

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е. В. Саврук, В. В. Каранский, С. В. Смирнов

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Учебно-методическое пособие по лабораторным работам
для студентов направлений подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»,
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,
профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»**

2016

Рецензент: Троян П. Е., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Физической электроники ТУСУР.

Саврук Е. В., Каранский В. В., Смирнов С. В.

Физика полупроводников: учебно-методическое пособие по лабораторным работам для студентов направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике». — Томск: ТУСУР, Кафедра Физической электроники, 2016. — 37 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование температурной зависимости электропроводности примесных полупроводников	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Измерение концентрации носителей заряда в полупроводниках методом термо-ЭДС	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Измерение концентрации и подвижности носителей заряда методом Холла	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Изучение фото-ЭДС в полупроводниках	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Изучение эффекта Пельтье в полупроводниках	31
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	36
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	37

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие содержит описание и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика полупроводников» и предназначено для студентов очной формы, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»).

Тематика лабораторных работы: исследование температурной зависимости электропроводности примесных полупроводников; измерение концентрации носителей заряда в полупроводниках методом термо-ЭДС; измерение концентрации и подвижности носителей заряда методом Холла; изучение фото-ЭДС в полупроводниках; изучение эффекта Пельтье в полупроводниках.

Процесс изучения и выполнения данных лабораторных работ направлен на формирование у студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» следующих компетенций:

– способностью представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);

– способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2);

– способностью аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-2).

Процесс изучения и выполнения данных лабораторных работ направлен на формирование у студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» следующих компетенций:

– способностью представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);

– способностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2);

– готовностью использовать базовое контрольно-измерительное оборудование для метрологического обеспечения исследований и промышленного производства материалов и компонентов нано- и микросистемной техники (ПК-9).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИМЕСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

1. Цель работы

Изучить методику экспериментального определения ширины запрещенной зоны полупроводников, энергии активации примеси и концентрации носителей заряда на основе температурной зависимости электропроводности.

2. Теоретическая часть

С точки зрения статистической физики свободные носители в полупроводнике рассматриваются как идеальный газ, подчиняющийся статистике Ферми-Дирака. Функция распределения Ферми-Дирака имеет вид:

$$f(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (1.1)$$

где E_F – уровень Ферми.

Эта функция выражает вероятность того, что состояние с энергией E занято электроном при температуре T .

Рассмотрим температурную зависимость электропроводности на примере электронного полупроводника с концентрацией доноров N_D , расположенных на глубине ΔE_D ниже зоны проводимости. Выберем в качестве начала отсчета дно зоны проводимости E_C , полагая $E_C = 0$. В отсутствие вырождения из условия электронейтральности следует, что уровень Ферми определяется выражением:

$$E_F = kT \ln \left[\frac{N_C}{2N_D} + \sqrt{\left(\frac{N_C}{2N_D}\right)^2 + \frac{N_C}{\beta N_D} \exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right)} \right], \quad (1.2)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура;

N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости:

$$N_C = 2 \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2},$$

где m_n^* – эффективная масса электрона;

\hbar – приведенная постоянная Планка;

$\beta = \frac{1}{2}$ – фактор вырождения донорного уровня.

Случай низких температур:

Условию низких температур соответствует неравенство:

$$\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \geq \frac{N_C}{N_D}. \quad (1.3)$$

При этом условии из (1.2) находим:

$$E_F = \frac{\Delta E_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{\beta N_D}\right). \quad (1.4)$$

Отсюда следует, что при $T = 0$ уровень Ферми расположен посередине между дном зоны проводимости и уровнем доноров. С ростом температуры при условии $N_C < \beta N_D$ уровень E_F вновь равен $\frac{\Delta E_D}{2}$. Этому состоянию соответствует концентрация электронов:

$$n = (\beta N_C N_D)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right). \quad (1.5)$$

Проводимость полупроводника равна:

$$\sigma_n = e\mu_n n = e\mu_n (\beta N_C N_D)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right).$$

Если пренебречь температурной зависимостью подвижности и плотности состояний N_C , то:

$$\sigma_n = const \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right). \quad (1.6)$$

Случай высоких температур:

При высоких температурах справедливо неравенство:

$$\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}\right) \leq \frac{N_C}{N_D}.$$

Этому условию соответствует положение уровня E_F

$$E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (1.7)$$

и концентрация электронов:

$$n = N_D.$$

Последнее условие означает, что все доноры ионизованы, и проводимость не зависит от температуры. Это состояние будет сохраняться до тех пор, пока температура не достигнет значения, при котором начнется переход электронов из валентной зоны. Когда концентрация электронно-дырочных пар будет больше N_D , уровень Ферми будет определяться выражением для собственного полупроводника:

$$E_F = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right), \quad (1.8)$$

а концентрация электронов:

$$n = n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right), \quad (1.9)$$

где ΔE_g – ширина запрещенной зоны;

m_p^* – эффективная масса дырок;

N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне:

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p^* kT}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2}.$$

Таким образом, при высоких температурах проводимость определяется:

$$\sigma_i = n_i e (\mu_n + \mu_p) = e (\mu_n + \mu_p) (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right). \quad (1.10)$$

Пренебрегая слабой температурной зависимостью подвижностей и плотностей состояний, получим:

$$\sigma_i = const \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right). \quad (1.11)$$

Логарифмируя выражения (1.6) и (1.11), получим:

$$\ln \sigma_n = \text{const} - \frac{\Delta E_D}{2kT}, \quad (1.12)$$

$$\ln \sigma_i = \text{const} - \frac{\Delta E_g}{2kT}. \quad (1.13)$$

Следовательно, зависимости $\ln \sigma_n \approx \frac{1}{T}$ и $\ln \sigma_i \approx \frac{1}{T}$ есть прямые линии с наклонами, которые определяют энергию активации доноров (уравнение (1.12)) и ширину запрещенной зоны (уравнение (1.13)). Из (1.12) и (1.13) находим:

$$\Delta E_D = 2k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{\sigma_n(T_1)}{\sigma_n(T_2)}, \quad (1.14)$$

$$\Delta E_g = 2k \frac{T'_1 T'_2}{T'_1 - T'_2} \ln \frac{\sigma_i(T'_1)}{\sigma_i(T'_2)}, \quad (1.15)$$

Зависимость электропроводности от обратной температуры $\frac{1}{T}$ имеет вид, показанный на рисунке 1.1.

