

# **ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тихоокеанский государственный университет»

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**  
Методические указания к выполнению  
лабораторной работы по физике №133  
для студентов форм обучения

Изучение эффекта Холла в полупроводниках : методические указания к выполнению лабораторной работы № 133 по физике для студентов всех форм обучения / сост.: А.В. Кирюшин, В. И. Римлянд. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. – 9 с.

Методические указания составлены на кафедре «Физика». Включают общие сведения об особенностях эффекта Холла, описание установки и метода измерений концентрации и подвижности носителей тока в полупроводниках с помощью датчика Холла, порядок выполнения работы, контрольные вопросы. Объем выполнения лабораторной работы – 2 часа.

Печатается в соответствии с решением кафедры «Физика» и методического совета факультета математического моделирования и процессов управления.

**Цель работы:** изучение эффекта Холла

**Задача:** определение постоянной датчика Холла, концентрации и подвижности носителей тока в полупроводнике.

**Приборы и принадлежности:** установка для изучения эффекта Холла «ФПК-08».

**Техника безопасности:** к работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством, принципом действия и знающие правила техники безопасности при работе с напряжением до 1000В.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для количественной характеристики электрического тока в проводниках вводятся понятия силы тока  $I$  и плотности тока  $\vec{j}$ . При равномерном распределении плотности тока по сечению проводника плотность тока

$$j = \frac{I}{S} = en\bar{v} \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.  $e$  – заряд носителей тока,  $n$  – их концентрация,  $\bar{v}$  – средняя скорость направленного движения подвижных носителей (дрейфовая скорость),

Плотность тока  $\vec{j}$  в каждой точке проводника связана с напряженностью электрического поля  $\vec{E}$  в этой точке законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника.

Для однородного проводника длиной  $l$

$$\rho = \frac{rS}{l}, \quad (3)$$

где  $r$  – сопротивление этого проводника.

Если по проводнику идет ток, то на каждый подвижный носитель действуют сила со стороны электрического поля  $F_{эл} \sim E$  и сила трения  $F_{тр} \sim \bar{v}$ . При стационарном движении носителя (с постоянной скоростью  $\bar{v}$ )  $F_{эл} = F_{тр}$  и следовательно  $\bar{v} \sim E$ . Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется подвижностью  $\mu$ , т. е.

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}. \quad (4)$$

Из соотношений (1), (2), (4) следует, что

$$\mu = \frac{1}{\rho ne}. \quad (5)$$

Важнейшее применение находит теория электросопротивления полупроводников и металлов. К полупроводникам принято относить твердые

вещества с удельным сопротивлением  $\rho \sim (10^{-6} \div 10^8) \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . У металлов при комнатной температуре  $\rho \sim (10^{-8} \div 10^{-6}) \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В таблице 1 приведены также характерные значения концентрации  $n$  и подвижности  $\mu$  носителей тока в полупроводниках и металлах.

Таблица 1

Тип твердого тела	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м	Концентрация подвижных носителей $n$ , м <sup>-3</sup>	Подвижность носителей тока $\mu$ , м <sup>2</sup> /Вс
Полупроводники	$10^{-6} \div 10^8$	$10^{19} \div 10^{25}$	$10^{-4} \div 10$
Металлы	$10^{-8} \div 10^{-6}$	$10^{28} \div 10^{29}$	$10^{-4} \div 10^{-3}$

Интересно, что значения подвижностей тока в полупроводниках могут превышать подвижности электронов в металлах. Значительная разница удельных сопротивлений полупроводников и металлов обусловлена существенным различием в значениях концентрации свободных носителей заряда (см. формулу (5))

Во всех полупроводниках и металлах наблюдается эффект Холла, который является одним из наиболее эффективных современных методов измерения характеристик носителей тока в этих веществах.

