

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Тверской государственный технический университет

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Лабораторные занятия
по Ф И З И К Е

Часть 5

**Методические указания
к лабораторным работам по физике
твёрдого тела**

Тверь 2007.

УДК 531 (075.8)
ББК 22.3я7

Предназначены для студентов инженерно-строительного и машиностроительного факультетов, выполняющих лабораторные работы по разделу «Физика твердого тела» курса общей физики.

Основную часть указаний составляет описание методов, экспериментальных установок и порядка проведения лабораторных работ. В конце каждого описания работы приведены рекомендуемая литература и контрольные вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы и ее защиты.

Методика обработки результатов экспериментов, основные физические постоянные, некоторые справочные величины, а также множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования вынесены в приложения.

Методические указания рекомендованы к печати кафедрой физики (протокол № 1 от 31.08.07)

Составители: В.М. Алексеев, В.В. Измайлов.
По редакцией В.М. Алексеева

Лабораторная работа № 7-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ (термистора)

Цель работы: изучение температурной и статической вольтамперной характеристики термистора.

Введение.

Полупроводниковые термосопротивления (ПТС) – объемные полупроводниковые сопротивления с большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, нелинейной вольтамперной характеристикой получили в настоящее время широкое распространение для измерения температуры, мощности, стабилизации напряжения и т.д.

Термисторы воспринимают тепло от тел через теплопроводность, конвекцию и лучеиспускание.

Термисторы изготавливаются из поликристаллических полупроводниковых материалов, обладающих отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, в виде цилиндрических стержней, трубок, прямоугольных столбиков, бусинок или тонких нитей. Для предохранения от механических повреждений их заключают в баллончики из стекла, керамики или металла.

Рабочее тело изготавливается главным образом из смесей, окислов переходных металлов (окись кобальта, двуокись титана, окись алюминия, закись меди и др.). Варьируя состав окиси можно получить системы с изменением температурного коэффициента сопротивления и величины удельного сопротивления в очень широких пределах.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой термистора. Естественно, что она совпадает с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлено данное ПТС.

Проводимость σ , а следовательно и удельное сопротивление ρ веществ, зависит от концентрации свободных носителей заряда n и от их проводимости μ следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = e \cdot n \cdot \mu, \quad (1)$$

В полупроводниках подвижность носителей тока μ слабо зависит от температуры, но число носителей n резко возрастает с увеличением температуры по экспоненциальному закону:

$$n = n_0 e^{-\Delta E / 2kT} \quad (2)$$

где ΔE – энергия активации; k – постоянная Больцмана. В случае собственной проводимости ΔE – ширина запрещенной зоны, в случае примесной проводимости ΔE – энергия активации примеси.

В соответствии с формулами (1) и (2) зависимость сопротивления полупроводника от температуры определяется выражением

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (3)$$

Величину $B = \Delta E / 2K$ называют температурной чувствительностью, величина $A = R_{\infty}$ – условное сопротивление вещества ПТС при бесконечно высокой температуре. Для различных ПТС значения величины B лежат в пределах 700 – 16000 К.

Одной из важнейших характеристик ПТС является температурный коэффициент сопротивления α , который равен относительному изменению сопротивления при изменении температуры на один градус:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) можно получить

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}. \quad (5)$$

Температурный коэффициент сопротивления ПТС, так как с ростом температуры сопротивление полупроводника падает. Вследствие нелинейности зависимости сопротивления ПТС от температуры величина α является функцией температуры.

Постоянную A , входящую в формулу (3) можно найти из опыта по значению R_T для какой-либо температуры T :

$$A = R_{\infty} = R_T e^{-\frac{B}{T}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что величины можно A и B считать постоянными только для данного ПТС в определенном интервале температур.

Статической вольтамперной характеристикой термосопротивления называют зависимость падения напряжения на рабочем теле и величиной протекающего через него тока в условиях теплового равновесия между ПТС и окружающей средой. При снятии таких характеристик после изменения текущего через ПТС тока необходимо выждать время, пока не установится равновесие между мощностью (теплом), выделяемой током в рабочем теле ПТС, и мощностью, рассеиваемой им в окружающую среду.

Вольтамперная характеристика для металлов по закону Ома $U=IR$ является линейной, для полупроводников связь между U и I имеет более сложный характер.

