна $\Delta T = 80 \text{ К}$, сопротивление нагрузки составляет 200 Ом . Коэффициент термо-ЭДС равен $8 \cdot 10^{-2} \text{ В/К}$. На нагрев горячего спаея расходуется мощность 12 Вт . Определить КПД термоэлемента.

Решение задачи:

$$P_T = E_T \cdot I_T; \quad E_T = \alpha_{12} \cdot \Delta T; \quad I_T = \frac{\alpha_{12} \cdot \Delta T}{R_H};$$
$$P_T = \frac{(\alpha_{12} \cdot \Delta T)^2}{R_H} = \frac{(8 \cdot 10^{-2} \cdot 80)^2}{200} = 0,2048 \text{ Вт};$$
$$\eta_T = \frac{P_T}{P_{\text{нагр}}} 100\% = \frac{0,2048}{12,0} 100\% = 1,7 \%$$

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы.

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы – это полупроводниковые приборы, в которых используется воздействие магнитного поля на движущиеся в электрическом поле носители заряда.

Принцип действия гальваномагнитных приборов основан на двух эффектах: на эффекте Холла и на эффекте Гаусса.

Принцип действия гальваномагнитных приборов основан на эффектах

Эффект Холла

состоит в возникновении поперечной разности потенциалов в полупроводнике, по которому протекает электрический ток, под действием магнитного поля, перпендикулярного направлению тока

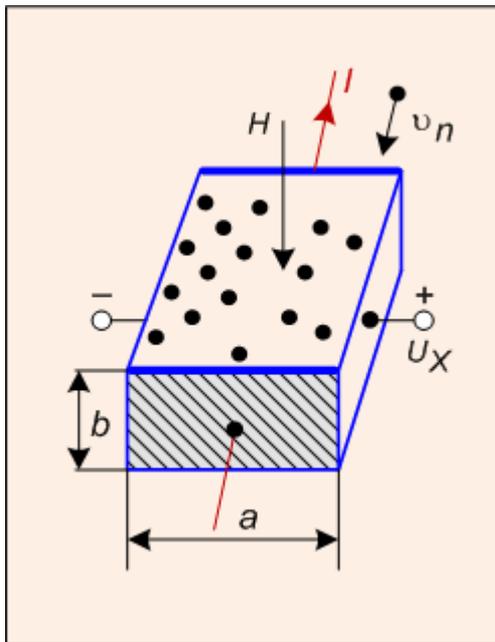
Эффект Гаусса

представляет собой изменение электрического сопротивления полупроводника под действием магнитного поля

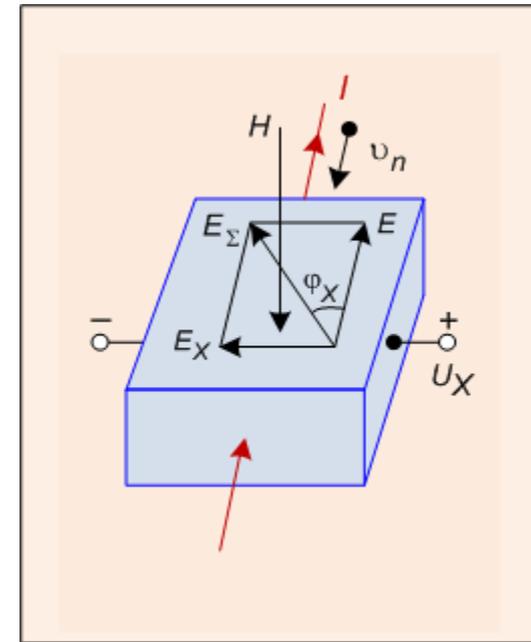
*Оба эффекта обусловлены действием на движущийся в магнитном поле электрический заряд **силы Лоренца.***

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Эффект Холла.