Если проводящий образец в виде прямоугольной пластины толщиной  $d$ , шириной  $a$  и длиной  $l$  поместить в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  и пропустить по нему ток с силой  $I$ , как показано на рис. 1, то в нем появится разность потенциалов [1]

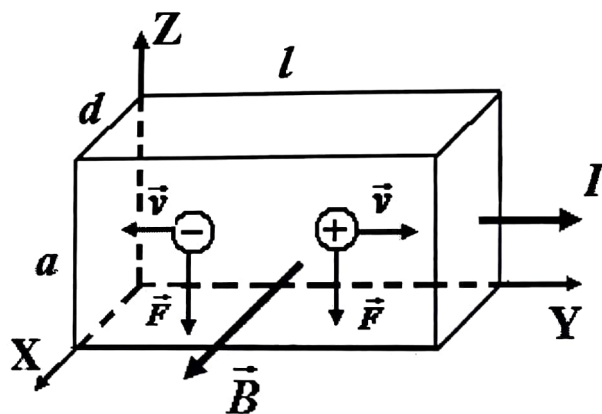


Рис. 1 Эффект Холла

$$F_a = -e[\vec{v} \cdot \vec{B}]$$

$$U_x = R \frac{IB}{d}, \quad (6)$$

где  $R$  – постоянная Холла. Этот эффект обусловлен силой Лоренца, которая действует со стороны магнитного поля на подвижные носители тока, дрейфующие в электрическом поле со скоростью  $\vec{v}$ . При этом направление этой силы не зависит от знака заряда носителей, что позволяет по знаку холловской разности потенциалов установить знак носителей тока.

При изменении направления магнитного поля на обратное или при изменении направления тока, протекающего через образец, на обратное разность потенциалов  $U_x$  (эдс Холла) меняет знак на противоположный.

Если основной вклад в эффект вносит один из носителей (электроны в металлах, или электроны, или дырки в полупроводниках), то для расчета постоянной Холла можно пользоваться выражением [2]



$$R = \frac{1}{ne}, \quad (7)$$

где  $e$  – элементарный заряд (модуль заряда электрона).

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка состоит из двух блоков (рис. 2) – измерительного блока 1 и блока с исследуемым образцом 2 (датчиком Холла).

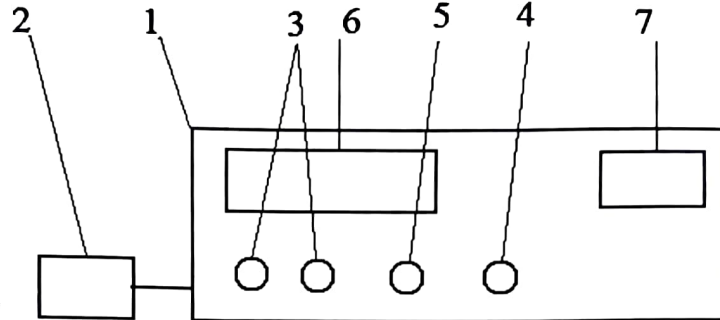


Рис. 2. Схема установки

На передней панели измерительного блока размещены следующие органы управления и индикации:

- кнопки «ТОК + -» 3, позволяющие регулировать ток через катушку электромагнита и исследуемый образец;
- кнопка «ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА» 4, с помощью которой осуществляется переход от регулировки тока датчика и регулировке тока электромагнита и обратно;
- кнопка «СБРОС» 5, после нажатия которой значение тока обнуляется и направление тока меняется на противоположное;
- табло «мА» 6, которое позволяет проводить измерение тока, протекающего через катушку электромагнита, либо через датчик Холла;
- табло «мВ» 7, служащее для измерения разности потенциалов  $U$ .

На задней панели измерительного блока расположен выключатель «СЕТЬ».

В блоке 2 установлен электромагнит и датчик Холла. Сверху блок имеет окно, через которое видны полюса электромагнита и плата с датчиком Холла. Индукция магнитного поля в зазоре электромагнита определяется эмпирической формулой

$$B = KI_{эм}, \quad (8)$$

где  $I_{эм}$  – сила тока, протекающего через электромагнит,  $K = 3,102 \cdot 10^{-2}$  Тл/А.