Вольтамперная характеристика ПТС изображена на рис. 1. Линейность характеристики ПТС при малом токе (участок ОА) объясняется тем, что выделяемая в рабочем теле мощность недостаточна для сколь угодно ощутимого изменения температуры; вследствие этого закон Ома выполняется. При дальнейшем увеличении тока выделяемая в рабочем теле мощность растет, и температура ПТС повышается. В результате сопротивление рабочего тела уменьшается в соответствии с формулой (3), и линейная зависимость между падением напряжения и током перестает иметь место. Крутизна вольтамперной характеристики уменьшается (участок АВ). При некотором токе I_m падение напряжения на ПТС достигает пикового значения U_m . При дальнейшем росте тока падение напряжения на ПТС уменьшается (участок ВС).

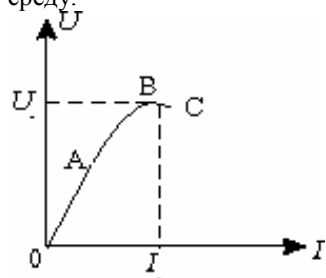


Рис. 1.

УПРАЖНЕНИЕ 1. Изучение температурной зависимости ПТС. Описание установки и методика измерения.

Приборы и принадлежности: термистор – ПТС, омметр, термометр, Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. ПТС 1 находится на нагревателе 2, изготовленном из остеклованного полого проволочного сопротивления, заполненного минеральным маслом 3, температура которого контролируется термометром 4. Нагреватель питается от источника переменного напряжения 24 В. Включение нагревателя осуществляется тумблером 5 (вниз). Концы ПТС присоединены к клеммам 6. Сопротивление термистора измеряется омметром, ко торый присоединяется к клеммам 6 щуповым методом.

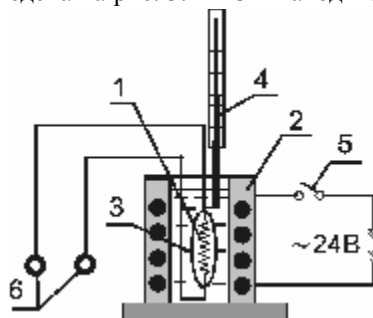


Рис. 3.

Порядок выполнения упражнения.

1. Настроить омметр на измерение сопротивления порядка 1000 Ом.
2. Щупы омметра подключить к клеммам 6 и замерить сопротивление термистора при комнатной температуре. Значения сопротивления и температуры записать в таблицу 1.
3. Включить нагреватель и измерить величину R_T , отмечая соответствующую температуру (показания термометра надо снимать сразу после измерения сопротивления). Измерения проводить через 5° , доведя температуру масла до 80° .
4. Занести показания омметра в таблицу 1.

Таблица 1.

№ п.п.	$t^\circ\text{C}$	T, K	$1/T$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$
1					
2					
и т.д.					

УПРАЖНЕНИЕ 2. Снятие вольтамперной характеристики ПТС.

Описание установки и методики измерения.

Приборы и принадлежности: термистор (ПТС), вольтметр, миллиамперметр, реостат, источник питания. Термистор помещается в стеклянную трубку. Напряжение на термисторе регулируется с помощью потенциометра. Измерительная схема изображена на рис. 3.

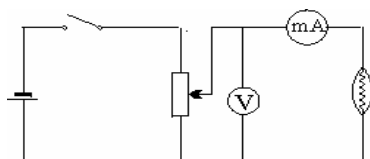


Рис. 3.

Порядок выполнения работы.

1. Составить таблицу записей результатов измерения.
2. Подать на термистор минимальное напряжение. С помощью потенциометра постепенно увеличивать напряжение, записывая показания вольтметра и миллиамперметра. При снятии показаний следует каждый раз дожидаться (в течение нескольких минут) установления стационарного состояния, особенно при больших значениях напряжения. Данные занести в таблицу 2 (см. указания).
3. По полученным данным построить вольтамперную характеристику.

Таблица 2.

$U, В$											
I, mA											

Обработка результатов измерений

1. Проверить правильность формулы (3). Для этой цели построить график зависимости $\ln R_T = \ln A + B/T$. В координатах $\ln R_T$ и $1/T$ должна получиться прямая линия.
2. По наклону прямой вычислить величину постоянной B .
3. Вычислить по данным опыта постоянную A .
4. Найти по формуле (5) температурный коэффициент сопротивления α и построить его зависимость от температуры T по формуле (5).
5. Найти энергию активации ΔE в эВ.

Контрольные вопросы и задания.

1. Почему зависимость сопротивления от температуры для полупроводников и металлов разная?
2. В чем разница температурных коэффициентов сопротивления для металлов и полупроводников?
3. Какой физический смысл имеют постоянные A и B и от чего они зависят?
4. Как определить экспериментально постоянные A и B ?
5. Как объяснить ход вольтамперной характеристики ПТС?
6. Почему при снятии вольтамперной характеристики надо выждать определенное время перед измерением?
7. Как изменится вид вольтамперной характеристики в зависимости от температуры?

