

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Радиофизический факультет
Кафедра электроники

Отчет по лабораторной работе:

ДВИЖЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Выполнил:

студент 430 группы

Зайцев Юрий

4 апреля 2007 г.

Проверил:

Оболенский Сергей Владимирович

Нижний Новгород
2007 год

Содержание

1	Введение	3
2	Теоретическая часть	3
2.1	Движение электронов в полупроводниках	3
2.1.1	Полупроводники с идеальной кристаллической решеткой	3
2.1.2	Полуклассическая модель движения электрона	4
2.2	Эффект Холла	5
3	Практическая часть	7
3.1	Результаты эксперимента	7
3.2	Расчет погрешностей измерений	10
4	Вывод	10

1 Введение

Цель работы

Измерить эффект Холла в образце и определить его основные характеристики (постоянную Холла R , концентрацию основных носителей n и их подвижность μ).

Оборудование

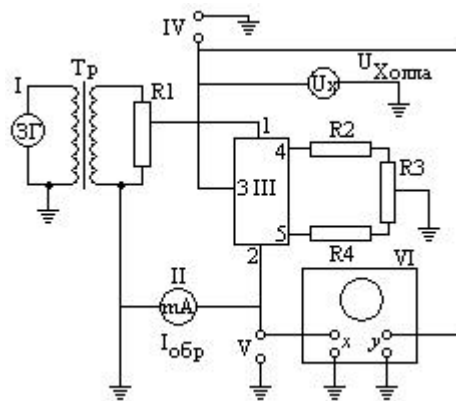


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

На Рис. 1 приведена схема установки для определения постоянной Холла. Переменное напряжение подается со звукового генератора I на трансформатор Тр, регулировочный потенциометр R1, который выведен на переднюю панель установки и миллиамперметр II подается на образец. Величина тока через образец устанавливается потенциометром R1. На одной из боковых поверхностей образца вместо одного Холловского контакта установлены два (4, 5), потенциал одного из которых заведомо выше, а у другого заведомо ниже потенциала контакта 3, расположенного на противоположной поверхности. Установка двух контактов нужна для точной балансировки.

2 Теоретическая часть

2.1 Движение электронов в полупроводниках

2.1.1 Полупроводники с идеальной кристаллической решеткой

Идеальная кристаллическая решетка представляет собой совокупность атомов, периодически (с периодом, равным периоду кристаллической решетки \vec{a}) расположенных в пространстве. Потенциальная энергия электрона $V(\vec{r})$ в идеальной кристаллической

решетке также является периодической функцией с периодом, равным периоду кристаллической решетки: $V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{a})$.

Теорема Блоха утверждает, что собственные функции электрона, движущегося в таком периодическом поле, представляют собой модулированные плоские волны вида

$$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i(\vec{k}, \vec{r})} U_{\vec{k}}(\vec{r}), \quad (1)$$

где $U_{\vec{k}}(\vec{r})$ – периодическая функция координат с периодом прямой решетки, \vec{k} – вектор, характеризующий квантовое состояние электрона в кристалле, имеющий размерность волнового вектора и поэтому названный *квазиволновым вектором*. Функции $\psi_{\vec{k}}(\vec{r})$ называют *блоховскими функциями*. Можно ввести понятие *квазиимпульса* электрона с помощью соотношения $\vec{p} = \hbar \vec{k}$. При заданном значении \vec{k} имеется много решений уравнения Шредингера, и описание энергетических уровней электрона с периодическим потенциалом осуществляется посредством семейства непрерывных функций $W_n(\vec{k})$. Совокупность всех электронных уровней, описываемых функцией $W_n(\vec{k})$ при фиксированном n , называют *разрешенной энергетической зоной* с номером n . Энергия электрона $W(\vec{k})$ в разрешенной зоне является периодической и четной функцией в пространстве обратной решетки.

