

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет»
Факультет приборостроения, информационных технологий и
электроники
Кафедра «Физика»

Курсовая работа по дисциплине:
«Физика твердого тела»
на тему: «Электрические свойства металлов»

Выполнил: ст.гр.14ПФ1

Путилин А.И.

Проверил: к.т.н Евдокимов С.В.

Принято к защите 15.12.17

Дата, подпись преподавателя

Оценка удовлетворительно

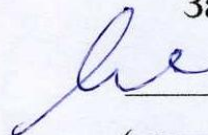
Оценка, подпись преподавателя

Пенза 2017 год

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет»
Факультет приборостроения, информационных технологий и
электроники
Кафедра «Физика»

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

 М.Б.Семенов

(подпись, инициалы, фамилия)

«14» декабря 2017г.

ЗАДАНИЕ

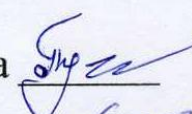
по курсовой работе студента

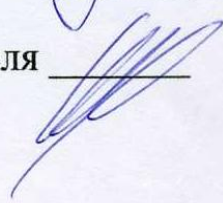
Путилин Алексей Иванович

по дисциплине «Физика твердого тела»

Группа 14ПФ1

1. Тема работы: Электрические свойства металлов
2. Руководитель: к.т.н Евдокимов С.В.
3. Срок сдачи студентом законченной работы 11.12.2017
4. Перечень подлежащих разработке вопросов:
 - Свойства твердых тел, проводящих ток
 - Классическая электронная теория
 - Явления электропроводности

Подпись студента 

Подпись преподавателя 

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ТВЕРДЫЕ ТЕЛА ПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	5
1.1 Проводники.....	5
1.2 Диэлектрики.....	6
1.3 Полупроводники.....	6
ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ	8
2.1 Классическая электронная теория электропроводности металлов.....	8
2.2 Пьезоэлектрический эффект	Ошибка! Закладка не определена.
2.3 Квантовая энергия электронов в атоме.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.4 Элементы зонной теории кристаллов	16
2.5 Распределение электронов по энергиям в твёрдом теле.....	18
2.6 Электропроводность твёрдых тел на основе зонной теории.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.7 Электропроводность полупроводников.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.8 Контактные явления.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.9 Термоэлектрические явления.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.10 Зависимость сопротивления контакта от внешнего напряжения	Ошибка! Закладка не определена.
2.11 р-п-р-переход. Транзисторы.....	Ошибка! Закладка не определена.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	Ошибка! Закладка не определена.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших признаков металлов является их способность проводить электрический ток, что получило название электропроводности. Тела, проводящие электрический ток, называются проводниками.

До воздействия на проводник электрического напряжения свободные электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. Они передвигаются в разных направлениях, распределяясь равномерно по всему объему металла. Сами же атомы, потерявшие электроны, превращаются в положительные ионы, которые расположены в узлах кристаллической решетки. Таким образом, металлический проводник состоит из положительных ионов, колеблющихся около своих узлов, и их хаотично движущихся свободных электронов.

Цель курсовой работы: познакомиться поближе с электрическими свойствами твердых тел.

ГЛАВА 1 ТВЕРДЫЕ ТЕЛА ПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.

По способности проводить электрический ток все вещества в природе условно делят на три основных класса: проводники, полупроводники и диэлектрики.

1.1 Проводники.

Проводники обладают очень большой электропроводностью и делятся на две группы. К проводникам первой группе относятся металлы (медь, алюминий, серебро и т.д.) и их сплавы, в которых возможно перемещение только электронов. То есть в металлах электроны очень слабо связаны с ядрами атомов и легко от них отделяются. В металлах явление электрического тока связано с движением свободных электронов, которые обладают очень большой подвижностью и находятся в состоянии теплового движения. Эту электропроводность называют электронной. Проводники используются для изготовления проводов, ЛЭП, обмоток электрических машин и т.п. К проводникам второй группе относятся водные растворы солей, кислот и т.д., которые называют электролитами. Под действием раствора молекулы вещества распадаются на положительные и отрицательные ионы, которые под действием электрического поля начнут перемещаться. Ионы электролита при прохождении тока начнут осаждаться на электродах, опущенных в электролит. Процесс выделения вещества из электролитов электрическим током называется электролизом. Его используют для добычи цветных металлов из растворов их соединений (медь,

алюминий), а также для покрытия металлов защитным слоем другого металла (например, хромирование).

1.2 Диэлектрики.

Диэлектрики (или электроизоляционные вещества) вещества с очень малой электропроводностью (газы, резиновые вещества, минеральные масла и т.п.). В этих веществах электроны очень сильно связаны с ядрами атомов и под действием электрического поля редко отделяются от ядер. Т.е. диэлектрики не проводят электрический ток. Это их свойство используют при производстве электрозащитных средств: диэлектрические перчатки, обувь, коврики, изолирующие подставки, накладки, колпаки, изоляторы на электрооборудовании и т.п. Диэлектрики могут быть: твердые, газообразные, жидкие.

1.3 Полупроводники.

Полупроводники (германий, селен, кремний) вещества, которые кроме электронной проводимости, имеют «дырочную» проводимость, которая в большой степени зависит от наличия внешних факторов: света, температуры, электрического или магнитного поля. Эти вещества имеют ковалентную связь (химическая связь между двумя электронами соседних атомов на одной орбите). Ковалентная связь очень непрочна. При наличии внешнего фактора она разрушается и появляются свободные электроны (электронная проводимость). В момент образования свободного электрона в ковалентной связи появляется свободный электрон - «электронная дыра» (эквивалентная протона), которая притягивает к себе электрон из соседней ковалентной связи. Но тогда образуется новая «дыра», которая вновь притягивает к себе

электрон из соседнего ковалентной связи и так далее. Т.е. под действием электрического поля перемещаются «дыры» в направлении поля (навстречу электронам) - движение протонов. Таким образом, при электронной проводимости - электрон проходит весь путь, а при «дырочной» - электроны поочередно замещаются по связям, каждый электрон проходит долю пути. При нарушении связей в полупроводниках одновременно возникает одинаковое количество электронов и «дырок». То есть, проводимость состоит из электронной и «дырочной» и называется собственной проводимостью полупроводника. Свойства полупроводников возможно изменить, если в них внести примеси других веществ. Тем самым увеличить ту или иную проводимость. Это используется в промышленной электронике: диоды, транзисторы, тиристоры. Используют, как усилители, выпрямители, электронные генераторы, стабилизаторы и тому подобное. Их преимущества: малая потеря энергии, стоимость, размер и масса, простота эксплуатации, большой срок работы. Недостаток: зависимость проводимости от температуры.

ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

2.1 Классическая электронная теория электропроводности металлов

Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля возникает разность потенциалов $U = j_1 - j_2$. Она называется Холловской разностью потенциалов.

Основная идея этой теории состоит в том, что электроны в металле свободны и образуют своеобразный электронный газ, подобный идеальному газу.

При столь большой концентрации электронов их взаимодействие между собой, как и с ионами решётки металла, очень велико. Однако средняя сила, действующая на каждый электрон со стороны всех остальных электронов и ионов, равных нулю, и поэтому в известном приближении такой электрон можно рассматривать как свободный, который взаимодействует с ионами решётки только при упругих соударениях. Следовательно, электронный газ, подобно идеальному газу, обладает лишь кинетической энергией

$$\frac{mv^2 T}{2} = \frac{3}{2} kT$$

где m - масса электрона; $v^2 T$ - средняя квадратичная скорость его движения;

k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура. Это выражение позволяет определить среднюю квадратичную скорость теплового движения электрона:

$$VT = \sqrt{v^2 T} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Хаотическое тепловое движение электронов и непрерывные столкновения с ионами кристаллической решётки приводят к тому, что нельзя указать преимущественного направления движения заряда - в проводнике нет электрического тока. Следовательно, ток может появиться лишь при наличии электрического поля, сообщающего всем электронам некоторую добавочную, «дрейфовую» скорость, направленную вдоль поля.