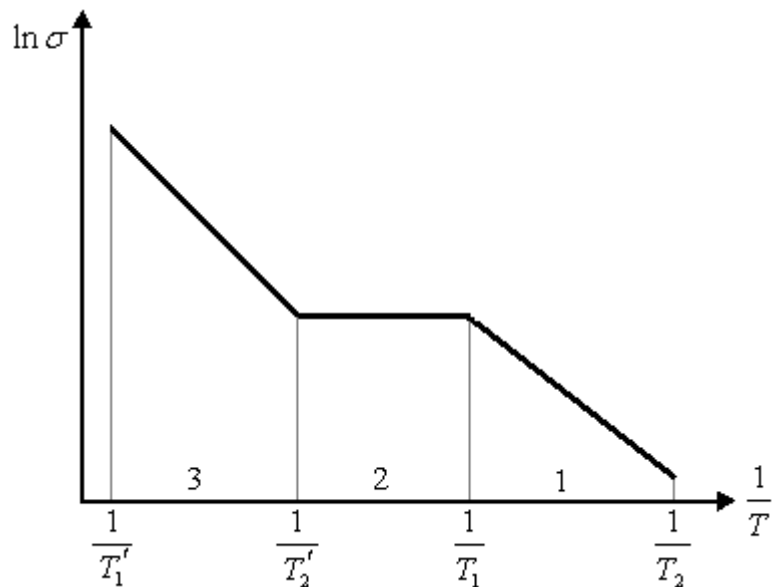


Рисунок 1.1 – Температурная зависимость электропроводности:
 1 – участок примесной проводимости; 2 – участок истощения примесей;
 3 – участок собственной проводимости

В (1.14) и (1.15) температуры T_1 , T_2 и T_1' , T_2' соответствуют двум произвольным (например, крайним) точкам температурного диапазона измерения электропроводности, как показано на рисунке 1.1.

3. Экспериментальная установка

Внешний вид и схема экспериментальной установки *3B Scientific Physics* показаны на рисунке 1.2. Кристалл полупроводника помещается в печь, которая питается от сети через автотрансформатор.



Термокамера

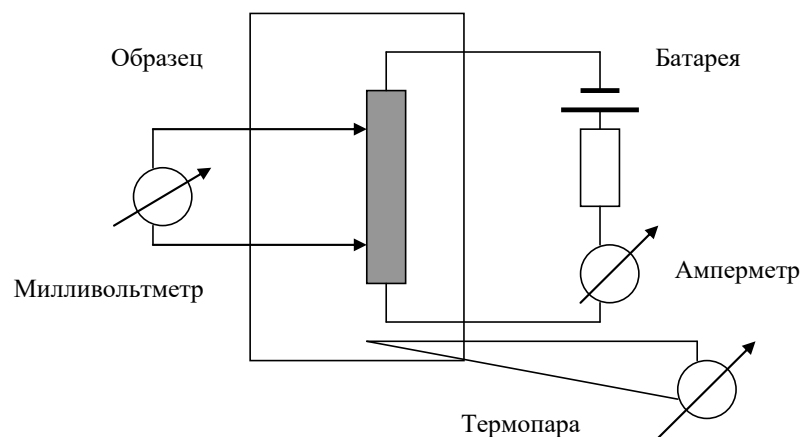


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема установки

Через образец (рисунок 1.3) размером 20 x 10 x 1 мм от батареи пропускается ток I . При этом на образце появляется разность потенциалов U . Следовательно, проводимость равна

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{S}, \quad (1.16)$$

где S – площадь поперечного сечения образца;
 l – длина образца.

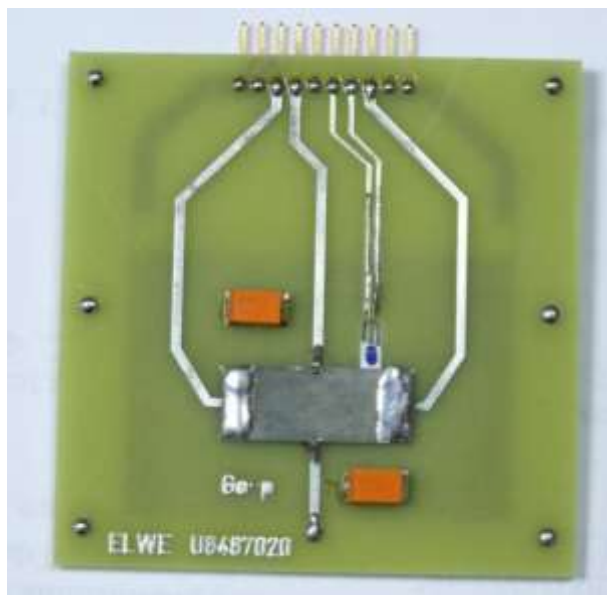


Рисунок 1.3 – Внешний вид исследуемого образца

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Включить блок U3300 в сеть и установить на нем напряжение 9 В, при этом должна загореться индикация на панели управления.
2. Нажать кнопку I_p и ручкой I_k установить измерительный ток в пределах 5 – 20 мА.
3. Нажать кнопку T_p и записать температуру образца.

4. Нажать кнопку U_H и удерживать её в течении 2 с, пока не загорится лампочка U_p . Записать падение напряжения на образце.

5. Ручкой OFF-170 С установить нагрев образца и, дождавшись повышения температуры на 5 градусов, повторить п.п. 3 – 4.

6. Измерения температуры проводить до 120 °С через 5 °С.

5. Задание на работу

1. Снять и построить зависимость электропроводности от температуры – $\sigma(T)$.

2. Построить теоретическую и экспериментальную зависимости $\ln\sigma\left(\frac{1}{T}\right)$ (на одном графике).

3. Из построенных зависимостей определить энергию активации примеси.

4. Из построенных зависимостей определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

5. Построить зависимости $n(T)$ и $\ln n\left(\frac{1}{T}\right)$ для участков примесной и собственной проводимостей.

6. Построить теоретическую и экспериментальную зависимости подвижности носителей заряда от температуры (на одном графике).

7. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Каков энергетический спектр электронов в полупроводнике?

2. Что такое эффективная плотность состояний?

3. Что характеризует уровень Ферми?

4. Каков физический смысл условия $n = N_D$ в электронном полупроводнике?

5. Изобразить графически температурную зависимость уровня Ферми в электронном, дырочном и собственном полупроводнике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ТЕРМО-ЭДС»

1. Цель работы

Изучить зависимость термо-ЭДС полупроводников от температуры и методику определения концентрации основных носителей.

2. Теоретическая часть

При наличии градиента температуры в однородном кристалле полупроводника возникают соответствующие ему градиенты концентрации свободных носителей и их средней энергии. В разомкнутой цепи в стационарном состоянии плотность тока во всех точках полупроводника равна нулю, что возможно только в случае возникновения ЭДС, компенсирующей поток носителей. Возникающая при этом электродвижущая сила называется термо-ЭДС.

Рассмотрение термоэлектрических явлений теоретически возможно на основе кинетического уравнения Больцмана. В общем случае термо-ЭДС зависит от механизма рассеяния носителей. В атомном полупроводнике при рассеянии на акустических фононах плотность тока в соответствии с кинетической теорией равна:

$$j = n\mu_n \left\{ \nabla_r (E_F - e\varphi) + \left(2k - \frac{E_F}{T} \right) \nabla_r T \right\} + p\mu_p \left\{ \nabla_r (E_F - e\varphi) - \left(2k - \frac{E_F + \Delta E_g}{T} \right) \nabla_r T \right\}, \quad (2.1)$$

где n и p – концентрации электронов и дырок, соответственно;

μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок, соответственно;

E_F – уровень Ферми;

T – абсолютная температура;

ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника.