На уровне, заданном номером зоны n и квазиволновым вектором \vec{k} электрон имеет отличную от нуля среднюю скорость

$$\vec{v}(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} W(\vec{k}). \quad (2)$$

Согласно этому соотношению, электрон в периодическом потенциале имеет стационарные уровни, находясь на которых он, несмотря на взаимодействие с периодической последовательностью ионов продолжает двигаться бесконечно долго, не теряя своей средней скорости.

В общем случае состояние электрона описывается с помощью волнового пакета, состоящего из блоховских функций. Если ширина пакета по квазиволновым векторам мала по сравнению с зоной Бриллюэна и $W(\vec{k})$ мало меняется для уровней, входящих в волновой пакет, то скорость движения электрона есть ни что иное, как групповая скорость движения центра волнового пакета

$$\vec{v}_g(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} W(\vec{k}). \quad (3)$$

2.1.2 Полуклассическая модель движения электрона

Если полупроводник находится во внешнем электрическом или магнитном поле, то для описания изменения квазиволнового вектора \vec{k} электрона и его координаты \vec{r} можно воспользоваться полуклассической моделью. Она справедлива в случае, когда внешние электрические и магнитные поля медленно меняются в координатном пространстве на расстояниях порядка размера элементарной ячейки.

Тогда при известной зависимости энергии электрона в разрешенной зоне $W(\vec{k})$ состояние электрона описывается его квазиволновым вектором \vec{k} , а также координатой \vec{r} . Считается, что в присутствии внешних электрических и магнитных полей \vec{E} и \vec{B}

1. номер зоны электрона не меняется (т.е. в модели пренебрегается возможностью межзонных переходов);
2. изменения квазиволнового вектора и координаты электрона определяются уравнениями движения

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}_g(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial W(\vec{k})}{\partial \vec{k}}, \quad (4)$$

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e \left(\vec{E} + [\vec{v}_g, \vec{B}] \right). \quad (5)$$

Вблизи точки экстремума \vec{k}_0 функцию $W = W(\vec{k})$ можно разложить в ряд Тейлора, используя выражение

$$W(\vec{k}) = W(\vec{k}_0) + \frac{1}{2} \sum_{i=x}^z \sum_{j=x}^z \frac{1}{m_{ij}^*} \hbar^2 (k_i - k_{i0})(k_j - k_{j0}), \quad (6)$$

где m_{ij}^* – компоненты тензора *эффективной массы* носителей заряда, определяющиеся соотношением

$$\frac{1}{m_{ij}^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 W(\vec{k})}{\partial k_i \partial k_j} \bigg|_{\vec{k}=\vec{k}_0} \quad (7)$$

Преобразовав тензор к диагональному виду можно получить уравнение движения электрона в виде

$$m^* \vec{a} = -e \left(\vec{E} + [\vec{v}_g, \vec{B}] \right), \quad (8)$$

где \vec{a} – ускорение электрона.

2.2 Эффект Холла

Эффект Холла представляет собой поперечный гальваномагнитный эффект, суть которого заключается в следующем: если поместить полупроводниковую пластину во внешнее магнитное поле \vec{B} и пропустить вдоль неё ток, то вследствие смещения движущихся зарядов к одной из граней пластины возникает поперечная разность потенциалов, называемая *ЭДС Холла*. При этом, носители различных знаков смещаются к одной и той же боковой грани полупроводника, поэтому с изменением типа электропроводности меняется и знак ЭДС.