Литература.

1. Савельев И. В. Курс физики. Т. 3. –М.: Наука, 1989, §38, 40, 42, 43.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. –М.: Высш. шк., 1990, §102, 103, 236, 238, 240 – 243.

Лабораторная работа № 7-2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД.

Цель работы: измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках, снятие вольтамперной характеристики.

Введение

Приведем в соприкосновение два полупроводника или полупроводник с металлом и предоставим их самим себе. Возникшая в приграничном слое разность потенциалов носит название контактной. В работе измеряется контактная разность потенциалов, и исследуются электрические свойства, которыми обладает приграничный слой.

Приведем полупроводники n- и р-типа в соприкосновение друг с другом. В момент установления контакта происходит встречная диффузия основных носителей тока через пограничный слой; при этом дырки и электроны рекомбинируют друг с другом.

Вблизи перехода в n-области положительные ионы донорной примеси, заряд которых теперь не компенсируется электронами, образуют положительный пространственный заряд. Соответственно в р-области отрицательные ионы акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками, образуют отрицательный пространственный заряд.

Таким образом, возникает контактная разность потенциалов – потенциальный барьер, препятствующий диффузии основных носителей.

Равновесие наступает при такой высоте потенциального барьера, когда положения уровней Ферми в обеих областях совпадают, как это изображено на рис. 1. Для пояснения этого правила рассмотрим для простоты уровень E_1 , находящейся в зоне проводимости. Вероятность заполнения этого уровня не может зависеть от того, как ее считать: через функцию Ферми в n-области или через функцию Ферми в р-области. Поэтому

$$\frac{1}{1 + e^{-\frac{E_1 - E_{F(n)}}{KT}}} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{E_1 - E_{F(p)}}{KT}}}, \quad (1)$$

откуда следует, что $E_{F(n)} = E_{F(p)}$. В области n-p-перехода возникает, таким образом, слой, объединенный носителями тока. Существование объединенного слоя легко понять из рассмотрения рис. 1. В n-области уровень Ферми располагается далеко от валентной зоны и поблизости от зоны проводимости. Вероятность заполнения уровней валентной зоны близка к единице, а вероятность заполнения уровней зоны проводимости заметно отлична от нуля. В этой области много электронов и мало дырок. В р-области наблюдается обратная картина. В области n-p-перехода уровень Ферми проходит вдалеке как от валентной зоны, так и от зоны проводимости. Эта область поэтому бедна как электронами, так и дырками (рис. 2) и обладает большим электрическим сопротивлением. Из-за наличия потенциального барьера между concentra-

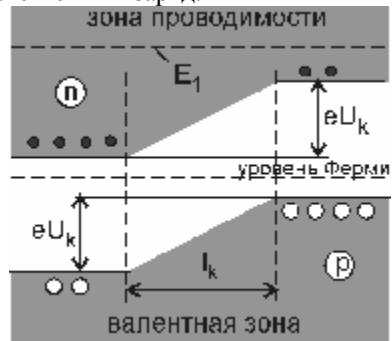


Рис. 1.

циями основных и неосновных носителей заряда в n - p -областях устанавливается определенное соотношение. В условиях равновесия

$$\frac{\Pi_n(n\text{-область})}{\Pi_n(p\text{-область})} = \frac{\Pi_p(p\text{-область})}{\Pi_p(n\text{-область})} = e^{\frac{eU_k}{kT}}, \quad (2)$$

Это соотношение нетрудно понять. В материале n -типа имеется высокая концентрация электронов, но только

небольшая их доля $e^{\frac{e\Delta V}{kT}}$, поднимаясь «в горку» (см. рис. 1), проходит в материал p -типа. Эти электроны образуют поток, проходящий через переход слева. Имеется также ток электронов, приближающихся к переходу справа. Указанный ток не уменьшается из-за контактной разности потенциалов, так как электроны в этом случае скатываются «под горку». В условиях равновесия эти токи равны друг другу. Обозначая их величину через I_0 , найдем:

$$I_0 \sim \Pi_n(p\text{-область}) = \Pi_n(n\text{-область}) e^{\frac{e\Delta V}{kT}} \quad (3)$$

Приложим теперь к n - p -переходу напряжение $V_{ист}$ от внешнего источника тока таким образом, чтобы p -область заряжалась положительно относительно n -области (рис. 3а). Это напряжение практически полностью падает на n - p -переходе, проводимость которого крайне мала из-за того, что принадлежащая к переходу область, как уже отмечалось, бедна носителями тока. Потенциальная энергия электронов в p -области снижается по сравнению с энергией в n -области на величину $eV_{ист}$. Соответственно понижается и положение уровня Ферми.

