

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. П. КОРОЛЕВА**

ИЗУЧЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 2—6, 2—8, 2—20

КУЙБЫШЕВ 1980

Лабораторные работы содержат: краткое введение, знакомящее студентов с образованием энергетических зон в материалах и объяснением контактных явлений различного рода на основе зонной теории; порядок выполнения практической части работы, включая обработку полученных результатов; контрольные вопросы и перечень рекомендуемой литературы. Использована следующая нумерация работ: первая цифра — 2 — шифр лаборатории электричества и магнетизма, принятый на кафедре, второе число — порядковый номер работы в соответствии с которым пронумерованы все применяемые приборы и принадлежности в лаборатории.

Лабораторные работы выполняются студентами всех факультетов дневного и вечернего отделений.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ Э. Д. С. ТЕРМОПАРЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: определение зависимости термоэ.д.с. от температуры и расчет постоянной термопары S для заданной пары металлов.

Приборы и инструменты: электропечь, в которой установлены термопара и термометр, микроамперметр.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Распределение Ферми-Дирака. Функция распределения Ферми-Дирака определяет вероятность нахождения электронов на уровне с энергией E . Эта функция описывается формулой

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}, \quad (1)$$

где E_F — уровень Ферми.

Из формулы (1) видно, что уровень Ферми — это такой энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна $1/2$. Численное значение уровня Ферми — несколько эВ, например, для серебра $E_F = 5,5$ эВ, для меди — $7,1$ эВ, для натрия — $3,2$ эВ.

Графики распределения Ферми-Дирака при различных температурах показаны на рис. 1.

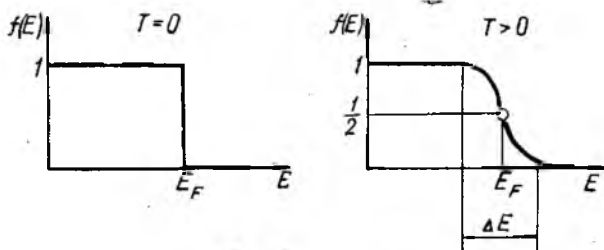


Рис. 1

Контактная разность потенциалов. Рассмотрим изменение потенциальной энергии электрона на границе раздела металла и вакуума (рис. 2). Здесь же нанесена зона проводимости

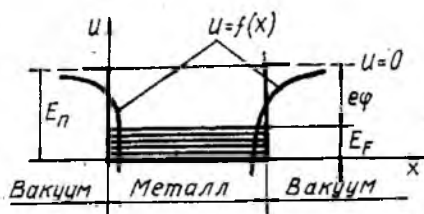


Рис. 2

E_n с уровнем Ферми. В соответствии с распределением Ферми-Дирака электроны заполняют уровни от дна зоны проводимости до уровня Ферми. Электроны в металле находятся в потенциальной яме; для того, чтобы удалить электрон из металла в бесконечность, необходимо сообщить ему энергию не менее чем $e\phi$. Эта энергия называется *работой выхода*.

Поскольку потенциальная энергия электрона вне металла уже на расстоянии порядка 10^{-6} м практически равна нулю, то потенциальную яму обычно изображают прямоугольной.

Пусть два металла с различными работами выхода приведены в соприкосновение. Примем для определенности, что $e\phi_1 < e\phi_2$. Тогда в первый момент после соприкосновения потенциальная яма будет иметь вид, представленный на рис. 3, а.

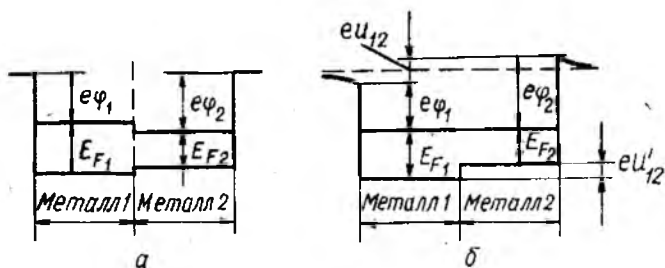


Рис. 3

В дальнейшем электроны начнут переходить из металла 1 в металл 2, поскольку в металле 2 имеются незанятые энергетические уровни выше уровня E_{F_2} , но ниже уровня E_{F_1} .

Этот процесс, напоминающий выравнивание уровней жид-

кости в сообщающихся сосудах, будет продолжаться до тех пор, пока не установится общий для системы уровень Ферми (рис. 3, б). Таким образом, в состоянии равновесия системы металл 1 будет иметь положительный заряд, металл 2 — отрицательный заряд. Следовательно, между точками, лежащими вне металлов в непосредственной близости к их поверхности, установится разность потенциалов U_{12} , которая называется *внешней контактной разностью потенциалов*. Значение U_{12} определяется из следующего соотношения:

$$U_{12} = \frac{e\varphi_2 - e\varphi_1}{e} = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Между внутренними точками металлов также имеется разность потенциалов, которая называется *внутренней контактной разностью потенциалов*. Ее значение определяется из следующего соотношения:

$$U'_{12} = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e}.$$

Для цепи из нескольких, например, трех разнородных металлов, разность потенциалов между первым и последним звеном определяется разностью работ выхода металлов, из которых состоят эти звенья. В частности, если цепь замкнута, то сумма скачков потенциалов на границах раздела отдельных звеньев будет равна нулю.

В заключение следует отметить, что контактная разность потенциалов возникает также при соединении металла с полупроводником или двух полупроводников. Контактная разность потенциалов имеет значение несколько вольт.

