

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**В.М.Татарников,
Т.А.Лисейкина,
В.В.Хайновская**

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Методические указания
к лабораторному практикуму
по физике**

Новосибирск
2020 г.

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ**

**СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**В.М.Татарников
Т.А.Лисейкина
В.В.Хайновская**

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Методические указания
к лабораторному практикуму
по физике**

**Новосибирск
2020 г.**

К. т. н. доцент В.М. Татарников, К. ф.-м. н. доцент Т.А. Лисейкина, К. ф.-м. н. доцент В.В. Хайновская. Физика твердого тела. Методические указания к лабораторному практикуму по физике/СибГУТИ. – Новосибирск. – 2020. – 49 с.

Методические указания к лабораторному практикуму предназначены для оказания помощи студентам Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики при подготовке к выполнению лабораторных работ по разделу «Физика твердого тела».

Кафедра физики.

Ил.– 18, таблиц – 4, список лит. – 6 наименований

Рецензент: профессор А.Н. Игнатов

Утверждена редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве методических указаний.

© Сибирский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики, 2020 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа № 6.6 ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	6
Лабораторная работа № 6.7 ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭФФЕКТА	15
Лабораторная работа № 6.8 ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	23
Лабораторная работа № 6.9 ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ	29
Лабораторная работа № 6.10 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	37
ПРИЛОЖЕНИЯ	45
ЛИТЕРАТУРА	48

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум третьего семестра охватывает материал квантовой оптики, атомной физики, и физики твердого тела. Основное внимание в практикуме уделено физике твердого тела. Изучению этого раздела отведено шесть лабораторных работ из десяти.

При подготовке к каждому лабораторному занятию рекомендуется проделать следующую работу.

1. Изучить теоретический материал. Для этого можно использовать учебные пособия, указанные в списке рекомендуемой литературы, данное методическое пособие или другие источники.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Решить задачи из приложения к описанию данной лабораторной работы. Первая цифра в номере задачи указывает на номер бригады по журналу преподавателя. Необходимо решить все задачи с этой цифрой.
4. Подготовить в тетради теоретическую часть отчета по лабораторной работе.
5. Разработать таблицу для записи результатов лабораторной работы. В таблице необходимо предусмотреть колонки или строки не только для измеряемых величин, но также и для некоторых, наиболее важных, вычисляемых величин.

Все вычисления должны быть приведены в отчете лабораторной работы. Графики желательно строить на миллиметровке. Отчет должен завершаться выводами по данной лабораторной работе.

Лабораторная работа № 6.6

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать влияние света на электропроводность полупроводника.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электропроводностью полупроводников называют величину, обратную удельному сопротивлению

$$\sigma = 1/\rho. \quad (1)$$

Электропроводность материалов зависит от концентрации и подвижности свободных носителей зарядов. Для полупроводников σ определяется выражением:

$$\sigma = e(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p), \quad (2)$$

где e - электрический заряд электронов, p и n - концентрация дырок и электронов в полупроводнике, μ_p и μ_n - подвижность дырок и электронов.

Механизмы проводимости и фотопроводимости в примесных и собственных полупроводниках различны. В данной работе мы рассмотрим только процессы, происходящие в собственных полупроводниках.

В случае собственной проводимости $p = n$. Поэтому (1) можно переписать в виде:

$$\sigma = e(\mu_p + \mu_n) \cdot n. \quad (3)$$

Предположим теперь, что на полупроводник падает по нормали поток монохроматического света с циклической частотой ω . Этот световой поток представляет собой поток фотонов, каждый из которых обладает энергией:

$$\varepsilon = \hbar \cdot \omega. \quad (4)$$

Попадая в полупроводник, фотоны взаимодействуют с валентными электронами полупроводника, рис.6.1а, и стремятся передать им свою энергию. Если энергия падающих фотонов превышает ширину ΔW запрещенной зоны или равна ей:

$$h\omega \geq \Delta W, \quad (5)$$

то благодаря приобретенной энергии валентные электроны способны перейти в зону проводимости, рис.6.1б. При этом в зоне проводимости появляются дополнительные свободные электроны, а в валентной зоне - дырки. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием света получил название внутреннего фотоэффекта. Электроны, перешедшие в зону проводимости под действием квантов света, мы будем называть фотоэлектронами.

Однако, далеко не каждый фотон, падающий на поверхность полупроводника, породит фотоэлектрон. Часть фотонов отражается от поверхности по-

лупроводника. Значительная часть фотонов отдает свою энергию остову кристаллической решетки, т.е. превращается в тепло. Только незначительная часть падающих фотонов порождает фотоэлектроны.

Пусть за одну секунду на единицу поверхности полупроводника падает N фотонов, и g_ϕ из них порождают фотоэлектроны. Отношение

$$\gamma = \frac{g_\phi}{N} \quad (6)$$

называют квантовым выходом фотоэффекта, а величину g_ϕ - интенсивностью генерации фотоэлектронов или интенсивностью фотогенерации.

Так как количество N падающих фотонов пропорционально световому потоку Φ

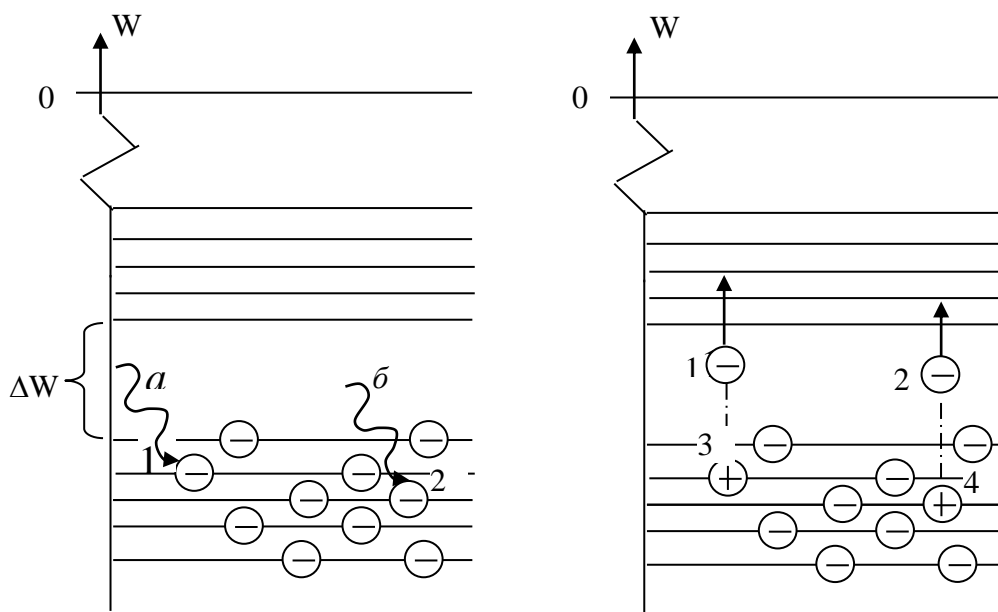


Рисунок 6.1 – Механизм возникновения фотопроводимости в полупроводниках. Фотоны a и b взаимодействуют с электронами 1 и 2. В результате электроны 1 и 2 переходят в зону проводимости, а на их местах образуются дырки 3 и 4

$$N = \chi \Phi, \quad (7)$$

то:

$$g_\phi = \gamma \chi \Phi \quad (8)$$

также пропорциональна падающему световому потоку.

Таким образом, облучение полупроводника светом достаточно высокой частоты приводит к увеличению концентрации свободных носителей зарядов и, следовательно, к увеличению проводимости полупроводника. Увеличение проводимости полупроводника под действием света называется фотопроводимостью.

Из предыдущего следует, что величина фотопроводимости собственных полупроводников определяется выражением:

$$\sigma_\phi = e(\mu_p + \mu_n) \cdot \Delta n. \quad (9)$$

Здесь Δn - приращение концентрации электронов в зоне проводимости, обусловленное действием света. Можно также сказать, что Δn - это концентрация фотоэлектронов в полупроводнике.

Переход электронов в зону проводимости происходит не только под действием квантов света, но также под действием тепловой энергии. Количество dN_1 электронов, которые за время dt переходят в полупроводнике с единичной поверхностью в зону проводимости, определяется выражением:

$$dN_1 = (g_T + g_\phi) \cdot dt. \quad (10)$$

Здесь g_T - интенсивность термогенерации, т.е. число электронов, которые переходят за одну секунду в зону проводимости под действием теплового движения, g_ϕ - интенсивность фотогенерации. Одновременно с процессом генерации свободных электронов идет процесс рекомбинации электронов и дырок, т.е. возвращение электронов из зоны проводимости на свободные места в валентной зоне. Рекомбинация электронов и дырок сопровождается уменьшением концентрации свободных носителей зарядов. Количество dN_2 электронов, рекомбинировавших за время dt в полупроводнике, описывается формулой:

$$dN_2 = \alpha n p dt = \alpha n^2 dt, \quad (11)$$

где α - коэффициент рекомбинации.

В стационарном состоянии $dN_1 = dN_2$ и из (10), (11) получаем:

$$g_T + g_\phi = \alpha n^2. \quad (12)$$

В темноте $g_\phi = 0$. Поэтому можно записать, что темновая равновесная концентрация свободных электронов равна:

$$n_T = \sqrt{\frac{g_T}{\alpha}}. \quad (13)$$

Тогда концентрация фотоэлектронов:

$$\Delta n = n - n_T = \frac{\sqrt{g_T}}{\sqrt{\alpha}} \left(\sqrt{1 + \frac{g_\phi}{g_T}} - 1 \right). \quad (14)$$

Рассмотрим два предельных случая.

Случай первый. Мощность светового потока мала. Тогда $\frac{g_\phi}{g_T} \ll 1$ и

$$\sqrt{1 + \frac{g_\phi}{g_T}} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{g_\phi}{g_T}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14) и, воспользовавшись (8), получаем:

$$\Delta n = \frac{\gamma \chi}{2\sqrt{\alpha} g_T} \Phi. \quad (16)$$

В случае слабых световых потоков концентрация фотоэлектронов достаточно хорошо описывается формулой (16). Тогда из (9) для фотопроводимости полупроводника получаем:

$$\sigma_{\phi} = \frac{e(\mu_p + \mu_n) \gamma \chi}{2\sqrt{\alpha} g_T} \Phi. \quad (17)$$

Таким образом, при слабой освещенности полупроводника фотопроводимость прямо пропорциональна падающему световому потоку. Можно записать:

$$\sigma_{\phi} = D \cdot \Phi, \quad (18)$$

где:

$$D = \frac{e(\mu_p + \mu_n) \gamma \chi}{2\sqrt{\alpha} g_T}. \quad (19)$$

Случай второй. Интенсивность светового потока настолько велика, что $g_{\phi} \gg g_T$. Тогда из (14) и (8) следует:

$$\Delta n \approx \sqrt{\frac{\gamma \chi}{\alpha}} \cdot \sqrt{\Phi}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (9), получим:

$$\sigma_{\phi} = e(\mu_p + \mu_n) \sqrt{\frac{\gamma \chi}{\alpha}} \cdot \sqrt{\Phi}, \quad (21)$$

т.е. фотопроводимость $\sigma_{\phi} \sim \sqrt{\Phi}$.

Однако при больших световых потоках начинают действовать и другие процессы, которые мы в данной работе не рассматриваем. Поэтому уравнение (21) справедливо только в первом приближении. Одна из задач нашей

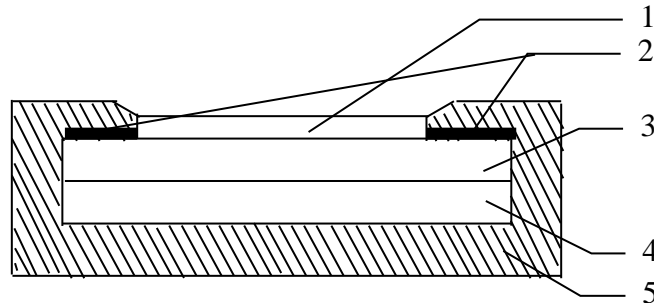


Рисунок 6.2 – Основные элементы конструкции фоторезистора.

1 – прозрачный защитный слой лака, 2 – электроды, 3 – светочувствительный слой полупроводника, 4 – диэлектрическая подложка, 5 - оправа

работы состоит в проверке зависимости $\sigma_F(\Phi)$. Помимо этого нам следует выяснить, зависит ли фотопроводимость от величины приложенного напряжения.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы, принцип действия которых основан на явлении фотопроводимости, называются фоторезисторами. Устройство фоторезистора показано на рис.6.2.