Датчик Холла представляет полупроводниковую пластину прямоугольной формы с размерами  $a = 31$  мкм,  $d = 35$  мкм,  $l = 42$  мкм (см. рис. 1). Сопротивление датчика  $r = 1,8$  кОм. Удельное сопротивление в силу (3) может быть рассчитано по формуле

$$1879 \text{ ом}$$

$$\rho = \frac{rad}{l} \quad (9)$$

При отсутствии магнитного поля в соответствии с (6) эдс Холла равна нулю. Однако вследствие различных причин (например, недостаточно точной установки выходных электродов датчика на одной эквипотенциальной поверхности) измерительный прибор может показать некоторую разность потенциалов  $U_0$  даже при  $B = 0$ . При  $B \neq 0$  показания приборов, измеряющих разность потенциалов, описываются выражением

$$U = U_0 + U_x.$$

Для выделения из измеряемой разности потенциалов  $U$  интересующего нас холловского слагаемого  $U_x$  используется тот факт, что величина  $U_x$ , в отличие от  $U_0$ , изменяет знак при изменении направления магнитного поля на противоположное. Поэтому два последовательных измерения разности потенциалов  $U_1$  и  $U_2$ , проведенные для обоих направлений магнитного поля, описываются соотношениями

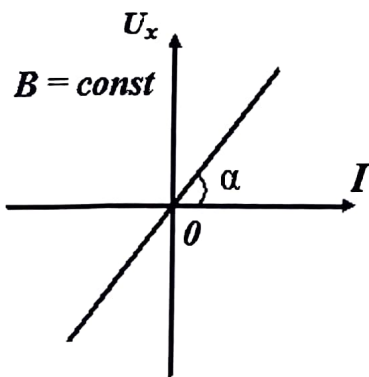
$$U_1 = U_0 + U_x,$$

$$U_2 = U_0 - U_x,$$

откуда следует

$$U_x = \frac{1}{2}(U_1 - U_2). \quad (10)$$

В работе находится зависимость холловской разности потенциалов  $U_x$  от величины тока  $I$  через образец при заданном значении индукции  $B$  магнитного поля. В соответствии с формулой (6) эта зависимость имеет вид прямой, проходящей через начало координат (рис. 3). Тангенс угла  $\alpha$  наклона этой прямой, как показывает выражение (6), есть



откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{RB}{d},$$

$$R = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{B}. \quad (11)$$

Значения постоянной Холла  $R$  позволяют по вытекающим из (5), (7) соотношениям

$$n = \frac{1}{Re}, \quad (12)$$

$$\mu = \frac{R}{\rho} \quad (13)$$

Рис. 3. Примерный вид экспериментальной зависимости  $U_x(I)$  при заданном значении

рассчитать концентрацию  $n$  и подвижность  $\mu$  носителей тока в исследуемом полупроводнике.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Величину индукции  $B$  магнитного поля, при которой снимается токовая зависимость  $U_x(I)$ , задает преподаватель. Рекомендуемый интервал возможных значений магнитного поля  $(1,0 \div 2,0) \cdot 10^{-2}$  Тл. Это значение заносится в табл. 2.

Таблица 2

$B$ , Тл		$I$ , мА	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$I_{эм}$ , мА		$U_1$ , мВ									
		$U_2$ , мВ									
		$U_x$ , мВ									

2. С помощью формулы (8) рассчитать значение силы тока  $I_{эм}$ , протекающего через электромагнит и создающего выбранное значение  $B$ . Результат с точностью до десятых долей мА занести в табл. 2.
3. Подключить прибор к питающей сети и нажать клавишу «СЕТЬ», расположенную на задней панели измерительного блока. Табло «мА» должно индигировать «00.0», табло «мВ» – «0.0». Установка находится в режиме измерения тока электромагнита, о чем должен свидетельствовать соответствующий светодиод кнопки «ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА».
4. Нажатием на кнопку «ТОК +» задать ток электромагнита  $I_{эм}$ .
5. С помощью кнопки «ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА» перевести установку в режим измерения тока через датчик Холла (включается другой светодиод).
6. Нажать кнопку «СБРОС». После этого табло «мА» должно высветить «-00.0».
7. Посредством кнопки «ТОК +» задать ток датчика  $I = -2,0$  мА и провести измерение соответствующей разности потенциалов  $U_I$  с помощью табло «мВ» (с учетом знака). Результат записать в табл. 2.
- ВНИМАНИЕ. Не допускается задавать ток через датчик более 3 мА.
8. С помощью кнопки «ТОК -» установить токи датчика -1.5 мА; -1.0 мА; -0.5 мА; 0 и провести соответствующие измерения разности потенциалов  $U_I$ . Результаты записать в табл. 2.
9. Для изменения направления тока датчика нажать кнопку «СБРОС». Табло «мА» должно индигировать «00.0».
10. Нажатием кнопки «ТОК +» задать токи датчика 0,5 мА; 1,0 мА; 1,5 мА; 2 мА и измерить разности потенциалов  $U_I$ , соответствующие этим токам. Результаты занести в табл. 2.
11. Кнопку «ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА» перевести в режим измерения тока электромагнита («горит» левый светодиод).
12. Нажать кнопку «СБРОС». Табло «мА» должно высветить «-0.00».
13. Нажатием кнопки «ТОК +» установить необходимый ток электромагнита, направление которого противоположно первоначальному (об этом свидетельствует знак индикации табло «мА»).