Одним из успехов классической электронной теории является также объяснения связи между электропроводностью металлов и их теплопроводностью. Действительно, обладая энергией теплового движения, электроны проводимости участвуют в переносе тепла в металле, и, чем выше концентрация электронов, от которой зависит электропроводность, тем больше и теплопроводность металла. Прямая пропорциональная зависимость электропроводности и теплопроводности была установлена И. Видеманом и

Р. Францем ещё в 1853г. Открытый ими закон имеет вид: $\frac{\chi}{\gamma} = At$, χ - коэффициент теплопроводности; T - абсолютная температура; A - константа. На основе электронной теории Лоренца вычислил величину этой константы.

В 1901 г. Физик Э. Рике поставил следующий опыт. Через три металлических цилиндра (медный, алюминиевый, медный), одинакового радиуса, которые плотно соприкасались друг с другом хорошо отшлифованными торцевыми поверхностями, в течении очень долгого времени пропускали ток. При этом через цилиндры прошёл заряд $3,5 \cdot 10^{-6}$ К. тщательное взвешивание цилиндров до опыта и после него показало, что масса их не изменилась. Это позволило установить, что электропроводность

металлов обусловлена перемещением таких заряженных частиц, которые являются общими для всех металлов [1].

В 1912 году советские физики Л.И.Мандельштам и Н.Д.Папалекси на опыте по наблюдению инерционного движения заряженных частиц в металлическом проводнике подтвердили, что в металле имеются такие частицы, которые слабо связаны с кристаллической решёткой.

В 1916 году американские физики Толмен и Стюарт, применив чувствительный гальванометр вместо телефона, показали, что частицы, образующие инерционный ток при торможении катушки, имеют отрицательный электрический заряд, а также вычислили удельный заряд этих

частиц $\frac{e}{m}$. Они получили $4,8 \cdot 10^{17}$ ед., что оказалось близким к значению удельного заряда электрона, вычисленному в опытах по отклонению пучка электронов в электрических и магнитных полях. Таким образом, в работах Толмена и Стюарта электронная теория проводимости металлов получила строгое экспериментальное обоснование.

Однако было обнаружено, что основная идея этой теории - наличие в металле электронного газа, подобно идеальному, - находится в противоречии с некоторыми опытными фактами.

Молярная теплоёмкость металла, вычисленная на основе электронной теории, должна быть равна , а та же теплоёмкость, полученная

экспериментально, - $25 \frac{\text{дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$. Такой же результат можно получить и теоретически, если предположить, что электронный газ не обладает теплоёмкостью. Подобное предположение выглядит очень странным, так как согласно электронной теории температура металла определяется не только энергией колебания атомов в решётке. Но и энергией движения электронов.

2.2 Пьезоэлектрический эффект

В 1880 г. французские учёные-физики Пьер и Жак Кюри открыли пьезоэлектрический эффект.

Пьезоэлектрический эффект заключается в следующем. Если из кристалла кварца (кварц-диэлектрик) вырезать определённым образом пластинку и поместить её между двумя электродами, то при сжатии кварцевой пластинки на электродах появятся равные по величине, но различные по знаку заряды.

Если изменить направление силы, действующей на пластинку (вместо того чтоб сдавить кварц его будут растягивать), то изменяются и знаки зарядов на электродах: на том электроде, где при сжатии возникал положительный заряд, при растяжении появится отрицательный. При этом, чем больше сила, сжимающая или растягивающая пластинку, тем больше и величина зарядов, возникающая на электродах.

В середине XIX в. были также обнаружены диэлектрики, которые подобно остаточной поляризации. Такие диэлектрики по аналогии с термином «магнит» называли электретами.

Самое характерное свойство электретов - способность нести на своих противоположных сторонах заряды различного знака, которые могут сохраняться в течение весьма длительного времени. Так, для электретов из Карнаубского воска и его смесей это время составляет годы, керамические электреты сохраняют заряд в течение двух лет, электреты из полимеров имеют время жизни месяцы.

Объяснить этот обширный экспериментальный материал об электрических свойствах диэлектриков стало возможным тогда, когда появилась теория, объясняющая строение твёрдых тел, связи между их структурными частицами.

Есть такие твёрдые тела, у которых центры положительных и отрицательных зарядов отдельных атомов или молекул совпадают.

Если такие вещества поместить в электрическое поле, то возникает «электрическая деформация» структурных частиц, т.е. электрическое поле

смещает электрические заряды, входящие в состав диэлектрика, от тех положений, которые они занимали в отсутствие поля. Так, например, если диэлектрик состоит из нейтральных атомов, то в присутствии поля их электронные оболочки смещаются относительно положительно заряжённых ядер. Если кристаллическая решётка твёрдого тела состоит из положительно и отрицательно заряжённых ионов, например, решетка NaCl , то в электрическом поле ионы равных знаков смещаются относительно друг друга. В результате упругого смещения каждой пары зарядов образуется система, обладающая некоторым дополнительным моментом $\vec{p} = q\vec{l}$, а весь диэлектрик поляризуется.

Поляризация диэлектрика численно характеризуется дипольным моментом единицы объёма P , который равен произведению числа элементарных диполей N , содержащих в единице объёма вещества, на величину момента элементарного диполя. Что дипольный момент единицы объёма диэлектрика пропорционален напряжённости электрического поля внутри диэлектрика.

Помимо неполярных диэлектриков, существует большой класс диэлектриков, молекула которых и при отсутствии внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Постоянный дипольный момент могут иметь многие молекулы, у которых центры симметрии составляющих их положительных и отрицательных зарядов не совпадают друг с другом. Типичными представителями полярного твёрдого диэлектрика служат лёд, твёрдая соляная кислота, органическое стекло и др.

При помещении полярного диэлектрика в электрическое поле происходит ориентация полярных молекул так, чтобы их оси совпадали с направлением линий напряжённости электрического поля. Однако тепловое движение частиц вещества препятствует такой ориентации. В результате действия поля и теплового движения устанавливается равновесное состояние, при котором полярные молекулы приобретают в среднем

некоторую направленную ориентацию, а весь диэлектрик благодаря этому приобретает дипольный момент в направлении поля, т.е. поляризуется.

Рассмотренный вид поляризации называют ориентационной или дипольной. В этом виде поляризации, в отличие от поляризации смещения, существенную роль играет температура диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков больше, чем у неполярных, так как у них по существу наблюдаются оба вида поляризации: ориентационная и упругая поляризация смещения.

Если внешнее поле убрать, то полярные и неполярные диэлектрики депольризуются, т.е. поляризация их практически исчезает.

Существует третий тип диэлектриков, у которых наблюдается самопроизвольная поляризация. В этом случае внутри диэлектрика, без какого бы то ни было воздействия внешнего поля, самопроизвольно возникают однородно поляризованные области, так называемые домены. В отсутствии внешнего поля направления дипольных моментов областей различны. При наложении поля происходит «ориентация» доменов и весь диэлектрик поляризуется. Так как каждый домен имеет большой дипольный момент, то диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков обычно очень велика, порядка 10^4 . Диэлектрики такого типа называют сегнетоэлектриками.

Сегнетоэлектрики отличаются от других диэлектриков рядом специфических свойств.

