

## 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  $\Delta E_D$  ниже зоны проводимости. Выберем в качестве начала отсчета дно зоны проводимости  $E_C$ , полагая  $E_C = 0$ . В отсутствии 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  $\Delta E_g$  – 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.

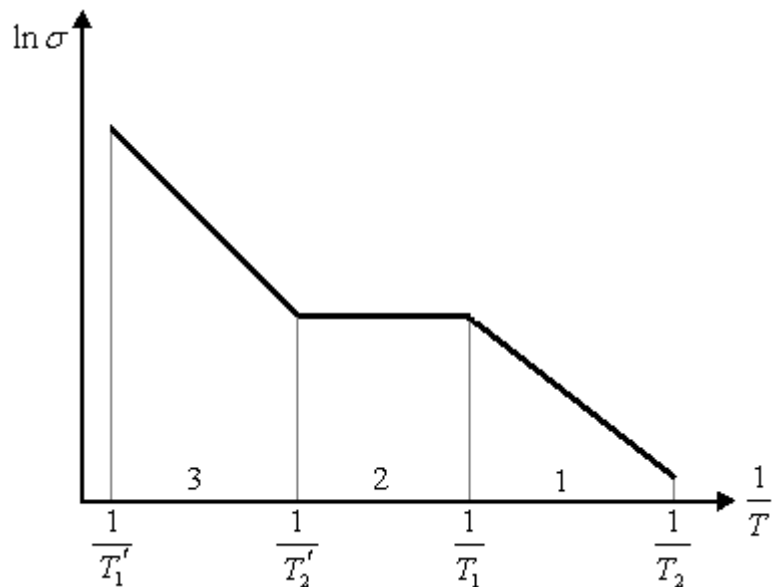


Рисунок 1.1 – Температурная зависимость электропроводности:  
 1 – участок примесной проводимости; 2 – участок истощения примесей;  
 3 – участок собственной проводимости

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

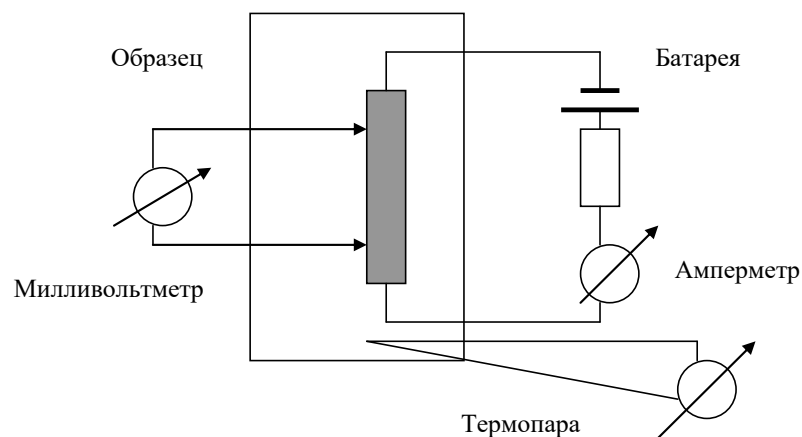


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема установки

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.

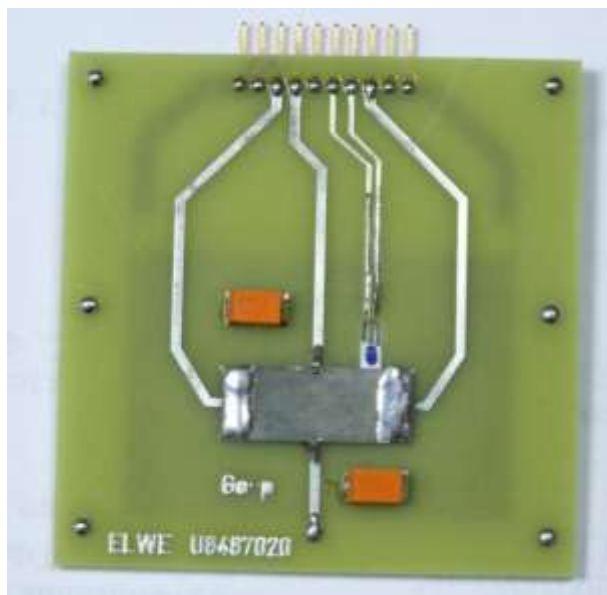


Рисунок 1.3 – Внешний вид исследуемого образца

#### **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;

$\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок, соответственно;

$E_F$  – уровень Ферми;

$T$  – абсолютная температура;

$\Delta E_g$  – 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.

