

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Цель работы: измерить концентрацию и подвижность носителей тока в полупроводнике путём определения постоянной Холла и удельного сопротивления образца.

Приборы и принадлежности: полупроводниковый образец, электромагнит, милливольтметр, миллиамперметр, блок управления.

Объект измерений: эффект Холла в полупроводнике.

Средства измерений: милливольтметр, миллиамперметр.

Теоретическая часть

Одним из наиболее удобных методов изучения полупроводников является эффект Холла. *Эффект Холла* заключается в возникновении поперечной разности потенциалов при пропускании тока через металлическую или полупроводниковую пластинку, помещенную в магнитное поле, направленное под некоторым углом к направлению тока. Обычно вектор индукции магнитного поля \mathbf{B} направляют перпендикулярно вектору плотности тока \mathbf{j} .

Классическая электронная теория объясняет эффект Холла следующим образом: поток электрических зарядов, попадая в магнитное поле, отклоняется от первоначального направления своего движения под действием силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_\text{Л} = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad (1)$$

где q – величина заряда, \mathbf{v} – средняя скорость направленного движения носителей тока (дрейфовая скорость), \mathbf{B} – вектор магнитной индукции.

Под влиянием этой силы отрицательные заряды отклоняются к верхней грани пластины (рис. 1). Верная сторона пластинки получает отрицательный заряд, в то время как противоположная сторона заряжается равным ему по величине положительным зарядом. Накопление зарядов происходит до тех пор, пока сила,

действующая на электрический заряд со стороны холловского электрического поля, не уравнивает силу Лоренца:

$$q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}] = 0. \quad (2)$$

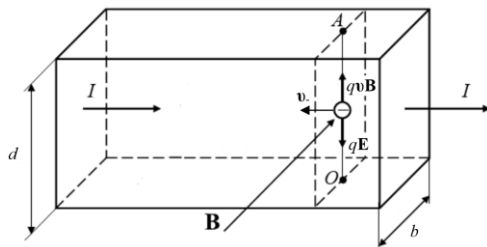


Рис. 1. Силы, действующие на носитель тока в полупроводнике

Таким образом, напряженность поперечного холловского электрического поля:

$$\mathbf{E} = -[\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \quad (3)$$

Если векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} взаимно перпендикулярны, то напряженность поперечного электрического поля равна по абсолютной величине $E = vB$, $v = |\mathbf{v}|$, что соответствует поперечной разности потенциалов:

$$U_x = Ed = vBd, \quad (4)$$

где d – расстояние AO .

При одном и том же направлении тока на верхней грани накапливаются разные по знаку заряды в зависимости от типа носителей. Например, если носители заряда – электроны, верхняя грань (рис. 1) заряжается отрицательно, а если носители заряда дырки – положительно.

Средняя скорость направленного движения носителей тока связана с плотностью тока j соотношением $j = nqv$, где n – концентрация носителей заряда (число носителей в единице объема, q – заряд носителя). Следовательно,

$$v = \frac{j}{nq}. \quad (5)$$

Выразив плотность тока через силу тока I :

$$j = \frac{I}{bd}, \quad (6)$$

(b – толщина пластины) и подставив выражения (6) и (5) в (4), получим:

$$U_x = \frac{IB}{qnb} = R_x \frac{IB}{b}, \quad (7)$$

где R_x – постоянная Холла.

Соотношение (7) позволяет определить постоянную Холла R_x , м³/Кл, и концентрацию носителей заряда n , м⁻³, в образце из опытных данных:

$$R_x = \frac{U_x b}{IB}, \quad n = \frac{IB}{U_x q b} = \frac{R_x}{q}. \quad (8)$$

В зависимости от типов носителей зарядов знак U_x может быть как «+», так и «-».