Если у полярных и неполярных диэлектриков дипольный момент единицы объёма вещества пропорционален напряжённости электрического поля E , то у сегнетоэлектриков такая линейная зависимость между P и E существует только в слабых полях (рис 1). При увеличении напряжённости поля дипольный момент P возрастает в соответствии с кривой AB , а при некотором значении E изменение дипольного момента прекращается. Это состояние называют насыщением. В состоянии насыщения все домены сегнетоэлектрика располагаются вдоль поля, и дальнейшее увеличение поля

Е уже не приводит к увеличению поляризации. Если после этого начать уменьшать величину напряжённости поля до нуля, то поляризация кристалла будет изменяться не по начальной кривой OB , а по кривой BD и при напряжённости поля, равной нулю, кристалл останется поляризованным.

Такое явление называется диэлектрическим гистерезисом. Величину поляризации, определяемую отрезком OD при $E=0$, называют остаточной поляризацией.

Таким образом, зависимость поляризации от напряжённости переменного электрического поля для сегнетоэлектриков описывается кривой $BDFLHB$, называемой петлей гистерезиса. По петле гистерезиса можно определить величину спонтанной поляризации.

Однако при увеличении температуры свойства сегнетоэлектриков изменяются и при некоторой температуре, называемой температурой Кюри, происходит исчезновение спонтанной поляризации [2].

Сегнетоэлектрики применяют при изготовлении лазеров и в запоминающих устройствах электронно-вычислительных машин.

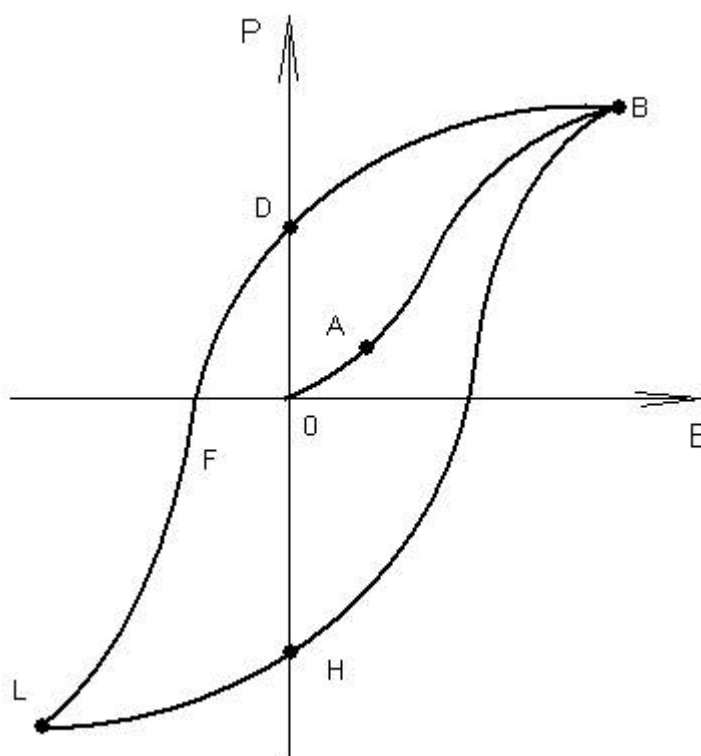


рис. 1

2.3 Квантовая энергия электронов в атоме

Для объяснения электрических свойств металлов и диэлектриков, применялись совершенно не связанные между собой теории, основанные на различных моделях. Лишь с применением квантово-механических представлений удалось создать единую, современную теорию твёрдого состояния, или зонную теорию.

С самого начала надо иметь в виду, что законы движения макроскопических тел неприменимы для описания поведения атомных частиц. А вот энергия электронов в атомах, молекулах кристалла не может иметь произвольных значений. В квантовой механике показывается, что энергии электронов в таких случаях могут принимать лишь определённые, дискретные значения. Это означает что если при расстоянии между ядром и электроном r_1 (рис 2) Энергия электрона E_1 , то при расстоянии r_2 энергия электрона станет E_2 , причём $\Delta E = E_2 - E_1$ имеет совершенно определённое значение. Электрон не может иметь энергию, большую E_1 , но меньшую E_2 . О величинах, которые могут принимать лишь ряд определённых дискретных значений, говорят, что они квантованы. К таким величинам относятся энергия электронов в атомах, молекулах и кристаллах (рис.2).

На рис 2 представлены диаграмма уровней энергии атома водорода, или энергетический спектр атома водорода. Самый низкий уровень энергии E_1 соответствует ближайшему расположению электрона от ядра и характеризует основное, или нормальное состояние атомов. Такую энергию имеет атом, если он получает энергию извне. В основном состоянии изолированный атом может пребывать сколь угодно долго. Все энергетические уровни, начиная со второго, соответствуют возбуждённым состояниям атома. Эти значения энергии электрон в атоме водорода может иметь, если он приобретает дополнительную энергию за счёт воздействия каких-либо внешних факторов равную $\Delta E = E_m - E_n$, где m и n - номера

верхнего и нижнего энергетических уровней, между которыми осуществляется переход электрона.

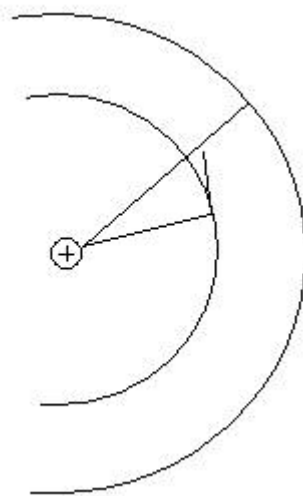


рис.2

Находится в возбуждённом состоянии долгое время атом не может, и поэтому он самопроизвольно переходит в нормальное состояние, отдавая излишек энергии $\Delta E = E_n - E_m$ в виде электромагнитных излучений (света).

На этой диаграмме видно также, что энергия электрона в атоме водорода имеет отрицательное значение. Это означает, что нулевая энергия соответствует состоянию, в котором находится неподвижный электрон, удалённый на бесконечно большое расстояние от ядра и не взаимодействующий с ним.

При рассмотрении энергетического спектра атома следует обратить внимание также и на то, что при увеличении главного квантового числа n происходит сближение уровней энергии. При достаточно большом n можно считать, что энергия атома практически не квантуется, а изменяется непрерывно. В этом находит своё выражение принцип соответствия, установленный Н.Бором в 1922г.

2.4 Элементы зонной теории кристаллов

Как изменится эта диаграмма для двухатомной молекулы, состоящей из двух атомов.

По мере сближения каждый атом - его электроны, ядро - испытывает увеличивающееся силовое воздействие со стороны электрических полей электронов и ядра другого атома. Это взаимодействия между атомами приводит к тому, что вместо одного энергетического уровня, одинаково для двух изолированных атомов, возникают два близко расположенных, но не совпадающих уровня. В таких случаях говорят, что происходит расщепление энергетических уровней электронов.

Следовательно, в энергетическом отношении образование двух атомов молекулы означает, что для каждого электрона обоих атомов появилась возможность принимать вдвое больше значений энергии, чем в изолированном состоянии.

Если теперь будут сближаться 3,4,5 или вообще N атомов, то в результате их взаимодействия вместо каждого энергетического уровня, одинаково для всех N изолированных атомов, появится 3,4,5 или N близких, но не совпадающих уровней, которые образуют энергетическую полосу или зону разрешённых значений энергии.

Таким образом, разрешённая энергетическая зона состоит из N близких уровней, где N -общее число атомов твёрдого тела. В 1 м^3 твёрдого тела находится 1028-1029 атомов. Такой же порядок величины имеет и число уровней в зоне. Так как электроны принадлежат всему кристаллическому телу, то можно сказать, что зоны энергии характеризуют возможные значения энергии электронов всех атомов тела, а диаграмму разрешённых значений энергии называют энергетическим спектром твёрдого тела.