Явление Зеебека. Если спаи двух разнородных металлов, образующих замкнутую цепь, поддерживать при различных температурах, то в цепи потечет ток. Изменение знака разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

Термоэлектродвижущая сила E_T складывается из суммы скачков потенциалов в контактах E_k и суммы изменений потенциала, вызванных диффузией носителей тока E_d . E_k обусловлена тем, что уровень Ферми, хотя и незначительно, но зависит от температуры. Поэтому скачок потенциала при переходе из одного металла в другой для спаев, находящихся при разных температурах, неодинаков, и сумма скачков потенциала для всей цепи отлична от нуля. E_d возникает за счет разности потенциалов на концах неравномерно нагретого про-

водника. В этом случае вдоль проводника образуется градиент концентрации электронов, так как электроны у нагретого конца имеют большую скорость и быстрее диффундируют к холодному концу, чем от холодного конца к горячему. Холодный конец заряжается отрицательно, возникает поле, напряженность которого противоположна градиенту температур.

Если разность температур спаев невелика, то значения E_K , E_A , а следовательно, E_T оказываются пропорциональными этой разности температур:

$$E_T = \alpha_{AB} (T_1 - T_2). \quad (2)$$

Величину α_{AB} называют удельной термоэ.д.с. пары металлов или полупроводников. Для большинства пар металлов $\alpha_{AB} = 10^{-5} \div 10^{-4}$ В/град, для полупроводников она гораздо больше и может достигать значения 10^{-3} В/град. На практике удельная термоэ.д.с. часто называется «постоянная термопары» и обозначается буквой S .

Явление Зеебека используется в устройствах, применяемых для измерения температур (термопары). Термопара представляет собой замкнутую цепь, которая составлена из двух проводников, имеющих различные коэффициенты термоэ.д.с. Один спай термопары поддерживают при известной постоянной температуре, другой помещают в среду, температуру которой необходимо определить. Измеряя термоток и зная сопротивление измерительной цепи, можно определить термоэ.д.с., а следовательно, и разность температур по формуле (2).

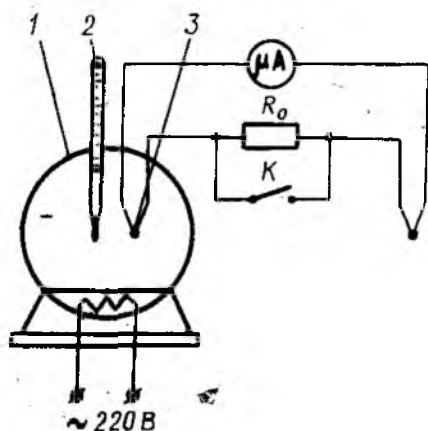


Рис. 4

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки дана на рис. 4. В электрической печи 1 установлена термопара 3. Один участок термопары между спаями изготовлен из материала «хромель», другой участок — из материала «копель». Эта пара материалов является одной из стандартизованных пар, на которые имеются специальные градуировочные таблицы.

Температура в печи определяется с помощью термометра 2. Измерение термотока в цепи термопары осуществляется с помощью микроамперметра μA , в котором роль указательной стрелки выполняет луч света.

Все элементы схемы смонтированы на панели. В цепи термопары установлено сопротивление R_0 , которое может шунтироваться тумблером К. Установка (спираль электропечи и подсветка микроамперметра) питается от сети переменного тока 220 В. В данной установке горячий спай термопары находится в печи, а холодный спай — в специальной коробочке на панели. Температура холодного спая равна температуре воздуха в лаборатории.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ Э. Д. С. ТЕРМОПАРЫ

Если в цепь термопары включен только микроамперметр, который показывает значение тока I_1 , то по закону Ома для полной цепи ток I_1 определяется по формуле

$$I_1 = \frac{E}{r}, \quad (3)$$

где E — э.д.с. термопары, r — полное сопротивление цепи термопары, состоящее из сопротивлений измерительного прибора и подводящих проводов. Если же в эту цепь включено известное добавочное сопротивление R_0 , то микроамперметр будет показывать ток I_2 . По закону Ома

$$I_2 = \frac{E}{R_0 + r}. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4), получим для э.д.с. выражение

$$E = \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} R_0. \quad (5)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать температуру холодного спая t_2 .
2. Включить установку в сеть. Включить электропечь тумблером на передней панели печи. При этом загорается красная сигнальная лампочка.
3. Наблюдать за повышением температуры печи t_1 по показаниям ртутного термометра, измерять через каждые 10—

15°C ток I_1 без добавочного сопротивления R_0 и ток I_2 с включенным добавочным сопротивлением.

4. При достижении в печи температуры $\sim 120^\circ \text{C}$ следует выключить печь и продолжить измерения I_1 , I_2 и t_1 в процессе охлаждения печи.

Результаты измерений записать в таблицу.

t_1 °C	I_1 мкА	I_2 мкА	E мкВ	t_2 °C

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы рассчитать значения E (в мкВ), пользуясь формулой (5). Результаты расчетов записать в вышеприведенную таблицу.

2. Построить график $E = f(t_1 - t_2)$. Наличие двух серий экспериментальных точек позволяет выявить и учесть гистерезис, т. е. отличие температуры в печи от температуры горячего спая термопары. Поскольку это отличие имеет разные знаки для нагревания и охлаждения печи, график $E = f(t_1 - t_2)$ следует построить по двум сериям точек как усредненную прямую, проходящую через точку (0, 0).