Фоторезистор представляет собой тонкий слой полупроводника, соединенного с двумя электродами и помещенного в защитный корпус с окном для

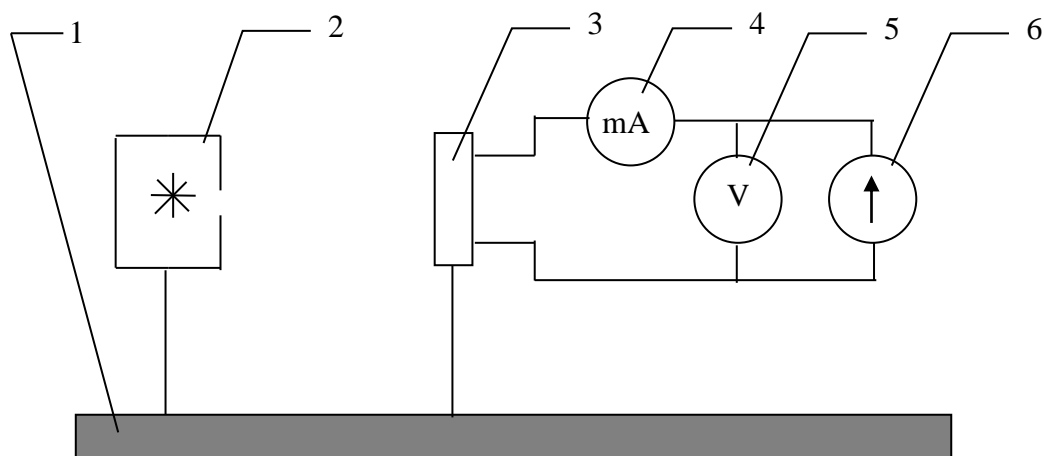


Рисунок 6.3 – Схема лабораторной установки.

1 – оптическая скамья, 2 – источник света, 3 – фоторезистор, 4 – миллиамперметр, 5 – вольтметр, 6 – регулируемый источник напряжения.

света. Простота конструкции, высокая надежность, малые размеры и вес, высокая чувствительность, большой диапазон спектральной чувствительности обеспечили широкое применение фоторезисторов в автоматике, фотометрии, для регистрации слабых потоков в инфракрасной области и т.д.

Для экспериментальных исследований используется установка, схема которой показана на рис.6.3. Установка состоит из оптической скамьи (1), на которой установлен точечный источник света (2) и фоторезистор (3). Электрический ток в фоторезисторе создается регулируемым источником напряжения (6). Напряжение на фоторезисторе измеряется вольтметром (4), ток фоторезистора измеряется миллиамперметром (5).

Световой поток, падающий на фоторезистор, создается точечным источником света. Поэтому освещенность, создаваемую источником света на фоторезисторе, можно вычислить по формуле:

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}, \quad (22)$$

в которой I - сила света источника, r - расстояние от источника света до фоторезистора, α - угол падения светового пучка на фоторезистор.

Установив $\alpha = 0$ и, учитывая, что световой поток

$$\Phi = E \cdot S, \quad (23)$$

где S - рабочая поверхность фоторезистора, получим:

$$\Phi = \frac{I S}{r^2}. \quad (24)$$

Если бы фоторезистор имел форму тонкого прямоугольника, то его сопротивление можно было бы описать формулой

$$R = \frac{l}{S \cdot \sigma} . \quad (25)$$

Выражая R через напряжение и ток, получаем формулу для σ :

$$\sigma = \frac{II}{sU} \quad (26).$$

В связи с тем, что фоторезистор имеет более сложную по сравнению с прямоугольником геометрию, непосредственное применение формулы (26) затруднительно. Для реального фоторезистора формула для вычисления σ будет отличаться от (26) присутствием постоянного коэффициента формы

$$\sigma = k \cdot I/U \quad (27).$$

Здесь k - коэффициент формы для конкретного фоторезистора. Он включает в себя также величины l и S . Измерив ток и напряжение, можно определить проводимость $G = I/U$ фоторезистора, которая отличается от электропроводности постоянным геометрическим множителем k . В подобных случаях говорят, что величина определена с точностью до постоянного множителя (или постоянного коэффициента).

Фототок i_ϕ при неизменной геометрии фоторезистора зависит только от приложенного напряжения U и от электропроводности σ фоторезистора. В данной работе изучаются зависимости $\sigma_\phi(U)$ фотопроводимости полупроводника от приложенного напряжения и $\sigma_\phi(\Phi)$ фотопроводимости полупроводника от падающего светового потока. Эти зависимости устанавливаются посредством построения соответствующих графиков.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Исследование зависимости фотопроводимости от напряжения при постоянном световом потоке.

Мы рекомендуем следующий порядок выполнения работы.

1. Убедитесь в том, что темновые токи, то есть токи при отсутствии освещения фоторезистора, очень малы и ими можно пренебречь. Для этого выключите источник света, установите фоторезистор в произвольном месте на скамье и измерьте токи в цепи фоторезистора при разных напряжениях на фоторезисторе. Вы убедитесь, что они трудно измеримы и потому в дальнейшем мы их не будем учитывать.
2. Выберите значения световых потоков (расстояния), для которых будут изучаться зависимости $\sigma_\phi(U)$.
3. Установите фоторезистор на первом из выбранных расстояний r от источника света.
4. Включите источник света
5. Произведите измерения фототоков при нескольких напряжениях на фоторезисторе. Запишите измеренные значения фототоков и напряжений в таблицу измерений.
6. Выполните измерения по пункту 5 для всех выбранных расстояний.

7. Постройте графики зависимости $i_{\phi}(U)$ для каждого значения светового потока. Все графики можно строить на одной координатной сетке.
8. Проанализируйте результаты и выясните, как зависит фотопроводимость фоторезистора от приложенного напряжения.

Задание 2. Изучение зависимости фотопроводимости от светового потока.

Как указывалось выше, проводимость G фоторезистора отличается от электропроводности σ только постоянным коэффициентом. Поэтому вместо зависимости $\sigma_{\phi}(\Phi)$ мы будем изучать зависимость $G_{\phi}(\Phi)$ при нескольких напряжениях на фоторезисторе. Задание рекомендуется выполнять в следующем порядке.

1. Включите источник света.
2. Учитывая результаты задания 1, назначьте напряжения на фоторезисторе, при которых вы намерены исследовать зависимость $\sigma_{\phi}(\Phi)$.
3. Установите одно из этих напряжений на фоторезисторе.
4. Установите фоторезистор на максимальном расстоянии от источника света.
5. Измерьте фототок i фоторезистора при заданном напряжении и внесите его значение в таблицу измерений.
6. Перемещая фоторезистор к источнику света, произведите измерения по пункту (5) во всех позициях через 5 см.
7. Выполните измерения по пунктам (3) - (6) для всех выбранных значений напряжения на фоторезисторе.
8. Вычислите световой поток Φ по формуле (24) для всех точек измерения фототока.
9. Постройте графики зависимости i_{ϕ} , сопротивления R и проводимости G фоторезистора от светового потока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вспомните основные фотометрические величины (сила света, световой поток, освещенность) и единицы их измерения.
2. Что называется внутренним фотоэффектом? Почему внутренний фотоэффект не наблюдается в металлах?
3. Изменение каких параметров полупроводника под действием света ведет к увеличению проводимости?
4. Как объяснить наличие красной границы для внутреннего фотоэффекта?
5. Докажите, что при слабых световых потоках фотопроводимость прямо пропорциональна падающему световому потоку.
6. Почему после прекращения действия света фотопроводимость исчезает?
7. Объясните график $i_{\phi}(U)$.
8. Объясните график $i_{\phi}(\Phi)$.
9. Поясните схему установки и принцип ее действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. - М.: Наука. 1979. § 9
2. Яворский Б.М. и Детлаф А.А. Курс физики. Том 3. - М.: Высшая школа. 1972. § 11.1.
3. Зисман Г.А. и Тодес О.М. Курс физики. Том 3. - М.: Наука. 1972. §§ 4.35, 36

ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1.1. Рассчитайте, может ли монохроматический свет с длиной волны 0,55 мкм вызвать значительный фотоэффект в полупроводниковом веществе, если ширина запрещенной зоны у него 1,5 эВ.

1.2. Кремниевый полупроводник с собственной удельной электропроводностью $10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ имеет подвижность дырок $0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Считая концентрацию дырок равной $40 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, найдите во сколько раз подвижность электронов больше подвижности дырок.

1.3. Сколько электронов и дырок образуется в кристалле при поглощении им 10^{-4} Дж световой энергии с длиной волны 0,2 мкм, если квантовый выход 0,6?

2.1. Ширина запрещенной зоны некоторого собственного полупроводника равна 1,1 эВ. Рассчитайте, при какой максимальной длине волны возможно интенсивное поглощение падающего на полупроводник света.

2.2. Удельное сопротивление некоторого чистого полупроводника при комнатной температуре равно $50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. После включения источника света удельное сопротивление стало равным $45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Среднее время жизни электронов проводимости равно 0,9 с. Считая, что число электронов проводимости изменяется по закону $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где $\lambda = 1/\tau$, определите удельное сопротивление после выключения источника света через 5 с.

2.3. Концентрация носителей тока в кремнии $5 \cdot 10^{10} \text{ в см}^3$, подвижность электронов $0,15 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, подвижность дырок $0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Определите сопротивление кремниевого стержня длиной 5 см и поперечным сечением 2 мм^2 .

3.1. Сколько электронов и дырок образуется в маленьком кристалле ВаО при поглощении им 10^{-11} Дж световой энергии с длиной волны 0,2 мкм? Квантовый выход η для электронов равен 0,65. Какой заряд потечет во внешней цепи кристалла, если приложенное к кристаллу электрическое поле достаточно сильно, чтобы доставить все свободные носители заряда к электродам?

3.2. Удельное сопротивление арсенида индия $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, постоянная Холла $10^{-2} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Полагая, что проводимость осуществляется зарядами одного знака, определите их концентрацию и подвижность.

3.3. Считая, что поглощенный квант с вероятностью 0,5 порождает пару электрон-дырка, определите количество генерируемых пар при следующих условиях: сила источника света 160 канделл, фотосопротивление находится на расстоянии 0,5 м от источника, длина волны равна 500 нм и площадь фотосопротивления 10 см^2 .

4.1. Удельное сопротивление чистого полупроводника при комнатной температуре $100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После включения источника света удельное сопротивление стало равным $20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Определите время, в течение которого после выключения света удельное сопротивление станет равным $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. (Считать, что число электронов проводимости изменяется по закону $N = N_0 e^{-\lambda t}$). Среднее время жизни электронов проводимости равно $1,2 \text{ с}$.

4.2. Определите примесную электропроводность германия, который в первом случае содержит индий в концентрации $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и во втором сурьму в концентрации $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Подвижность дырок и электронов соответственно равна $0,18$ и $0,38 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

5.1. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равны $0,15 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $0,05 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Вычислите постоянную Холла для кремния, если удельное сопротивление кремния равно $\rho = 620 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

5.2. Удельное сопротивление чистого полупроводника при комнатной температуре $60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После включения источника света сопротивление стало равным $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Определите изменение концентрации носителей тока под действием света, если сумма подвижностей электронов и дырок равна $0,56 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

5.3. Свет с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$ падает нормально на фотосопротивление и оказывает давление равное 4 мкПа . Определите число фотонов, падающих за 1 с на площадь 1 мм . Поверхность считать абсолютно черным телом.

6.1 Подвижность электронов в полупроводнике n -типа $,4 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Определите заряд, переносимый в единице объема, если удельное сопротивление полупроводника равна $2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

6.2. Сколько электронов и дырок образуется в кристалле при поглощении им энергии $2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ длиной волны 500 нм , если квантовый выход равен $0,9$?

6.3. Удельное сопротивление некоторого чистого беспримесного полупроводника при комнатной температуре $50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После включения источника света оно стало равным $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а через 8 с после выключения света удельное сопротивление оказалось равным $45 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Найдите среднее время жизни электронов проводимости и дырок. Считать, что число электронов проводимости изменяется по закону: $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$.