Однако не все уровни, соответствующие различным значениям главного квантового числа n , расщепляются одинаково. При сближении атомов электрического поля в первую очередь действуют на валентные электроны, которые к тому же слабее связаны с ядрами своих атомов, чем утренные электроны. Поэтому энергетические уровни валентных электронов

расщепляются уже при расстояниях между атомами 10^{-9} м, а ширина образующейся зоны разрешённых значений энергии – примерно нескольких электрон-вольт.

Влияние электрических полей взаимодействующих атомов на внутренние электроны очень слабые. Поэтому энергетические состояния внутренних электронов практически такие же, как и в изолированных атомах. Слабое расщепление энергетических уровней внутренних электронов происходит при расстояниях между взаимодействующими атомами, много меньшими периода кристаллической решётки (10^{-10} м).

Разрешённые энергетические зоны твёрдого тела разделены друг от друга промежутками – областями энергии, которые электроны не могут иметь по законам квантовой механики. Эти области называют зонами запрещённых значений энергии. Ширина запрещённых зон соизмерима по величине с шириной разрешённых зон. Более возбуждённые уровни изолированных атомов дают разрешённые зоны большей ширины. С увеличением энергии ширина разрешённых энергетических зон увеличивается, а ширина запрещённых зон уменьшается. Таким образом, для любого твёрдого тела характерна зонная структура энергетических уровней электронов, или зонный энергетический спектр [3].

2.5 Распределение электронов по энергиям в твёрдом теле

Рассмотрим атом водорода. В возбуждённом состоянии электрон находится недолго и, испуская излишек энергии, переходит в нормальное, невозбуждённое состояние, характеризующееся наименьшей из всех возможных значений энергией. Состояние с наименьшей энергией - устойчивое состояние. Очевидно, что стремление перейти в энергетически более устойчивое состояние, т.е. «занять» самый низший из всех возможных энергетических уровней, характерно для электронов и многоэлектронных атомов. Означает ли это, что все электроны многоэлектронных атомов имеют

в устойчивом состоянии одну и ту же энергию? Ответить на этот вопрос позволяет основное правило квантовой механики - принцип Паули, в соответствии с которым невозможно «скопление» электронов на самом низком энергетическом уровне. Принцип Паули утверждает, что в любой системе взаимодействующих частиц в одном и том же энергетическом состоянии не могут находиться более двух электронов.

В соответствии с принципом Паули электроны «занимают» попарно все энергетические уровни, начиная с самого нижнего. Таким образом, принцип Паули регулирует распределение электронов по энергиям в любой системе, содержащей множество электронов, как в изолированных многоэлектронных атомах, так и в твёрдых телах.

Рассмотрим распределение электронов по энергиям в твёрдом теле. Мы знаем, что образование молекулы из двух изолированных атомов в энергетическом отношении означает образование двух близко расположенных подуровней вместо одинаковых уровней энергии изолированных атомов. Если в изолированных атомах этому уровню энергии соответствовало по одному электрону, то при образовании молекулы оба электрона будут иметь наименьшую из всех возможных значений энергию. В подобных случаях говорят, что электроны «расположатся» на самом низком энергетическом уровне, т.е. согласно принципу Паули они оба «расположатся» на нижнем подуровне, а верхний подуровень окажется «пустым». Если бы каждый изолированный атом имел по два электрона, соответствующих данному уровню энергии, то при образовании молекулы эти четыре электрона «расположились» бы попарно на обоих подуровнях.

Распределение электронов по энергиям справедливо лишь в том случае, если твёрдое тело будет находиться при температуре абсолютного нуля, не подвергаясь никаким внешним воздействиям.

Что же произойдёт, если такое твёрдое тело подвергнуть нагреванию, освещению или облучению ультрафиолетовыми, рентгеновскими лучами или просто создать внутри него электрическое поле? Так как кристалл при этом

получает энергию извне, то и энергия электронов должна увеличиваться. С позиции квантовой механики это означает, что электроны получают возможность перейти в новое состояние, соответствующее более высокому энергетическому уровню, если порция энергии, получаемая твёрдым телом извне, достаточна для перевода электронов на один из возбуждённых уровней энергии.

Такая возможность представляется в первую очередь электронам валентной зоны, так как для перехода электронов из заполненных целиком зон, лежащих ниже валентных, нужна слишком большая энергия возбуждения. Следовательно, основную роль во всех энергетических процессах в твёрдом теле играют, в первую очередь, внешние валентные электроны, или с точки зрения зонной теории процессы, разыгрывающиеся в валентной и свободной зонах. Поэтому, как правило, на зонной диаграмме изображают только валентную и свободную зоны.

Нетрудно показать, что при нагревании кристалла до комнатной температуры или под действием электрического поля источника тока электрон приобретает энергию, достаточную лишь для внутризонных переходов.

2.6 Электропроводность твёрдых тел на основе зонной теории

Зонная теория впервые позволила объяснить многие явления в твёрдых телах с единых позиций. Рассмотрим с позиции зонной теории механизм электропроводности кристаллов.

Электрическим током называют упорядоченное движение заряжённых частиц в веществе под действием сил электрического поля. Электрическое поле, действуя на электроны, ускоряет их на расстоянии свободного пробега λ и сообщает им энергию, равной работе электрической силы E на перемещении λ . Электрический ток возникает лишь в том случае, если

верхняя энергетическая зона не полностью занята электронами, т.е. число подуровней энергии в зоне превышает число электронов. Такую зону называют зонной проводимости. Таким образом, если валентная зона не полностью занята электронами, то твёрдое тело всегда будет проводником электрического тока. Этот случай заполнения валентной зоны соответствует металлам, входящим в первую группу периодической системы Д.И.Менделеева. Ведь у них имеется всего по одному валентному электрону. В твёрдом теле из N таких атомов будет и N валентных электронов. Но, располагаясь в валентной зоне твёрдого тела по 2 электрона на уровень, они займут только половину, т.е. $\frac{N}{2}$ уровней из N возможных [4].

Для металлов второй группы периодической системы полностью заполненная валентная зона перекрывается с какой-нибудь незаполненной зонной.

Верхний занятый электронами металла энергетический уровень при

$T = 0$ К называют уровнем Ферми. Энергия Ферми E_F составляет приблизительно 10эв. Уровень Ферми играет большую роль в квантовых представлениях о твёрдом теле.

Рассмотрим теперь энергетический спектр твёрдого тела. В валентной зоне все энергетические уровни полностью заняты электронами, а свободные уровни отделены от валентной зоны зоной запрещённых значений энергии ΔE . Обычные электрические поля не могут сообщить электрону валентной зоны энергию ΔE , достаточную для преодоления запрещённой зоны и перевода его в свободную зону, где он мог бы уже увеличивать свою энергию. Следовательно, в таких твёрдых телах электропроводность не может иметь место при отсутствии внешних возбуждений и нулевой температуре. Однако в реальных условиях температура твёрдых тел отличается от нуля, поэтому эти тела обладают некоторой энергией

теплового движения. Есть кристаллы, для которых энергии теплового движения при обычных температурах недостаточна, чтобы электрон мог преодолеть запрещённую зону энергии ($kT < \Delta E$). Поэтому при наложении электрического поля электропроводность в таких твёрдых телах не может иметь место даже при высоких температурах. Такие твёрдые тела не проводят электрический ток и их называют диэлектриками.

У некоторых кристаллов ширина запрещённой зоны сравнительно мала и энергия теплового движения оказывается достаточной для «заброса» части электронов из валентной зоны в свободную. В таком твёрдом теле электрическое поле вызывает ток, т.е. электроны, попавшие в свободную зону, и электроны в валентной зоне получают возможность переходить на более высокие незанятые уровни энергии. Такие твёрдые тела называются полупроводниками.