Найдем величину тока, проходящего через полупроводник при небольших $V_{ист}$, когда потенциальный барьер уменьшится, но не исчезнет. Ток, проходящий справа налево, при этом не меняется; он по-прежнему равен $eV_{ист}$ ток, проходящий слева направо, из-за снижения барьера увеличится в $e^{\frac{eV_{ист}}{kT}}$ раз. Полный ток равен разности этих токов, т. е.

$$I(V_{ист}) = I_0 \left(e^{\frac{eV_{ист}}{kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

Все сказанное выше с равным успехом может быть отнесено и к току, переносимому дырками. При равновесии немногочисленные дырки, находящиеся в n -области, беспрепятственно проникают в p -область, «взбираются в горку», из-за чего их количество уменьшается в $e^{\frac{e\Delta V}{kT}}$ раз. В присутствии напряжения эти точки перестают компенсировать друг друга, и мы снова приходим к формуле (4). Эта формула поэтому правильно описывает и полный ток, проходящий через n -переход, если понимать под I_0 суммарный ток, переносимый при равновесии как электронами, так и дырками. Ток $I(V_{ист})$ при увеличении $V_{ист}$ быстро (при заметных $V_{ист}$ экспоненциально быстро) возрастает.

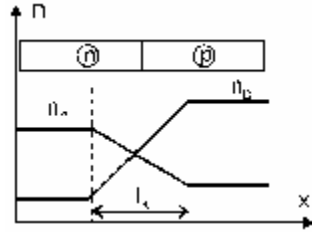


Рис. 2

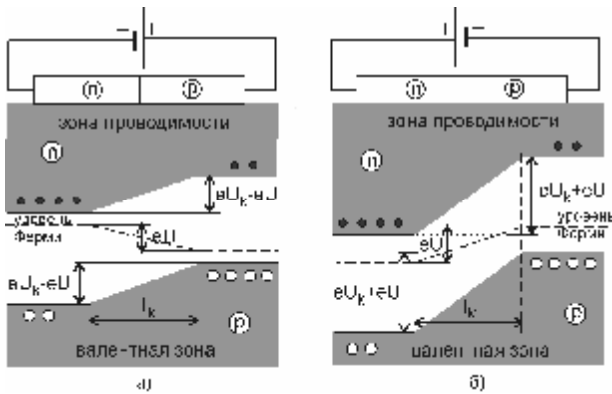


Рис. 3.

Рассмотрим процессы, происходящие при обратном напряжении (рис. 3б). Потенциальный барьер при этом еще более увеличивается, так что ток из n-области падает ниже I . Легко видеть, что формула (4) и в этом случае правильно описывает величину тока, проходящего через n-p-переход. При $V_{ист} < 0$ этот ток меняет направление. Экспоненциальный член вскоре становится пренебрежимо малым, так что отрицательный ток никогда не превышает I , величина которого очень мала из-за низкой концентрации неосновных носителей в примесных проводниках.

Подставим (3) в (4) и примем во внимание, что измеряемый на опыте ток равен сумме тока электронов и тока дырок:

$$I(V_{ист}) = (I_{0,n} + I_{0,p}) e^{\frac{eV_{ист}}{KT} - 1} = [P_n(n\text{-область}) + P_p(p\text{-область})] e^{-\frac{eV}{KT}} \cdot \left(e^{\frac{eV_{ист}}{KT}} - 1 \right) = Ae^{-\frac{eV}{KT}} \cdot \left(e^{\frac{eV_{ист}}{KT}} - 1 \right) \quad (5)$$

При написании этой формулы было принято во внимание, что P_n и P_p определяются концентрацией акцепторных и донорных примесей и слабо зависят от температуры, поэтому их сумма заменена константой. Зависимость тока от напряжения, приложенного к n-p-переходу, изображена на рис. 4.

Нелинейный характер вольтамперной характеристики n-p-перехода позволяет использовать его для выпрямления переменного тока (полупроводниковые диоды). В качестве полупроводниковых диодов используются как переходы, образованные полупроводниками n- и p-типа, так и контакты металла с полупроводником (в последнем случае весь объемный заряд в области перехода сосредоточен в полупроводнике). Выражение (5) справедливо в этом случае.

Материалом для выпрямительных диодов служат германий и кремний. Диоды выпускаются на токи от нескольких миллиампер до нескольких сотен ампер.

При протекании тока через диод в нем выделяется тепло, и температура



Рис. 4.