С целью учёта разности потенциалов U_x , создаваемой как основными, так и неосновными носителями, в эксперименте измерения U_x проводят дважды при противоположных направлениях B и j ; получаемые значения U_{x1} и U_{x2} равны:

$$\begin{aligned} U_{x1} &= U_{x0} - U_{xH} \\ -U_{x2} &= -U_{x0} + U_{xH}, \end{aligned}$$

где U_{x0} и U_{xH} – значения ЭДС Холла связанные, соответственно с основными и неосновными носителями заряда. Таким образом:

$$U_x = \frac{|U_{x1}| + |U_{x2}|}{2}. \quad (9)$$

Важной характеристикой полупроводника является подвижность в нем носителей заряда, под которой подразумевается средняя скорость, приобретаемая носителем в поле, напряженность которого равна единице. Если в поле напряженностью E носители приобретают скорость v , то их подвижность u , м²/(В·с), равна:

$$u = \frac{v}{E}. \quad (10)$$

Можно выразить подвижность через проводимость σ и концентрацию носителей заряда n :

$$u = \frac{\sigma}{nq} = R_x \sigma, \quad (11)$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость, Ом⁻¹м⁻¹.

Таким образом, для определения подвижности носителей n необходимо измерить R_x и σ .

Методика проведения измерений и описание установки

Установка (рис. 2) состоит из двух блоков: блока, содержащего электромагнит с исследуемым образцом (датчиком Холла) **I** и блока управления и индикации **II**.

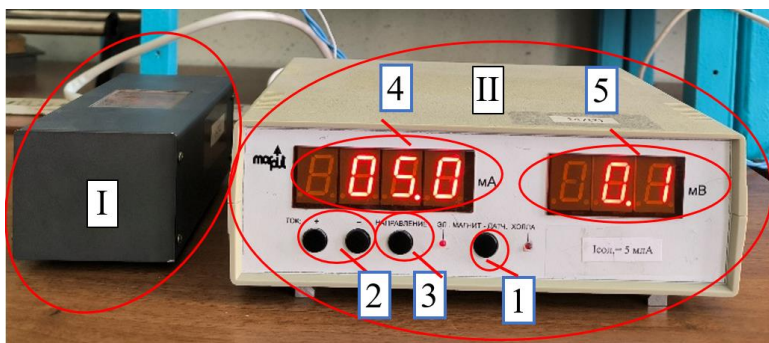


Рис. 2. Общий вид установки

Блок управления позволяет регулировать токи через электромагнит и исследуемый образец и менять их полярность. Переход от регулировки тока датчика к регулировке тока электромагнита и обратно выполняется кнопкой **1** «ЭЛ МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА». Величина тока устанавливается кнопками **2** «+» и «-» и контролируются по цифровому миллиамперметру **4**. Направление тока меняется кнопкой **3** «НАПРАВЛЕНИЕ». ЭДС Холла измеряется с помощью трёхразрядного цифрового милливольтметра **5**.

Источник питания не следует использовать на предельных режимах. *Переключать направление тока следует при его нулевом значении.*

Порядок выполнения работы

Измерения в лаборатории

1. Включите кнопку «Сеть». Должны высветиться индикаторы, указывающие наличие напряжения и тока.

2. Установите ток через электромагнит $I_{ЭМ}=4$ мА, что приведет к появлению магнитного поля вокруг образца напряженностью B (мТл).

3. Измерьте ЭДС Холла $U_{Х1}$ при различных значениях тока датчика Холла $I_{ДХ}$. Диапазон изменения $I_{ДХ}$: от 0,2 мА до 2 мА с шагом 0,2 мА. Данные занести в таблицу 1.

4. Проведите эксперимент с противоположным направлением тока, измерив разность потенциалов Холла $U_{Х2}$ при тех же значениях тока датчика Холла $I_{ДХ}$ и тока через электромагнит $I_{ЭМ}$, что и в пункте 3. Данные занести в таблицу 1.

5. Повторите измерения пп 3-4 при значениях ток через электромагнит $I_{ЭМ}=6$ мА и $I_{ЭМ}=8$ мА.