Для полупроводников в отличие от металлов число носителей тока, которые могут участвовать в электропроводности, существенно зависит от температуры. При высоких температурах электропроводность полупроводников приближается к электропроводности металлов, так как при больших значениях энергии теплового движения число выброшенных в свободную зону электронов очень велико и они вместе с электронами валентной зоны все могут принять участие в электропроводности. Но, с другой стороны, все полупроводники при $T = 0$ К становятся диэлектриками. Отсюда следует, что полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Этим и объясняется их название.

Однако следует заметить, что и диэлектрики при очень высоких температурах начинают проводить ток. Поэтому деление твёрдых тел на полупроводники и диэлектрики в достаточной мере условно, но практика даёт возможность, хотя и условно, разграничить их по ширине запрещенной зоны. Если у твёрдого тела $\Delta E > 6 \text{ эВ}$, то оно - диэлектрик, а если $\Delta E < 6 \text{ эВ}$ -

полупроводник. Наиболее широкий класс полупроводников, как показывают теория и опыт, имеет ширину запрещённой зоны $\Delta E < 2\varepsilon_v$.

Полупроводники могут стать электропроводными также под действием падающего на них электромагнитного излучения, так как электромагнитное излучение тоже обладает энергией, достаточной для перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости [5].

2.7 Электропроводность полупроводников

Как известно, полупроводник-это твёрдое тело с ковалентной связью между атомами. При абсолютном нуле температуры все связи между атомами заполнены, в веществе нет зарядов, способных перемещаться под действием приложенного электрического поля. При увеличении температуры в полупроводнике возникают носители зарядов двух типов: электроны и дырки.

Рассмотрим электропроводность полупроводника с энергетической точки зрения. Чистый полупроводник при абсолютном нуле температуры и при отсутствии внешнего воздействия описывает энергетической диаграммой, в которой валентная зона полностью заполнена, а в свободной зоне нет электронов. Полупроводник подобен диэлектрику. Если к такому проводнику подводить энергию извне, то часть электронов, находящиеся в валентной зоне, получив дополнительную энергию, равной ширине запрещённой зоны, попадёт в свободную зону. Благодаря наличию большого количества свободных уровней в свободной зоне свободные электроны легко изменяют свою энергию под действием электрического поля. Это движение свободных электронов и представляет собой электрический ток в полупроводнике. Кроме этого, с уходом электронов из валентной зоны в свободную создаются условия для перемещения электронов в самой валентной зоне. При этом оказывается, что движение в такой почти полностью заполненной зоне эквивалентно может быть описано движением

«пустых» мест – «дырок», если им приписать положительный знак. Под действием электрического поля энергия «дырок» тоже изменяется, и общий ток в полупроводнике равен $I = I_{эл} + I_{дыр}$.

Так как в чистом полупроводнике число электронов равно числу дырок, то те и другие принимают участие в электропроводности в равной мере. Такую электропроводность полупроводников называют собственной.

Все сказанное выше относится к химически чистым полупроводникам, у которых электропроводность обеспечивается примесями. В качестве примесей используют элементы III и V групп периодической системы элементов Д.И.Менделеева. Пяти - валентные привесные атомы имеют на внешнем слое 5 электронов. Для образования ковалентной связи с окружающими атомами полупроводника необходимо всего 4 электрона. Остаётся один электрон, который не участвует в образовании сильной ковалентной связи. Это электрон слабо связан со своим атомом смеси: сила взаимодействия между электроном и ионом атома примеси при попадании последнего в полупроводник в соответствии с законом Кулона уменьшается в $\epsilon = (10 \div 18)$ раз. Поэтому достаточно малой энергии, чтобы электрон от атома примеси последний превращается в положительный ион, хотя сам полупроводник остаётся электрически нейтральным. Энергия, необходимая для того, чтобы пятый электрон стал свободным, много меньше энергии, необходимой для появления свободного электрона из валентной зоны. Этот факт говорит о том, что уровень энергии E_d такого электрона лежит чуть ниже «дна» свободной зоны (рис 3).

Этот уровень E_d характеризует все «пятые» электроны атомов примеси, так как эти электроны находятся в одинаковых условиях.

Уровень энергии характеризует как энергетическое состояние электронов, слабо связанных с атомом примеси, так и энергетическое состояние самих атомов примеси. Ширина запрещённой зоны ΔE_d от «дна» свободной зоны, определяет энергию, необходимую для возбуждения атома

примеси и превращение его в положительный ион. Положительный заряд такого иона примеси - «связанный» заряд, он не может перемещаться от одного атома примеси к другому.

Если увеличить температуру кристалла германия с пятивалентной примесью, начиная с абсолютного нуля, то в первую очередь в свободную зону начнут переходить электроны с примесного уровня, так как $\Delta E_d \ll \Delta E$. Такие переходы начнут уже при $T = 5^\circ\text{К}$, потому что $\Delta E_d = 0,01\text{эВ}$. И только при более высокой температуре электроны из валентной зоны будут переходить в свободную.

Ясно, что в таких условиях число свободных электронов всегда будет превышать число «дырок» в валентной зоне, которые образовались за счёт части электронов, ушедших из валентной зоны в зону проводимости.

Если в таком примесном полупроводнике создать электрическое поле, то электропроводность будет осуществляться в основном за счёт свободных электронов. Таким образом, пятивалентные примеси служат поставщикам свободных электронов, поэтому их называют донорами, а полупроводники с такими примесями - полупроводниками п-типа.

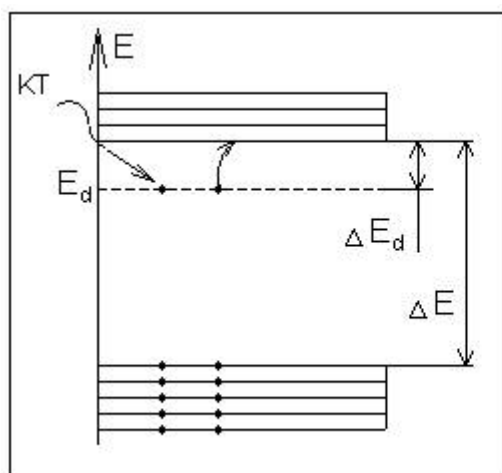


рис. 3

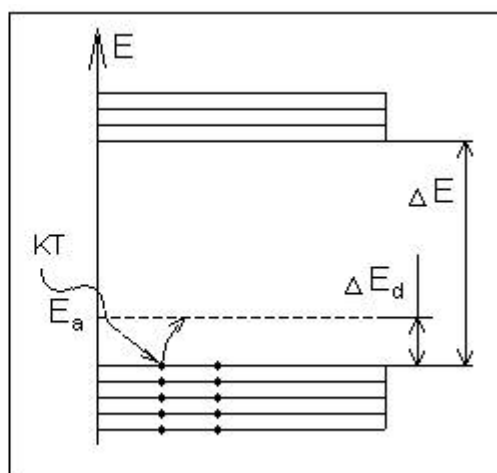


рис. 4

Атомы элементов из III группы периодической системы имеют всего три валентных электрона, которые образуют парные электронные связи с тремя атомами германия. Одна электронная связь с четвёртым атомом

германия остаётся незаполненной. Заполнение связи может произойти, если электроны атомов германия получают небольшую энергию возбуждения. Атом примеси, присоединивший электрон, становится отрицательным ионом. При этом на месте ушедшего от атома германия электрона образуется дырка.

Рассматривая такой полупроводник с энергетической точки зрения, можно увидеть, что уровень энергии, характеризующее энергетическое состояние всех атомов трёхвалентной примеси с точки зрения захвата электронов для заполнения связей, находится чуть выше «потолка» валентной зоны, так как атомы примеси захватывают немного возбуждённые электроны из валентных состояний. ΔE_a - ширина зоны, отделяющий уровень примеси E_a от потолка валентной зоны (рис 4). При этом $\Delta E_a \ll \Delta E$. с увеличением температуры в первую очередь начнутся переходы электронов из валентной зоны на примесный уровень E_a . При значительно более высоких температурах электроны будут переходить из валентной зоны в свободную. Отсюда ясно, что при температуре число дырок в валентной зоне всегда больше, чем число электронов в свободной зоне. Если в таком проводнике будет осуществляться преимущественно за счёт дырок валентной зоны.