перехода повышается. Увеличение температуры вызывает увеличение обратного тока, что в свою очередь приводит к росту температуры. При увеличении температуры растет собственная проводимость полупроводников, которая начинает сравниваться с примесной. Выпрямляющие свойства полупроводников при этом резко ухудшаются. Предельная температура диодов тем меньше, чем меньше ширина энергетической щели между валентной зоной и зоной проводимости в материале, из которого изготовлен диод.

Для германиевых *n-p*-переходов предельная температура $\approx 75^\circ\text{C}$, а для кремниевых $\approx 150^\circ\text{C}$.

При малых температурах формула (5) может быть упрощена. Полагая, что

$$eV_{\text{ИСТ}}/KT \leq 1 \quad (5)$$

и разлагая экспоненту в ряд Тейлора, получим:

$$I = Ae^{-\frac{e\Delta V}{KT}} \cdot \frac{eV_{\text{ИСТ}}}{KT} \quad (6)$$

При больших $V_{\text{ИСТ}}$ (порядка нескольких мВ) ток, проходящий через *n-p*-переход, пропорционален напряжению. Деля $V_{\text{ИСТ}}$ на I , найдем сопротивление перехода:

$$R = \frac{V_{\text{ИСТ}}}{I} = \frac{KT}{e} \cdot \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{e\Delta V}{KT}} \cdot \alpha e^{\frac{e\Delta V}{KT}} \quad (7)$$

При написании последнего равенства мы приняли во внимание, что слабая зависимость от температуры предэкспоненциального члена мало заметна на фоне быстрой экспоненциальной зависимости.

Целью работы является определение ΔV потенциального барьера *n-p*-перехода (контактной разности потенциалов) германиевого или кремниевое диода. Значение ΔV можно найти по формуле (7), исследуя температурную зависимость сопротивления:

Логарифмируя, а затем дифференцируя (7), найдем:

$$\Delta V = \frac{K}{e} \cdot \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)} \quad (8)$$

УПРАЖНЕНИЕ 1. Снятие вольтамперной характеристики диода.

Приборы и принадлежности: полупроводниковый диод, вольтметр, миллиамперметр, микроамперметр, потенциометр, ключ.

Работа выполняется на установке, принципиальная схема которой дана

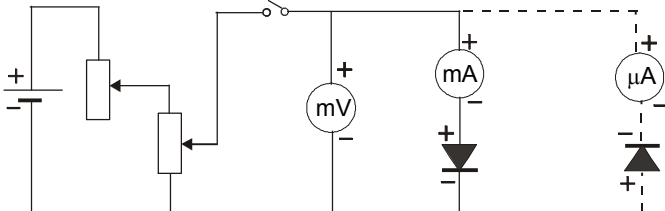


Рис. 5

на рис. 5. Сплошная линия схемы – прямое включение диода, пунктирная – обратное включение.

Порядок выполнения работы.

1. Включить диод так, чтобы снять характеристику для обратного тока. В качестве токоизмерительного прибора присоединить микроамперметр. Переключателем подать постоянное напряжение. Изменяя с помощью потенциометра величину напряжения, снять вольтамперную характеристику для обратного тока, записывая показания милливольтметра и микроамперметра. Разомкнуть цепь.

Таблица 2. Обратный ток.

U, mB															
I, μA															

2. Переключить диод для снятия характеристики прямого тока. Микроамперметр заменить миллиамперметром. Снять вольтамперную характеристику прямого тока. Разомкнуть цепь.

Таблица 3. Прямой ток.

U, mB														
I, mA														

3. По данным таблиц построить вольтамперную характеристику диода.

4. Осциллограф и диод подключить к источнику переменного напряжения. Увеличивая с помощью реостата ток, получить осциллограмму. Отключить диод и зарисовать вновь полученную осциллограмму.

УПРАЖНЕНИЕ 2. Определение контактной разности потенциалов в p-n-переходе.

Описание экспериментальной установки для определения контактной разности потенциалов в p-n-переходе.

Схема установки изображена на рис. 6.

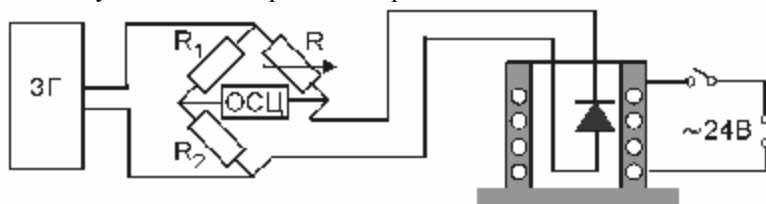


Рис. 6.

Установка состоит из мостовой схемы для измерения сопротивления

диода и нагревателя. Источником питания мостовой схемы служит звуковой генератор З. Г. В качестве нуль-индикатора используется осциллограф. В плечи моста включены эталонные сопротивления R_1 и R_2 , магазин сопротивлений и полупроводниковый диод, сопротивление которого измеряется.