Таблица 1

$I_{ДХ}$, мА	$I_{ЭМ}=4$ мА			$I_{ЭМ}=6$ мА			$I_{ЭМ}=8$ мА		
	$U_{Х1}$, мВ	$U_{Х2}$, мВ	$U_{Х}$, мВ	$U_{Х1}$, мВ	$U_{Х2}$, мВ	$U_{Х}$, мВ	$U_{Х1}$, мВ	$U_{Х2}$, мВ	$U_{Х}$, мВ
0,2									
0,4									
...									
2									

Обработка результатов измерений

6. Вычислите значения $U_{Х}$ по формуле 9 для всех вариантов $I_{ЭМ}$ и $I_{ДХ}$. Данные занести в таблицу 1.

7. Постройте графики зависимости $U_{Х}$ от $I_{ДХ}$ при трех значениях $I_{ЭМ}$ и определите для них $\text{tg}\alpha$.

8. Вычислите постоянную Холла, для каждого значения $I_{ЭМ}$ используя формулу:

$$R_x = \frac{U_x}{I} \frac{b}{B} = \text{tg}\alpha \frac{b}{B}, \quad (12)$$

где $B=\gamma I_{ЭМ}$, b -толщина образца.

для аудитории 14206: $\gamma=2,5$ Тл/А – коэффициент пропорциональности между током электромагнита и индукцией магнитного поля в его зазоре; $b=1,2$ мм – толщина образца.

для аудитории 14110: $\gamma=22,6$ Тл/А – коэффициент пропорциональности между током электромагнита и индукцией магнитного поля в его зазоре; $b=5 \cdot 10^{-4}$ м – толщина образца.

9. Вычислите среднее значение постоянной Холла $R_{ХСР}$ как среднеарифметическое значений при разном $I_{ЭМ}$.

10. По среднему значению постоянной Холла $R_{ХСР}$ рассчитайте концентрацию носителей заряда n в образце, используя формулу (8) и приняв $q=|e|=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

11. Определите подвижность носителей заряда, используя формулу (11).

для аудитории 14202: $\sigma=1,14 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ – удельная проводимость.

для аудитории 14110: $\sigma=2,35 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ – удельная проводимость.

12. Оцените погрешность в определении постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей по соответствующим формулам:

$$\delta R_X = \frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{\Delta U}{U_x} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta B}{B},$$

где ΔI и ΔU – ошибка, равная единице наименьшего разряда прибора, Δb – точность заданного значения b (единица наименьшего разряда числа), а $\Delta B = \gamma \Delta I$

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta R_X}{R_X}.$$

$$\delta u = \frac{\Delta u}{u} \approx \frac{\Delta R_X}{R_X}.$$

13. Найдите абсолютные погрешности величин:

$$\Delta R_X = \delta R_X \cdot R_{ХСР}, \quad \Delta n = \delta n \cdot n_{СР}, \quad \Delta u = \delta u \cdot u_{СР}.$$

14. Запишите результаты расчета постоянной Холла, концентрации носителей заряда и подвижности с учетом найденных погрешностей:

$$R_X = R_{ХСР} \pm \Delta R_X.$$

$$n = n_{СР} \pm \Delta n.$$

$$u = u_{СР} \pm \Delta u.$$

Контрольные вопросы

1. В чем состоит физический смысл эффекта Холла?
2. В чем состоит различие между $I_{ДХ}$ и $I_{ЭМ}$?

3. Почему на гранях проводника с током в поперечном магнитном поле появляются электрические заряды?
4. Какова природа электрического поля в образце Холла?
5. Чему равна сила Лоренца и как определить ее направление?
6. Запишите условие равновесия для электрической и магнитной сил.
7. Изменяется ли кинетическая энергия частицы при ее движении в магнитном поле?
8. От чего зависит постоянная Холла R_H ?
9. С какой целью в эксперименте мы меняем направление тока в образце и повторяем измерения?
10. Укажите возможные области применения эффекта Холла.
11. Что такое подвижность носителей заряда и как ее рассчитать?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы по движению зарядов в магнитном поле рекомендуется [1, §72-73; 3, §114-115], по вопросам эффекта Холла [1, §79; 3, §117], по полупроводникам [2, §57-59; 3, §241-243]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество. Волны. Оптика. С.-Пб.: Лань, 2022. – 468 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. С.-Пб.: Лань, 2022. – 320 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2006. – 560 с.