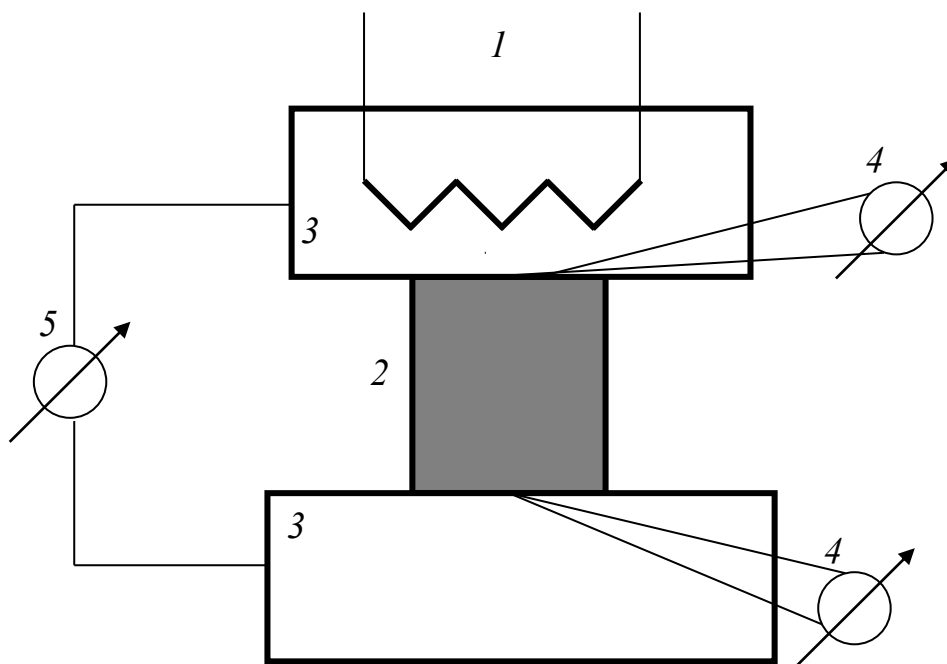


Рисунок 2.1 – Схема измерительной установки

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

$T_1$	$T_2$	$\Delta T$	$\Delta U$	$\alpha$

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  $F = q\mu[\vec{V}H]$ , направление которой определяется вектором  $[\vec{V}H]$ . Если векторы  $\vec{V}$  и  $\vec{H}$  взаимно перпендикулярны, то в результате действия силы Лоренца появляется составляющая скорости электрического заряда, перпендикулярная векторам  $\vec{V}$  и  $\vec{H}$ . 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  $y$  ( $-\vec{E}_y$ ), магнитное поле – по оси  $z$  ( $-\vec{B}_z$ ), 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:

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

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:

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

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;

$\mu_p$  и  $\mu_n$  – 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  $r = 1,93$ .

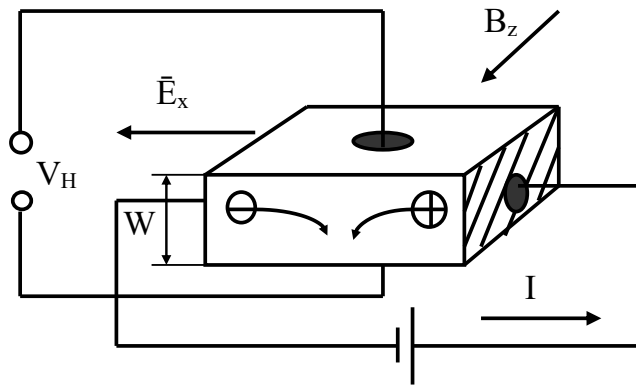


Рисунок 3.1 – Схема для исследования эффекта Холла

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).

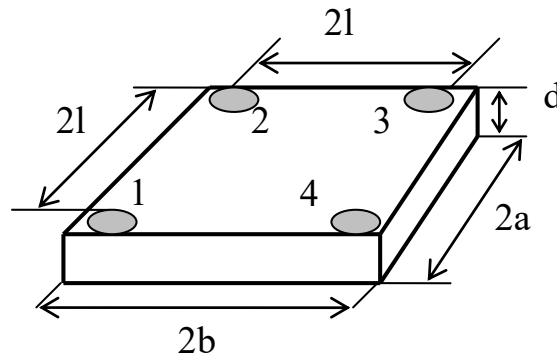


Рисунок 3.2 – Размещение зондов в планарном варианте метода Ван дер Пау

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  $\Delta U_{24}$  – 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  $\Delta U$ . 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  $\sigma$  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.

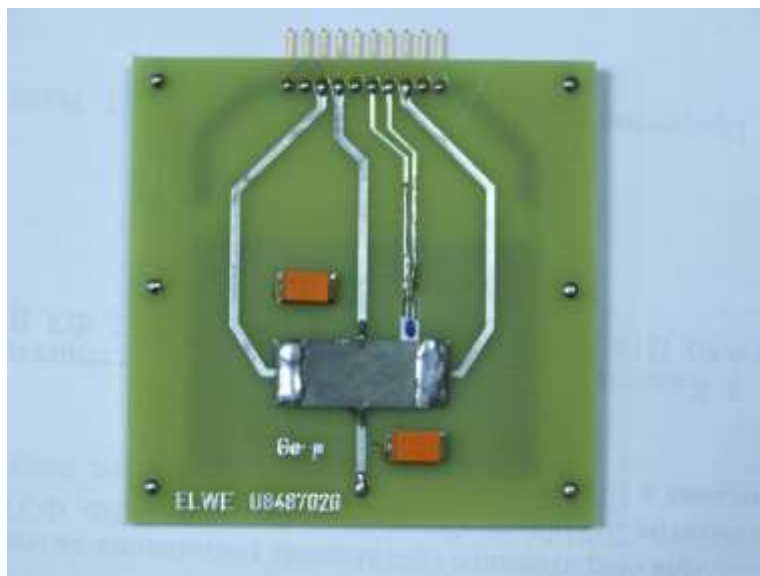


Рисунок 3.4 – Схема образца для измерения концентрации и подвижности носителей методом эффекта Холла

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  $\sigma$  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.