Трёхвалентные примеси «захватывают» электроны, поэтому их называют акцепторами, а полупроводники с такими примесями – полупроводниками p – типа.

2.8 Контактные явления

Если говорить языком электронной теории, то два разнородных металла отличаются друг от друга различной концентрацией электронов и различной работой выхода (ϕ), а полупроводники разных типов - ещё и основными носителями тока. Исходя из зонной теории можно сказать, что

два разнородных металла отличаются друг от друга энергией Ферми - верхним занятым электронами уровнем.

Что произойдёт, если сблизить два разнородных металла или два полупроводника с различным типом проводимости или металл и полупроводник до межатомного расстояния? Оказывается, что при этом обнаружат себя весьма интересные явления, которые получили названия контактных.

При контакте двух металлов вследствие теплового движения электроны, энергия которых достаточна для того, чтобы покинуть металл, начнут проходить через границу раздела металлов. Чем меньше работа выхода металла, тем больше число таких электронов. Итак, при контакте двух металлов возникает двойной электрический слой.

С возникновением двойного электрического слоя условия движения электронов через границу раздела металлов изменяются. Теперь электроны движутся во внутреннем электрическом поле, электрические силы которого тормозят переход электронов из металла 1 в металл 2 (рис 5)

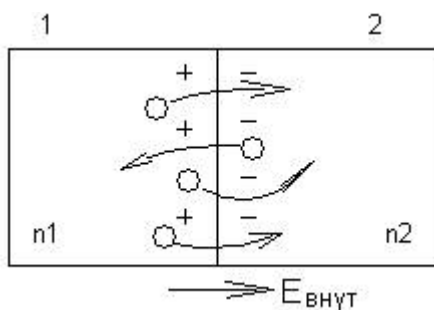


рис. 5

и «помогают» электронам, переходящим из металла 2 в металл 1. Так продолжается до тех пор, пока не наступит «динамическое равновесие» - непрерывающееся движение электронов из одного металла в другой никак не изменяет возникшей между металлами контактной разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

При контакте двух полупроводников **n – типа** вследствие теплового движения диффундируют в полупроводник **p – типа**. Встреча электрона с дыркой приводит к уничтожению дырки, т.е. при встрече электроны рекомбинируют с дырками. В результате этого атомы примеси становятся отрицательными ионами. В тонком слое полупроводника p-типа вблизи контакта образуется избыточный отрицательный заряд. Дырки из полупроводника **p – типа** также вследствие теплового движения диффундируют в полупроводник n-типа, частично рекомбинируют с электронами, в результате чего в тонком слое полупроводника n-типа создаётся избыточный положительный заряд [6].

Возникший в месте контакта двойной электрический слой создаёт электрическое поле напряжённостью, которое препятствует движению основных носителей заряда из одного полупроводника в другой. Поскольку в контактном слое мало носителей тока, он обладает повышенным электрическим сопротивлением и препятствует прохождению электрического тока через контакт полупроводников. По этой причине двойной контактный слой называют ещё запирающим. Контакт двух полупроводников разных типов называют также **p – n – переходом**.

2.9 Термоэлектрические явления

К сожалению, контакт двух металлов с его разностью потенциалов $\Delta\varphi$ нельзя использовать как источник электрической энергии не потому, что $\Delta\varphi$ мало, а потому, что в замкнутой цепи, составленной из различных металлов, находящихся при одинаковой температуре, сумма всех контактных разностей потенциалов равна нулю.

Сформулированный выше вывод справедлив лишь при условии, что температуры контактирующих металлов одинаковы.

Но если в замкнутом контуре, составленном из двух металлических проводников, контакты имеют различные температуры, то сумма контактных

разностей потенциалов будет отлична от нуля. Это означает, что в контуре будет действовать электродвижущая сила, которую называют термоэлектродвижущей, а в замкнутом контуре установится электрический ток, называемый термоэлектрическим.

Термоэлектродвижущая сила ε пропорциональна разности температур контактов: $\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2)$.

Явление термоэлектричества было открыто около 150 лет назад голландским физиком Зеебеком и давно используется в лабораторной технике для измерения температур. Принципиальная схема термоэлектрического термометра показана на рис (6).

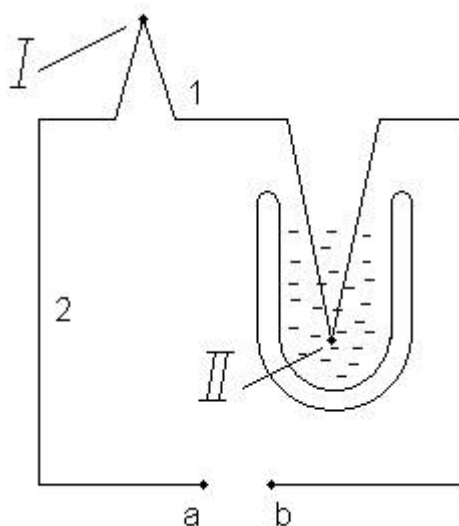


рис.6

Металлы 1 и 2, составляющие термопару, подбирают так, чтобы чувствительность её была наибольшей. Один спай помещают в место, температуру которого нужно измерить, а температуру другого спая поддерживают постоянной. При не очень точных измерениях второй спай находится просто в воздухе. При точных измерениях его погружают в сосуд Дьюара, заполненный, например, жидким азотом или тающим льдом. К клеммам «а,б» подключают чувствительный гальванометр. Термопары позволяют измерять как очень высокие, так и очень низкие температуры, которые невозможно измерить обычным жидкостным термометром.

Для увеличения чувствительности вместо одной термопары берут несколько термопар, соединенных последовательно. Э.д.с. полученной термобатарей равна сумме э.д.с. отдельных термопар. Термостолбики монтируют так, что все нечётные спаи находятся на поддерживающей рамке, а все чётные - в середине рамки. Рамка с термобатареей помещена внутрь закрытого металлического кожуха, имеющего небольшое оконце, через которое падающее на термостолбик излучение нагревает чётные спаи термобатарей. Если подсоединить такой термостолбик к проекционному гальванометру, то можно убедиться, что он обнаруживает тепловое излучение человеческой руки, удалённой от него на расстоянии нескольких метров. Такое излучение вызывает разность температур спаев лишь около миллионной доли градуса.

Термоэлемент можно использовать для превращения тепла, нагревающего горячий спай, в электрическую энергию. Однако при этом значительная часть тепла отдаёт холодным спаем окружающей среде, теряет за счёт хорошей теплопроводности металлов, поэтому доля тепла, превращаемого в электрическую энергию, невелика. Величина же термоэлектродвижущей силы таких элементов незначительна, так как у металлов число свободных электронов и их энергия практически не зависят от температуры. К.п.д. таких термоэлементов не превышает 0,5%. Поэтому они непригодны в качестве генераторов электрической энергии.

Дальнейший шаг на пути создания термоэлементов с более высоким к.п.д. - создание термоэлемента из двух полупроводников. Идея создания полупроводниковых термоэлементов принадлежит советскому физiku академику А.Ф.Иоффе.