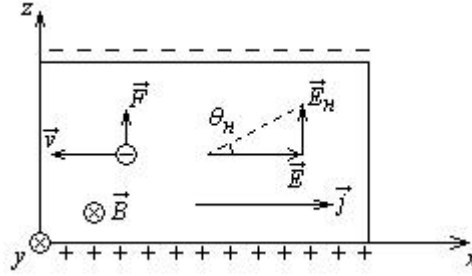


Рис. 2: Возникновение эффекта Холла в электронном полупроводнике

На Рис. 2 показан полупроводник, две плоскости которого подключены через омические контакты к внешней батарее. Обозначим \vec{j} плотность тока в направлении Ox . Магнитное поле \vec{B} приложено в направлении оси Oy . Рассмотрим электрон, движущийся в отрицательном направлении оси Ox со средней скоростью \vec{v} . На движущийся в магнитном поле электрон действует магнитная составляющая силы Лоренца:

$$\vec{F} = -e [\vec{v}, \vec{B}]. \quad (9)$$

В результате действия этой силы траектория электрона будет искривляться в направлении оси Oz , и, поскольку в этом направлении ток протекать не может, электроны будут накапливаться на боковой поверхности до тех пор, пока не установится электрическое поле \vec{E}_H , достаточное для создания силы, равной магнитной составляющей силы Лоренца, но направленной противоположно:

$$\vec{E}_H = [\vec{v}, \vec{B}]. \quad (10)$$

Воспользуемся законом Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (11)$$

где $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$ – удельная проводимость образца, $\mu_n = \frac{v}{E}$ – подвижность носителей.

$$\vec{j} = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} = -e \cdot n \cdot \vec{v} \quad (12)$$

Исключая v из соотношения (10), получим:

$$\vec{E}_H = -\frac{1}{en} \cdot [\vec{j}, \vec{B}] = R \cdot [\vec{j}, \vec{B}] \quad (13)$$

Учитывая, что полный ток через образец $I = j \cdot ab$, а поперечная ЭДС $U_H = E_H a$, получим соотношение, связывающее ЭДС Холла с величиной электрического тока:

$$U_H = R \cdot \frac{I \cdot B}{b}. \quad (14)$$

Величина R называется *постоянной Холла*.

3 Практическая часть

3.1 Результаты эксперимента

1. Определение типа носителей в образце.

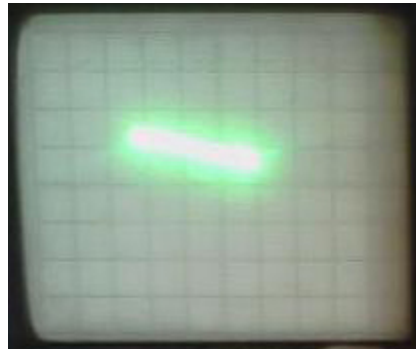


Рис. 3: К эксперименту по определению типа носителей в полупроводнике

На Рис. 3 показан снимок с экрана осциллографа после внесения сбалансированного образца в магнитное поле. Так как магнитное поле направлено вниз, можно сделать вывод о том, что это полупроводник n-типа (электронный полупроводник).

2. Снятие зависимости ЭДС Холла от величины магнитного поля. Зависимость была снята для трёх величин тока через образец: 3, 5 и 7 мА.
3. Снятие зависимости ЭДС Холла от величины тока через образец. Зависимость была снята для 420, 490 и 620 Гс ($4.2 \cdot 10^{-2}$, $4.9 \cdot 10^{-2}$ и $6.2 \cdot 10^{-2}$ Тл соответственно).
4. Для 10 точек была вычислена постоянная Холла R , концентрация основных носителей n и их подвижность μ .

$$R = \frac{U_H \cdot b}{I \cdot B}, \quad \mu = R \cdot \sigma, \quad n = \frac{A}{R \cdot e}$$

где $A = \frac{3\pi}{8}$, $\sigma = 0,1 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$, $b = 0,5 \text{ мм}$.