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭФФЕКТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение вентильного фотоэффекта. Построение световых характеристик, определение чувствительности фотоэлемента.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Вентильный фотоэффект заключается в возникновении электродвижущей силы в $p-n$ переходе под действием света. $P-n$ переход образуется в области контакта полупроводников с разным типом проводимости или в области контакта полупроводника и металла. Наибольшее практическое значение имеет вентильный фотоэффект,

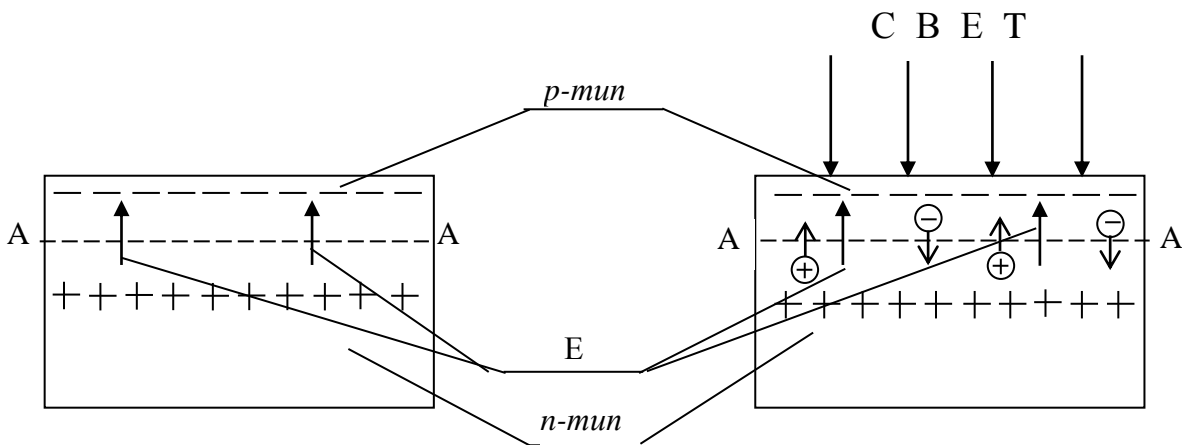


Рисунок 7.1.а – Распределение зарядов и контактное электрическое поле E в $p-n$ переходе при отсутствии светового облучения

Рисунок 7.1.б – Фотовозбужденные носители заряда и их движение под действием контактного поля E

возникающий в области контакта полупроводников с разным типом проводимости. Рассмотрим именно такой случай.

Имеется монокристалл с $p-n$ переходом А-А в месте контакта полупроводников p и n типа, рис.7.1а. Толщина одного из полупроводников, в нашем случае полупроводника типа p , очень мала, так, что этот полупроводник прозрачен для света.

Рассмотрим процессы в $p-n$ переходе при отсутствии светового потока (рис.7.1а). После создания $p-n$ контакта электроны из n области диффундируют в область p типа, а дырки из области p типа диффундируют в область n . В области $p-n$ контакта электроны и дырки рекомбинируют друг с другом, вследствие этого в области $p-n$ контакта возникает область обедненная основными носителями заряда. В результате этого процесса в области $p-n$ контакта остаются нескомпенсированные заряды: положительные ио-

ны в области n и отрицательные ионы в p области, которые показаны на рис. 7.1а в виде двойного заряженного слоя. Данный слой порождает внутреннее контактное поле E , которое оказывает тормозящее действие на основные носители заряда и ускоряющее действие на неосновные носители.

При освещении $p-n$ перехода полупроводников светом (рис.7.1б) фотоны света взаимодействуют с валентными электронами полупроводников в $p-n$ переходе и стремятся передать электронам свою энергию W . Если энергия фотонов больше ширины запрещенной зоны основного полупроводника:

$$h\nu \geq \Delta W, \quad (1)$$

то из валентной зоны электроны могут перебрасываться в зону проводимости.

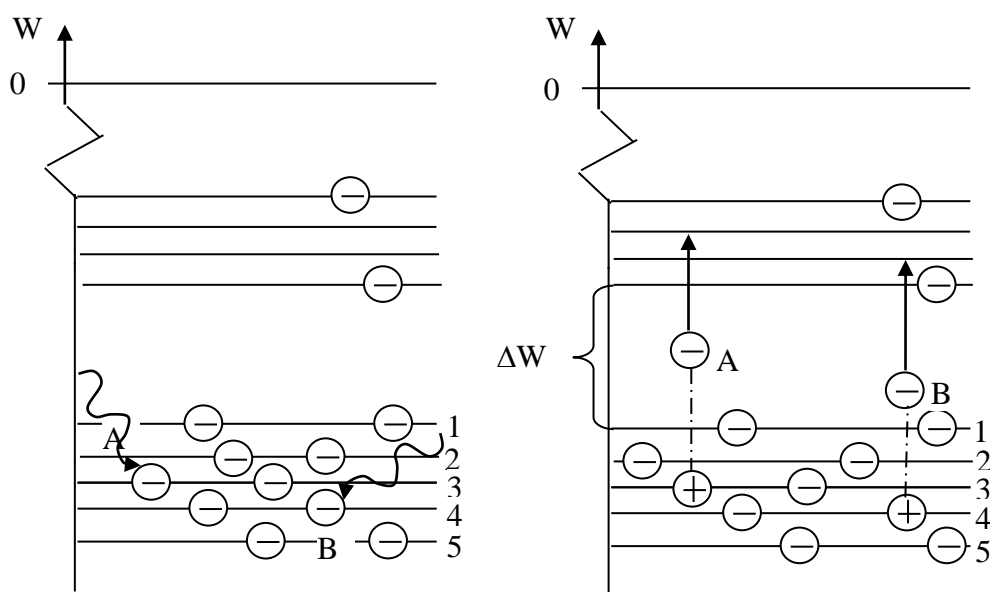


Рисунок 7.2 – Переход электронов А и В с уровней 3, 4 валентной зоны в зону проводимости. В валентной зоне на уровнях 3, 4 появились дырки \oplus .
 ΔW – ширина запрещенной зоны

сти, а в валентной зоне при таких переходах появляются дырки (рис.7.2). Благодаря этому в $p-n$ переходе возникают дополнительные свободные носители заряда, электроны и дырки.

Под действием контактного поля E фотоэлектроны из $p-n$ перехода перемещаются в полупроводник n - типа, а дырки перемещаются в полупроводник p - типа (рис.7.1б). Этот процесс разделения зарядов приводит к тому, что на границах $p-n$ перехода появляется дополнительная разность потенциалов, которая и представляет собой фотоэлектродвижущую силу (фото-Э.д.с.).

Если включить такой $p-n$ переход в замкнутую электрическую цепь, то в этой цепи под действием света возникнет электрический ток, который называется фототоком i_ϕ . Возникающий в цепи фототок зависит от падающего светового потока, сопротивления цепи и свойств фотоэлемента. Зависимость фототока i_ϕ от светового потока Φ называется световой характеристикой

кой фотоэлемента. Обычно световая характеристика строится в виде графика $i_{\phi}(\Phi)$ в режиме короткого замыкания, т.е. при сопротивлении внешнего участка цепи $R = 0$.

В нашей установке:

$$\Phi = E \cdot S, \quad (2)$$

где E - освещенность фотоэлемента, а S - его площадь. Так как мы используем точечный источник света и луч света перпендикулярен к поверхности фотоэлемента, то:

$$E = \frac{J}{r^2}. \quad (3)$$

Здесь J - сила света источника, r - расстояние от источника света до фотоэлемента.

Тогда:

$$\Phi = \frac{J \cdot S}{r^2}. \quad (4)$$

Важной характеристикой фотоэлемента является его чувствительность. Чувствительностью γ называется отношение фототока к падающему на фотоэлемент световому потоку Φ :

$$\gamma = \frac{i_{\phi}}{\Phi}. \quad (5)$$

Обычно чувствительность измеряется в микроамперах на люмен. Учитывая (4), получим:

$$\gamma = \frac{i_{\phi} \cdot r^2}{J \cdot S}. \quad (6)$$

Если перед фотоэлементом установлена диафрагма с диаметром D , меньшим диаметра фотоэлемента, то S - это площадь светового пятна, вырезаемого диафрагмой. Тогда:

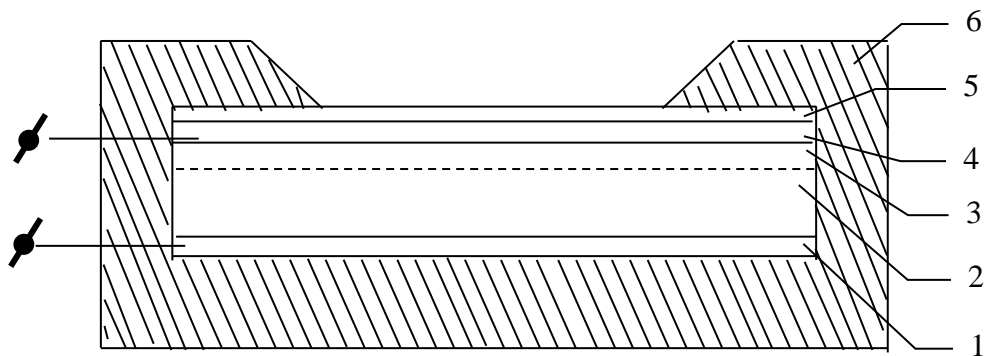


Рисунок 7.3 – Основные элементы конструкции вентильного фотоэлемента

$$\gamma = \frac{4 \cdot i_{\phi} \cdot r^2}{\pi \cdot D^2 \cdot J}. \quad (7)$$

Формула (7) является рабочей для экспериментального определения чувствительности фотоэлемента. Еще раз напоминаем, что обычно в формулу (7)

фототок подставляется в микроамперах.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Основные детали конструкции вентильных фотоэлементов показаны на рис.7.3. Нижний электрод (1), представляет собой прочную металлическую пластину. На него наносится тонкий слой полупроводника (2). Затем нижний электрод с нанесенным на него полупроводниковым слоем подвергается соответствующей обработке. Цель этой обработки заключается в создании в толще полупроводника $p-n$ перехода (2-3), играющего основную роль в

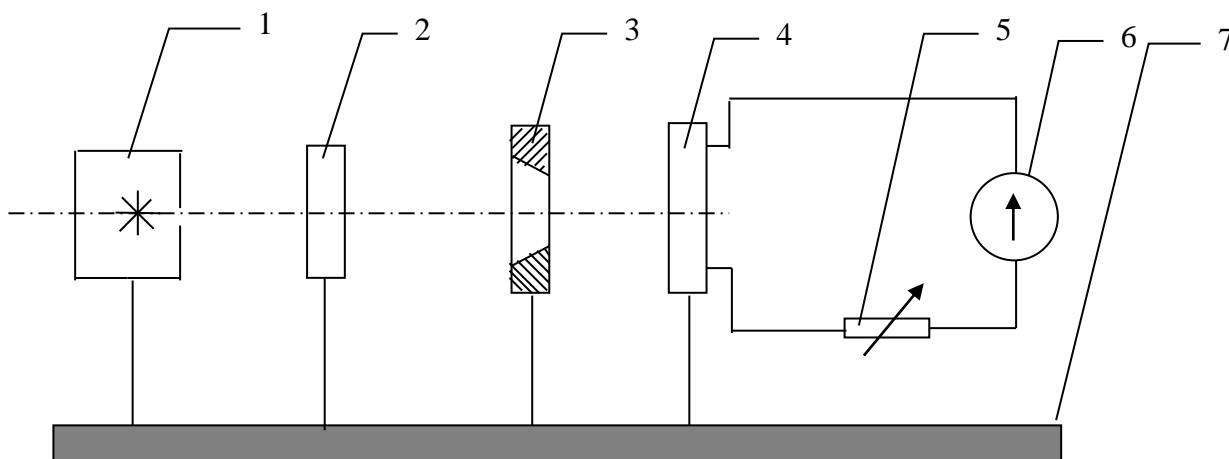


Рисунок 7.4 – Схема лабораторной установки

осуществлении фотоэлектрических процессов. На наружную поверхность полупроводникового слоя наносится верхний металлический электрод (4), представляющий собой настолько тонкий слой металла, что он обладает способностью пропускать свет.

Для предохранения фоточувствительной поверхности фотоэлемента от вредного влияния окружающей среды, она покрывается пленкой прозрачного лака (5). Фотоэлемент помещается в пластмассовую оправу (6) с окошком для света.

Схема лабораторной установки представлена на рис.7.4. Источник света (1), светофильтр (2), диафрагма (3), фотоэлемент (4) устанавливаются соосно при помощи оптической скамьи (7). К фотоэлементу для измерения фототока подключен гальванометр (6) через магазин резисторов (5).

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Построение световой характеристики фотоэлемента.

Как отмечалось выше, световой характеристикой называется зависимость фототока от падающего светового потока в режиме короткого замыкания.

Работу рекомендуется выполнять в следующем порядке:

Собрать установку без светофильтра и диафрагмы.

Установить режим короткого замыкания, т.е. $R = 0$ в магазине резисторов.

Установить фотоэлемент и источник света на максимальном расстоянии друг от друга.

Включить источник света.

Перемещением фотоэлемента убедиться, что во всех точках оптической скамьи фотоэлемент находится в центре светового поля. Если это не так, произвести необходимую регулировку.

Вернуть фотоэлемент на максимальное расстояние от источника света.

Приближая фотоэлемент к источнику света, произвести измерения фототоков в точках оптической скамьи, отстоящих друг от друга на расстоянии 5 см. Одновременно измерять расстояния r от источника света до фотоэлемента. Результаты занести в таблицу.

Вычислить световые потоки для всех r .

1. Построить график зависимости $i_\phi(\Phi)$, т.е. световую характеристику.
2. Построить световые характеристики для трех различных длин волн падающего света. Для этого выполнить задание 1, устанавливая между источником света и фотоэлементом соответствующие светофильтры.
3. Проанализировать вид световых характеристик.