При протекании электрического тока в полупроводниковой пластине, расположенной в магнитном поле, сила Лоренца смещает движущиеся носители заряда к одной из боковых граней, в результате чего между боковыми гранями пластины возникает ЭДС Холла. Направление смещения носителей заряда определяется направлением силы Лоренца, то есть правилом левой руки по отношению к техническому направлению тока.

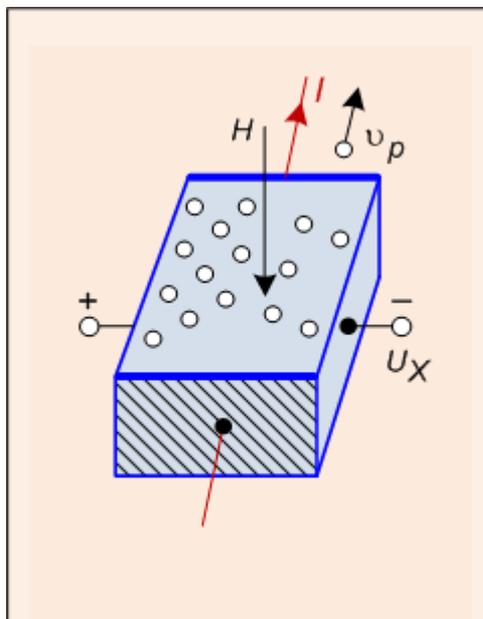


$$U_X = R_X \frac{IB}{b}$$

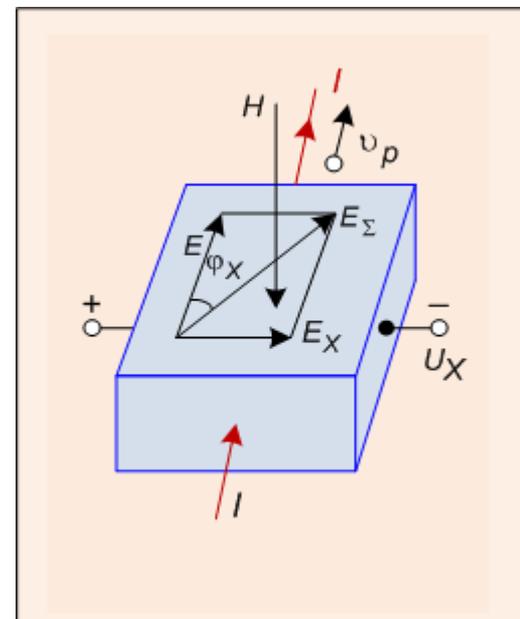


Возникновение ЭДС Холла для полупроводника n-типа

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Эффект Холла.



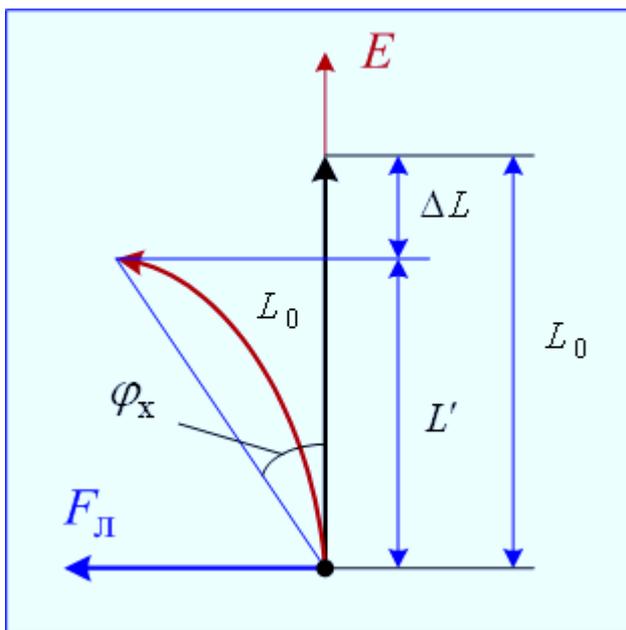
$$U_X = R_X \frac{IB}{b}$$



Возникновение ЭДС Холла для полупроводника р-типа

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Магниторезистивный эффект.