3. Найти постоянную термопары C по формуле

$$C = \frac{E}{t_1 - t_2}.$$

Для определения C разность температур $t_1 - t_2$ и соответствующее значение E следует брать из графика. Численное значение C обычно выражается в мкВ/град.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как объясняет электронная теория возникновение термоэ.д.с.?
2. Опишите метод определения э.д.с. в данном задании.
3. Каков физический смысл постоянной термопары? В каких единицах она измеряется?
4. Дайте определение величины: работа выхода электрона из металла

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1979, гл. IX, § 60—65.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы: определение вольтамперной характеристики диода; расчет коэффициента выпрямления и сопротивления диода в прямом и обратном направлениях; наблюдение осциллограмм одно- и двухполупериодного выпрямления.

Приборы и инструменты: блок двух диодов Д242, вольтметры, миллиамперметр, микроамперметр, реостат, осциллограф, делитель напряжения с нагрузочным сопротивлением, двухполюсный перекидной ключ.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Согласно квантовой теории энергия электронов в атомах может принимать лишь дискретный ряд значений. Какое-либо значение энергии из этого ряда называется энергетическим уровнем. Энергия электрона в атоме определяется состоянием, в котором электрон находится, и задается квантовыми числами. Например, энергия электрона в атоме водорода определяется формулой

$$E_n = -\frac{A}{n^2},$$

где $A = 13,6$ эВ, а n — (главное квантовое число) принимает значения 1, 2, 3...

Схема энергетических уровней водорода имеет вид, представленный на рис. 5. Эта схема строится следующим образом: шкала энергии располагается вертикально; отметки на шкале, соответствующие определенным энергетическим уровням, делаются в виде горизонтальных штрихов, около кото-

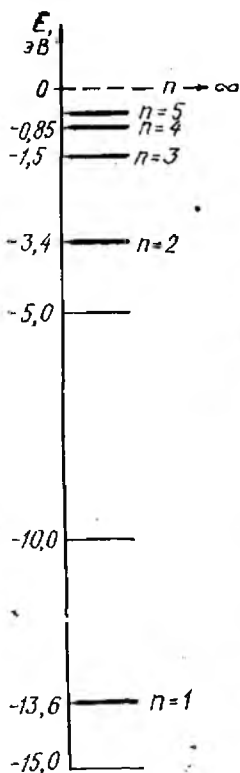


Рис. 5

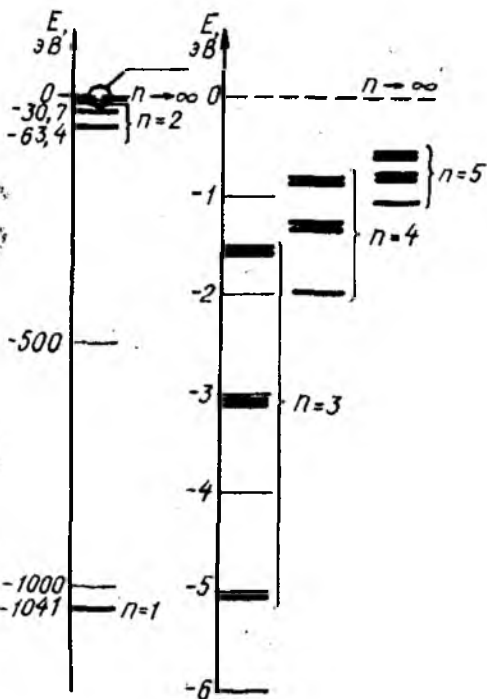


Рис. 6

рых обычно проставляются характеристики уровней, например, главное квантовое число или непосредственно значение энергии уровня.

В общем случае атом, находящийся в состоянии с некоторым значением главного квантового числа n , имеет несколько энергетических уровней, причем эти уровни могут не совпадать друг с другом. Для атома водорода такое расщепление уровней очень мало. Однако для следующих за водородом атомов это расщепление может быть весьма значительным: расстояние между некоторыми уровнями с данным n (по шкале энергии) становится сравнимым с расстоянием между

уровнями с различными n . Поэтому, схема энергетических уровней таких атомов значительно сложнее, чем для водорода. Для примера на рис. 6 приведена схема энергетических уровней натрия. Уровни с $n = 3$, $n = 4$ и т. д. смещены, поскольку они накладываются друг на друга.

Некоторые уровни все же могут совпадать друг с другом. Такие уровни называются вырожденными, а число совпадающих уровней — кратностью вырождения.

Распределение электронов по энергетическим уровням определяется принципом Паули, согласно которому на одном невырожденном уровне может находиться не более двух электронов, причем спины этих электронов антипараллельны (спин электрона — собственный момент импульса электрона). На вырожденном уровне с кратностью вырождения k может находиться не более $2k$ электронов.

Из принципа Паули следует, что электроны не могут все скопиться на нижнем уровне, а попарно занимают энергетические уровни, начиная с наименьшего.

Описанные схемы энергетических уровней изолированных атомов наблюдаются при отсутствии внешних воздействий в виде сил электрического и магнитного полей. Если же атомы объединяются в кристаллическую решетку, то одинаковые энергетические уровни этих атомов должны смещаться относительно друг друга, иначе на одном уровне новой системы — кристалла — будет находиться более двух электронов, что противоречит принципу Паули. Образование такой группы смещенных уровней называется расщеплением исходного энергетического уровня, а сама группа уровней — энергетической зоной или просто зоной.

Степень расщепления или ширина энергетических зон зависит от многих факторов и, прежде всего, от расположения исходных уровней на шкале энергии. В первую очередь наблюдается расщепление верхних уровней атомов, занятых валентными электронами, поскольку в кристаллической решетке валентные электроны соседних атомов взаимодействуют в значительно большей степени, чем электроны внутренних заполненных оболочек.