14. Посредством кнопки «ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА» перевести установку в режим измерения тока датчика («горит» правый светодиод).
15. Повторить действия, описанные в пп. 6–10 с той лишь разницей, что теперь измеряется разность потенциалов  $U_2$  (для обратного направления магнитного поля).
16. С помощью формулы (10) для каждого тока датчика  $I$  найти холловскую разность потенциалов  $U_x$ . Результаты записать в табл. 2.
17. Построить экспериментальный график зависимости  $U_x(I)$ .
18. Из графика найти тангенс угла наклона прямой  $U_x(I)$ . Результат занести в табл. 3. Обратить внимание на то, что  $\operatorname{tg}\alpha$  – это размерная величина.

Таблица 3

$\operatorname{tg}\alpha$	$R$	$n$	$\rho$	$\mu$

19. С помощью формул (9), (11), (12), (13) рассчитать значения постоянной Холла  $R$ , концентрации  $n$  носителей тока в полупроводнике, удельное сопротивление  $\rho$  этого полупроводника и подвижность  $\mu$  носителей. Результаты записать в табл. 3.
20. Сравнить полученные значения  $n$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  с их типовыми значениями для полупроводников. Сделать вывод.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется силой Лоренца? Как можно определить направление этой силы? Ответ пояснить рисунком.
2. В чем состоит эффект Холла? Ответ пояснить рисунком.
3. Почему с помощью эффекта Холла можно определить знак носителей тока? Ответ пояснить рисунком.
4. Какие вещества называются проводниками, полупроводниками? Чем объясняется различие их электрических свойств?
5. Что называется подвижностью носителей тока?
6. Как зависит от температуры проводимость проводников и полупроводников?
7. Что называется постоянной Холла? У каких веществ – у проводников или полупроводников – константа Холла сильнее зависит от температуры? Почему?
8. Каковы практические применения эффекта Холла?
9. Чем эффект Холла в полупроводниках отличается от эффекта в металлах?
10. Вывести формулу (11) для постоянной Холла.
11. Каковы особенности зонного энергетического спектра в металлах, полупроводниках и диэлектриках?
12. Что называется электронным типом проводимости? Дырочным типом проводимости? Возможна ли дырочная проводимость в металлах?

13. Что называется собственной проводимостью полупроводника? Примесной проводимостью?
14. Вывод выражения для постоянной Холла  $R$  был получен без учета распределения носителей тока по скоростям. Насколько это оправдано в случае металлов и полупроводников?
15. Получите выражение константы Холла  $R$  для образцов с двумя типами носителей. При расчете используйте условие, что поперечный ток должен быть равен нулю.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. Т.4. М., 2008. 751 с.
2. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм / А.Н. Матвеев. М., 2005. 463 с.
3. Савельев И. В. Курс общей физики / И.В. Савельев. Т. 2. М., 2002. 336 с.
4. Калашников С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. М., 2008. 624 с.
5. Лабораторные занятия по физике / под ред., Л. Л. Гольдина. М., 1983. 704 с.

# **ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы по физике №133  
для студентов форм обучения

*Анатолий Васильевич Кирюшин  
Владимир Иосифович Римлянд*

Главный редактор *Л. А. Суезалова*  
Редактор *Н. Г. Петряева*  
Компьютерная верстка *Т. В. Араповой*

Подписано в печать 14.12.2009. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага писчая. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.  
Усл. Печ. Л. 0,52. Тираж 250 экз. Заказ

Издательство Тихоокеанского государственного университета  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

Отдел оперативной полиграфии издательства  
Тихоокеанского государственного университета  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136