При измерении термо-ЭДС кристалл полупроводника находится между двумя металлическими электродами. Поэтому для исключения влияния контактной разности потенциалов на границе металл-полупроводник термо-ЭДС выбирается в виде:

$$\alpha = \frac{\nabla_r \left(\varphi - \frac{E_F}{e} \right)}{\nabla_r T}. \quad (2.2)$$

Из уравнений (2.1) и (2.2) при условии равенства нулю плотности тока получаем:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \frac{1}{\sigma} \left\{ \sigma_n \left(2 - \frac{E_F}{kT} \right) - \sigma_p \left(2 - \frac{E_F + \Delta E_g}{kT} \right) \right\}, \quad (2.3)$$

где $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$;

$$\sigma_n = en\mu_n;$$

$$\sigma_p = ep\mu_p.$$

В полупроводнике с одним типом носителей, например, когда $n \gg p$ (электронный полупроводник):

$$\alpha_n = -\frac{k}{e} \left(2 - \frac{E_F}{kT} \right). \quad (2.4)$$

В дырочном полупроводнике:

$$\alpha_p = \frac{k}{e} \left(2 - \frac{E_F + \Delta E_g}{kT} \right). \quad (2.5)$$

Из формул (2.4) и (2.5) следует, что в зависимости от типа носителей термо-ЭДС имеют противоположные знаки. Таким образом, по знаку термо-ЭДС определяется тип основных носителей.

В невырожденных полупроводниках концентрация носителей находится из выражений:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right), \quad (2.6)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{\Delta E_g - E_F}{kT}\right). \quad (2.7)$$

Из формул (2.4) – (2.7) определим зависимости концентраций от величины термо-ЭДС:

$$n = N_C \exp\left[-\left(2 + \frac{\alpha_n e}{k}\right)\right], \quad (2.8)$$

$$p = N_V \exp\left[-\left(2 + \frac{\alpha_p e}{k}\right)\right], \quad (2.9)$$

где N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника:

$$N_C = 2 \left(\frac{m_n^* k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2};$$

где N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне полупроводника:

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p^* k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2};$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – приведенная постоянная Планка;

m_n^* и m_p^* – эффективные массы электронов и дырок, соответственно:

$$m_n^* = 1,08 m_0;$$

$$m_p^* = 0,56 m_0.$$

Формулы (2.8) и (2.9) выражают температурные зависимости концентраций электронов и дырок в n - и p -полупроводнике, соответственно.

Рассмотрим такую зависимость в n -полупроводнике. Экспериментально определяется обычно не дифференциальная, а интегральная термо-ЭДС:

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{\partial U}{\partial T}. \quad (2.10)$$

3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рисунке 2.1. Она состоит из нагревательного элемента 1. Ток в нагревательном элементе регулируется источником питания. Образец полупроводника 2 в форме цилиндра зажимается между стальными электродами 3. В верхнем электроде расположен нагревательный элемент 1. Нижний электрод охлаждается. Температура электродов измеряется термопарами (4) T_1 и T_2 . Термо-ЭДС, возникающая в полупроводнике, подается на вольтметр 5.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомьтесь с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

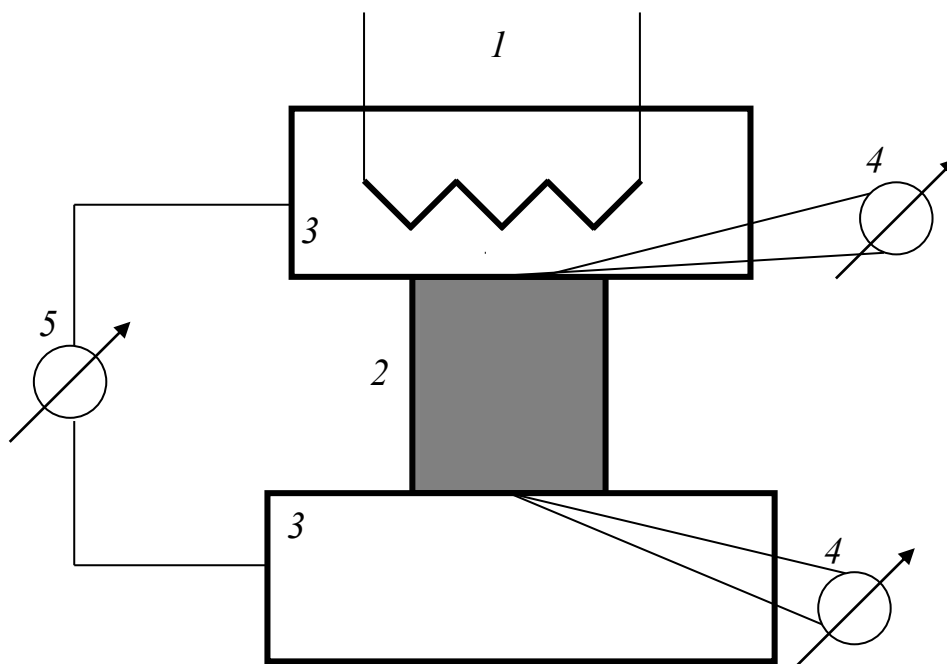


Рисунок 2.1 – Схема измерительной установки

Порядок работы:

1. Получить у преподавателя исследуемый образец полупроводника.
2. Включить нагревательный элемент и приступить к измерению показаний. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

T_1	T_2	ΔT	ΔU	α

3. По полученным результатам выполнить расчеты в соответствии с заданием на работу.

4. Нагрев образца полупроводника проводить до 80 °С, данные записывать через каждые 5 °С.

5. Задание на работу

1. Снять и построить температурную зависимость падения напряжения в образце полупроводника.
2. Рассчитать и построить температурную зависимость термо-ЭДС.
3. По знаку термо-ЭДС определить тип основных носителей заряда в полупроводнике.
4. Рассчитать и построить температурную зависимость концентрации основных носителей заряда в полупроводнике.
5. Сделать выводы по результатам выполненной работы.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить механизм появления термо-ЭДС в полупроводнике.
2. Что такое дифференциальная термо-ЭДС?
3. Что такое интегральная термо-ЭДС?
4. Какие параметры полупроводника определяют термо-ЭДС?
5. Объяснить принцип работы измерительной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА МЕТОДОМ ХОЛЛА»

1. Цель работы

Изучить метод измерения концентрации и подвижности полупроводников с помощью эффекта Холла.

2. Теоретическая часть

На электрический заряд, двигающийся со скоростью V в магнитном поле H действует сила Лоренца $F = q\mu[\bar{V}H]$, направление которой определяется вектором $[\bar{V}H]$. Если векторы \bar{V} и \bar{H} взаимно перпендикулярны, то в результате действия силы Лоренца появляется составляющая скорости электрического заряда, перпендикулярная векторам \bar{V} и \bar{H} . В полупроводниковом кристалле, помещенном во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, под действием силы Лоренца происходит пространственное перераспределение зарядов (рисунок 3.1). Если электрическое поле направлено по оси y ($-\bar{E}_y$), магнитное поле – по оси z ($-\bar{B}_z$), то за счет перераспределения зарядов на гранях кристалла появится дополнительная ЭДС E_x . Этот эффект назван эффектом Холла, а соответствующая ЭДС E_x названа ЭДС Холла.