Конструктивно полупроводниковый термоэлемент может быть оформлен так, как показано на рис. 7

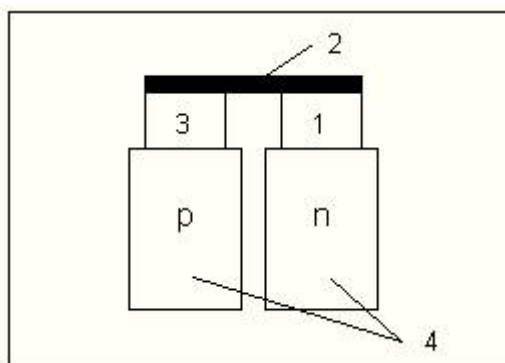


рис.7

верхние концы полупроводниковых брусочков 1 и 3 с разным типом проводимости замкнуты медной пластинкой 2. П-образные, стальные пластины радиатора 4 предназначены для отвода теплоты и поддержания необходимой разности температур при работе термоэлемента. Медная пластина 2, замыкающие горячие концы полупроводников, не оказывает влияния на величину термо-э.д.с. такого термоэлемента, так как оба конца её находятся при одной и той же температуре.

Величина термо-э.д.с. в полупроводниковых термоэлементах больше, чем у металлических термопар, не только за счёт меньшей теплопроводности полупроводников. Основная причина состоит в том, что в полупроводниках нагревание увеличивает не только кинетическую энергию электронов и дырок, но и их концентрацию.

В результате повышения концентрации основных носителей тока – электронов в полупроводнике **n-типа** (рис 8) и дырок в полупроводнике **p-типа** (рис 9) и увеличение энергии их движения изменяется распределение зарядов внутри полупроводника: основные носители тока «устремляются» к холодному концу, «обнажая» ионы примеси. Такое перераспределение зарядов влечёт за собой образования внутреннего электрического поля, которое по мере возрастания замедляет движение зарядов от горячего конца к холодному. В результате совместного действия этого поля и соответствующей разности температур устанавливает

равновесие, характеризуемое определённой разностью потенциалов между нагретым и холодным концами полупроводника. Если включить такой полупроводник в цепь и замкнуть её, то в цепи появится ток.

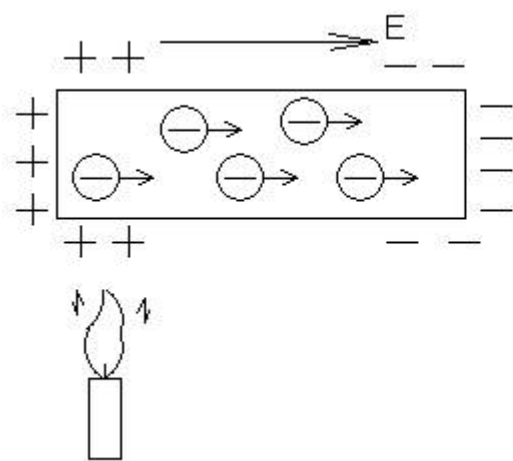


рис. 8

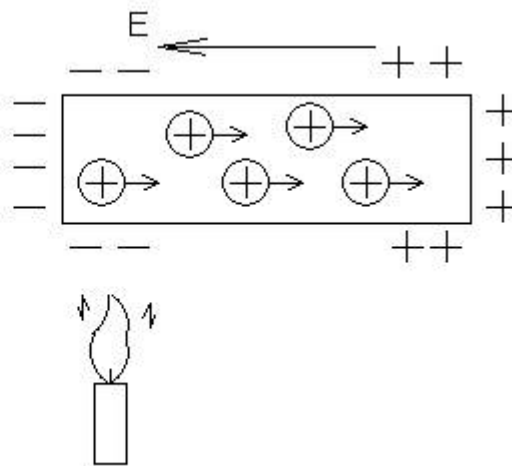


рис. 9

При прохождении тока через цепь, состоящую из двух спаянных металлов, наблюдается эффект, обратный явлению термоэлектричества, т.е. температура одного из контактов повышается, а другого - понижается. Этот эффект был обнаружен в 1834 году французским физиком Пельтье. Изменив направление тока в термобатарее, можно холодильник превратить в генератор. На основе явления Пельтье разработан термоэлектрический способ отопления.

2.10 Зависимость сопротивления контакта от внешнего напряжения

Двойной электрический слой, возникающий вдоль поверхности соприкосновения двух металлов, двух полупроводников или металла и полупроводника, обладает ещё способностью изменять электрическое сопротивление в зависимости от направления внешнего электрического поля источника тока.

Подсоединим контакт двух металлов 1 и 2 (рис 10) к источнику постоянного тока. Если к металлу 1 подсоединить плюс, а к металлу 2 – «-» источника, то тогда направление электрического поля источника и направление внутреннего электрического поля в двойном электрическом слое будут одинаковыми. Суммарное электрическое поле ещё больше затруднит движение электронов в контактном слое.

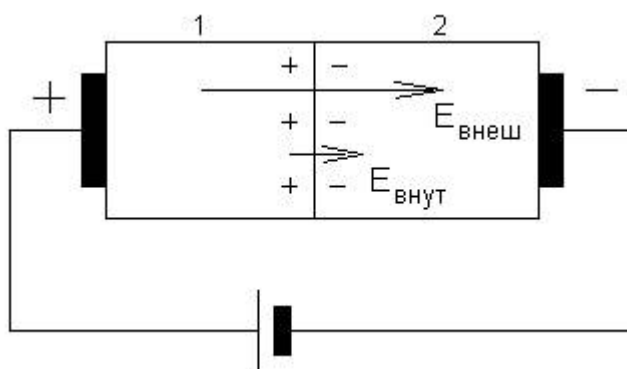


рис. 10

Толщина двойного слоя и контактная разность потенциалов возрастут. Можно сказать, что увеличилось сопротивление контактного слоя, так как ток в цепи уменьшится.

Если к металлу 2 присоединить положительный, а к металлу 1- отрицательный полюс источника, то направление внешнего электрического поля и электрического поля контактного слоя будут противоположны. Суммарное электрическое поле напряжённостью оказывает меньшее тормозное воздействие на движущиеся электроны, и преимущественное движение электронов из металла 1 в металл 2 станет более активным. Толщина двойного электрического слоя и контактная разность потенциалов уменьшатся, что равносильно уменьшению электрического сопротивления контакта.

Приложенное внешнее напряжение источника тока называют прямым, если оно уменьшает сопротивление контакта, и обратным, если оно увеличивает его сопротивление.

Однако при контакте двух металлов изменение концентрации электронов при прямом и обратном напряжении не очень заметно. Ведь

концентрация электронов в металлах огромна – порядка 10^{28} . Поэтому явление зависимости сопротивления двойного электрического слоя от приложенного напряжения особенно ярко проявляется при контакте двух полупроводников с различным типом проводимости.

Если внешнее электрическое поле направить навстречу внутреннему, то под действием сил этого поля основные носители зарядов устремляются к **p – n – переходу**, внедряются в него, насыщают его (рис 11). В результате этого сопротивления **p – n – перехода** уменьшается. В цепи установится значительный ток, созданный основными носителями тока.