Задание 2. Изучение работы фотоэлемента в цепи с нагрузкой.

Для выполнения этого задания необходимо построить зависимости $i_\phi(\Phi)$ при различных сопротивлениях R , включенных в цепь фотоэлемента. Работа должна выполняться так же как и задание 1, но последовательно с гальванометром должен быть включен резистор и работу следует выполнить только для белого света. Необходимые значения R устанавливаются при помощи магазина. Работу необходимо выполнить при 3-5 различных значениях R . Воспользовавшись законом Ома для полной цепи, оцените по результатам измерений внутреннее сопротивление фотоэлемента.

Задание 3. Изучение чувствительности фотоэлемента.

Напомним, что чувствительностью фотоэлемента называется отношение фототока i_ϕ к падающему световому потоку Φ :

$$\gamma = \frac{i_\phi}{\Phi}$$

Обычно чувствительность фотоэлемента определяется в режиме короткого замыкания, то есть при сопротивлении R магазина равном нулю. Рабочей формулой для выполнения задания 3 является формула (6). В соответствии с этим рекомендуется порядок выполнения задания, приведенный ниже.

1. Собрать установку по рис.7.4 без светофильтра.
2. Установить сопротивление магазина равным нулю.
3. Включить лампу осветителя.
4. Установить диафрагму непосредственно перед фотоэлементом и записать ее диаметр.
5. Установить фотоэлемент на максимальном расстоянии от источника света.
6. Измерить по микроамперметру величину i_ϕ фототока и расстояние до источника света.
7. Приближая фотоэлемент к источнику света, произвести измерения по

пункту 6 при одной и той же диафрагме не менее 6 раз.

8. По формуле (6) вычислить значения γ для всех опытов и вычислить среднее значение

$$\gamma_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_k, \quad (8)$$

где n - число опытов по определению γ .

9. Вычислить погрешность $\Delta\gamma$ по формуле:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\frac{\sum (\gamma_k - \gamma_{cp})^2}{(n-1)}}. \quad (9)$$

10. Сменить диафрагму. С новой диафрагмой произвести измерения и их обработку, как описано в пунктах 5-9.

11. Сравнить значения чувствительности фотоэлемента, полученные в двух сериях опытов.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление фотоэффекта? Какие существуют виды фотоэффекта?
2. Что называется световой характеристикой фотоэлемента?
3. Как объяснить полученные зависимости (графики)?
4. Как влияет сопротивление нагрузки на работу фотоэлемента?
5. Что называется чувствительностью фотоэлемента?
6. Как в данной работе определяется чувствительность фотоэлемента?
7. Как влияет расстояние до источника света на чувствительность фотоэлемента?
8. Как влияет величина светового потока на чувствительность фотоэлемента?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. М.: "Наука". 1979. § 9.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. М.: "Наука". 1980. § 56.
3. Яворский Б.М. и Детлаф В.В. Курс общей физики. Том 3. М.: "Наука". 1971. § 11.1.

ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1.1. Селеновый фотоэлемент имеет чувствительность равную 200 мА/лм. Принимая, что такая же чувствительность имеет место при освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 0,55 мкм, определите, сколько фотонов приходится на 1 электрон, участвующий в фототоке.

1.2. Какой должна быть ширина запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен светодиод, светящийся зеленым светом ($\lambda = 500$ нм)?

1.3. Какую силу тока (в мкА) покажет гальванометр, присоединенный к селеновому фотоэлементу, если на расстоянии 75 см от него поместить лампочку, световой поток которой равен 1200 лм? Рабочая поверхность фотоэлемента равна 10 см², чувствительность 300 мкА/лм.

2.1. Монохроматическое излучение с длиной волны 6000 \AA падает на поверхность фотоэлемента, чувствительность которого 9 мА/Вт , освобождая при этом 1000 фотоэлектронов. Определите число квантов света, падающих на поверхность.

2.2. Какой заряд в кулонах протечет по внешней цепи, если на фотоэлемент падает монохроматическое излучение с длиной волны $0,2 \text{ мкм}$. Энергия падающего светового потока 10^{-4} Дж . Квантовый выход равен $0,1$.

2.3. Свет с длиной волны $0,5 \text{ мкм}$ нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление 4 мкПа . Определите число фотонов, падающих за 10 с на площадь равную 1 мм^2 .

3.1. Лампа с силой света 100 кд находится на расстоянии 50 см от фотоэлемента. Определите чувствительность фотоэлемента в мкА/лм , если ток равен 10 мкА и площадь фотокатода 20 см^2 .

3.2. Оцените число электронно-дырочных пар, возникающих за 1 с в исследуемом фотоэлементе при токе, равном 20 мкА .

3.3. Рассчитайте квантовый выход (отношение числа электронов к числу фотонов) для фотоэлемента с чувствительностью 10^{-3} А/Вт . Длину световой волны взять равной 500 нм .

4.1. Какова ширина запрещенной зоны сурьмянистого индия, если его красная граница внутреннего фотоэффекта равна $0,68 \text{ мкм}$?

4.2. Квантовый выход фотоэлектронов, т.е. отношение числа вылетевших фотоэлектронов к числу падающих фотонов, равен $0,5$. Спектральная чувствительность фотоэлемента 5 мА/Вт . Определите длину волны падающего излучения.

4.3. Лампа с силой света 100 кд находится на расстоянии 40 см от фотоэлемента, площадь которого равна 20 см^2 . Ток во внешней цепи равен 36 мкА . Какой ток потечет в цепи, если лампа будет находиться на расстоянии 60 см от фотоэлемента?

5.1. Селеновый фотоэлемент имеет чувствительность равную 200 мкА/лм . Принимая, что такая чувствительность имеет место при освещении фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны 500 нм , определите число фотонов, приходящихся на один электрон, участвующий в фототоке.

5.2. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$ падает на зачерненную поверхность и оказывает на нее давление $0,3 \text{ мкПа}$. Определите концентрацию фотонов в световом пучке.

5.3. Импульс излучения, состоящий из $5 \cdot 10^4$ квантов света длиной волны $0,5 \text{ мкм}$, падает на фотоэлемент. Количество фотоэлектронов, освобождаемых таким импульсом света, равно 10^4 . Определите спектральную чувствительность этого фотоэлемента.

6.1. Какой должна быть ширина запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен светодиод, светящийся красным светом ($\lambda = 700 \text{ нм}$)?

6.2. На каком расстоянии находится фотоэлемент от лампочки со световым потоком 1500 лм , если гальванометр показывает ток 600 мкА ? Площадь фотоэлемента 10 см^2 , чувствительность 200 мА/лм .

6.3. Рассчитайте квантовый выход для фотоэлемента с чувствительностью 19 мА/Вт. Длину световой волны взять равной 650 нм.

Лабораторная работа № 6.8

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить зависимость электропроводности полупроводникового образца от температуры. Определить ширину запрещенной зоны.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электропроводностью материалов называется величина обратная удельному сопротивлению. Электропроводность σ материалов определяется выражением:

$$\sigma = \mu^+ n^+ q^+ + \mu^- n^- q^-, \quad (1)$$

где

q^+ и q^- - соответственно заряд свободных положительных и свободных отрицательных носителей электрического заряда;

n^+ и n^- - концентрация соответственно свободных положительных и свободных отрицательных носителей заряда;

μ^+ и μ^- - подвижность свободных положительных и свободных отрицательных носителей заряда. В дальнейшем всюду в данной работе речь идет о свободных электрических зарядах и слово "свободный" мы будем опускать.

В нашей работе исследуется собственная электропроводность полупроводника. В полупроводниках положительными носителями заряда являются дырки, а отрицательными - электроны. Следовательно:

$$|q^+| = |q^-| = e \quad (2)$$

и

$$n^+ = n^- = n.$$

Тогда:

$$\sigma = ne(\mu_p + \mu_n). \quad (3)$$

Здесь: μ_n и μ_p - подвижность соответственно электронов проводимости и дырок. Строго говоря, n , μ_n и μ_p зависят от температуры. Однако во многих случаях в узком диапазоне температур зависимостью μ_n и μ_p от T можно пренебречь и принять $\mu_n + \mu_p = \text{const}$. В нашей работе рассматривается именно этот случай.

Зависимость концентрации свободных электронов от температуры описывается экспонентой:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (4)$$

Здесь ΔW - ширина запрещенной зоны, k - постоянная Больцмана, T - температура образца, n_0 - концентрация носителей при высоких температурах.

Отсюда:

$$\sigma = n_0 e (\mu_n + \mu_p) \cdot e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (5)$$

Обозначим:

$$n_0 e (\mu_n + \mu_p) = \sigma_0. \quad (6)$$

Воспользовавшись (5) и (6), получаем:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (7)$$

где σ_0 - условно можно назвать *электропроводностью образца* при достаточно высоких температурах ($T \rightarrow \infty$).

Таким образом, зависимость σ от T является экспоненциальной. Уравнение (7) является основным в нашей работе. Оно поддается экспериментальной проверке и позволяет определить ширину запрещенной зоны ΔW . Проверка формулы (7) осуществляется следующим образом.

Прологарифмируем уравнение (7):

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$ является линейной. Это легко проверить экспериментально. Для вычисления ΔW поступим следующим образом. Возьмем на прямой (8) две произвольные точки 1 и 2. В этих точках имеем:

$$\begin{cases} \ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T_1}, \\ \ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T_2}. \end{cases} \quad (9)$$

Решив систему (9) относительно ΔW , получим:

$$\Delta W = 2k \frac{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (10)$$

Уравнение (10) является рабочим для вычисления ширины запрещенной зоны полупроводникового образца.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 8.1. Здесь (1) - источник стабильного тока. Сила тока регулируется в широких пределах и практически не зависит от сопротивления нагрузки источника тока. Нагрузкой источника тока является образец (9), изготовленный из полупроводника в виде прямоугольника с известными размерами. Сила тока, протекающего через образец, контролируется миллиамперметром (4), а напряжение на образце

измеряется при помощи вольтметра (3). Образец помещен в печь (7) с маслом

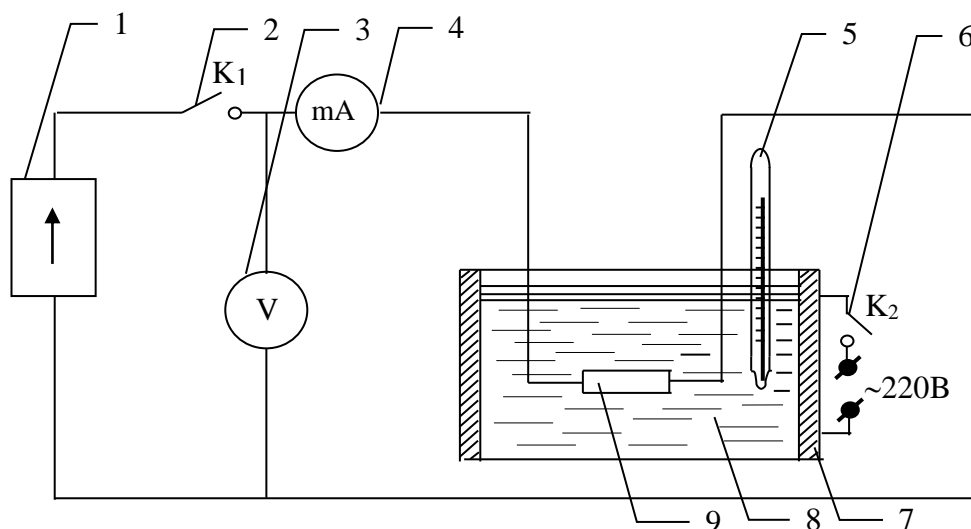


Рисунок 8.1 – Схема установки для изучения зависимости электропроводности

(8). Температура масла, а следовательно и образца, измеряется термометром (5). С целью повышения точности измерения температуры t образец через электроизолирующую, но теплопроводную, прокладку наклеен на медную пластину

Измерив напряжение U и силу тока I , по закону Ома легко вычислить электрическое сопротивление образца:

$$R = \frac{U}{I} . \quad (11)$$

Приняв во внимание геометрию образца и связь $\sigma = 1/\rho$ между электропроводностью и удельным сопротивлением, найдем выражение для электропроводности образца:

$$\sigma = \frac{I \cdot l}{S \cdot U} , \quad (12)$$

где l - длина образца, S - его поперечное сечение.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по рис.8.1.
2. Включить установку и установить силу тока в образце порядка 5-10 мА. Записать силу тока в журнал измерений.
3. Включить печь.
4. По мере нагревания образца записывать его температуру и напряжение на нем через каждые 5°C . Следить, чтобы сила тока в процессе опыта не изменялась. Если сила тока в процессе опыта изменяется, регулятором возвращать ее в исходное значение.
5. При температуре $90-100^{\circ}\text{C}$ печь выключить.