В соответствии с теорией гальваномагнитных явлений плотность тока, протекающего в полупроводнике при условиях, показанных на рисунке 3.1, равна:

$$j = q(n\mu_n + p\mu_p) + rq(n\mu_n^2 + p\mu_p^2)(\bar{B}\bar{E}). \quad (3.1)$$

Если ток направлен по оси x , магнитное поле по оси y , то, разлагая ток на составляющие и удерживая только члены первого порядка, найдем составляющую E_x , или ЭДС Холла:

$$\bar{E}_x = \frac{r}{q} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} j\bar{H} = R_j\bar{B}. \quad (3.2)$$

Коэффициент Холла R_x вычисляется как:

$$R_x = \frac{r}{q} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}, \quad (3.3)$$

где p и n – концентрации дырок и электронов;

μ_p и μ_n – подвижности дырок и электронов;

r – постоянная, определяемая механизмом рассеяния носителей. В частности, в атомной решетке $r = 1,17$; в ионной решетке при температуре выше дебаевской $r = 1,11$; при рассеянии на ионах примеси $r = 1,93$.

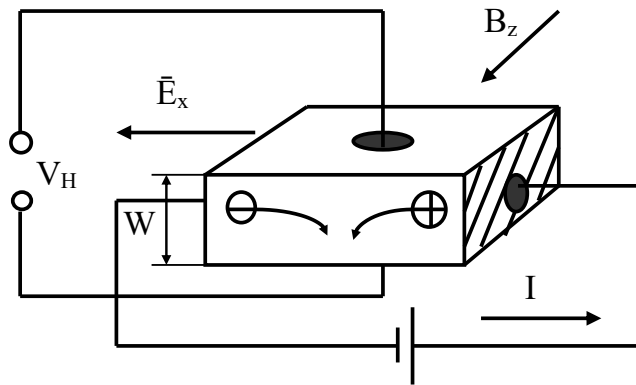


Рисунок 3.1 – Схема для исследования эффекта Холла

Из выражения (3.2) следует, что ЭДС Холла будет больше в примесном полупроводнике с одним типом проводимости, например при $n \gg p$ или $p \gg n$, и меньше в собственном полупроводнике.

Из формулы (3.3) для электронного полупроводника ($n \gg p$) получаем:

$$R_n = -r \frac{1}{nq}. \quad (3.4)$$

Для дырочного:

$$R_p = r \frac{1}{pq}. \quad (3.5)$$

Если формулы (3.4) и (3.5) умножить и разделить на значения подвижностей электронов и дырок, соответственно, то получим очень важные практические соотношения:

$$\text{Из (3.4): } R_n = -r \frac{\mu_n}{\sigma_n} \quad \text{или} \quad \mu_n = \frac{1}{r} \sigma_n R_n. \quad (3.6)$$

$$\text{Из (3.5): } R_p = r \frac{\mu_p}{\sigma_p} \quad \text{или} \quad \mu_p = \frac{1}{r} \sigma_p R_p. \quad (3.7)$$

Таким образом, из формул (3.4) – (3.7) следует, что, определив экспериментально коэффициент Холла R_n или R_p можно всегда рассчитать концентрацию основных носителей и их подвижность.

На практике обычно определяется не E_x , а разность потенциалов $U_x = E_x a$, и не плотность тока j , а ток $J = jad$, где a – ширина; d – толщина кристалла.

Учитывая это, можно записать:

$$U_x = R_x \frac{BJ}{d}. \quad (3.8)$$

Если U_x измерять в вольтах, H – в (А/м), J – в амперах, d – в метрах, то:

$$R_x = \frac{U_x d}{JB} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кулон}} \right]. \quad (3.9)$$

Тип носителей в полупроводнике определяется по знаку ЭДС Холла (формулы (3.6) и (3.7)).

Используя соотношения (3.6), (3.7) и (3.8) и полагая $r \cong 1$, найдем концентрации носителей:

$$n = \frac{BJ}{qdU_x} \quad \text{или} \quad p = \frac{BJ}{qdU_x}. \quad (3.10)$$

Схема образца для измерений концентрации и подвижности носителей показана на рисунке 3.2. Для определения подвижностей вначале определяется разность потенциалов между контактами 3 и 4, которая возникает в результате протекания тока между контактами 1 и 5:

$$U_p = J \frac{l}{\sigma ad}, \quad \text{отсюда} \quad \sigma = \frac{J}{U_p} \frac{l}{ad}. \quad (3.11)$$

При температурных измерениях необходимо учитывать, тот факт, что подвижность носителей заряда зависит от температуры. Эта зависимость имеет вид

$$\frac{1}{\mu} = \alpha T^{-3/2} + b T^{3/2}. \quad (3.12)$$

И эту зависимость необходимо учитывать при расчетах.

Для измерения эффекта Холла классическим методом необходимо изготовление образцов правильной геометрической формы, что является достаточно трудоемким и не всегда приемлемым процессом. Для измерения на тонких образцах и эпитаксиальных структурах используют метод Ван дер Пау (см. рисунок 3.2).

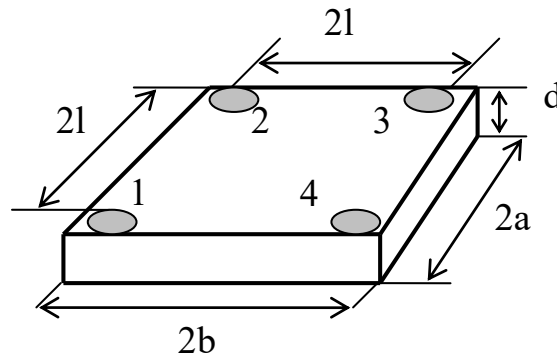


Рисунок 3.2 – Размещение зондов в планарном варианте метода Ван дер Пау

При определении постоянной Холла ток J подводится через зонды 1 и 3. Между другой парой контактов 2 и 4 измеряют падение напряжения. Для этой конфигурации контактов постоянная Холла равна:

$$R_{x13,24} = \frac{\Delta U_{24} d}{J_{13} B_z k}, \quad (3.13)$$

где ΔU_{24} – изменение напряжения между зондами 2 и 4 после включения магнитного поля; k – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию образца (см. таблицу 3.1). Затем повторяют измерения, изменив назначение контактов: через 2 и 4 подают ток J , а с 1 и 3 снимают разность напряжений ΔU . По этим данным определяют $R_{x13,24}$ и $R_{x24,13}$. Истинная постоянная Холла находится как среднее арифметическое $R_{x13,24}$ и $R_{x24,13}$:

$$R_x = \frac{R_{x13,24} + R_{x24,13}}{2}, \quad (3.14)$$

Для точного измерения электропроводности и постоянной Холла при каждом значении тока необходимо сделать четыре измерения σ и восемь для R_x , а полученные данные усреднить.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов k для случая размещения зондов, как на рисунке 3.2 (прямоугольный образец)

b/l	a/l							
	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
1,0	1	1	1	1	1	1	1	1
1,6	1	0,86	0,7	0,61	0,57	0,555	0,545	0,54
2,0	1	0,83	0,61	0,5	0,43	0,4	0,389	0,39
2,8	1	0,81	0,555	0,4	0,32	0,27	0,24	0,225

3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рисунок 3.3) состоит из электромагнита с размещенным на нем регистрационным устройством, блоков питания регистрационного устройства и электромагнита и измерителя магнитной индукции.



Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка 3V Scientific Physics 1009934

Исследуемый образец (рисунок 3.4) находится между полюсами электромагнита. Через образец пропускается постоянный ток, приблизительно $5 - 10$ мА. Размеры образца $20 \times 10 \times 1$ мм. Измеряемое напряжение с контактов 3 и 4 или 2 и 3 контролируется индикатором. Ток в образце регулируется потенциометром. Температура образца регулируется с помощью потенциометра. Величина магнитной индукции ре-

гулируется с помощью источника постоянного тока и контролируется с помощью измерителя, зонд которого находится между полюсами электромагнита.

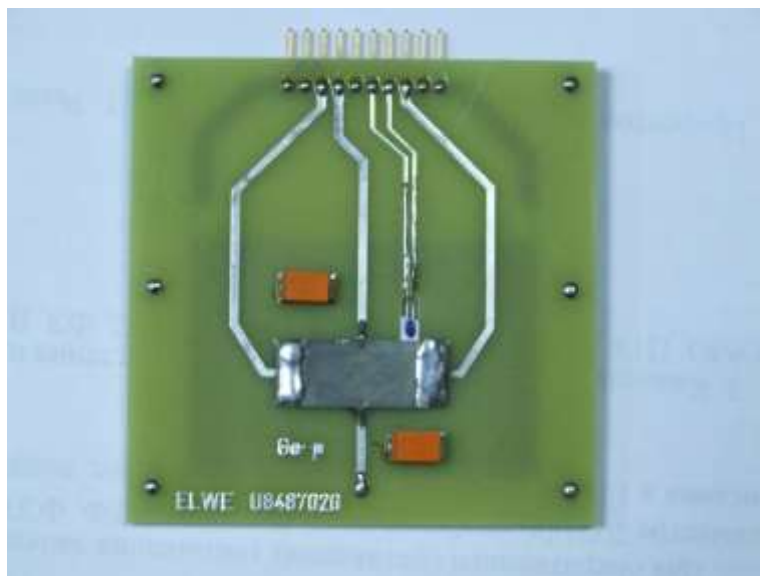


Рисунок 3.4 – Схема образца для измерения концентрации и подвижности носителей методом эффекта Холла

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо внимательно ознакомиться с настоящим описанием лабораторной работы и ответить на контрольные вопросы.

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Подключите блоки питания к сети. Переключатель напряжения установите на 9 В, при этом должна загореться индикаторная панель регистрирующего устройства. Через образец пропускается ток, и производятся измерения напряжений на контактах 2 – 3 (ЭДС Холла) и 3 – 4 для определения электропроводности. Затем устанавливаете ток питания электромагнита до достижения в зазоре магнитной индукции $100 - 250 \text{ мТ}$ и вновь повторяете измерения. Далее регулятором напряжения уста-

навливааете температуру образца через 5 градусов до 120 °С, Повторяя измерения для каждой температуры.

5. Задание на работу

1. Провести измерение R_x и σ в образцах из германия в диапазоне температур от комнатной до 120 °С.
2. Рассчитать подвижность и концентрацию носителей в полупроводнике, построить графики.
3. По знаку ЭДС Холла определить тип проводимости полупроводников.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое эффект Холла?
2. Как определить тип носителей в полупроводнике?
3. Объясните вид температурных зависимостей коэффициента Холла, концентрации носителей заряда, подвижности в легированном полупроводнике.
4. Какие параметры полупроводника определяются с помощью эффекта Холла?
5. Объяснить на принципиальной схеме работу измерительной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«ИЗУЧЕНИЕ ФОТО-ЭДС В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»

1. Цель работы

Изучить принцип работы кремниевого солнечного элемента и определить его основные параметры.

2. Теоретическая часть

Полупроводниковые материалы нашли широкое применение для получения электрической мощности от различных источников излучения, в том числе и солнца.

Процесс преобразования оптического излучения в электрическую энергию состоит из нескольких этапов:

1. Генерация электронно-дырочных пар фотонами при их проникновении в объём кристалла. Так как в видимой области спектра для электронно-фотонного взаимодействия в кремнии квантовый выход равен единице, то каждый фотон, поглощенный в кристалле, вызывает образование электронно-дырочной пары.

2. Диффузия электронно-дырочных пар, происходящих благодаря градиенту их концентрации, и собирание неосновных носителей p - n -переходом или рекомбинация электронно-дырочных пар, не достигающих перехода.

Для возникновения фотоэлектродвижущих сил необходимо разделение зарядов в пространстве. Особенно эффективное разделение неравновесных носителей имеет место в неоднородных полупроводниках и, в частности, в электронно-дырочных переходах.

В области p - n -перехода существует объемный заряд и объемное поле \vec{E} , направленное от n -области к p -области. Электроны и дырки, генерируемые в n -области и p -области на расстояниях, не превышающих длин диффузии L_n и L_p , будут разделены полем \vec{E} так, что неравновесные электроны будут переведены в n -область, а дырки в p -область, т.е. контактное поле способствует переходу через область объемного заряда неосновных носителей. Электронная область заряжается отрицательно, дырочная – положительно.

Дифференциальное уравнение диффузии для стационарного случая:

$$\frac{p_n - p}{\tau} + \alpha N \exp(-\alpha x) + D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = 0. \quad (4.1)$$

Первый член в уравнении учитывает рекомбинацию избыточных носителей ($p_n - p$) с временем жизни τ ; следующий член представляет собой количество генерируемых неосновных носителей, образованных N фотонами, падающими на единицу площади элемента за единицу времени, α – коэффициент поглощения материала; последний член учитывает скорость диффузии.

Если такой полупроводник включить в замкнутую цепь, то в ней потечет ток, направленный от p -области к n -области, приводящий к уничтожению избыточной концентрации электронов и дырок. Из самого механизма возникновения полей следует, что максимальная фото-ЭДС на p - n -переходе не может превзойти величину контактной разности потенциалов.

Типичная структура солнечного элемента представлена на рисунке 4.1. Для солнечного элемента рабочая точка на вольтамперной характеристике должна быть выбрана так, чтобы элемент производил возможно большую мощность.

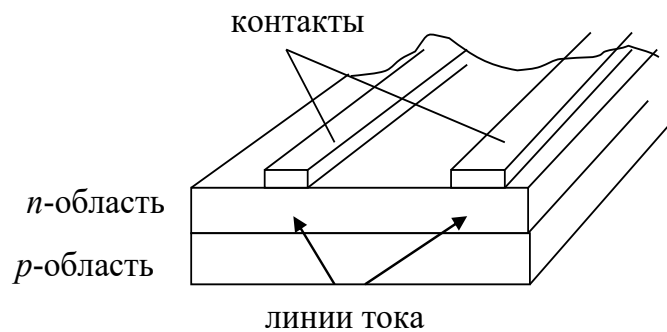


Рисунок 4.1 – Структура солнечного элемента

ВАХ элемента описывается выражением:

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right) - J_{кз}, \quad (4.2)$$

где J_0 – темновой ток (для данного элемента 10^{-6} А); V – разность потенциалов на электродах элемента (напряжение холостого хода); $J_{кз}$ – ток короткого замыкания элемента.