Если к **p – n – переходу** приложить внешнее напряжение так, чтобы напряжённость тока, была направлена в ту же сторону, что и напряжённость двойного слоя, то часть основных носителей тока под действием сил этого поля уйдёт из приконтактной области к соответствующим полюсам и нейтрализует там (рис 12)

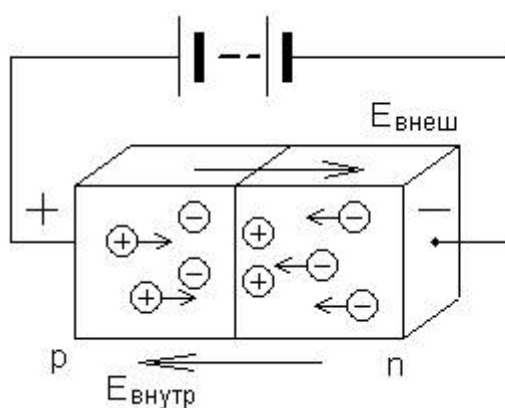


рис. 11

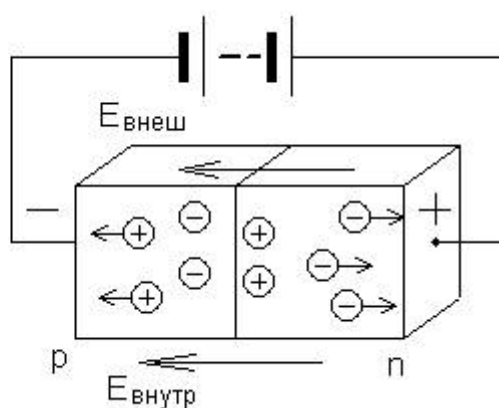


рис. 12

Следовательно, приконтактная область ещё больше обеднится основными носителями тока, а это означает сопротивления p-n-перехода значительно возрастёт. Ток во всей цепи будет очень малым, так как он

определяется лишь движением не основных носителей тока, которых немного по сравнению с основным.

Зависимость тока в цепи, содержащей **p-n-переход**, от напряжения источника тока изображена на рисунке 13.

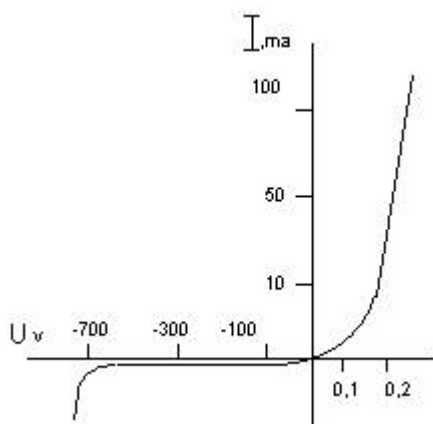


рис.13

При прямом напряжении сила, начиная с некоторого значения, почти линейно зависит от напряжения. Следовательно, сопротивления **p-n-перехода** сначала постепенно уменьшается, а затем остаётся почти постоянным. При обратном напряжении на некотором участке ток почти не зависит от приложенного напряжения. Это говорит о том, что сопротивление **p-n-перехода** возрастает пропорционально приложенному напряжению. Обратный ток, созданный не основными носителями, незначителен: он будет тем меньше, чем меньше не основных носителей в полупроводнике [7].

При больших обратных напряжениях, порядка нескольких сотен вольт, сила тока резко возрастает, наблюдается пробой **p-n-перехода**. Толщина запирающего слоя очень мала (10^{-5} см), а напряжённость поля в нём достигает тысяч вольт на метр. Столь сильное поле может освобождать связанные электроны, вырывая их из кристаллической решётки, что вызывает резкое увеличение числа не основных носителей тока. Запирающий слой разрушается, и обратный ток резко возрастает.

2.11 p-n-p-переход. Транзисторы.

Полупроводниковые приборы используют для усиления и генерации переменных токов и напряжений. Таки приборы получили названия кристаллических триодов или транзисторов. Чаще всего для устройства полупроводниковых триодов применяют германий и кремний. Это связано с тем, что длина свободного пробега электронов в них больше, чем в других полупроводниках. Кроме этого, кристаллы германия и кремния обладают большой механической прочностью, химической устойчивостью. Важным свойством этих полупроводников является относительно медленная рекомбинация дырок и электронов, поэтому запряжённые частицы противоположных знаков проникают сквозь тонкие слои этих кристаллов без воссоединения друг с другом.

Наиболее распространённым типом транзистора является плоскостной триод. Для изготовления плоскостного триода в монокристалл германия или кремния вводят соответствующие примеси таким образом, что создают прослойку дырочного полупроводника между двумя слоями электронного. В зависимости от этого различают триоды на основе p-полупроводников (тип $p-n-p$) (рис 14).

При соединении полупроводников с разным типом проводимости на границе раздела образуется область, обедненная носителями

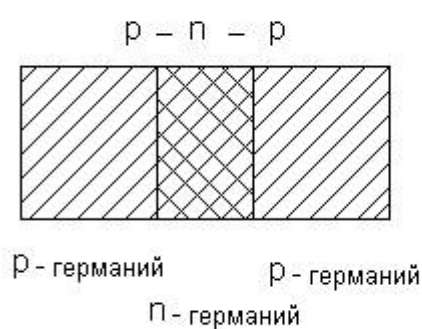


рис. 14

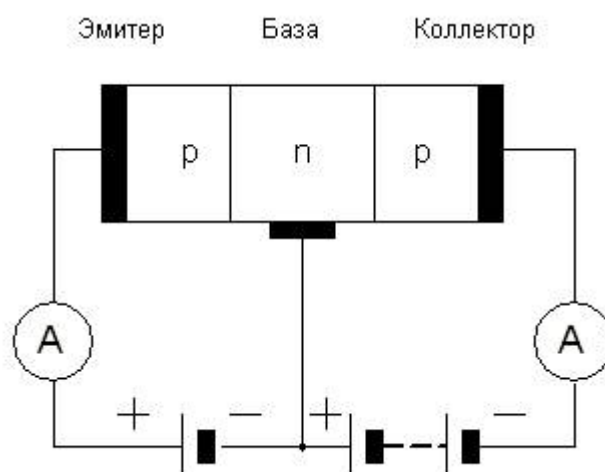


рис.15

тока (запирающий слой). Наличие трёх полупроводников в плоскостном триоде приводит к образованию двух запирающих слоёв по обе стороны среднего полупроводника. Таки образом, полупроводниковый триод в отличие от диодов содержит два электронно-дырочных перехода. Он как бы представляет собой два диода, соединённых последовательно, навстречу друг другу.

Но нельзя представить себе транзистор как простую совокупность двух обычных полупроводниковых диодов. Дело в том, что у транзистора ток, текущий через второй переход, в то время как у двух отдельных диодов ток в каждом из них зависит только от величины и полярности приложенного к нему напряжения и совсем не зависит от состояния другого диода.

Для того чтобы полупроводник триод начал усиливать, его надо соединить с двумя внешними источниками тока так, чтобы один электронно-дырочный переход был включён в прямом направлении, а второй - в обратном (рис 15) [8].

Переход, включаемый в пропускном направлении, называют эмиттерным, а переход, включаемый в запирающем направлении — коллекторным.

Электроды называют соответственно эмиттером и коллектором. Электрод, соединённый со средним проводником, называют основанием или базой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования свойств твёрдого тела объединились в большую область - физику твёрдого тела, развитие которой стимулируется как фундаментальной наукой, так и потребностями техники. Около половины физиков мира работают в области физики твёрдого тела, почти половина всех научных физических публикаций относится к исследованию твёрдого

тела. Физика твёрдого тела - источник новых материалов; новые физические идеи, рождающиеся в физике твёрдого тела, проникают в ядерную физику, астрофизику, биофизику и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Займан Дж. - Электроны и фононы. М, ИЛ, 2002. — 88 с.
2. Блейкмор Дж. Физика твердого тела / Пер. с англ.- Мир, 1988. - 422 с.
3. Воронин, С. В. Физические свойства металлов. Конспект лекций. Ч. 1, 2012. — 114с.

4. Колпаков В. А. Основы физики твердого тела. Издательство СГАУ 2013. — 102с.
5. Бутиков Е.И., Кондратьев А.С. Физика для углубленного изучения. Строение и свойства вещества. Том 3. М.: Физматлит, 2004. — 305с.
6. Шишкин Г.Г. Приборы квантовой электроники.: Учеб. пос. для вузов. – М.: Сайнс-Пресс, 2004 г. – 120 с.
7. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учебник для вузов. – 4-е изд., стер. – С.-П.: Лань, 2009. – 378 с.
8. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: «Высш. школа», 1977. – 133 с.