Исследуемый диод погружен в масло, заполняющее нагреватель. Температура масла измеряется термометром. Нагрев осуществляется пропусканием тока через нагреватель. Максимальная температура масла в нагревателе – 80°C.

1. Ознакомиться с работой всех приборов, входящих в измерительную цепь.

2. Измерить сопротивление диода при комнатной температуре. Для этого необходимо сбалансировать мост с помощью магазина сопротивлений R . Свидетельством баланса моста является отсутствие высокочастотных колебаний на экране осциллографа. При этом сопротивление диода равно сопротивлению магазина R .

3. Включить питание нагревателя, опустив тумблер на панели установки ВНИЗ.

4. Измерить и записать сопротивление диода при различных температурах – от комнатной до 80°, через каждые 10°.

5. Закончив измерения, ОТКЛЮЧИТЬ НАГРЕВАТЕЛЬ.

6. Построить график зависимости сопротивления диода от температуры в координатах $\ln R, T^{-1}$. По наклону полученной прямой найти контактную разность потенциалов ΔV в n - p -переходе исследуемого диода.

7. Определить достоверность полученного результата и сделать заключение по работе.

8. Режим измерений: частота $\nu = 5 \text{ кГц} + 15 \text{ кГц}$. Напряжение на входе $U = 0,01 \text{ В}$.

Таблица 1.

$T, ^\circ\text{C}$	Комнатная	30	40	50	60	70	80
$R, \text{ Ом}$							
$R_{\text{ср}}, \text{ Ом}$							

Контрольные вопросы и задания.

1. Что называется основными и неосновными носителями заряда?
2. Объяснить физические процессы, происходящие при контакте p - и n -областей полупроводника.
3. От чего зависит величина контактной разности потенциалов?
4. Начертить принципиальную схему установки для снятия вольтамперной характеристика диода.

5. Какие носители заряда обуславливают прямой и обратный ток?
6. Почему обратный ток диода достигает насыщения? Должен ли ток насыщения зависеть от температуры?
7. Как меняется сопротивление диода по всей вольтамперной характеристике?
8. Сравнить вольтамперные характеристики вакуумного и полупроводникового диода. Найти их сходство и различие.

Литература.

1. Савельев И. В. Курс физики. Т. 3. –М.: Наука, 1989, §42, 43, 45.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. –М.: Высш. шк., 1990, §105, 240 – 243, 249, 250.

Лабораторная работа № 7-3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА.

Цель работы: исследование зависимости холловской разности потенциалов от величины постоянного тока и магнитного поля и определение концентрации основных носителей заряда в полупроводниках.

Приборы и принадлежности: полупроводник, электромагнит, амперметр, милливольтметр, миллиамперметр, выпрямитель на 12 В, два реостата, три переключателя.

Введение.

Эффектом Холла называется возникновение под действием магнитного поля поперечной разности потенциалов в образце, вдоль которого проходит электрический ток.

Образец в виде пластинки толщиной d (рис. 1) помещается между полюсами электромагнита. Направление индукции магнитного поля B перпендикулярно направлению тока I . Холловская разность потенциалов возникает между верхней и нижней гранями пластинки, ее величина определяется формулой

$$U_X = R \frac{B \cdot I}{d} \quad (1)$$

где R – постоянная Холла.

Для металлов и полупроводников с одним типом проводимости (электронным или дырочным) для константы Холла справедлива формула

$$R = \frac{A}{e \cdot n}, \quad (2)$$

где A – постоянная величина, близкая к единице; e – величина элементарного заряда; n – концентрация носителей заряда.

С помощью постоянной Холла можно определить знак носителей заряда и их концентрацию n . Если, кроме того, известна проводимость вещества σ , то по формуле:

$$\sigma = n \cdot e \cdot b, \quad (3)$$

можно определить величину подвижности носителей тока $b = \sigma / en$.

Описание установки и методики эксперимента.

В качестве образца для исследования эффекта Холла в данной работе используется полупроводник с электронной проводимостью. К пластинке полупроводника (рис. 2) припаяны четыре электрода из тонкой медной проволоки: два для измерения поперечной разности потенциалов $U_X(A_1, A_2)$ и два для пропускания продольного тока I . Образец вмонтирован между двумя изолирующими пластинами, на которых имеются четыре клеммы, соединенные с электродами, и находится в зазоре между полюсами электромагнита.

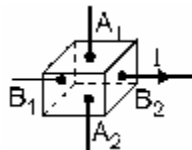


Рис. 2.