Из ВАХ следует, что мощность, выделяемая на элементе, равна:

$$|JV| = \left| VJ_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\beta kT}\right) - 1 \right] - VJ_{K3} \right|. \quad (4.3)$$

Из этого уравнения следует, что максимальная мощность элемента равна:

$$W_{\max} \approx \frac{kT}{e} J_{K3} (r - 1), \quad (4.4)$$

где r дается уравнением:

$$(r + 1) \exp(r) = \frac{J_{K3}}{J_0}. \quad (4.5)$$

Величина тока короткого замыкания J_{K3} определяется числом неравновесных пар, разделенных полем p - n -перехода. Отсюда:

$$J_{K3} = e\beta kI\eta, \quad (4.6)$$

где β – квантовая эффективность преобразования (число электронно-дырочных пар на один поглощенный фотон); k – коэффициент поглощения полупроводника (см^{-1}); I – интенсивность потока фотонов ($\text{см}^{-1}\text{с}^{-1}$); η – коэффициент собирания, определяющий долю носителей, дошедших до p - n -перехода.

Из уравнения следует, что спектральной характеристикой фотопреобразователя служит спектральная зависимость тока короткого замыкания (рисунок 4.2).

Основным параметром солнечных элементов служит эффективность преобразования, или коэффициент полезного действия, т.е. отношение электрической мощности, выделяемой на элементе, к мощности, падающего излучения. Это достигается высоким уровнем легирования слоев кремния с обеих сторон p - n перехода до 10^{18} см^{-3} .

3. Экспериментальная установка

На рисунке 4.3 приведена схема экспериментальной установки. Излучение от лампы через диафрагму попадает на фотоэлемент. Под фотоэлементом располагается нагревательный элемент для изучения температурной зависимости ВАХ фотоэлемента. Температура нагревательного элемента контролируется цифровым мультиметром. Для изучения эффективности солнечного элемента для различных участ-

ков спектра излучения используются фотофильтры, которые располагаются на поверхность фотоэлемента.

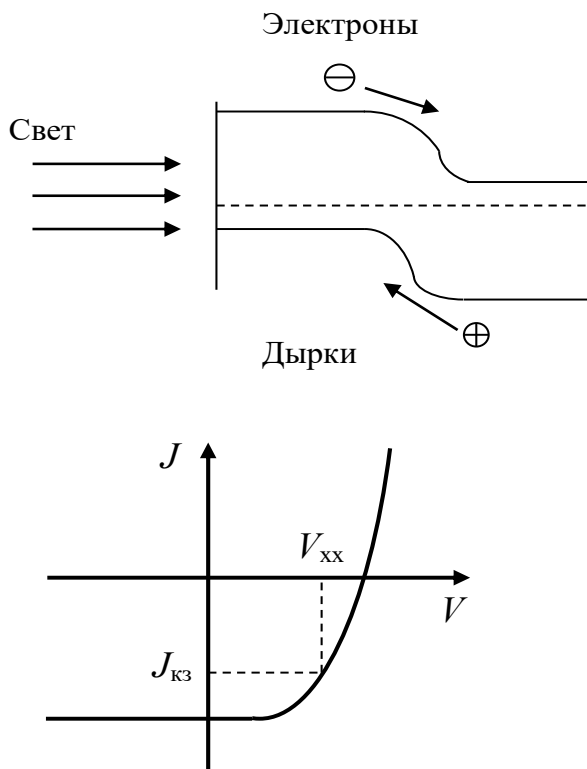


Рисунок 4.2 – Определение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода

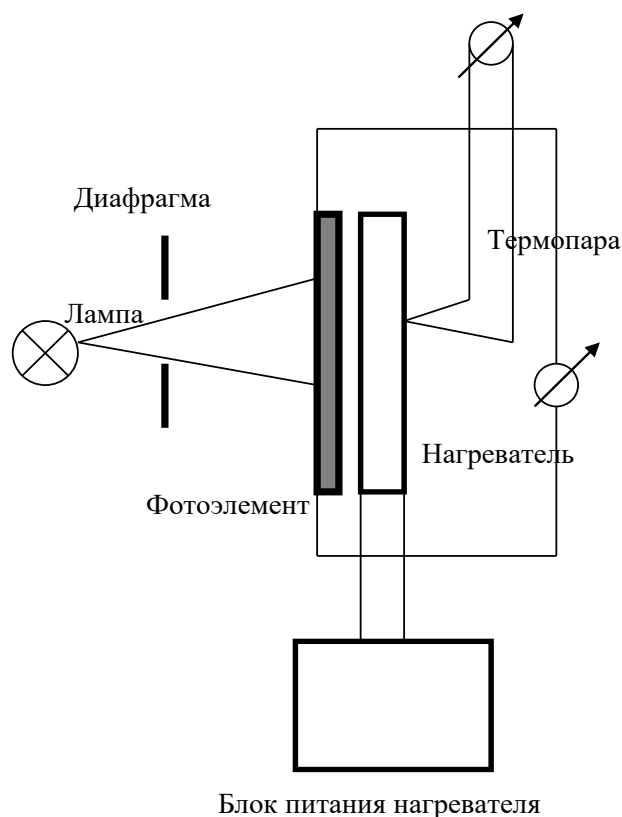


Рисунок 4.3 – Схема экспериментальной установки

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Установить на штативе осветитель и солнечный элемент. Не включая осветитель снять ВАХ солнечного элемента при изменении напряжения от 1 до -2 В с шагом $0,1$ В.

2. Установить на осветителе диафрагму «2,5 см». Включить осветитель в сеть и, изменяя высоту его положения, добиться того, чтобы пятно света не выходило за пределы элемента. При открытой диафрагме плотность светового потока на элементе составит $0,75 \text{ Вт/см}^2$. Снова снять ВАХ элемента.

3. Используя ВАХ элемента, рассчитайте мощность, отдаваемую солнечным элементом.

4. Меняя величину отверстия диафрагмы с шагом 0,5 см и повторяя операции п. 2, снять зависимость эффективности преобразования (КПД) от падающей мощности излучения осветителя (в относительных единицах).

5. Используя светофильтры, их спектральные характеристики и спектр излучения лампы, определить эффективность солнечного элемента для различных участков спектра излучения.

6. Рассчитать по формуле (4.4) максимальную мощность солнечного элемента и сравнить ее с измеренной. Объяснить полученный результат.

7. Нагреть фотоэлемент до 50°C и снова снять ВАХ элемента. Объяснить полученный результат.

5. Задание на работу

1. Построить ВАХ элемента без освещения и с освещением.

2. Построить зависимость КПД от падающей мощности излучения осветителя.

3. Определить КПД солнечного элемента для различных участков спектра излучения.

4. Сравнить теоретическую и экспериментальную максимальную мощность солнечного элемента.

5. Построить зависимость тока короткого замыкания и напряжения холостого тока от температуры.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое фото-ЭДС и причины ее возникновения в полупроводниках?