Под действием силы Лоренца траектории движения носителей заряда искривляются, что равносильно уменьшению длины свободного пробега в направлении внешнего продольного электрического поля между токовыми контактами или увеличению удельного сопротивления полупроводника в магнитном поле.



Так как за время свободного пробега носитель заряда проходит по направлению продольного электрического поля меньший путь, то это эквивалентно уменьшению дрейфовой скорости или подвижности, а, следовательно, увеличению удельного сопротивления:

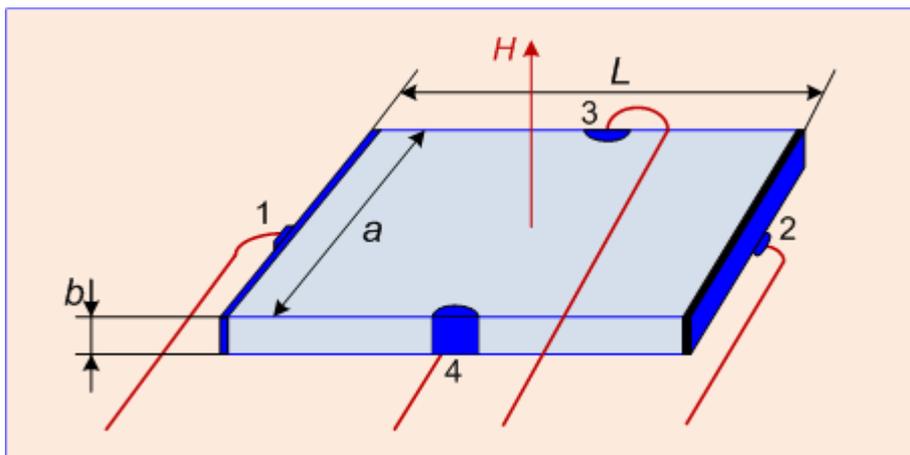
$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = C \mu^2 B^2,$$

где C – магниторезистивный коэффициент, зависящий от формы и геометрических размеров полупроводниковой пластины.

Изменение длины свободного пробега дырки в полупроводнике под действием магнитного поля

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Преобразователи Холла

Преобразователи Холла изготавливают в виде прямоугольных пластинок, вырезанных из монокристаллического либо поликристаллического полупроводника, или в виде тонких пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку методом испарения в вакууме.



К полупроводниковой пластинке припаивают четыре электрода: два входных (электроды 1 и 2 – токовые) и два выходных (электроды 3 и 4 – холловские).



$$U_x = X \frac{IB}{b} f\left(\frac{L}{a}\right).$$

Конструкция преобразователя Холла.

В качестве материала для преобразователей Холла применяют германий, кремний, сурьмянистый индий InSb, селенид и теллурид ртути HgSe, HgTe и др.

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Преобразователи Холла

Параметры преобразователей Холла.

Входное сопротивление

Гальваномагнитная чувствительность

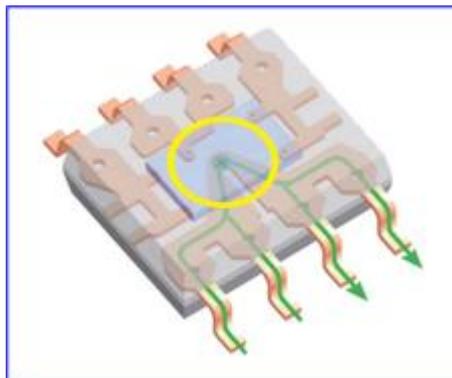
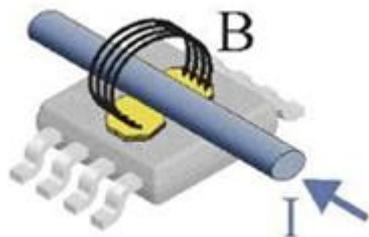
Чувствительность к магнитной индукции