6. По мере остывания образца регистрировать напряжение на образце при тех же значениях температуры, что и в процессе нагревания, поддерживая неизменной силу тока.

7. Вычислить по формуле (12) электропроводности образца при всех температурах.

8. Построить график зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$.

9. На графике выбрать две точки в диапазоне температур 40-100°C. Определить для этих точек по графику величины $\ln \sigma$ и $1/T$ и вычислить по формуле (10) ширину запрещенной зоны полупроводника.

Контрольные вопросы

1. Вывести формулу для собственной электропроводности полупроводника.

2. Почему для проверки температурной зависимости электропроводности полупроводников строится график зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$?

3. Вывести формулу для вычисления ширины запрещенной зоны полупроводника.

4. Пояснить схему установки и принцип ее действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики, том 2. - М. "Наука", 1970, § 72.

2. Савельев И. В. Курс общей физики, том 3. - М. "Наука", 1979, §§ 57, 58, 59.

3. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Милковская Л. Б. Курс лекций по физике, том 2. - М. "Высшая школа", 1960, §§ 13.4, 13.5.

ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1.1. Собственный полупроводник имеет при некоторой температуре удельное сопротивление 0,5 Ом·м. Определите концентрацию носителей тока, если подвижность электронов 0,4 м²/В·с, подвижность дырок - 0,2 м²/В·с. Чему равна плотность тока в полупроводнике, если напряженность поля 100 В/м?

1.2. Германий, имеющий температуру 300 °С, был охлажден так, что его удельное сопротивление увеличилось в 10 раз. До какой температуры он был охлажден? Ширина запрещенной зоны 0,7 эВ.

1.3. При низких температурах красная граница фотопроводимости чистого беспримесного германия равна 1,7 мкм. Найдите температурный коэффициент сопротивления германия при комнатной температуре $\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}$, где ρ - удельное сопротивление, α - температурный коэффициент.

2.1. Ширина запрещенной зоны для кремния 1,1 эВ. Начальная температура кремния 43 °С. На сколько градусов был нагрет полупроводник, если его сопротивление уменьшилось в 100 раз?

2.2. Удельное сопротивление полупроводника при температуре 500 К $4 \cdot 10^4$ (Ом·м), а при температуре 700°К - $8 \cdot 10^3$ (Ом·м). Определите плотность тока при этих температурах, если напряженность внешнего поля 200 В/м. Определите ширину запрещенной зоны.

2.3. Сила тока через полупроводник поддерживается постоянной. При температуре 20 °С падение напряжения на полупроводнике равно 27 В. С увеличением температуры до 100 °С напряжение падает до 10 В. Определите ширину запрещенной зоны полупроводника.

3.1. Во сколько раз изменится при повышении температуры от 300 К до 400 К электропроводность: а) металла, у которого температурный коэффициент сопротивления α равен 0.0039 град^{-1} ; б) собственного полупроводника, ширина запрещенной зоны которого 0,2 эВ ? Каков характер изменения сопротивления в обоих случаях?

3.2. Для полупроводника определена постоянная $\sigma_0 = 8 \cdot 10^5 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Найдите плотность тока в полупроводнике при напряженности внешнего поля 150 В/м. Температура полупроводника 700°К, ширина запрещенной зоны 1,1 эВ.

3.3. Плотность тока в германиевом полупроводнике с собственной проводимостью составляет $0,002 \text{ А/мм}^2$. Напряженность внешнего поля равна 1 В/мм. Определите концентрацию электронов при условии, что сумма подвижностей электронов и дырок равна $0,6 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

4.1. Во сколько раз возрастет сопротивление полупроводника из чистого германия, если его температуру понизить с 300 К до 30 К?

4.2. Кристалл германия содержит 10^{22} свободных электронов в 1 м^3 и значительно меньшее число дырок. Подвижность электронов равна $0,4 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Определите удельную электропроводность германия.

4.3. По опытным данным были определены для кремния с собственной проводимостью два значения логарифмов удельной проводимости: $\ln \sigma_1 = 9.3$ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и $\ln \sigma_2 = 5.1$ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, соответствующие температурам 1175°С и 430°С. Определите ширину запрещенной зоны, считая ее неизменной в заданном интервале температур. Во сколько раз и на сколько изменится проводимость при уменьшении температуры на 200°С в двух случаях: уменьшение фиксируется от верхней и от нижней температур опыта?

5.1. При повышении температуры кремниевого полупроводника от 700 К до 1450 К его проводимость увеличилась в 100 раз. Вычислите ширину запрещенной зоны для кремния.

5.2. Удельное сопротивление полупроводника при температуре 500 К $\rho_1 = 4 \cdot 10^4$ (Ом·м), а при температуре 700 К $\rho_2 = 8 \cdot 10^3$ (Ом·м). Определите ширину запрещенной зоны.

5.3. Ширина запрещенной зоны полупроводника $1,8 \cdot 10^{-19}$ Дж. При температуре 1000 К логарифм удельной электропроводности равен 6. Во сколько раз и в какую сторону изменится проводимость полупроводника, если температуру в одном случае увеличить на 100°С, а в другом - уменьшить на 100°С по отношению к 1000 К?

6.1. Сравните электропроводность чистого германия при температуре -40°C и 100°C . Энергия активации равна $0,72\text{ эВ}$.

6.2. В германиевом полупроводнике подвижность электрона равна $0,4\text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, подвижность дырок - $0,2\text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Вычислите собственную удельную электропроводность германия и определите напряженность поля в полупроводнике, если плотность тока равна $0,001\text{ А/мм}^2$. Концентрация носителей тока $2\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$.

6.3. Найдите минимальную энергию образования пары электрон-дырка в беспримесном полупроводнике, электропроводность которого возрастает в 5 раз при увеличении температуры от 300 К до 400 К .

Лабораторная работа № 6.9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить зависимость термо-э.д.с. от температуры спая термопары и определить удельную термо-э.д.с. термопары.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Возьмем замкнутую электрическую цепь, состоящую из двух различных проводников, рис.9.1.

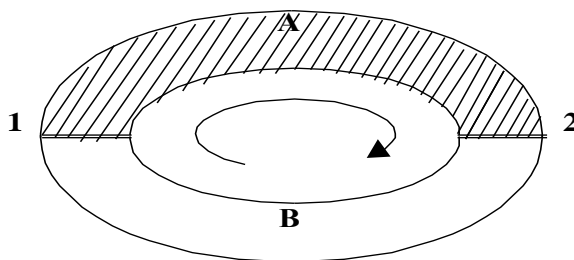


Рисунок 9.1 – Замкнутая цепь из двух различных проводников. Стрелкой указано положительное направление обхода контура

В качестве проводников A и B могут использоваться как различные металлы, так и различные полупроводники. Проводники A и B имеют два контакта 1 и 2, которые мы будем называть спаями. Если в этой электрической цепи, состоящей из разнородных проводников, температуры спаев окажутся различными, то в ней возникает электродвижущая сила и потечет электрический ток. Возникшая э.д.с. называется термоэлектрической электродвижущей силой или сокращенно термо-э.д.с., а возникший ток называется термоэлектрическим током или термо-током. Возникновение тока в цепи вследствие различия температур спаев цепи называется также явлением Зеебека.

Появление термоэлектрического тока обусловлено несколькими причинами и объясняется существенно отличающимися способами в квантовой и классической физике. Мы будем исходить из квантовых представлений.

Первой причиной возникновения термо-э.д.с. является возникновение скачков потенциалов $\Delta\phi'$ на границе материалов A и B в спаях 1 и 2. Эти скачки потенциалов называют внутренней контактной разностью потенциалов. Мы будем обозначать $\Delta\phi'$ с индексами $\Delta\phi'_{AB}$ или $\Delta\phi'_{BA}$. Порядок индексов указывает, какой материал при переходе границы является предыдущим (первый индекс) и какой последующим (второй индекс).

По квантовой теории внутренняя контактная разность потенциалов равна:

$$\Delta\phi'_{AB} = \frac{W_{FA} - W_{FB}}{e}, \quad (1)$$

где W_{FA} и W_{FB} - уровни Ферми в материалах A и B , а e - заряд электрона.

Наличие скачков потенциалов $\Delta\varphi'$ создает в замкнутой цепи электродвижущую силу E' . Чтобы её вычислить, выберем направление обхода контура, рис.9.1, по часовой стрелке.

Тогда:

$$E' = \Delta\varphi'_{AB}(2) + \Delta\varphi'_{BA}(1). \quad (2)$$

Здесь $\Delta\varphi'_{BA}(1)$ - внутренняя контактная разность потенциалов в спае (1), $\Delta\varphi'_{AB}(2)$ - внутренняя контактная разность потенциалов в спае (2).

Положение уровня Ферми в материалах зависит от температуры:

$$W_F = W(T). \quad (3)$$

Поэтому, воспользовавшись (1), получим:

$$E' = \frac{1}{e} [W_{FA}(T_2) - W_{FA}(T_1)] - \frac{1}{e} [W_{FB}(T_2) - W_{FB}(T_1)]. \quad (4)$$

Если $T_1 = T_2$, то э.д.с. E' - обращается в нуль. В цепи, все спаи которой находятся при одинаковой температуре, термо-э.д.с. не возникает. Если $T_1 \neq T_2$, то в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает термо-э.д.с. Первый член (4) дает э.д.с., обусловленную температурным сдвигом уровня Ферми в материале A , а второй член - в материале B .

В нашей работе можно считать, что W_F зависит от температуры линейно. Тогда термо-э.д.с. пропорциональна разности температур спаев:

$$E' = \zeta(T_2 - T_1). \quad (5)$$

Здесь ζ - некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от материалов проводников A и B .

Второй важной причиной возникновения термо-э.д.с. является изменение концентрации свободных носителей заряда по длине проводников A и B , когда температуры спаев различны. При выбранном направлении обхода контура вследствие неоднородности распределения носителей вдоль материала A в нем возникает разность потенциалов $\Delta\varphi''_{A12}$. Аналогично в материале B возникает разность потенциалов $\Delta\varphi''_{B21}$. Их сумма дает э.д.с. E'' , обусловленную изменением концентрации носителей вдоль проводников A и B .

Во многих случаях, особенно при небольшом перепаде температур спаев, можно считать, что э.д.с. E'' также пропорциональна разности температур спаев.

$$E'' = \beta(T_2 - T_1). \quad (6)$$

В пределах нашей работы коэффициент β можно считать постоянным. В общем случае при изменении температуры коэффициент β может изменяться и даже может изменять знак. Полная термо-э.д.с. E в цепи равна сумме:

$$E = E' + E'', \quad (7)$$

или

$$E = \alpha(T_2 - T_1), \quad (8)$$

где:

$$\alpha = \zeta + \beta. \quad (9)$$

Коэффициент α называется удельной термо-э.д.с. для данной пары материалов. Из (8) следует, что удельная термо-э.д.с. равна той термо-э.д.с., которая возникает в цепи при разности температур спаев в 1 Кельвин (градус Цельсия).

В пределах нашей работы мы будем считать α постоянной. Отсюда следует, что термо-э.д.с. зависит от разности температур спаев линейно.

Описание установки

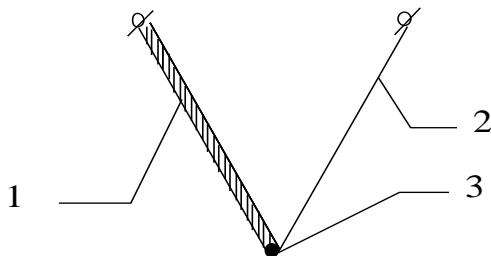


Рисунок 9.2 - Устройство термопары: 1 - металл А, 2 - металл В, 3 - спай металлов А и В.

Явление Зеебека лежит в основе работы термопар. Термопара, рис.9.2, представляет собой спай двух различных проводящих материалов. Чаще термопары изготавливаются из металлов, но иногда используются и термопары из полупроводников. Широко распространены пары: медь-константан и железо-константан. Термопары используются в качестве преобразователей тепловой энергии в электрическую, например, при измерении температур. В работе используется термопара из металлов медь и константан. Схема установки показана на рис.9.3.

