

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель работы:

исследование электрофизических характеристик полупроводников методом эффекта Холла.

2.1 Теоретические сведения о полупроводниках

Если поместить полупроводник, через который протекает электрический или тепловой поток в магнитное поле, то в нём возникают гальваномагнитные и термомагнитные явления.

Гальваномагнитные явления возникают в полупроводниках при одновременном воздействии электрического и магнитного полей, а термомагнитные явления – при одновременном воздействии магнитного и теплового полей. К гальваномагнитным явлениям относятся эффекты Холла, Эттингсгаузена, а к термомагнитным – эффекты Риги-Ледюка, Нернста-Эттингсгаузена.

В настоящей работе рассматривается *эффект Холла*, который используется для исследования электрофизических свойств полупроводников. Данный эффект носит имя американского физика Эдвина Холла, который впервые наблюдал его в 1879 году в тонких пластинах золота.

Суть эффекта Холла заключается в следующем. При пропускании электрического тока вдоль полупроводника, помещённого в магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно направлению электрического тока, возникает поперечная разность потенциалов, называемая ЭДС Холла.

Рассмотрим полупроводник, например, *n*-типа электропроводности, имеющий форму параллелепипеда. Пусть электрический ток движется вдоль оси *OX*. Перпендикулярно направлению электрического тока вдоль оси *OZ* направлено магнитное поле. Под действием силы, действующей со стороны магнитного поля, электроны будут отклоняться на боковую грань полупроводника. Таким образом, на одной из граней полупроводника будут накапливаться электроны, в результате чего она зарядится отрицательно, а на противоположной грани возникает нескомпенсированный положительный заряд. Это приведёт к образованию поперечного электрического поля напряжённостью E_y , направленного вдоль оси *OY* (рис. 1). Если электрический ток переносится дырками, то поперечное электрическое поле

будет противоположно направлению полю Холла для полупроводника n -типа электропроводности.

На заряд q , который движется в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует сила Лоренца $\vec{F}_л$, равная $\vec{F}_л = q[\vec{v}_x \times \vec{B}]$, где \vec{v}_x – скорость движения носителей заряда, направленных вдоль оси OX . Так как угол между векторами \vec{v}_x и \vec{B} равен 90° , то согласно правилу векторного произведения, уравнение для силы Лоренца преобразуется к виду $F_л = qv_x B$.

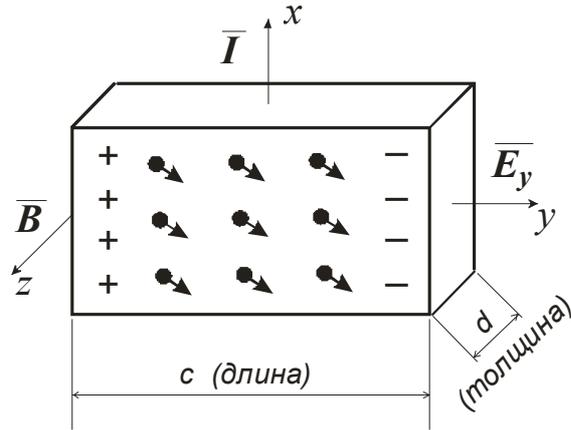


Рис. 1. Возникновение эффекта Холла

Под действием силы Лоренца движущиеся электроны отклоняются на одну из боковых граней полупроводника. Процесс накопления носителей заряда продолжается до тех пор, пока сила Лоренца не уравновесится силой, действующей со стороны поперечного электрического поля. Сила $\vec{F}_{эп}$, действующая со стороны электрического поля на заряд q , равна $\vec{F}_{эп} = q\vec{E}_y$. Она направлена в сторону, противоположную направлению силы Лоренца. В состоянии стационарного равновесия сила Лоренца равна силе, действующей со стороны поперечного электрического поля, $F_л = \vec{F}_{эп}$, т.е. $qv_x B = qE_y$. Поделив правую и левую части этого уравнения на величину заряда электрона (q), получим:

$$E_y = v_x B \quad (1)$$

При исследовании электрофизических свойств полупроводников методом эффекта Холла измеряют не величину напряжённости поперечного электрического поля E_y , а разность потенциалов, т.е. ЭДС Холла, ($V_{хол}$). Связь между этими величинами записывается в виде:

$$E_y = \frac{V_{хол}}{c}. \quad (2)$$

Скорость электронов v_x выразим через величину силы тока I :

$$I = q \cdot n \cdot v_x \cdot c \cdot d,$$

Отсюда получим

$$v_x = \frac{I}{q \cdot n \cdot c \cdot d}, \quad (3)$$

где n – концентрация свободных электронов; c и d – поперечные размеры полупроводника. Подставим уравнения (2) и (3) в формулу (1), получим