Выходное сопротивление

Чувствительность к току

Остаточное напряжение

Максимально допустимый ток



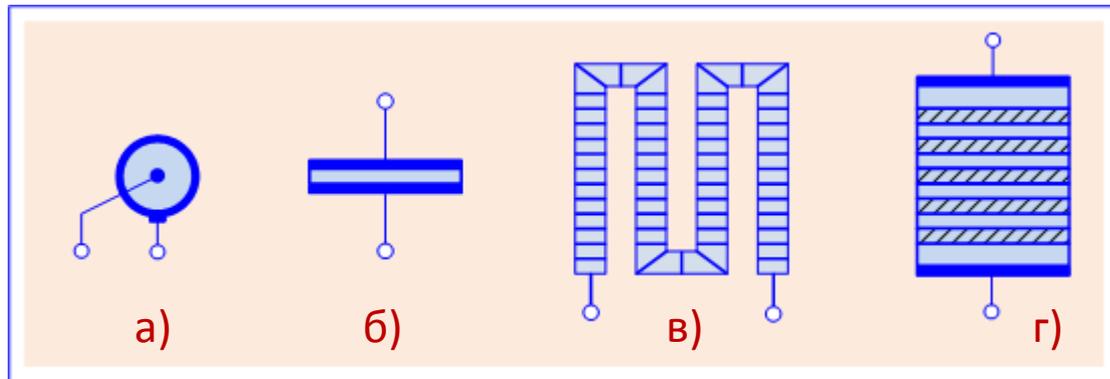
Внутренняя конструкция датчика тока ACS712. Виден U-образный медный проводник проходящий вокруг элемента Холла.

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Магниторезисторы.

Принцип действия магниторезисторов основан на магниторезисторном эффекте. Уравнение преобразования магниторезистора имеет вид

$$R_B = R_{B=0} \left(1 + A |\mu B|^m \right),$$

где B – индукция магнитного поля; $R_{B=0}$ – сопротивление преобразователя при $B = 0$; A – магниторезистивный коэффициент (значение магниторезистивного коэффициента зависит от свойств материала и формы преобразователя).



Конструкции магниторезисторов: а – диск Корбино, б – полупроводниковая пластина малой длины; в – последовательно соединенные проводящими слоями короткие магниторезисторы, г – полупроводниковая пластина с поперечными металлическими полосами на поверхности

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Магниторезисторы.

Основные метрологические параметры магниторезисторов.

Начальное сопротивление R_0

Начально допустимый ток I_0
(ток при $B = 0$)

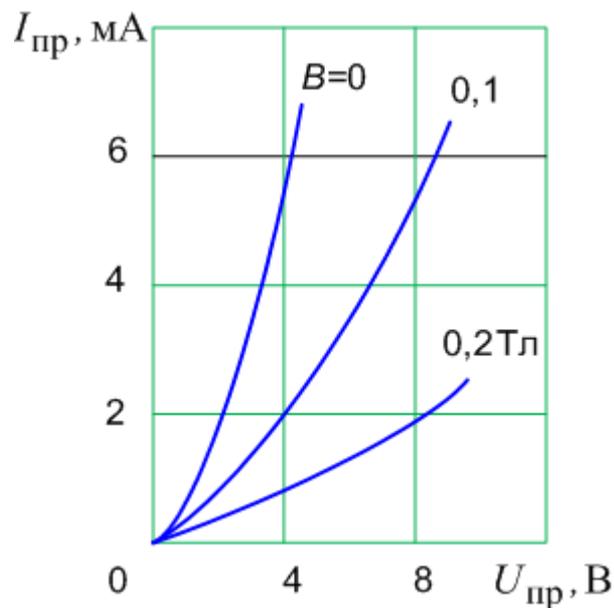
Магниторезистивная чувствительность $S_B = \frac{dR}{dB}$.