Ширина энергетических зон практически не зависит от массы кристалла и имеет значение несколько электронвольт (эВ). Число уровней в зоне определяется числом атомов в кристалле, а именно: каждая зона состоит из kN компонент, где k — кратность вырождения, а N — число атомов. Следовательно, даже для маленького кристалла, имеющего массу,

например 1 мг, число уровней в каждой зоне будет $\sim 10^{19}$, а интервалы между уровнями окажутся порядка 10^{-19} эВ, что невозможно обнаружить экспериментально. Такую группу уровней называют *разрешенной зоной*. В пределах разрешенной зоны дозволённые значения энергии электронов изменяются практически непрерывно от нижнего до верхнего края зоны. Энергетический промежуток между зонами E_g носит название *запрещенной зоны*. Следует еще раз отметить, что при увеличении числа атомов в системе ширина разрешенных и запрещенных зон не изменяется и в пределах запрещенной зоны не появляется каких-либо энергетических уровней.

Каждому твердому телу соответствует определенная совокупность энергетических зон. Число зон, их ширина и взаимное расположение определяются исходной схемой энергетических уровней атомов, образующих данное твердое тело, и расстоянием между атомами в равновесном состоянии кристаллической решетки. Самая верхняя зона, в которой имеются электроны, называется *валентной зоной*.

В твердых телах ток определяется движением электронов под действием электрического поля. Если электроны *частично* заполняют валентную зону, то такое тело является хорошим проводником, поскольку под действием электрического поля электроны могут перейти на более высокие энергетические уровни *этой же зоны*, т. е. приобрести дополнительную направленную скорость, обуславливающую появление тока. Такая частично заполненная зона называется *зоной проводимости*. Если же электроны *полностью* заполняют валентную зону, то они не могут участвовать в образовании тока. Правда, в более высоких разрешенных зонах есть свободные энергетические уровни, однако от заполненной зоны их отделяет запрещенная зона, энергетическая ширина которой имеет значение несколько электронвольт. Даже в сильном электрическом поле энергия, приобретаемая электроном, недостаточна для преодоления запрещенной зоны. Действительно, длина свободного пробега электрона λ в твердом теле имеет порядок 10^{-8} м. Пусть напряженность поля достаточно велика и равна, например 10^4 В/м. Тогда энергия электрона, вычисленная по формуле $W = eU = eE\lambda$, имеет порядок 10^{-4} эВ, что значительно меньше обычной ширины запрещенной зоны.

Схема, показывающая относительное расположение валентной зоны и ближайшей незаполненной зоны, приведена на рис. 7. Точками обозначены электроны на энергетических уровнях зон. Согласно сказанному выше тело является изоля-

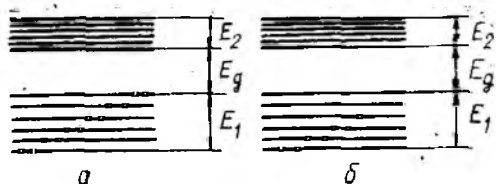


Рис. 7

тором, если имеет полностью заполненную валентную зону (рис. 7, а). Если же валентная зона заполнена электронами частично, то такое тело будет проводником (рис. 7, б).

Распределение электронов по энергетическим уровням (распределение Ферми-Дирака)

Функция распределения Ферми-Дирака определяет вероятность нахождения электронов на уровне с энергией E . Эта функция описывается формулой

$$f(E) = \frac{1}{\frac{E - E_F}{e^{kT}} + 1}, \quad (6)$$

где E_F — уровень Ферми.

Из формулы (6) видно, что уровень Ферми — это такой энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна $1/2$. Численное значение уровня Ферми — несколько эВ: например, для серебра $E_F = 5,5$ эВ, для меди — $7,1$ эВ, для натрия — $3,2$ эВ.

Проводимость полупроводников

Различают собственную и примесную проводимость полупроводников.

Собственная проводимость. Это проводимость химически чистых полупроводников.

На рис. 8 показана схема энергетических зон полупроводника совместно с распределением Ферми-Дирака при комнатной температуре, причем оба графика имеют общую ось энергии E . Из графика видно, что вероятность нахождения электронов в свободной зоне отлична от нуля. За счет теплового движения часть электронов с верхних уровней заполненной зоны 1 перебрасывается на нижние уровни свободной зо-

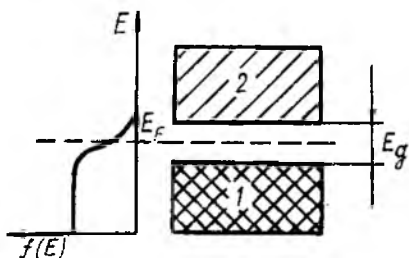


Рис. 8

Действительно, поле перемещает электроны в одном направлении, а квантовые состояния, не занятые электронами (т. е. дырки), перемещаются в другом направлении.

Итак, собственная проводимость полупроводников обусловлена наличием электронов в зоне проводимости (зона 2 на рис. 8) и наличием такого же числа дырок в валентной зоне (зона 1 на рис. 8).

Примесная проводимость. Электрическими свойствами полупроводников можно управлять путем введения в кристалл химических добавок — примесей. Так, если в кристалл германия ввести атомы мышьяка, имеющего пять валентных электронов, то четыре электрона каждого из них образуют ковалентные связи с атомами германия, а пятый остается избыточным (свободным) электроном. Энергетический уровень избыточного электрона находится в запрещенной зоне германия очень близко к нижней границе зоны проводимости (рис. 9), поэтому уже при комнатных температурах избыточные электроны мышьяка переходят в зону проводимости германия и становятся свободными.