2. Принцип работы элемента и механизм разделения электронно-дырочных пар.

3. Что такое генерация и рекомбинация неосновных носителей в полупроводниках?

4. Нарисуйте наиболее вероятную зависимость КПД солнечного элемента от длины волны излучения и объясните ее основные особенности.

5. Каким образом КПД элемента связан с шириной запрещенной зоны полупроводника?

6. Объясните температурную зависимость $J_{кз}$.

7. Дополнительный материал

Таблица 4.1 – Показатель поглощения светофильтров $k(\lambda)$

λ , нм	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
УФС	0,04	2,18	4	4					
КС		3	2,0	2,0	0,22	0,06	0,008	0,008	
ИКС				3	2,0	1,6	0,26	0,14	0,06
СЗС			0,006	0,02	0,04	0,08	0,49	1,5	2
ОС			1,5	0,12	0,04	0,004	0,004	0,004	

Таблица 4.2 – Спектральная плотность излучения ламп накаливания $r(\lambda)$ при $T_{цв} = 2856$ К

λ , мкм	$r(\lambda)$, %	λ , мкм	$r(\lambda)$, %	λ , мкм	$r(\lambda)$, %	λ , мкм	$r(\lambda)$, %	λ , мкм	$r(\lambda)$, %	λ , мкм	$r(\lambda)$, %
0,40	5,1	0,56	34,5	0,72	73	0,88	97	1,25	87	1,65	56
0,42	18	0,58	39,5	0,74	78	0,90	98	1,30	83	1,70	52
0,44	10	0,60	45	0,76	82,5	0,95	99	1,35	80	1,75	49
0,46	13	0,62	50	0,78	86	1,00	100	1,40	75	1,80	47
0,48	17	0,64	54,5	0,80	89	1,05	99	1,45	71	1,85	44
0,50	21	0,66	59	0,82	91,5	1,10	97	1,50	67	1,90	42
0,52	25	0,68	64	0,84	93	1,15	94	1,55	63	1,95	40
0,54	30	0,70	68	0,86	95	1,20	90,5	1,60	59	2,00	36

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

«ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»

1. Цель работы

Изучить работу полупроводникового термопреобразователя с использованием эффектов Зеебека и Пельтье и установить взаимосвязи между коэффициентами термо-ЭДС и Пельтье.

2. Теоретическая часть

Явлением Зеебека называют возникновение термо-ЭДС в цепи, составленной из двух различных твердых тел, при наличии разности их температур. Наиболее ярко это явление проявляется в контактах полупроводниковых материалов с металлами.

Дифференциальную термо-ЭДС определяют в виде:

$$\alpha_T = \frac{dE}{dT}. \quad (5.1)$$

Если термоэлектрическая цепь составлена из последовательно соединенных полупроводников *n* и *p*-типа, то их термо-ЭДС складывается:

$$E_{12} = (\alpha_1 + \alpha_2)\Delta T = \alpha_{12}\Delta T, \quad (5.2)$$

где α_{12} – коэффициент суммарной дифференциальной термо-ЭДС.

Зависимость $\alpha_{12} = f(T)$ не имеет универсального характера и зависит от материала и интервала температур.

Эффект Пельтье – выделение или поглощение тепла на контакте двух разнородных полупроводников или полупроводника и металла при прохождении через них электрического тока. Количество выделившегося или поглощенного тепла в месте контакта пропорционально прошедшему через контакт количеству электричества:

$$Q_{II} = \pm \Pi_{12} I t, \quad (5.3)$$

где Π_{12} – коэффициент Пельтье.

В случае невырожденного полупроводника:

$$\Pi_{12} = \frac{(2+r)kT - E_F}{It} = \alpha_{12}T, \quad (5.4)$$

где T – абсолютная температура холодного контакта. В общем случае количество тепла за счет эффекта Пельтье определяется как:

$$UI = I^2R \pm \alpha_{12}TI, \quad (5.5)$$

где U – падение напряжения на термоэлементе; I – ток через элемент; R – электрическое сопротивление элемента.

Физический смысл эффекта Пельтье можно понять из энергетической диаграммы контакта металл–полупроводник (рисунок 5.1).

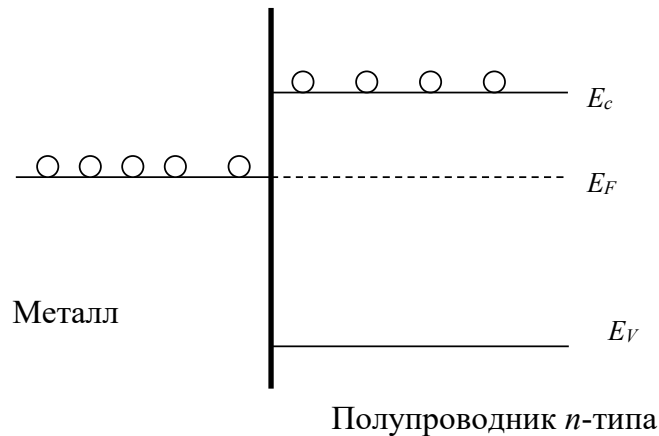


Рисунок 5.1 – Энергетическая диаграмма контакта металл–полупроводник

Рассмотрим для определенности контакт металл–полупроводник n -типа при работе выхода электронов из металла большей, чем из полупроводника $\Phi_M > \Phi_{\text{пн}}$. Причина возникновения этого термоэлектрического эффекта состоит в том, что средняя кинетическая энергия электронов, участвующих в создании электрического тока в металле и полупроводнике, различна. Как уже указывалось, в металле электроперенос осуществляется электронами вблизи поверхности Ферми. В полупроводнике n -типа ток будет переноситься электронами зоны проводимости. Энергия электронов в зоне проводимости больше, чем энергия электронов в металле на уровне Ферми, на величину $E_c - E_F$. Под действием внешнего электрического поля, направленного так, что осуществляется переход электронов из полупроводника в металл, более высокоэнергетические электроны полупроводника, перейдя в металл, будут опускаться до

уровня Ферми и отдавать при столкновениях с атомами решетки металла свою избыточную энергию. Выделяющееся при этом тепло и есть теплота Пельтье. Так как электроны приходят в тепловое равновесие в результате небольшого числа столкновений в непосредственной близости контакта, то практически вся теплота Пельтье выделяется на самом контакте. При противоположном направлении внешнего электрического тока электроны металла могут перейти в полупроводник, только преодолев энергетический барьер $E_c - E_F$. Для этого они должны получить энергию от решетки, вследствие чего металл в области контакта охлаждается.

Коэффициенты α_{12} , P_{12} и τ_T связаны между собой термодинамическими соотношениями, и поэтому достаточно определить один из них, например, α_{12} . Из кинетического уравнения Больцмана для невырожденного полупроводника с одним типом носителей получаем:

$$\alpha_n = -\frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} + t + \ln \frac{N_C}{n} \right), \quad (5.6)$$

$$\text{и } \alpha_p = \frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} + t + \ln \frac{N_V}{p} \right), \quad (5.7)$$

где t – показатель степени, определяемый механизмом рассеяния. В частности, при рассеянии на акустических колебаниях решетки $t = 1/2$, а при рассеянии на ионизированной примеси $t = 3/2$.