На рис. 3 показана электрическая схема установки, которая состоит из трех цепей:

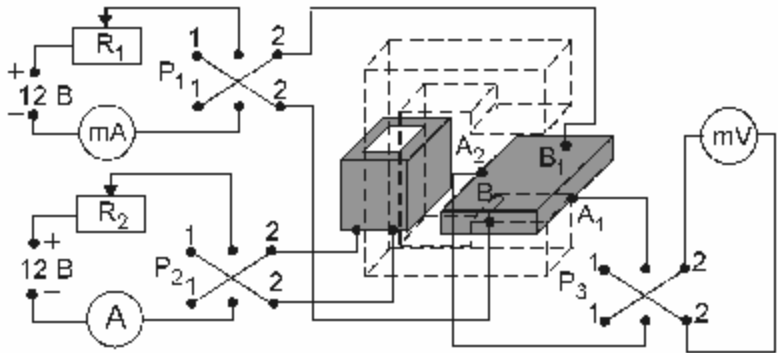


Рис. 3.

1. Цепи продольного тока I , который подводится к клеммам B_1 и B_2 образца. В эту цепь входит источник питания постоянного тока, реостат R_1 , миллиамперметр mA и переключатель P_1 , предназначенный для изменения направления продольного тока.

2. Цепи электромагнита. К электромагниту ток I_m поступает от выпрямителя, на клеммы которого (+,-) подается напряжение 12 В. Цепь электромагнита содержит амперметр, реостат R_2 и переключатель P_2 , предназначенный для изменения направления индукции магнитного поля между полюсами электромагнита.

3. Цепи измерения поперечной разности потенциалов между электродами A_1 и A_2 . Эта цепь состоит из милливольтметра для измерения разности потенциалов U_X и переключателя P_3 , предназначенного для согласования полярности милливольтметра и холловской разности потенциалов.

Так как при изготовлении образцов для измерения эффекта Холла обычно не удается расположить контакты точно на эквипотенциальной линии, то при прохождении через образец между точками A_1 и A_2 возникает разность потенциалов U_0 , обусловленная падением напряжения на участке между проекциями точек A_1 и A_2 на ось образца. Поэтому при возникновении холловской разности потенциалов U_X между точками A_1 и A_2 установится напряжение $U = \pm U_X + U_0$, которое и будет зафиксировано милливольтметром (знаки (+) или (-) зависят от направления индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита). Учитывая что при изменении направления тока I_m в электромагните (изменении направления индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита) холловская разность потенциалов изменит знак, а U_0 сохранит прежнее направление (знак U_0 зависит от направления продольного тока I , но не зависит от направления магнитного поля B), то измерение поперечной разности потенциалов следует производить дважды при разных направлениях магнитного поля при неизменном направлении тока I . Тогда, если в первом случае (переключатель P_2 в положении 1-1, переключатель P_1 в положении 1-1, переключатель P_3 в положении 1-1) милливольтметр покажет разность потенциалов $U_1 = U_X + U_0$, то после изменения направления маг-

нитного поля (переключатель P_2 в положение 2-2) милливольтметр станет показывать разность потенциалов $U_2 = U_X - U_0$. Так как $|U_X| > |U_0|$, то $U_2 < 0$ и чтобы снять показание прибора переключатель P_3 необходимо перевести в положении 2-2. Тогда милливольтметр покажет напряжение $U_2 = -U_2' = U_X - U_0$. Сопоставляя показания милливольтметра U_1 и U_2 имеем $U_1 + U_2 = 2 \cdot U_X$, откуда

$$U_X = \frac{U_1 + U_2}{2} .$$

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с расположением приборов и элементов управления установки, собранной на лабораторном столе по схеме (рис. 3).
2. Переключатели P_1, P_2, P_3 перевести в нейтральное положение и выключит электропитание установки.
3. Согласно указаниям, находящимся на лабораторном столе записать в таблицу 1 рекомендуемые значения токов I_m и I , вектора магнитной индукции B и толщину экспериментального образца d .

Таблица 1.

№ п/п	I_m, A	$B, Tл$	I, mA	U_1, mB	U_2, mB	U_X, mB	$R, \frac{M^3}{Kл}$	$n_0, 1/M^3$	Δn_{0i}	Δn_{0i}^2
1										
2, и.т.д.										