Такие примеси называются **донорами**, а полупроводники, в которых имеются донорные атомы, называются полупровод-

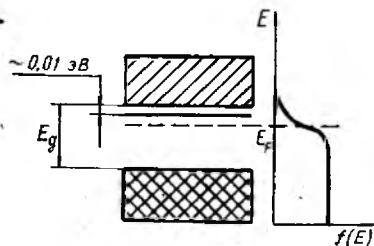


Рис. 9

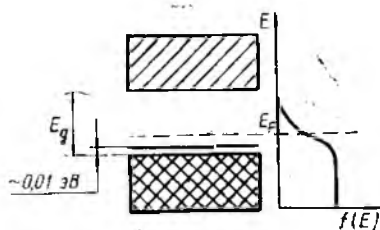


Рис. 10

ны 2 через запрещенную зону. Следовательно, в ранее заполненной зоне 1 появляются свободные от электронов энергетические уровни, которые называются **дырками**. Если к полупроводнику приложить электрическое поле, то дырки ведут себя как **положительные заряды**.

никами с электронной проводимостью или полупроводниками n — типа. Электроны в полупроводниках n — типа являются основными носителями тока, а дырки, которых мало, — неосновными носителями.

Уровень Ферми при комнатных температурах находится несколько ниже донорного уровня.

Введение в кристалл германия атомов трехвалентного элемента, например, индия, приводит к образованию избытка дырок. Свободный уровень индия (рис. 10) расположен несколько выше верхней границы валентной зоны германия, поэтому электроны из валентной зоны легко переходят на свободный уровень, а в валентной зоне образуются дырки. Такие примеси называются *акцепторами*, а полупроводники, в которых имеются акцепторные атомы, называются полупроводниками с дырочной проводимостью или полупроводниками p — типа. Дырки в полупроводниках p — типа являются основными носителями тока, а небольшое число электронов — неосновными носителями.

Уровень Ферми при комнатных температурах находится несколько выше акцепторного уровня.

$p - n$ — переход

$p - n$ — переходом называется граница соединения полупроводника p — типа с полупроводником n — типа. Явления, происходящие в $p - n$ — переходе, лежат в основе работы полупроводниковых диодов и транзисторов.

При соединении между собой полупроводников p — типа и n — типа наблюдаются следующие явления:

1. Электроны из полупроводника n — типа начинают переходить в полупроводник p — типа.

2. Благодаря этому переходу полупроводник p — типа заряжается отрицательно, а полупроводник n — типа заряжается положительно. Между полупроводниками возникает потенциальный барьер. Равновесие наступит тогда, когда установится одинаковый уровень Ферми для системы в целом, т. е. когда вероятность заполнения энергетических уровней будет одинакова для любой области рассматриваемой системы.

3. Дырки движутся в направлении, противоположном направлению движения электронов, и оказывают такое же влияние на процесс установления равновесия, что и электроны. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только электронную составляющую тока. Схема расположения энергетиче-

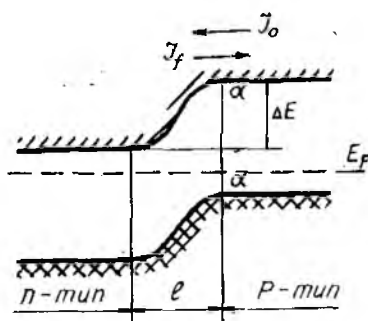


Рис. 11

ских зон $p-n$ — перехода приведена на рис. 11. Здесь изображены наиболее существенные элементы энергетической диаграммы: положение и форма нижней границы зоны проводимости (косая штриховка) и верхней границы валентной зоны (штриховка крестиками); E_F — одинаковый для всех областей системы уровень Ферми; l — ширина $p-n$ — перехода, имеющая обычно

порядок 10^{-6} м; ΔE — потенциальный барьер между полупроводниками.

Наиболее важным свойством $p-n$ — перехода является несимметричная зависимость тока I от напряжения U , которая называется вольтамперной характеристикой. Рассмотрим следующие участки вольтамперной характеристики:

1. Пусть $U = 0$. Выберем некоторое сечение, например, а—а. Электронный ток, проходящий через сечение, состоит из следующих составляющих:

а) I_0 — ток, обусловленный *небольшой* концентрацией электронов в зоне проводимости полупроводника p — типа. Потенциальный барьер ΔE не влияет на этот ток;

б) I_f — ток, обусловленный *большой* концентрацией электронов в зоне проводимости полупроводника n — типа. Однако потенциальный барьер ΔE препятствует переходу электронов, следовательно, I_f в конечном итоге мал. При $U = 0$, $I_0 = I_f$ и результирующий ток равен нулю.

2. Пусть $U < 0$, т. е. на p — сторону подается *отрицательный* потенциал. Такой способ подачи напряжения называется *отрицательным смещением*. Рассмотрим баланс токов:

а) ток I_0 не изменяется, так как концентрация электронов в полупроводнике p — типа остается практически постоянной, а потенциальный барьер не влияет на этот ток;

б) ток I_f резко уменьшается, так как возрастает высота потенциального барьера ΔE ;

в) результирующий ток $I = I_0 - I_f$, называемый обратным, будет мал. Он определяется практически только током I_0 , т. е. почти не зависит от U .

3. Пусть $U > 0$, т. е. на p — сторону подается *положитель-*

ный потенциал. Такой способ подачи напряжения называется *положительным смещением*.