Для изготовления магниторезисторов используются прежде всего антимонид индия InSb и арсенид индия InAs , обладающие большой подвижностью носителей заряда.

Магниторезисторы находят применение в качестве бесконтактных переменных резисторов, модуляторов малых постоянных токов и напряжений, используются для бесконтактного измерения токов, при создании тесламетров и датчиков ряда неэлектрических величин, легко преобразуемых в изменение магнитной индукции.

Полупроводниковые гальваноманитные приборы. Магнитодиоды.

Магнитодиод – это полупроводниковый диод, в котором используется изменение вольт-амперной характеристики под действием магнитного поля.



Прямые ветви вольт-амперных характеристик германиевого магнитодиода.

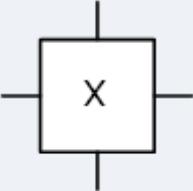
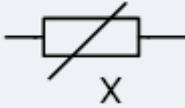
В качестве магнитодиодов применяют диоды с несимметричным p-n-переходом и толстой базой. Обычно толщина базы соответствует нескольким диффузионным длинам неосновных носителей. Полупроводниковый материал базы, также как и для магниторезисторов, должен обладать большой подвижностью носителей заряда, чему удовлетворяют *германий* и *кремний*.

Полупроводниковые гальваномагнитные приборы. Магнитодиоды.

Для оценки чувствительности магнитодиода к магнитному полю, по аналогии с преобразователем Холла, используют гальваномагнитную чувствительность

$$S_{BI} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{BI}$$

ГОСТ 2.728-74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые.

Датчик Холла	
Резистор магниточувствительный	
Магнитодиод	

Вопросы для самоконтроля.

1. Представлены условные графические обозначения термоэлектрических полупроводниковых приборов:

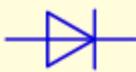
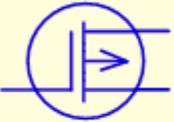
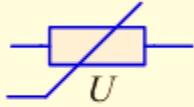
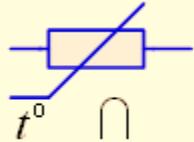
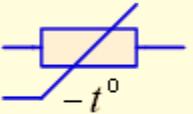
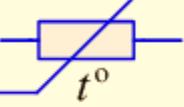
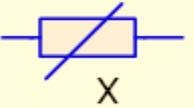
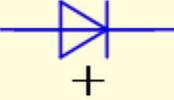
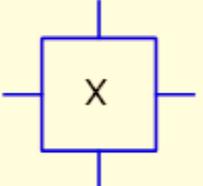
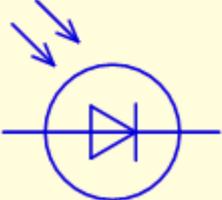
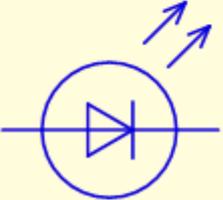
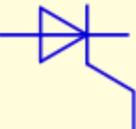
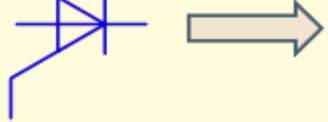


Укажите условное графическое обозначение варистора.

2. Дайте определение полупроводниковым термоэлектрическим прибора – термистору, позистору, болометру, варистору.

3. Дайте определение полупроводниковому гальваномагнитному прибору.

Заключение.

Рекомендуемая литература

- 1. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2011. – 244 с. ISBN 978-5-4332-0021-0
- 2. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: учеб. пособие / Н.С. Легостаев, П.Е. Троян, К.В. Четвергов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 476 с. ISBN 978-5-86889-422-0
- 3. Щука А.А.** Электроника: учеб. пособие / А.А. Щука; под ред. А.С. Сигова. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 752 с. ISBN 978-5-9775-0160-6

Спасибо за внимание