

Изучение эффекта Холла в полупроводниках №18-8

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} этой точке законом Ома в дифференциальной форме

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

где ρ – 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 действует 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}) $F_{эл} = F_{тр}$ следовательно, $\bar{v} \sim E$. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется подвижностью μ , т.е.

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}.$$

(4)

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

$$\mu = \frac{1}{\rho ne}.$$

(5)

Подвижность μ находит широкое применение в теории электропроводности полупроводников и металлов. К полупроводникам принято относить твердые

вещества с удельным сопротивлением $\rho \sim (10^{-6} \div 10^8)$ Ом·м. У металлов при комнатной температуре

$\rho \sim (10^{-8} \div 10^{-6})$ Ом·м. В таблице 1 приведены характерные значения концентрации n и подвижности μ носителей тока в полупроводниках и металлах.

Таблица 1

Тип твердого тела	Удельное сопротивление ρ , Ом·м	Концентрация подвижных носителей n , м ⁻³	Подвижность носителей тока μ , м ² /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 силой I , как показано на рис.1, то в нем появится разность потенциалов [1]

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

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.

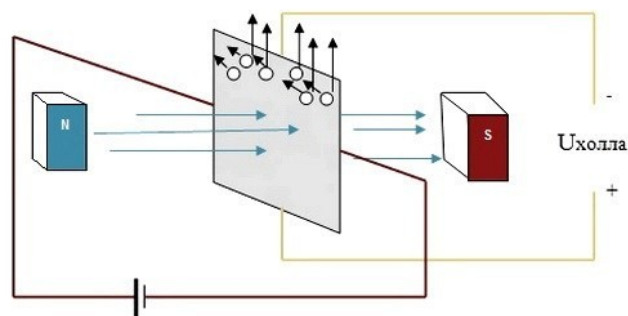


Рис. 1 Эффект Холла

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, электроны или дырки в полупроводниках), то для расчета постоянной Холлы можно пользоваться выражением

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

где e – элементарный заряд (модуль заряда электрона).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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

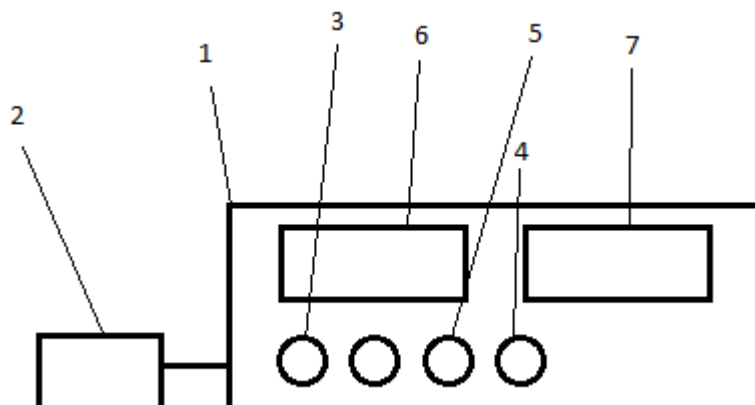


Рис. 2 Схема установки

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 регулировки 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

$$B = K I_{эм},$$

(8)

где $I_{эм}$ – сила тока, протекающего через электромагнит, $K=2,123$ Тл/А.

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

$$\rho = \frac{rad}{l}.$$

(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

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 + U_x, \\ U_2 &= U_0 - U_x, \end{aligned}$$

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 α наклона этой прямой, как показывает выражение (6), есть

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

откуда

$$R = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{B}.$$

(11)

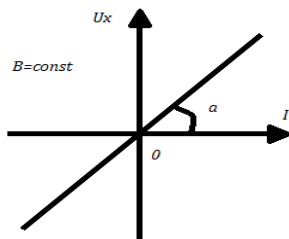


Рис. 3 Примерный вид экспериментальной зависимости

Значение постоянной Холла R позволяет по вытекающим из (5), (7) соотношениям

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

$$\mu = \frac{R}{\rho}.$$

(13)

В заданном значении рассчитать концентрацию n и подвижность μ 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 таблицу 2.

Таблица 2

B , Тл	I , мА	-2,0	-1,5	-1,0	-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 таблицу 2.
3. Подключить прибор к питающей сети и нажать клавишу «СЕТЬ», расположенную на задней панели измерительного блока. Табло «мА» должно индицировать «00.0», табло «мВ» - «0.0». Установка находится в режиме измерения тока электромагнита, о чем должен свидетельствовать соответствующей 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 (выключается 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_1 с помощью табло «мВ» (с учетом знака). Результат записать в таблицу 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_1 . Результаты записать в таблицу 2.
9. Для изменения направления тока датчика нажать кнопку «СБРОС». Табло «мА» должно индицировать «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_1 , соответствующие этим токам. Результаты занести в таблицу 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. Повторять 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 таблицу 2.
17. Построить экспериментальный график зависимости $U_x(I)$.
18. Из графика найти тангенс угла наклона прямой $U_x(I)$. Результат записать в таблицу 3. Обратить внимание на то, что $tg\alpha$ – это размерная величина.

Таблица 3

$tg\alpha$	R	n	ρ	μ

19. С помощью формул (9), (11), (12), (13) рассчитать значения постоянной Холла R , концентрации n носителей тока в полупроводнике, удельное сопротивление ρ этого полупроводника и подвижность μ носителей. Результаты записать в таблицу 3.
20. Сравнить полученные значения n , ρ , μ 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 – проводников или полупроводников константа Холла сильнее зависит от температуры? Почему?
8. Каково практическое применение эффекта Холла?
9. Чем эффект Холла в полупроводниках отличается от эффекта в металлах?
10. Вывести формулу 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.
6. Трофимова Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 17 – изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 720 с.
7. Детлаф А. А. Курс физики: учебное пособие для студ. вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский . – 7 – е изд. стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 720 с.
8. Учеб. Пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. –М. : Академия, 2012. – 557с.
9. Половнева С. И. Средства технологических измерений / С. И. Половнева, О. В. Лазарева. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2014. – 120 с.
10. Савельев И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – Т. 1, 2, 3. – М. : Наука 2012.
11. СТО ИРНИТУ 027-2015. Учебно-методическая деятельность. Общие требования к организации и проведению лабораторных работ.