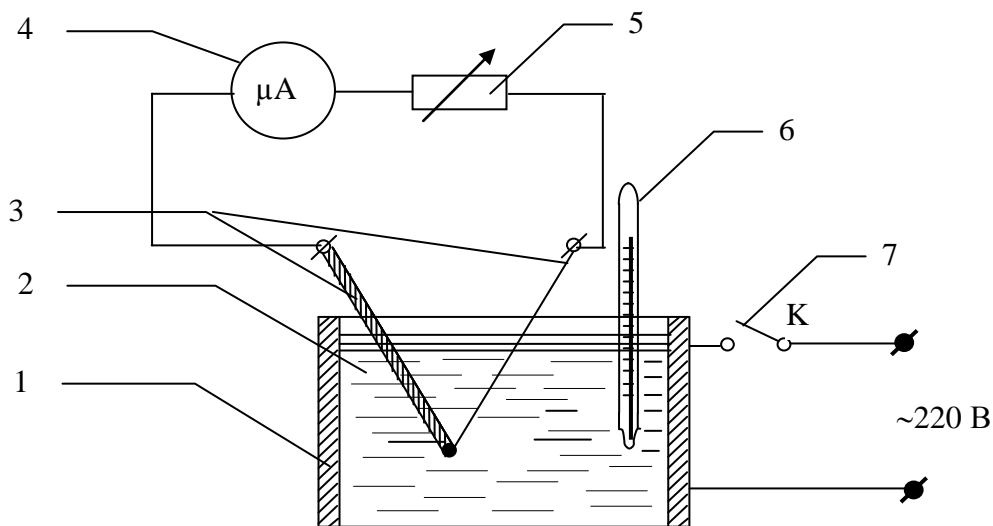


Рисунок 9.3 – Схема лабораторной установки

Установка состоит из нагревателя - 1, в который залито масло - 2. В масло помещены термопара - 3 и термометр - 6. К термопаре подключены микроамперметр - 4 и магазин резисторов - 5.

Температура рабочего спая термопары принимается равной температуре t масла и измеряется термометром. Все остальные контакты цепи находятся при комнатной температуре, которую мы дальше будем обозначать t_0 . Следовательно, термо-э.д.с. создается благодаря разности температур t рабочего спая термопары и комнатной температуры t_0 , которую имеют все остальные спаи цепи.

Поскольку разность температур $T - T_0$ в шкале Кельвина равна разности температур $t - t_0$ в шкале Цельсия, ниже мы будем писать формулу (8) в виде:

$$E = \alpha (t - t_0) \quad (10)$$

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание 1. Градуировка термопары.

Градуировкой измерительного прибора называется операция, при помощи которой устанавливается соответствие между показаниями измерительного прибора и значениями измеряемой величины. Результаты градуировки представляются в виде графиков, таблиц или в виде новой шкалы. В нашей работе измерительный прибор состоит из двух частей: термопары и гальванометра, а измеряемой величиной является разность температур рабочего спая термопары и остальных спаев цепи. Поэтому в процессе градуировки термопары устанавливается соответствие между разностью температур спаев цепи термопары и показаниями гальванометра.

В начале операции градуировки печь включается. Температура масла и термопары медленно повышается и при этом производятся измерения температуры t масла и одновременно I силы тока в цепи термопары.

По результатам измерений, строго говоря, следовало бы построить график зависимости $I(\Delta t)$, где $\Delta t = t - t_0$, однако, в данной работе удобнее строить график $I(t)$, чтобы можно было определить комнатную температуру t . Полученный график часто называется градуировочным графиком или градуировочной кривой.

Задание 2. Определение удельной термо-э.д.с. термопары.

Как мы видели, э.д.с. термопары представляется формулой (10). Удельная термо-э.д.с. α является важным параметром термопары. Величина α , в общем случае, зависит от температуры t в рабочей точке.

Для отыскания α рассмотрим цепь нашей установки, рис.9.3. Пусть температура рабочего спая термопары есть t , а температура остальных спаев цепи есть t_0 . Установим сопротивление магазина резисторов равным нулю и измерим ток I в цепи термопары при этих условиях. Пусть сопротивление всей остальной части цепи равно R_0 . Тогда, учитывая (11), по закону Ома находим:

$$I = \frac{\alpha(t - t_0)}{R_0}. \quad (11)$$

Введем теперь в цепь дополнительное сопротивление R_g при помощи магазина резисторов и при тех же температурах t и t_0 измерим ток I_g . Из закона Ома следует, что:

$$I_g = \frac{\alpha(t - t_0)}{R_g + R_0}. \quad (12)$$

Решив уравнения (12) и (13) относительно α , получим:

$$\alpha = \frac{I_g \cdot I \cdot R_g}{(I - I_g)(t - t_0)}. \quad (13)$$

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Чтобы сэкономить время и уложиться в двухчасовой график работы, рекомендуется задания 1 и 2 выполнять параллельно по приведенному ниже плану.

Подготовить таблицу для записи результатов измерений.

Собрать электрическую цепь и установить сопротивление магазина равным нулю.

Включить установку.

Нажать кнопку "установка нуля" и установить на табло гальванометра нули.

Включить электрическую печь.

Через каждые 5 градусов проводить следующие операции:

Записать температуру t рабочего спая термопары;

Записать силу тока I в цепи термопары;

Установить на магазине такое сопротивление R_g , чтобы сила тока в цепи термопары уменьшилась в 1,5 - 3 раза и записать в таблицу это сопротивление;

Измерить силу тока I_g в цепи термопары с дополнительным сопротивлением и записать его в таблицу;

Вернуть магазину резисторов значение сопротивления равное нулю.

Работу выполнять в диапазоне температур от комнатной до 90-100°C. При достижении верхней температуры печь выключить и продолжать работу с остывающей печью. При этом рекомендуется проводить измерения при тех же температурах, что и в процессе нагревания термопары.

По результатам измерений построить график зависимости $I(t^0)$ и продолжив его до пересечения с осью t определить комнатную температуру.

В каждой точке измерений, т.е. при каждой фиксированной температуре, вычислить удельную термо-э.д.с. α .

Установить характер зависимости α от t .

Вычислить среднее значение α по формуле:

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_k, \quad (14)$$

где n - число опытов по определению α .

Вычислить среднеквадратическую погрешность $\Delta\alpha$ по формуле:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum(\alpha_k - \alpha_{cp})^2}{(n-1)}}. \quad (15)$$

Вычислить относительную погрешность $\delta\alpha$:

$$\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{sr}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Контрольные вопросы

1. Объяснить природу эффекта Зеебека.
2. Пояснить физический смысл удельной термо-э.д.с. α и ее зависимость от температуры.
3. Вывести рабочую формулу для определения α .
4. Что называется градуировкой термопары?
5. Почему градуировка термопары осуществляется двумя сериями измерений: один раз в процессе нагревания термопары, второй в процессе ее охлаждения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Том 3. М.: "Наука". 1979. §§ 60, 62, 63.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. и Милковская Л. Б. Курс лекций по физике. Том 2. М.: "Высшая школа". 1960. §§ 10.1, 10.2.

ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1.1. Значения работы выхода для двух металлов равны соответственно 2,8 эВ и 3,2 эВ. Какая контактная разность потенциалов установится между этими металлами, если их привести в соприкосновение? Какой из этих металлов будет иметь больший потенциал?

1.2. Хром-алюминиевая термопара имеет удельную термо-э.д.с. 40 мк В/К. Найдите температуру горячего спая при условии, что температура холодного спая 20°C, сопротивление термопары 20 Ом, внутреннее сопротивление гальванометра 100 Ом, сила тока, измеренная гальванометром, 100 мкА.

1.3. Постоянная термопары 7,5 мкВ/К, температура холодного спая – 80°C (сухой лед), горячего 320°C (расплавленный свинец). Какой заряд протечет по термопаре, если горячему спаю будет передано количество тепла, равное одному Джоулю? Коэффициент полезного действия 20%.

2.1. Определите внутреннюю контактную разность потенциалов между алюминием и медью, медью и окисью цинка.

2.2. При подключении термопары к последовательно соединенным гальванометру и внешнему сопротивлению 100 Ом ток в цепи становится равным 150 мкА. Если внешнее сопротивление равно нулю, то ток равен 200 мкА. Определите термо-э.д.с. термопары.

2.3. Постоянная термопары равна 50 мкВ/К, температура горячего спая 400°C, холодного – 0°C. Через термопару прошел заряд 500 Кл. Определите коэффициент полезного действия термопары, если горячему спаю передано 1 Дж теплоты.

3.1. Зазор между пластинами плоского конденсатора 1 мм. Одна из пластин изготовлена из платины (работа выхода 5,29 эВ), другая - из алюминия (работа выхода 3,74 эВ). Пластины закорочены медным проводом. Какова напряженность поля между пластинами? Как направлен вектор напряженности?

3.2. Термопара константан-медь имеет постоянную, равную $4 \cdot 10^{-2}$ мВ/К, сопротивление термопары 50 Ом, сопротивление гальванометра 100 Ом. Один спай термопары поместили в тающий лед, второй - в кипящую воду. Определите силу тока в цепи и электродвижущую силу.

3.3. Чему равно отношение числа свободных электронов в единице объема у висмута и сурьмы, если при нагревании одного из спаев на 100°C возникает э.д.с., равная 0,01 В? Какой металл имеет больше свободных электронов в единице объема, если ток через нагретый спай идет от висмута к сурьме?

4.1. Имеется два металла с концентрацией свободных носителей (электронов) 10^{28} м^{-3} и 10^{29} м^{-3} . Определите внутреннюю контактную разность потенциалов, возникающую при приведении этих металлов в соприкосновение при температуре 27°C .

4.2. Зазор между пластинами плоского конденсатора 1 мм. Одна из пластин конденсатора изготовлена из платины (работа выхода 5,29 эВ). Пластины закорочены медным проводом. Напряженность поля между пластинами 450 В/м. Определите работу выхода второй пластины.

4.3. Термопара константан-медь имеет удельную термо-э.д.с. $4,3 \cdot 10^{-2}$ мВ/К. Определите сопротивление термопары, если сила тока в цепи 56 мкА, один спай термопары поместили в тающий лед, второй - в кипящую воду, а сопротивление гальванометра 100 Ом.

5.1. Глубина потенциальной ямы металла составляет 11 эВ, а работа выхода - 4 эВ. Найдите: а) полную энергию электронов на уровне Ферми; б) на сколько увеличится кинетическая энергия электрона при его проникновении в металл?

5.2. Хром-алюминиевая термопара имеет удельную термо-э.д.с. 40 мкВ/К. При разности температур холодного и горячего спаев равной 100 К ток в цепи равен 100 мкА. Чему будет равен ток в цепи, если разность температур увеличить вдвое, уменьшить вдвое?

5.3. Какой заряд протечет по термопаре, если горячему спаю будет передано 2 Дж энергии. Постоянная термопары 50 мкВ/К. Разность температур горячего и холодного спаев 200 К, а коэффициент полезного действия 15%.

6.1. Чему равно отношение числа свободных электронов в единице объема у висмута и сурьмы, если при нагревании на 200°C одного из спаев возникает э.д.с. равная 0,02 В? Определите постоянную этой термопары.

6.2. При подключении термопары к последовательно соединенным гальванометру и внешнему сопротивлению $R_g = 100 \text{ Ом}$ ток в цепи равен 100 мкА. Если внешнее сопротивление равно 0, ток в цепи 200 мкА. Определите термо-э.д.с., если температура холодного спаев -80°C , а горячего $+320^\circ\text{C}$.

6.3. Две пластины плоского конденсатора соединены проводом. Одна из пластин конденсатора изготовлена из материала с работой выхода 2,24 эВ, вторая пластина характеризуется работой выхода 4,84 эВ. Напряженность

поля между пластинами 1300 В/м. Определите расстояние между пластинами.

Указание: в задачах 2.1, 3.3, 4.1, 6.1 для определения контактной разности потенциалов U_k между двумя металлами использовать формулу $U_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_2}{N_1}$, где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/Г – постоянная Больцмана; T - абсолютная температура в градусах Кельвина; e - элементарный заряд; N_2 , N_1 - концентрации свободных электронов в единице объёма для соответствующего металла.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теорию эффекта Холла.
2. Исследовать зависимость э.д.с. Холла (U_x) от величины индукции внешнего магнитного поля (B) и силы тока (I), протекающего через образец.
3. Определить концентрацию основных носителей заряда (n) и их подвижность (μ).

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Эффектом Холла называют явление возникновения э.д.с. в помещённом в магнитное поле полупроводнике, по которому протекает электрический ток. Пусть полупроводник имеет форму параллелепипеда длиной l и сечением $a \cdot b$ и по нему протекает ток I перпендикулярно сечению. Полупроводник находится в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , направление которой перпендикулярно направлению тока и указано на рис.10.1.