3. Экспериментальная установка

Для изучения работы термоэлектрического генератора и холодильника собирается схема, показанная на рисунке 5.2. Термоэлектрическая батарея на основе сплавов ($\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,4}\text{Te}_{0,1}$ и $\text{Te}_{2,87}\text{Se}_{0,125}$) собрана в моноблок из 38 чередующихся элементов с проводимостью n и p -типа. Все элементы в электрической схеме включены последовательно, а по тепловому потоку параллельно. Термоэлектрическая батарея, для охлаждения тепловыделяющих спаев, расположена на металлическом теплоотводе с развитой поверхностью. Батарея с помощью проводов соединена с источником питания. Протекающий через батарею ток контролируется с помощью амперметра.

Величина термо-ЭДС контролируется с помощью милливольтметра. Измерения температуры проводят с помощью электронного цифрового термометра.

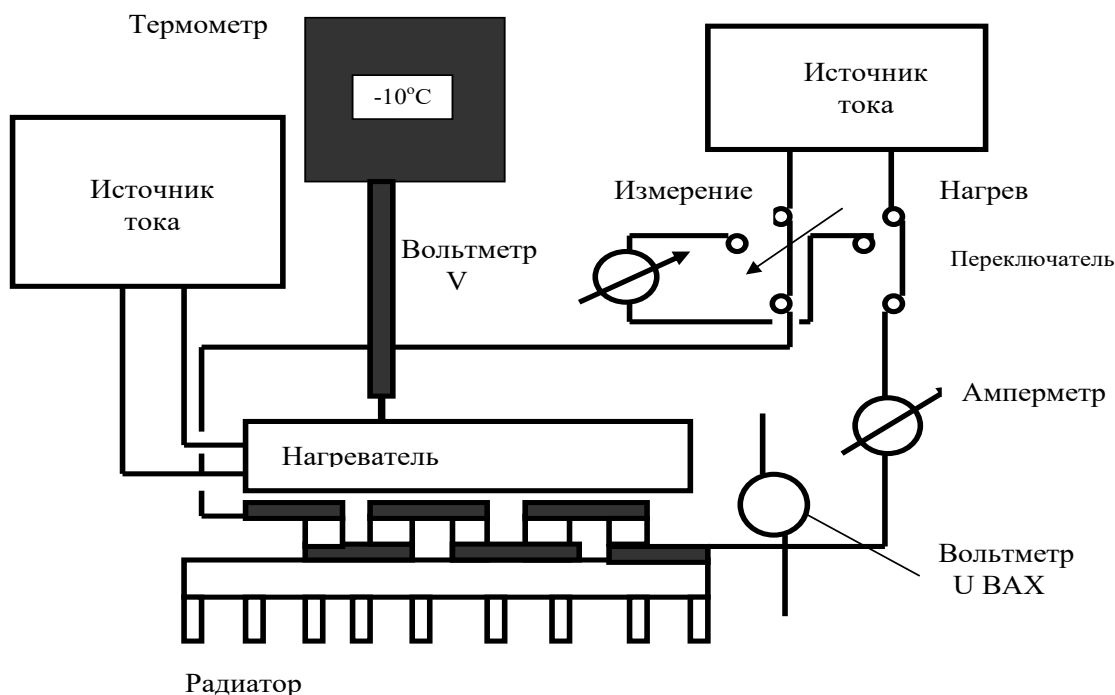


Рисунок 5.2 – Экспериментальная установка

4. Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения экспериментальной части необходимо внимательно изучить настоящее описание работы и ответить на контрольные вопросы.

Ознакомиться с экспериментальной установкой на принципиальной схеме и на макете.

Порядок работы:

1. Выключатель на радиаторе поставить в положение «Изм», на вольтметре установить предел измерений.

2. Блок нагревателя разместить на тетради или книги и подключить к источнику питания. Температуру нагревателя контролировать цифровым термометром.

3. При достижении на нагревателе температуры 30°C поместить его на поверхность термоэлемента и через 30 секунд замерить величину термо-ЭДС. Снять нагреватель с элемента и при достижении $T = 40^{\circ}\text{C}$, вновь провести измерения термо-ЭДС

и таким же образом провести измерения при 50°C . Затем отключить нагреватель от источника питания.

4. Построить зависимости $E_T = f(T)$ и $\alpha_{12} = f(T)$.

5. Переключатель на радиаторе поставить в положение «Нагрев». Сменить полярность выводов на вольтметре. Установить по амперметру минимальное значение тока и прогреть термоэлемент в течении 2 минут. По вольтметру U ВАХ зафиксировать падение напряжения на термоэлементе.

6. Переключатель на радиаторе перевести в положение «Изм» и зарегистрировать максимальное показание вольтметра V. Вновь перевести переключатель в положение «Нагр» и, установив новое значение тока, через 2 минуты повторить предыдущую операцию. Повторив измерения несколько раз и используя зависимость $E_T = f(T)$, построить зависимость $T = f(I)$.

5. Задание на работу

1. Построить зависимости $E_T = f(T)$ и $\alpha_{12} = f(T)$.

2. Построить зависимость $T = f(I)$.

3. Для максимальной хладопроизводительности найти по приведенным формулам коэффициент и теплоту Пельтье.

4. Построить ВАХ термоэлемента (прямую ветвь).

5. Построить на одном графике зависимость теплоты Пельтье и теплоты Джоуля-Ленца от силы тока и определить режим максимальной хладопроизводительности.

6. Контрольные вопросы

1. Каковы механизмы эффектов Зеебека и Пельтье?

2. Почему в полупроводниках эффекты проявляются в большей степени, чем в металлах?

3. Какова связь между коэффициентом Пельтье и термо-ЭДС?

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в электронном виде согласно требованиям ОС ТУСУР 01-2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления».

2. Содержание отчета

Обязательными элементами отчета являются:

1) титульный лист, содержащий название вуза, кафедры, название и номер лабораторной работы, наименование дисциплины, по которой выполнена работа, № группы и ФИО студентов, входящих в подгруппу, дату исполнения, ФИО преподавателя, год;

2) основная часть, к которой относятся цель работы, лабораторное задание, полученные по работе результаты, оформляемые в табличном, графическом или другом виде, ответы на контрольные вопросы;

3) выводы по результатам работы, которые являются важной частью отчета и подлежат защите.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Основная литература

1. Физика конденсированного состояния: учебное пособие для вузов / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 294 с.

2. Дополнительная литература

1. Смирнов С. В. Физика твердого тела: учебное пособие. – Томск, ТГУ, 2003. – 276 с.

2. Физика твердого тела. Под редакцией Верещагина И. К. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с.

3. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н. Твердотельная электроника. – Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с.

4. Чупрунов Е. В. Кристаллография: Учебник для вузов / Е. В. Чупрунов, А. Ф. Хохлов, М. А. Фадеев. – М.: Физматлит, 2000. – 496 с.

5. Гуртов В. А., Осауленко Р. Н. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие / ред.: Л. А. Алешина. – М.: Техносфера, 2007. – 518 с.

6. Павлов П. В. Физика твердого тела: Учебник для вузов / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2000. – 496 с.