$$\frac{V_{ХОЛ}}{c} = \frac{I \cdot B}{q \cdot n \cdot c \cdot d}.$$

Умножим правую и левую части этого уравнения на величину c :

$$V_{ХОЛ} = \frac{I \cdot B}{q \cdot n \cdot d}. \quad (4)$$

Введём обозначения $R_x = \frac{1}{qn}$. С учётом такого обозначения формула

(4) запишется в виде $V_{ХОЛ} = \frac{R_x \cdot I \cdot B}{d}$. Отсюда для R_x имеем

$$R_x = \frac{V_{ХОЛ} \cdot d}{I \cdot B}. \quad (5)$$

Здесь R_x – постоянная Холла. Она связывает ЭДС Холла, силу тока и индукцию магнитного поля B . Зная величину постоянной Холла R_x , можно определить концентрацию свободных носителей заряда:

$$n(p) = \frac{1}{qR_x}, \quad (6)$$

где p – концентрация дырок. Знак постоянной Холла совпадает со знаком носителей заряда. Следовательно, по величине R_x можно судить о типе электропроводности. Например, для электронного типа проводимости $R_x < 0$, для дырочного типа электропроводности $R_x > 0$.

При выводе уравнения для ЭДС Холла сделан ряд допущений, связанных с тем, что полная скорость электронов принимается равной дрейфовой скорости, т.е. не учитывается скорость хаотического теплового движение электронов и их распределение по скоростям. Поэтому более

строгое выражение для постоянной Холла, имеет вид: $R_x = \frac{A}{qn}$, где A –

постоянная, зависящая от механизма рассеяния носителей заряда. При рассеянии электронов на акустических, оптических колебаниях решётки, на

ионах примеси величина A соответственно принимает значения: 1,17; 1,11; 1,93.

Исследования эффекта Холла позволяют определить основные электрофизические свойства полупроводников.

Определив величину R_x , для различных температур, можно построить зависимость концентрации носителей заряда в функции от температуры. Учитывая, что температурная зависимость концентрации носит экспоненциальный характер, её строят в координатах $\ln n = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Это позволяет представить зависимость концентрации свободных носителей заряда от температуры в виде совокупности прямых линий. Как видно из рис. 2, график разбит на три области.

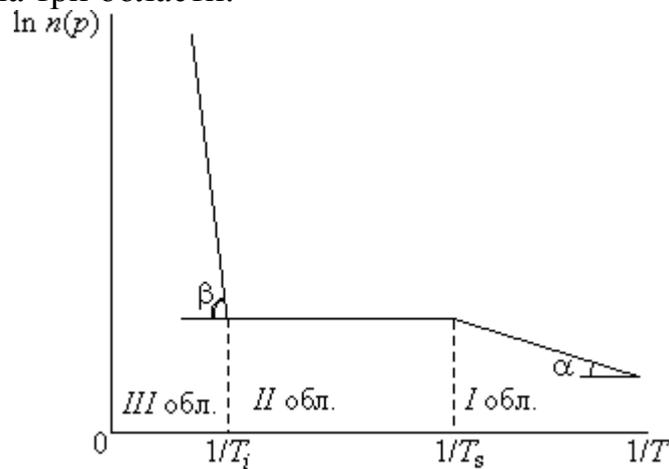


Рис. 2. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры

Область I называется областью низких температур. Образование свободных носителей заряда происходит за счёт перехода электронов с донорного уровня в зону проводимости для полупроводника n -типа электропроводности, а для полупроводника p -типа электроны переходят из валентной зоны на акцепторный уровень. Энергия активации примесного уровня определяется из уравнения

$$E_A = 2k|\operatorname{tg} \alpha|, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln(n_2) - \ln(n_1)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (8)$$

Область II – область истощения примеси. Как видно из рисунка, концентрация свободных носителей заряда не зависит от температуры. Это соответствует тому, что все электроны с донорного уровня перешли в зону проводимости в полупроводнике n -типа электропроводности, а для полупроводников p -типа электропроводности заполнены все энергетические

состояния на акцепторном уровне электронами, перешедшими из валентной зоны. В этой области концентрация свободных носителей заряда равна концентрации примесных атомов.

Область *III* является областью высоких температур. Здесь энергия теплового хаотического движения электронов kT соизмерима с величиной запрещённой зоны E_g . Поэтому электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости, при этом образуются парные носители заряда: электрон и дырка. Ширина запрещённой зоны E_g может быть определена из графика (см. рис. 2) посредством следующего выражения:

$$E_g = 2k|\operatorname{tg}\beta|. \quad (9)$$

Величина $\operatorname{tg}\beta$ определяется из уравнения (8) применительно к области *III*.