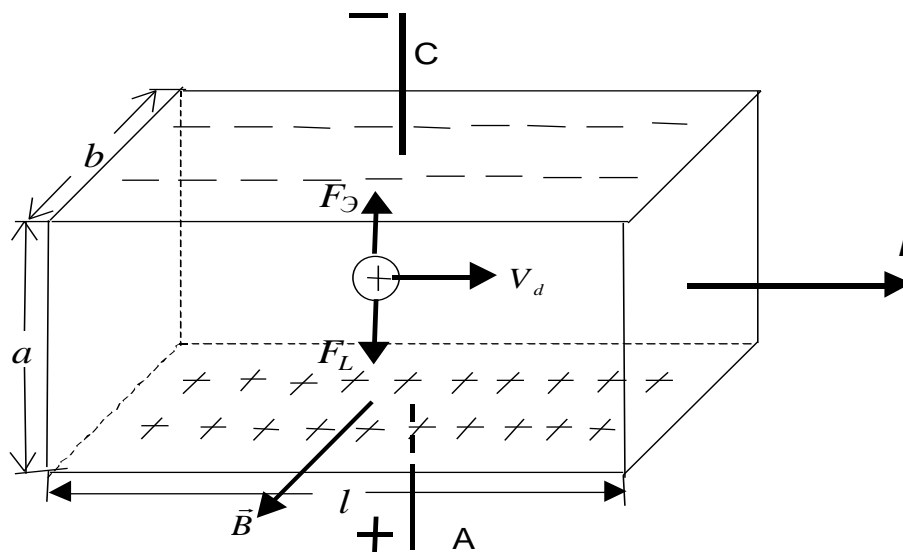


Рисунок 10.1 – Механизм возникновения холловской ЭДС

Опыт показывает, что между точками A и C , расположенными на нижней и верхней гранях образца, возникает разность потенциалов, названная э.д.с. Холла, которая возрастает с увеличением тока I и вектора магнитной индукции \vec{B} : $U_x \sim I \cdot B$. Объясняется возникновение U_x смещением движущихся зарядов к верхней или нижней грани образца под действием силы Лоренца. Если основными носителями заряда являются дырки, то силой Лоренца (рис.10.1) они отклоняются к нижней грани образца, и там накопится поло-

жительный заряд, а на верхней останется не скомпенсированный отрицательный заряд. Если основными носителями заряда являются электроны, то они будут также отклоняться и накапливаться на нижней грани, создавая на ней отрицательный заряд. (Вспомните правило левой руки, по которому в данном случае определяем направление силы Лоренца).

Величина силы Лоренца определяется соотношением:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}_d \cdot \vec{B}], \quad (1)$$

где q - заряд носителя, \vec{v}_d - его дрейфовая скорость. Смещение носителей заряда в поперечном (по отношению \vec{v}_d и \vec{B}) направлении прекратится тогда, когда сила Лоренца уравнивается силой F_x электрического поля, создаваемого сместившимися зарядами. Если $B \perp \vec{v}_d$, то:

$$qv_d \cdot B = qE_x. \quad (2)$$

Дрейфовая скорость может быть выражена из формулы для плотности дрейфового тока:

$$v_d = \frac{j}{q \cdot n}. \quad (3)$$

Если плотность тока J одинакова во всех точках сечения $a \cdot b$, то:

$$j = \frac{I}{a \cdot b}. \quad (4)$$

После подстановки уравнений (4) и (3) в формулу (2) получим:

$$E_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{ab}. \quad (5)$$

Считая возникшее поле однородным, найдем холловское напряжение на контактах АС, используя связь напряженности E_x и разности потенциалов U_x :

$$U_x = -E_x a = -\frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{b} = R_x \cdot \frac{IB}{b}. \quad (6)$$

Величина $R_x = -\frac{1}{qn}$ называется постоянной Холла.

Предложенный вывод выражения для U_x нагляден, но недостаточно строг. Не был учтён статистический характер распределения носителей заряда по скоростям. Это значит, что уравнение (2) не может выполняться одновременно для всех электронов (или дырок), имеющих различные по величине и направлению скорости. Поэтому стационарное состояние наступает не тогда, когда сила Лоренца уравнивает силу электрического поля Холла для каждого электрона, а тогда, когда ток, созданный холловским электрическим полем U_x , компенсирует ток, созданный действием силы Лоренца. Однако результат строгой теории эффекта Холла для атомарных полупроводников *Ge* и *Si* практически не отличается от полученного нами. В нашей лабораторной работе используется датчик, Холла изготовленный из кремния.

Итак, измеренное значение напряжения Холла U_x и знание условий эксперимента (размеры образца, величина тока I , вектор магнитной индукции \vec{B}) дают возможность определить знак и концентрацию носителей заряда в полупроводнике. А параллельное измерение удельной электропроводности σ :

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n \quad (7)$$

того же образца позволяет вычислить и подвижность носителей заряда μ :

$$\mu = \frac{\sigma}{q \cdot n} = \sigma \cdot R_x. \quad (8)$$

Подвижность электрона μ_n и подвижность дырки μ_p численно равна скорости, которую приобретает электрон или дырка, в электрическом поле напряженностью равной единице, т.е.:

$$\mu_n = \frac{U_n}{E}; \quad \mu_p = \frac{U_p}{E}. \quad (9)$$

Подвижность электрона и дырки является одной из основных характеристик полупроводника, по которой можно судить о степени “загрязнения” материала неконтролируемыми примесями.

Метод определения концентрации и подвижности носителей заряда по холловской э.д.с. и удельной проводимости является классическим методом научного исследования полупроводников.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется при комнатной температуре с использованием постоянного тока через образец и магнитного поля электромагнита. Принципиальная схема измерительной установки изображена на рис.10.2.

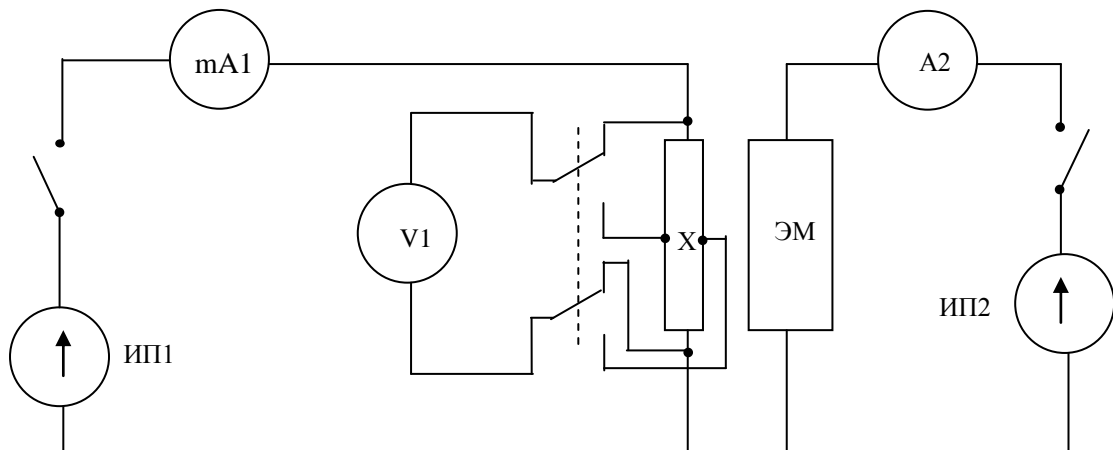


Рисунок 10.2 – Принципиальная схема измерительной установки

ИП 1, ИП 2 – источники питания схемы; mA1 – миллиамперметр для измерения силы тока через образец; V1 – вольтметр для измерения холловского напряжения и падения напряжения на образце; X – полупроводниковый образец для исследования эффекта Холла; ЭМ – электромагнит; A2 – амперметр для измерения силы тока через электромагнит.

Геометрические размеры образца кремния указаны на стенде. В условиях нашего эксперимента вектор магнитной индукции \vec{B} прямо пропорционален току электромагнита I_m : $\vec{B} = \alpha I_m$. График этой зависимости имеется на рабочем месте и позволяет определять значения B в теслах по экспериментальным значениям тока I_m . На образце имеется две пары электродов. Одна из них служит для измерения напряжения U на образце, другая - для измерения холловского напряжения U_x . Ток I в образце измеряется миллиамперметром mA1, расположенным в правой части установки. Холловское напряжение U_x измеряется цифровым вольтметром V1, расположенным в центральной части установки. Этот же вольтметр используется для измерения падения напряжения на образце U . Режим работы вольтметра переключается тумблером, расположенным справа от вольтметра. Изменение индукции B магнитного поля, в котором находится образец, производится регулированием тока I_m через электромагнит (ЭМ), измеряемого амперметром A2, расположенном в левой части установки.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Объем экспериментальной работы задается преподавателем каждому студенту.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Изучение зависимости U_x от величины индукции B внешнего магнитного поля.

Подготовьте таблицу для записи результатов измерений падения напряжения U на образце, тока I через образец, тока I_m через электромагнит, вектора \vec{B} магнитной индукции и холловского напряжения U_x . Ток через образец I установите в пределах от 3 до 10 мА и не изменяйте в этой серии опытов. Измерьте U_x при разных токах I_m . Ток I_m магнита измените не менее 10 раз, повторите измерения U_x . Для каждого тока магнита найдите индукцию магнитного поля. По результатам постройте график $U_x = f(B)$. Сравните результат с теорией.

Задание 2. Изучение зависимости холловского напряжения U_x от величины тока I , протекающего через образец.

Подготовьте таблицу для записи результатов измерения напряжения U и тока I через образец, тока I_m через электромагнит, магнитной индукции B и величины U_x . Установите величину тока I_m через электромагнит в пределах от 0,6 А до 2 А и не изменяйте её в течение этой серии экспериментов. Изменяя ток I через образец 10 раз, измерьте холловское напряжение U_x при каждом значении тока I и продольное напряжение U . Данные занесите в таблицу и по ним постройте график $U_x = f(I)$. Сравните результат с теоретической зависимостью.

Задание 3. Определение концентрации n основных носителей заряда в полупроводнике.

Подготовьте таблицу для вычисленных 10 значений постоянной Холла R_x и концентрации “ n ”. (Таблицу рекомендуется расположить горизонтально). Вычислите не менее 10 раз постоянную Холла R_x по формуле:

$$R_x = \frac{U_x \cdot b}{I \cdot B}, \quad (10)$$

используя данные экспериментов задания 1 или 2 (напоминаем, что I - ток через образец). После этого 10 раз определите концентрацию носителей заряда n :

$$R_x = \frac{1}{q \cdot n}, \quad n = \frac{1}{q \cdot R_x}. \quad (11)$$

Найдите среднее значение $\langle R_x \rangle$ и концентрации носителей заряда $\langle n \rangle$. Вычислите абсолютную погрешность Δn по формуле:

$$\Delta n = \sqrt{\left[\frac{\sum (n_k - \langle n \rangle)^2}{(k-1)} \right]}, \quad (12)$$

где k - количество опытов в данной серии измерений.

Задание 4. Определение подвижности электронов в кремнии при комнатной температуре.

Для вычисления подвижности электронов μ_n нужно знать постоянную Холла R_x и удельную проводимость σ :

$$\mu = R_x \cdot \sigma. \quad (13)$$

Используйте среднее значение $\langle R_x \rangle$, полученное в задании 3, а удельную проводимость определите следующим образом:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (14)$$

где ρ - удельное сопротивление кремния. Выразим ρ через его размеры и величину сопротивления R :

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}. \quad (15)$$

Сопротивление образца определяется по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (16)$$

где U - напряжение на образце, I - ток через образец, измеренные в тех случаях, для которых рассчитывалась постоянная Холла (Задание 3).

Площадь поперечного сечения:

$$S = a \cdot b. \quad (17)$$

После подстановки формул (15), (16), (17) в формулу (14), получим:

$$\sigma = \frac{I \cdot l}{U \cdot a \cdot b}. \quad (18)$$

Подвижность электронов можно вычислить так:

$$\mu = \sigma \cdot R_x. \quad (19)$$

Все вычисления проводите в системе СИ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление называется эффектом Холла?
2. Почему разные знаки имеет холловское напряжение в материалах n и p типов проводимости?
3. Сделайте вывод формулы для U_x . В чем неточность этого вывода?
4. Какой формы должен быть теоретический график $U_x = f(B)$?
5. Какой формы должен быть график $U_x = f(I)$?
6. Что называется подвижностью электронов и дырок?
7. Как изменится (увеличится или уменьшится) концентрация носителей заряда с увеличением температуры? Почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. М., "Наука", 1979, § 79.

ЗАДАЧИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

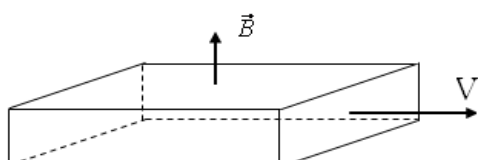
1.1. Перпендикулярно магнитному полю с индукцией $B=0,1$ Тл возбуждено электрическое поле, напряженность которого равна 100 кВ/м. Определите величину и направление скорости движения протона, если известно, что в таких полях он движется прямолинейно.

1.2. Пластина из полупроводника шириной $d=2$ мм помещена в магнитное поле. Вектор магнитной индукции поля перпендикулярен одной из плоскостей пластинки. По пластинке пропускают электрический ток силой $0,1$ А. При этом возникает поперечная разность потенциалов равная $3,25 \cdot 10^{-3}$ В. Определите подвижность носителей тока в полупроводнике. Удельное сопротивление полупроводника 10^{-4} Ом·м, индукция поля 1 Тл.