Рассмотрим баланс токов:

а) ток I_0 по-прежнему мал и почти не зависит от напряжения;

б) ток I_f резко возрастает, так как уменьшается высота потенциального барьера;

в) результирующий ток $I = I_f - I_0$, называемый прямым, будет велик и, как показывают расчеты, возрастает с увеличением U примерно по экспоненциальному закону.

Итак, вольтамперная характеристика $p-n$ -перехода имеет вид, представленный на рис. 12.

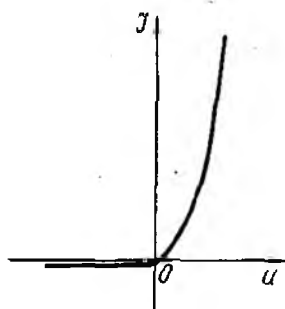


Рис. 12

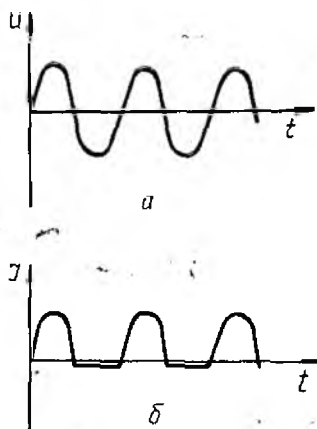


Рис. 13

Отсюда, в частности, следует, что $p-n$ -переход пригоден для выпрямления переменного тока. Если напряжение, подаваемое на $p-n$ -переход, изменяется по закону, отраженному на рис. 13, а, то ток через $p-n$ -переход будет изменяться по закону, отраженному на рис. 13, б.

Упражнение 1. *Определение вольтамперной характеристики $p-n$ -перехода.*

Диапазон изменения электрических параметров для прямой ветви вольтамперной характеристики (положительное смещение на диоде) составляет: по напряжению — десятые доли вольта, по току — сотни миллиампер и выше. Внутрен-

нее сопротивление порядка нескольких ом. Для обратной ветви характеристики (отрицательное смещение на диоде) ток на несколько порядков меньше и меняется слабо при изменении напряжения в широких пределах. Внутреннее сопротивление диода — десятки и сотни килоом. Поэтому для определения полной вольтамперной характеристики используются две схемы:

а) на рис. 14 представлена схема установки, предназначенной для нахождения прямой ветви характеристики: V_1 — вольтметр 0—1 В; $m A$ — миллиамперметр 0—500 мА;

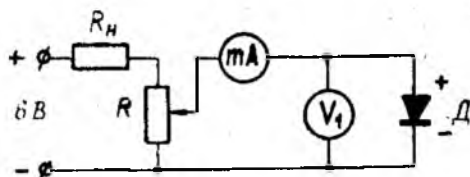


Рис. 14

б) на рис. 15 представлена схема установки, предназначенной для нахождения обратной ветви характеристики: V_2 — вольтметр 0—6 В; μA — микроамперметр.

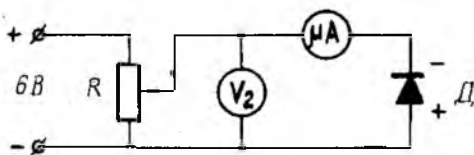


Рис. 15

Порядок выполнения упражнения.

1. Собрать схему (рис. 14). В качестве ограничивающего сопротивления R_n следует использовать нагрузочное сопротивление, установленное на панели делителя напряжения.

2. После проверки схемы установить подвижный контакт потенциометра в положение, соответствующее наименьшему напряжению, и включить источник питания.

3. Увеличивая с помощью потенциометра напряжение на диоде, определить ряд значений прямого тока $I_{пр}$, протекающего через диод, и соответствующие значения прямого напряжения $U_{пр}$. Данные опыта записать в таблицу.

4. Выключить питание и разобрать схему,

5. Собрать схему согласно рис. 15.
6. Следуя пунктам 2, 3 и 4, определить зависимость обратного тока $I_{обр}$ от напряжения $U_{обр}$.
7. Результаты измерений занести в таблицу.

№ изме- рения	$U_{пр}$ В	$I_{пр}$ мА	$U_{обр}$ В	$I_{обр}$ мкА

8. Построить вольтамперную характеристику диода $I = f(U)$ и оценить разброс опытных данных. Прямые напряжения и токи откладывают на положительных полуосях, а обратные — на отрицательных полуосях. Для каждой ветви вольтамперной характеристики выбирается свой удобный масштаб по осям I и U .

9. По формуле $\alpha = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$ вычислить коэффициент выпрямления. Входящие в это выражение значения $I_{пр}$ и $I_{обр}$ берутся при одинаковых по модулю значениях прямого и обратного напряжений, равных, например, максимальному значению прямого напряжения.

10. По формуле $R = \frac{U}{I}$ определить сопротивление диода постоянному току в конечных точках прямой и обратной ветвей вольтамперной характеристики.

У п р а ж н е н и е 2. Исследование выпрямительных схем с помощью осциллографа

На рис. 16 представлена схема установки, позволяющая осуществлять одно- или двуполупериодное выпрямление переменного тока, где R_1 и R_2 — делитель напряжения, R_n — нагрузочное сопротивление, D_1 и D_2 — диоды, ЭО — электронный осциллограф.

Если поставить ключ K в положение 2, то один диод будет замкнут накоротко, а второй — отключен. Выпрямление в этом случае будет отсутствовать, на осциллографе будет наблюдаться синусоида.