Исследования эффекта Холла позволяют измерить не только концентрацию свободных носителей заряда, но и их подвижность. Подвижность носителей заряда μ это скорость дрейфа носителей заряда в электрическом поле единичной напряженности. Она определяется по формуле:

$$\mu = R_x \cdot \sigma, \quad (10)$$

где σ - электропроводность полупроводника. Зная величины R_x и σ для нескольких температур, можно построить температурную зависимость подвижности носителей заряда, график которой строится в координатах

$$\ln \mu = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

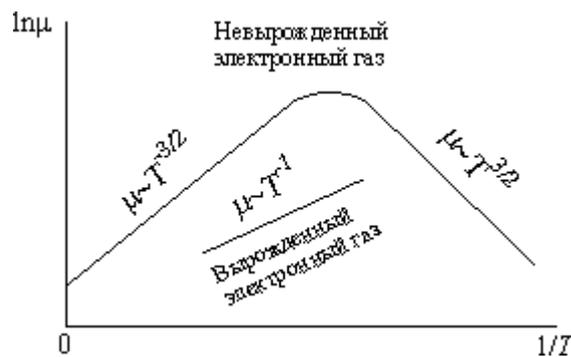


Рис. 3. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры

На рис.3 приведен пример температурной зависимости подвижности носителей заряда в полупроводнике. Величина подвижности зависит от механизмов рассеяния носителей заряда. В области высоких температур, когда амплитуда колебаний узлов кристаллической решетки велика, происходит рассеяние носителей заряда на фононах. Подвижность носителей заряда пропорциональна $T^{-3/2}$ и T^{-1} соответственно для полупроводников, содержащих невырожденный и вырожденный электронный газ. При низких

температурах рассеяние носителей заряда происходит на ионизированных примесях. Этот механизм рассеяния носителей заряда заключается в следующем: движущиеся электроны либо притягиваются к атому примеси, либо отталкиваются от него благодаря кулоновским силам, действующим между заряженными частицами, в зависимости от знака заряда примеси. В результате, при рассеянии на ионизированных примесях изменяется по направлению скорость движения электронов. Для полупроводников, содержащих невырожденный электронный газ, подвижность носителей заряда пропорциональна $T^{-\frac{3}{2}}$. Подвижность носителей заряда для случая вырожденного электронного газа не зависит от температуры.

Если величина подвижности носителей заряда определяется несколькими механизмами рассеяния, то доминирующий механизм определяется из соотношения

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{\text{ф}}} + \frac{1}{\mu_{\text{ип}}} + \frac{1}{\mu_{\text{нп}}} + \dots,$$

где $\mu_{\text{ф}}$, $\mu_{\text{ип}}$, $\mu_{\text{нп}}$ – соответственно подвижность носителей заряда, обусловленная рассеянием на фонах, ионизированных и нейтральных примесях. Как следует из этого уравнения, преобладающим является тот механизм, который обуславливает минимальное значение величины подвижности носителей заряда.

2.2 Порядок выполнения работы

Рабочее задание

1. Запустить программу измерения (Cond_xpusb).
2. Выберите исследуемый образец согласно своему варианту.
3. Установите ток источника тока величиной от 50 до 100 мкА.
4. Снимите температурную зависимость удельного электрического сопротивления, периодически записывая результаты измерений. Диапазон изменения температуры от 100К до 500К.
5. На графике будет изображен ход зависимости $\rho(T)$.
6. Сохраните результаты измерений для дальнейшей обработки и построения графиков.
7. Переключитесь на вкладку «Эффект Холла».
8. Снимите зависимость ЭДС Холла от магнитного поля при различных токах, протекающих через образец. Для этого установите ток источника. Изменяя магнитную индукцию, снимите ряд показаний. После чего снова измените ток источника. На графике отображается

зависимость ЭДС Холла от магнитной индукции. Отрегулируйте масштаб графика для отображения зависимости. Сохраните результаты измерений.

9. Перейдите к измерению постоянной Холла от температуры. Для чего нажмите на кнопку $R_x(T)$. Изменяя температуру постройте зависимость $R_x(T)$.
10. Определите тип основных носителей заряда.
11. Рассчитайте зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры и постройте график.
12. Рассчитайте подвижность основных носителей заряда от температуры и постройте график.
13. Определите ширину запрещенной зоны и сравните с табличным значением для исследуемого полупроводника.