1.3. Покажите, что холловскую э.д.с. можно представить в виде: $U_x = v_d B b$, где v_d - дрейфовая скорость носителей тока в проводнике шириной b , B - магнитная индукция поля.

2.1. Заряженная частица, двигаясь перпендикулярно скрещенным под прямым углом электрическому и магнитному полям, не испытывает отклонения от прямолинейной траектории. Найдите удельный заряд частицы, если напряженность электрического поля равна 400 кВ/м, вектор магнитной индукции равен $0,46$ Тл. Частица прошла ускоряющую разность потенциалов 10 В.

2.2. Пластина из однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε движется с постоянной скоростью



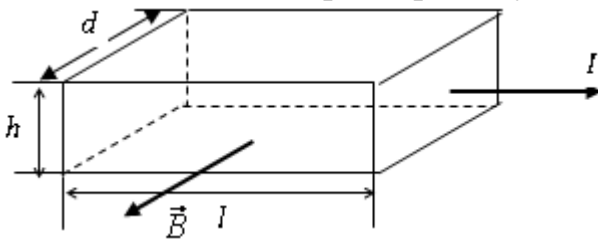
стью \vec{V} в однородном магнитном поле, индукция которого B . Определите вектор поляризации \vec{P} и поверхностную плотность связанных зарядов ($P = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E$, $\varepsilon = 1 + \chi$).

2.3. Удельное сопротивление арсенида индия $2,5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, постоянная Холла 10^{-2} м³/кл. Полагая, что электропроводность осуществляется зарядами одного знака, определите их концентрацию и подвижность.

3.1. Определите постоянную Холла для серебра по его плотности и атомной массе. Серебро одновалентное.

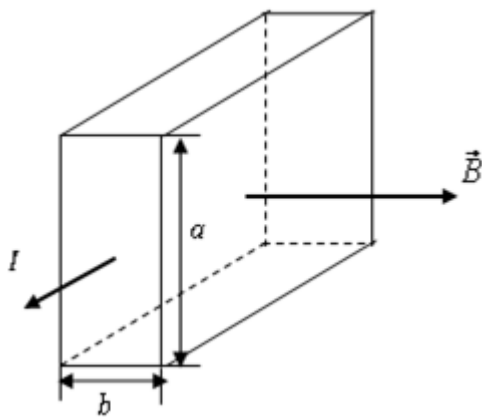
$$\left(\rho = 1,05 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, A = 108 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}, N_A = 0,02 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{кмоль}} \right)$$

3.2. Пластика с размерами, указанными на рисунке, включена в электрическую сеть. При продольной разности потенциалов $\Delta\varphi$ по пластинке течёт ток I . Если, не выключая тока, создать перпендикулярно пластинке магнитное поле с индукцией \vec{B} , то между нижним и верхним основаниями возникнет холловская разность потенциалов (U_x). Найдите концентрацию зарядов, их подвижность, постоянную Холла, если: $\Delta\varphi = 0,5$ В, $I = 10$ А, $B = 0,1$ Тл, $d = 4$ мм, $h = 5$ мм, $l = 60$ мм, $\Delta\varphi_x = 55$ мВ.



3.3. Определите величину холловской разности потенциалов, при которой сила Лоренца, действующая на носители тока, равна $8 \cdot 10^{-18}$ Н. Высота пластинки равна 3,1 мм.

3.1. Пластика высотой 20 мм и шириной 1 мм расположена перпендикулярно магнитному полю с индукцией 2 Тл. По пластинке течет ток силой 5 А. Вследствие эффекта Холла внутри пластинки возникает однородное электрическое поле напряженностью E_1 . Определите величину и направление этого поля, если концентрация электронов проводимости равна $1,1 \cdot 10^{27} \frac{1}{\text{м}^3}$. Определите отношение E_1 к напряженности поля E_0 , обуславливающего ток в пластинке. Удельная электропровод-



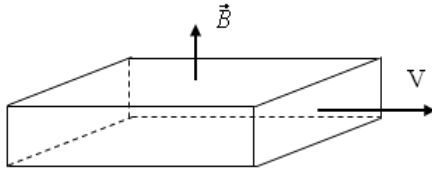
ность $5,8 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$.

4.2. Во сколько раз постоянная Холла для серебра больше постоянной Холла для меди? $\rho_{\text{меди}} = 8,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\rho_{\text{серебра}} = 10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Атомные массы

$635 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$, $108 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ соответственно.

4.3. Через поперечное сечение полупроводника шириной 1 мм и высотой 10 мм течет ток силой 2,1 А. Если полупроводник поместить в магнитное поле, возникает поперечная разность потенциалов равная $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ В}$. Определите величину и направление силы Лоренца, действующей на носители тока. Индукция поля равна 0,8 Тл.

5.1. Пластина движется со скоростью $V = 0,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ в однородном магнитном



поле с индукцией 70 мТл. Найдите поверхностную плотность зарядов, возникающих на пластине вследствие её движения.

5.2. Определите подвижность зарядов в полупроводнике, если отношение холловской разности потенциалов к продольной разности потенциалов, вызывающей ток в полупроводниковой пластинке, равно 0,03. Магнитная индукция поля 1,5 Тл; длина пластинки в три раза больше её высоты.

5.3. Определите постоянную Холла для меди по её плотности и атомной массе. $\rho_{\text{Cu}} = 8,6 \cdot 10 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, атомная масса $63,5 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

6.1. Определите постоянную Холла для полупроводника, удельное сопротивление которого равно $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, подвижность носителей тока $0,6 \frac{\text{м}^2}{\text{В}}$. Электропроводность определяется зарядами одного типа.

6.2. Через сечение алюминиевой пластинки $S = a \cdot b$ (a – ширина, b – высота) пропускают ток силой 5А. Пластина помещена в магнитное поле перпендикулярное ребру b и направлению тока. Определите холловскую разность потенциалов, если индукция поля 0,5 Тл, ширина пластинки 0,1 мм. Концентрацию электронов проводимости считать равной концентрации атомов. $\rho_{\text{алюминия}} = 2,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, атомная масса $26 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

6.3. Определите скорость крови в артериях (кровь содержит ионы, создающие электрический ток) диаметром 3,3 мм, если магнитная индукция поля $B = 0,07 \text{ Тл}$, холловская разность потенциалов равна 0,1 мВ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 - Фундаментальные физические величины

№ п п	Величина	Обо- значение.	Значение
1.	Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
2.	Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
3.	Скорость света в вакууме	c	299792458 м/с
4.	Элементарный заряд	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
5.	Постоянная Планка	h	$6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	Постоянная Планка (редуцированная)	\hbar	$1,0545887 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
6.	Число Авогадро	N_A	$6,0220943 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
7.	Атомная единица массы	а.е.м.	$1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
8.	Энергетический эквивалент одной а.е.м.		931,5016 МэВ
9	Масса покоя: электрона	m_e	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
			$5,4858026 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
10	мюона	m_μ	$1,883566 \cdot 10^{-28}$ кг
			0,11342920 а.е.м.
11	протона	m_p	$1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
			1,007276470 а.е.м.
12	нейтрона	m_n	$1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг
			1,008665012 а.е.м.
13.	Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл·кг
14.	Число Фарадея	F	$9,648456 \cdot 10^4$ ККл/моль
15.	Постоянная Ридберга	R	$1,097373142 \cdot 10^7$ м ⁻¹
16.	Боровский радиус	a_0	$5,2917706 \cdot 10^{-11}$ м
17	Комптоновская длина волны: электрона	λ_{ce}	$2,4263089 \cdot 10^{-12}$ м
18	протона	λ_{cp}	$1,3214099 \cdot 10^{-15}$ м
19.	Магнетон Бора	μ_B	$9,274078 \cdot 10^{-24}$ Дж/Т
20.	Ядерный магнетон	$\mu_{яд}$	$5,050824 \cdot 10^{-27}$ Дж/Т
21	Магнитный момент: электрона	μ_e	$9,284832 \cdot 10^{-24}$ Дж/Т
22	протона	μ_p	$1,4106171 \cdot 10^{-26}$ Дж/Т
23.	Газовая постоянная	R	8,31441 Дж/(моль·К)
24.	Объем 1 моля идеального газа	V_0	$2,241383 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
25.	Постоянная Больцмана	k	$1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
26.	Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
27.	Гравитационная постоянная	G	$6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
28.	Квант магнитного потока	Φ_0	$2,0678506 \cdot 10^{-15}$ Вб
29.	Квант циркуляции		$3,6369455 \cdot 10^{-4}$ Дж/(Гц·кг)

Таблица 2 - Работа выхода из металлов

Металл	$A, \text{эВ}$	Металл	$A, \text{эВ}$	Металл	$A, \text{эВ}$
Алюминий	3,74	Калий	2,15	Никель	4,84
Барий	2,29	Кобальт	4,25	Платина	5,29
Висмут	4,62	Литий	2,39	Серебро	4,28
Вольфрам	4,50	Медь	4,47	Титан	3,92
Железо	4,36	Молибден	4,27	Цезий	1,89
Золото	4,58	Натрий	2,27	Цинк	3,74

Таблица 3- Некоторые свойства металлов

	Атомный вес	Плотность, г/см ³	Температурный коэффициент, α , град ⁻¹
Алюминий, Al	27,0	2,7	0,004
Вольфрам, W	184,0	19,3	0,005
Константан, (Cu-60%, Ni-40%)			$2 \cdot 10^{-5}$
Латунь, (Cu-60%, Zn-40%)			0,001
Манганин, (Cu-85%, Mn-12%, Ni-3%)			$3 \cdot 10^{-5}$
Медь, Cu	64,0	8,9	0,004
Никелин, (Cu-65%, Ni-34%, Mn-1%)			10^{-4}
Нихром, (Ni-65%, Cr-16%, Fe-17%, Mn-1%)			10^{-4}
Платина, Pt	195,0	21,5	0,004
Никель, Ni	59,0	8,6	-
Ртуть, Hg	201,0	13,6	$9 \cdot 10^{-4}$
Серебро, Ag	108,0	10,5	0,004
Свинец, Pb	207,0	11,3	0,004
Цинк, Zn	65,0	7,8	0,004
Хром, Cr	52,0	7,1	-
Железо, Fe	56,0	7,8	0,006
Марганец, Mn	55,0	7,3	-

Таблица 4 Некоторые свойства полупроводников
при T=300 К

Тип полупроводника	Ширина запрещенной зоны ¹⁾ , эВ	Эффективная масса электронов ¹⁾ , m_n^*/m_e	Эффективная масса дырок ¹⁾ , m_p^*/m_e	Подвижность электронов ¹⁾ , μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Подвижность дырок ¹⁾ , μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Постоянная времени ²⁾ , τ_n , τ_p , с	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Антимонид индия, InSb	0,17	0,014	0,40	8,0	0,12	10^{-6}	17,7
Арсенид индия, InAs	0,43	0,023	0,41	3,30	0,46	10^{-7}	15,0
Антимонид галлия, GaSb	0,72	0,042	0,40	0,50	0,85	10^{-8}	15,7
Германий, Ge	0,66	0,82	0,40	0,39	0,19	10^{-6}	16,0
Кремний, Si	1,12	0,19	0,16	0,15	0,045	10^{-6}	11,9
Фосфид индия, InP	1,35	0,077	0,64	0,46	0,015	10^{-6}	12,4
Арсенид галлия, GaAs	1,42	0,067	0,082	0,85	0,040	10^{-7}	13,1
Фосфид галлия, GaP	2,26	0,82	0,60	0,011	0,0075	10^{-6}	11,6
Карбид кремния, SiC	3,00	0,60	1,00	0,040	0,0050	10^{-4}	10,0

ПРИМЕЧАНИЕ:

¹⁾ С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. Т.2., М., “Мир”, 1984 г.

²⁾ Ориентировочно

ЛИТЕРАТУРА

1. Ансельм А.И. Введение в физику полупроводников. М., 1978, 616 с.
2. Бонч – Бруевич В.Л, Калашников С.Г. Физика полупроводников. М., 1977, 678 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов., Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999, 718 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для втузов., Т. 1, 2, 3., М.: Наука, 1988 (или любое издание др. года).
5. Трофимова Т.И. Курс физики., 6-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1999, 542 с.
6. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики с решениями, М.: Высшая школа, 1999, 591 с.

В.М. Татарников, Т.А. Лисейкина, В.В. Хайновская

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к лабораторному практикуму по физике

Редактор: А.П. Шерстяков
Корректор: О.С. Шкитина

Лицензия РЛ №020475

Подписано в печать . Формат бумаги 62х84/16

Бумага писчая №1. Уч. Изд. Л. . Тираж 300

Типография СибГУТИ, Кирова, 86.