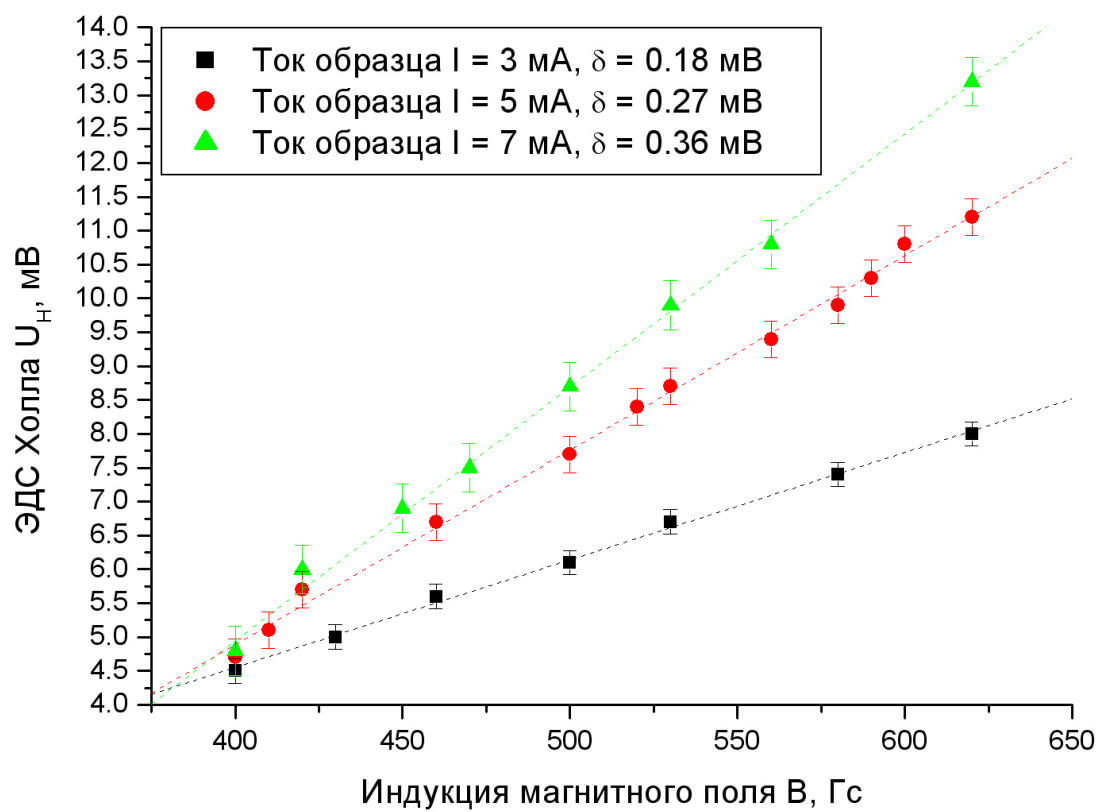


Рис. 4: Зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля

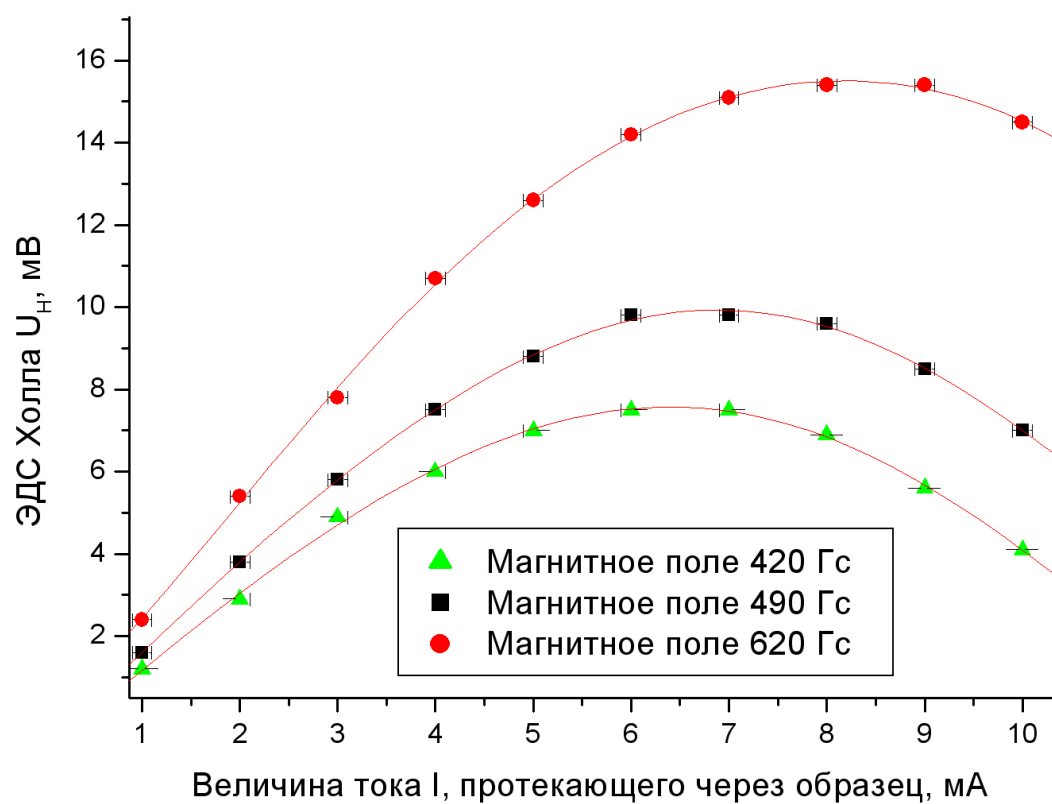


Рис. 5: Зависимость ЭДС Холла от величины тока через образец

U_H , мВ	I, мА	B, Гс	R , $\frac{\mathcal{M}^3}{\text{Кл}}$	μ , $\frac{\mathcal{M}^2}{\text{Кл} \cdot \text{Ом}}$	n , $\frac{1}{\mathcal{M}^3}$
1,6	1	490	0,016	0,16	$4,5 \cdot 10^{20}$
5,8	3	490	0,020	0,20	$3,7 \cdot 10^{20}$
6,1	3	500	0,020	0,20	$3,6 \cdot 10^{20}$
10,3	5	530	0,019	0,19	$3,8 \cdot 10^{20}$
10	5	520	0,019	0,19	$3,8 \cdot 10^{20}$
13,2	7	620	0,015	0,15	$4,8 \cdot 10^{20}$
8,7	7	500	0,012	0,12	$5,9 \cdot 10^{20}$
6	7	420	0,010	0,10	$7,2 \cdot 10^{20}$
9,8	6	490	0,017	0,17	$4,4 \cdot 10^{20}$
6,9	7	450	0,011	0,11	$6,7 \cdot 10^{20}$

3.2 Расчет погрешностей измерений

$$\Delta B' = 5 \Gamma c \Rightarrow \Delta B = 5 \cdot 10^{-4} T_l$$

$$\Delta R = \frac{(\Delta U \cdot b + \Delta b \cdot U) - (\Delta I \cdot B + \Delta B \cdot I)}{(I \cdot B)^2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\mathcal{M}^3}{\text{Кл}}$$

$$\Delta \mu_H = \Delta R \cdot \sigma = 2 \cdot 10^{-2} \frac{\mathcal{M}^2}{\text{Кл} \cdot \text{Ом}}$$

$$\Delta n = \frac{A}{e} \frac{\Delta R}{R^2} = 5 \cdot 10^{19} \frac{1}{\mathcal{M}^3}$$

4 Вывод

Полученные результаты для постоянной Холла, холловской подвижности и концентрации несколько выходят за рамки вычисленной погрешности измерений для больших величин тока через образец и магнитного поля. Однако измеренные зависимости качественно хорошо согласуются с теоретическими данными, в частности, зависимость ЭДС Холла от величины приложенного к образцу магнитного поля для разных токов ложится на линейную зависимость с очень высоким коэффициентом корреляции ($\rho \gtrsim 0.99$). Изменение R в разных опытах предположительно может быть вызвано температурными флуктуациями в образце при пропускании через него довольно высоких токов.

В целом, поэтому, работу можно считать выполненной успешно.