$d =$ мм,

$\langle n_0 \rangle = \frac{\Sigma \Delta n_{0i}^2}{\dots}$

4. Замкнуть переключатель P_2 на клеммы 1-1 и с помощью реостата R_2 по амперметру A установить заданное значение тока в обмотке электромагнита I_m .
5. Замкнуть переключатель P_1 на клеммы 1-1 и реостатом R_1 по миллиамперметру A установить заданное значение силы продольного тока I , проходящего через образец.
6. Замкнуть переключатель P_3 на клеммы 1-1 и измерить разность потенциалов U_1 . Значение U_1 записать в таблицу.
7. Переключить переключатели P_2 и P_3 на клеммы 1-1 и измерить разность потенциалов U_2 . Значение U_2 записать в таблицу.
8. При данном значении тока в электромагните I_m (т.е. при постоянном значении магнитного поля) пункты 4 – 7 повторяют для всех значений продольного тока I , записанных в таблице.
9. Выполнить пункты 4 – 8 для всех значений тока в электромагните I_m , записанных в таблице.
10. Разомкнуть переключатели P_1, P_2 и P_3 и выключить электропитание лабораторной установки.

Обработка результатов измерений.

1. Построить 4 графика зависимости $U_x = f(I)$ для четырех значений B . По графику с учетом формулы (1) определить величину постоянной Холла R .

2. Для каждого значения R вычислить концентрацию носителей тока $n_0 = \frac{1}{R \cdot e}$.

3. В соответствии с приложением 1 рассчитать среднее значение $\langle n_0 \rangle$ концентрации носителей тока, доверительный интервал Δn_0 и относительную погрешность результата $E = \Delta n_0 / \langle n_0 \rangle$. Доверительную вероятность принять $\alpha = 0,95$.

Результат работы

1. Записать полученное значение показателя в виде:

$$n_0 = \langle n_0 \rangle \pm \Delta n_0; \quad E = \dots\%$$

Контрольные вопросы и задания.

1. В чем заключается различие механизма возникновения ЭДС Холла в проводниках и полупроводниках?

2. Как, используя эффект Холла, можно определить тип полупроводника (n- или p-тип)?

3. Объясните, какие параметры полупроводника (металла) можно определить по измерениям эффекта Холла.

4. От чего зависит знак постоянной Холла для собственного полупроводника и для примесного полупроводника (дырочного или электронного)?

5. С какой целью проводится измерение ЭДС Холла при двух направлениях магнитного поля? Почему U_0 своего знака не изменяет при изменении направления B ?

Литература.

1. Савельев И. В. Курс физики. Т. 2. –М.: Наука, 1989, §45.

2. Трофимова Т. И. Курс физики. –М.: Высш. шк., 1990, §117, 242, 243.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

РАСЧЕТ ОШИБКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u : $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$.

Расчет ошибки эксперимента включает в себя следующие этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины

$$\langle u \rangle = \frac{\sum u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_i + \dots + u_n}{n}. \quad (1)$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого результата

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|. \quad (2)$$

3. Рассчитываются квадраты абсолютных погрешностей Δu_i^2 и находится их сумма

$$\sum (\Delta u_i)^2 = \sum (u_i - \langle u \rangle)^2. \quad (3)$$

4. Рассчитывается доверительный интервал

$$\Delta u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где $t_{\alpha, n}$ - коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице приложения в зависимости от числа значений n и доверительной вероятности α . Чем выше вероятность α , тем больше будет ошибка. Рекомендуется брать $\alpha = 0,95$.

5. Рассчитывается относительная погрешность результата

$$E = \frac{\Delta u}{\langle u \rangle} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Результат работы представляется в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta u; \quad E = \dots \%$$

$\alpha \backslash n$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	3,3	3,0

Приложение 2

Основные физические постоянные

Атомная единица массы – $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931 \text{ МэВ}$.

Газовая постоянная – $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$.

Масса покоя электрона – $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Масса покоя протона – $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Постоянная Авогадро – $N_A = 6,03 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Постоянная Больцмана – $k = 1,23 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К}$.

Постоянная Вина – $2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м/К}$.

Постоянная Планка – $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Постоянная Планка – $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Постоянная Стефана-Больцмана – $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Скорость света в вакууме – $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Ускорение свободного падения – $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Электрическая постоянная – $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Элементарный заряд – $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Электрон-вольт – $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Энергия ионизации водорода – $13,6 \text{ эВ}$.

Энергия покоя электрона $0,511 \text{ МэВ}$.

Кратные и дробные приставки к единицам измерения

Название	Сокраще- ние	Множи- тель	Название	Сокраще- ние	Множи- тель
пико	п	10^{-12}	дека	да	10^1
нано	н	10^{-9}	гекто	г	10^2
микро	мк	10^{-6}	кило	к	10^3
милли	м	10^{-3}	мега	М	10^6
санти	с	10^{-2}	гига	Г	10^9
деци	д	10^{-1}	тера	Т	10^{12}