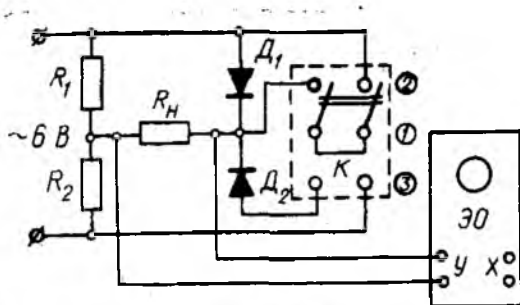


Рис. 16

Когда ключ К находится в положении 1 (нейтральное положение ключа), то будут включены один диод и нагрузочное сопротивление. На осциллографе должна наблюдаться синусоида со срезанными отрицательными полупериодами. Необходимой ориентации изображения можно добиться переключением концов на входе осциллографа.

Если поставить ключ К в положение 3, то работают два диода, т. е. получается схема двухполупериодного выпрямления.

Порядок выполнения упражнения

1. Собрать схему (рис. 16). Ключ К поставить в положение 2.

2. Подготовить осциллограф к работе. Для этого следует включить генератор развертки ручкой «Диапазон частот», вращением рукоятки «Усиление X» получить на экране непрерывную горизонтальную линию. Ручку «Синхронизация» установить в положение «Сеть».

3. Манипулируя ручками «Диапазон частот», «Частота плавно», «Усиление Y» и «Усиление X», добиться получения на экране синусоиды, т. е. картины, когда выпрямление отсутствует.

4. Перекидывая ключ в положение 1 и 3, наблюдать осциллограммы одно- и двухполупериодного выпрямления.

5. Зарисовать полученные кривые с экрана осциллографа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните с точки зрения зонной теории различия электрических свойств проводников, полупроводников и диэлектриков.

2. Чем отличается примесная проводимость от собственной проводимости полупроводника?
 3. Начертите и объясните энергетическую диаграмму $p-n$ — перехода.
 4. Объясните ход вольтамперной характеристики полупроводникового диода.
 5. Начертите схему двуполупериодного выпрямителя и объясните принцип его работы.
 6. Почему при определении прямой ветви вольтамперной характеристики (см. рис. 14) миллиамперметр включен до вольтметра (по направлению тока), а при определении обратной ветви микроамперметр включен после вольтметра (см. рис. 15)?
- Указание: учесть внутреннее сопротивление приборов.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1979, гл. VII, § 53; гл. VIII, § 57, 58, 59.

Лабораторная работа № 2—20

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента Пельтье.

Приборы и инструменты: установка для изучения эффекта Пельтье, амперметры, гальванометр, источники постоянного тока, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Явление Пельтье. При протекании тока через цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников, в одном спае происходит выделение, а в другом — поглощение тепла. Этот эффект объясняется следующим образом. Электроны, находящиеся по разные стороны от спая, имеют различную энергию. Если ток в цепи направлен так, что электроны с большей энергией переходят через спай в область с меньшей энергией, то область цепи в непосредственной близости от спая нагревается за счет энергии, приносимой элек-

тронами. Напротив, другой спай будет охлаждаться, поскольку электроны, переходящие в область с большей энергией, сами должны иметь большую энергию. Эта энергия черпается у кристаллической решетки, в результате чего температура участка цепи в непосредственной близости от спаев уменьшается. Таким образом, явление Пельтье оказывается обратным явлению Зеебека.

Опытным путем установлено, что количество тепла, выделившегося в спае, определяется выражением

$$Q_{1-2} = \Pi_{1-2} q = \Pi_{1-2} It,$$

где q — заряд, прошедший через спай; Π_{1-2} — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Пельтье. Коэффициент Пельтье зависит от природы контактирующих веществ и температуры. Для большинства различных пар металлов Π_{1-2} имеет значение $10^{-2} \div 10^{-3}$ В.

В отличие от тепла Джоуля—Ленца тепло Пельтье пропорционально не квадрату, а первой степени силы тока. При перемене направления тока Q_{1-2} изменяет знак, т. е. вместо выделения тепла в одном спае наблюдается поглощение такого же количества тепла, а в другом спае наоборот — вместо поглощения наблюдается выделение тепла. Следовательно,

$$\Pi_{1-2} = -\Pi_{2-1}.$$

Коэффициент Пельтье и удельная термоэд.с. связаны соотношением, вытекающим из законов термодинамики:

$$\Pi_{1-2} = \alpha_{12} T.$$

Эффект Пельтье находит применение в холодильных установках. Несмотря на низкий к.п.д., эти установки обладают тем преимуществом, что не содержат движущихся элементов. При замене металла полупроводниками к.п.д. таких установок значительно повышается.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема установки приведена на рис. 17. Здесь 1 и 2 — проволоки из различных сплавов (хромель и копель). Спаи проволок (точки A и B) помещены в сосуды, заполненные специальным маслом.

Если через спай A и B пропустить ток I в направлении, указанном на схеме стрелкой, то в результате эффекта

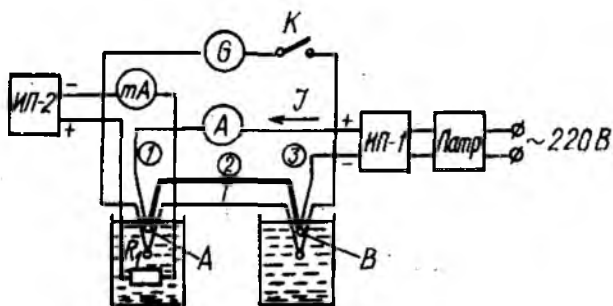


Рис. 17

Пельтье спай *A* будет охлаждаться, а спай *B* — нагреваться. Следовательно, температура масла в левом сосуде будет понижаться, а в правом — повышаться до тех пор, пока не установится определенное равновесие с окружающей средой.

В левый сосуд помещен нагреватель R_1 , с помощью которого можно компенсировать охлаждение масла, вызванное эффектом Пельтье. Регистрация момента компенсации производится с помощью дифференциальной термопары T , соединенной через ключ K с гальванометром.

Пусть до начала эксперимента, когда температуры масла в обоих сосудах одинаковы, световой указатель гальванометра находится на некотором делении шкалы x_0 . Очевидно, что при полной компенсации тепла Пельтье, поглощенного спаем *A*, теплом Джоуля—Ленца, выделенным нагревателем R_1 , температуры масла в сосудах должны быть одинаковыми, хотя и несколько большими, чем температура окружающей среды. Следовательно, световой указатель гальванометра в момент компенсации должен находиться на том же делении шкалы x_0 , что и до опыта.

Для установившегося теплового режима при полной компенсации можно записать следующее уравнение:

$$Q_{дж} - Q_{п} + Q'_{дж} = Q_{дж} + Q_{п}, \quad (7)$$

где $Q_{дж}$ — тепло Джоуля—Ленца, выделяемое в спаях при прохождении тока I ; $Q_{п}$ — тепло Пельтье, поглощаемое спаем *A* и выделяемое спаем *B*; $Q'_{дж}$ — тепло Джоуля—Ленца, выделяемое нагревателем при прохождении по нему тока I_1 .

Из формулы (7) следует, что

$$Q'_{дж} = 2 Q_{п}. \quad (8)$$

Известно, что

$$Q'_{\text{дж}} = I^2 R_1 t, \quad Q_{\text{п}} = \Pi It. \quad (9)$$

Подставив выражения (9) в формулу (8), получим

$$I_1^2 R_1 t = 2 \Pi It,$$

откуда

$$\Pi = \frac{I_1^2 R_1}{2I}. \quad (10)$$

Пусть через спай протекает ток I . Тепло Джоуля—Ленца, выделяемое в спае, равно $I^2 R t$, где R — сопротивление спае. С другой стороны, в спае поглощается тепло Пельтье, равное ΠIt . Максимальное охлаждение спае будет наблюдаться тогда, когда

$$\Delta Q = \Pi It - I^2 R t \quad (11)$$

будет максимально. Решая задачу на определение экстремума функции (11), найдем

$$I = \frac{\Pi}{2R}.$$

В данной работе учитывается это условие, т. е. ток I выбирается таким, чтобы имело место максимальное охлаждение левого спае A .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему установки, согласно рис. 17. Питание цепи, изготовленной из разнородных проволок 1 и 2, производится от источника питания ИП-1. Регулировка тока ИП-1 осуществляется с помощью ЛАТРа.

Питание цепи нагревателя R_1 производится от источника питания ИП-2, выходные клеммы которого вынесены на панель лабораторного стола. Здесь же находится ручка регулировки тока источника ИП-2. При повороте ручки по часовой стрелке ток через нагревательный резистор R_1 возрастает.

Питание схемы освещения шкалы гальванометра производится от сети 220 В через шнур питания, который постоянно подключен к гальванометру через колодку на задней стенке корпуса.

2. Прежде чем подавать питание на схему, необходимо включить гальванометр G с помощью ключа K и записать положение светового указателя на шкале гальванометра.

3. Включить источник питания ИП-1 и установить ток 3—4 А. После того, как световой указатель гальванометра начнет перемещаться в новое положение, что свидетельствует о наличии эффекта Пельтье, следует включить питание нагревателя R_1 (источник ИП-2) и, регулируя ток нагревателя, вернуть световой указатель гальванометра в исходное положение, т. е. положение до начала опыта. Поскольку установка обладает тепловой инерцией, эту операцию следует проводить в несколько этапов: установив начальный ток, примерно 30 мА, выждать 5—7 мин, пока световой указатель переместится в новое положение—ближе к исходному. Затем увеличить ток на несколько миллиампер, снова выждать 5—7 мин и т. д. — до установления светового указателя в исходное положение.

4. Определить окончательные значения токов I и I_1 и записать их в таблицу. Опыт повторить для больших значений тока, проходящего через спай А и В.

№ опыта	I А	I_1 мА	Q_n Дж	П В

5. Для каждого опыта вычислить по формулам (10) и (9) коэффициент Пельтье и теплоту Пельтье, поглощаемую спаем за $t = 5$ мин. Сопротивление нагревателя $R_1 = 68$ Ом.

6. Дать оценку точности полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Пельтье?
2. Запишите формулу, определяющую теплоту Пельтье.
3. Чем определяется значение коэффициента Пельтье и в каких единицах он измеряется?
4. Запишите формулу, определяющую условия максимального охлаждения спая.
5. Объясните метод измерения, применяемый в данной работе.
6. Почему значения токов I и I_1 можно определить лишь при установившемся тепловом режиме?

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1979, гл. IX, § 60—65.

Составители: *Леонид Павлович Муркин,*
Виталий Алексеевич Барвинок

ИЗУЧЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Лабораторные работы № 2—6, 2—8, 2—20

Редактор Т. К. Кр е т и н и н а
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к
Корректор Т. В. П и к у р о в а

Сдано в набор 11.10.80 г. Подписано в печать 21.10.80 г. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага оберточная белая. Литературная гарнитура. Высокая печать.
Усл. п. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 2000 экз. Заказ № 878. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.