

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: измерение холловской разности потенциалов в полупроводниковой пластине и определение концентрации, подвижности и знака носителей заряда, участвующих в токе.

Приборы и принадлежности: полупроводниковый образец, экран из ферромагнетика, постоянный магнит, резисторы разного сопротивления, миллиамперметр, микроамперметр.

Объект измерений: эффект Холла в полупроводнике.

Средства измерений: миллиамперметр, микроамперметр.

Теоретическая часть

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:

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

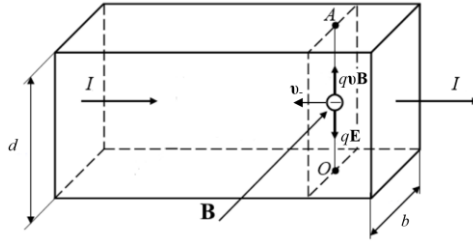


Рис. 1. Силы, действующие на носитель тока в полупроводнике

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 .

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:

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

где R_x – постоянная Холла.

Данная формула позволяет определить постоянную Холла R_H , $\text{м}^3/\text{Кл}$, и концентрацию носителей заряда n , м^{-3} , в образце из опытных данных:

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

Если R_H известно, то, измеряя U_H и I , можно найти B . Этот способ измерения B используется в технике (датчики Холла).

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 , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, равна:

$$u = \frac{v}{E}. \quad (9)$$

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

$$u = \frac{\sigma}{nq} = R_H \sigma, \quad (10)$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

Таким образом, для определения подвижности носителей u необходимо измерить R_H и σ .

Знак постоянной Холла определяется знаком носителей заряда. У полупроводников постоянная Холла может быть отрицательной и положительной, так как существует два типа проводимости. У полупроводников с электронной проводимостью (полупроводников n -типа) перемещаются электроны, и знак постоянной Холла отрицателен. У другого типа полупроводников электропроводность осуществляется положительными зарядами или так называемыми «дырками». Такие полупроводники называются дырочными (полупроводниками p -типа). Они имеют положительный знак постоянной Холла. При этом $|q_n| = q_p = e$.

Таким образом, определив знак постоянной Холла или холловской разности потенциалов, можно установить знак носителей заряда, участвующих в токе.

Методика проведения измерений и описание установки

Изучение эффекта Холла в полупроводниках проводится на учебном приборе, общий вид которого представлены соответственно на рис. 2.

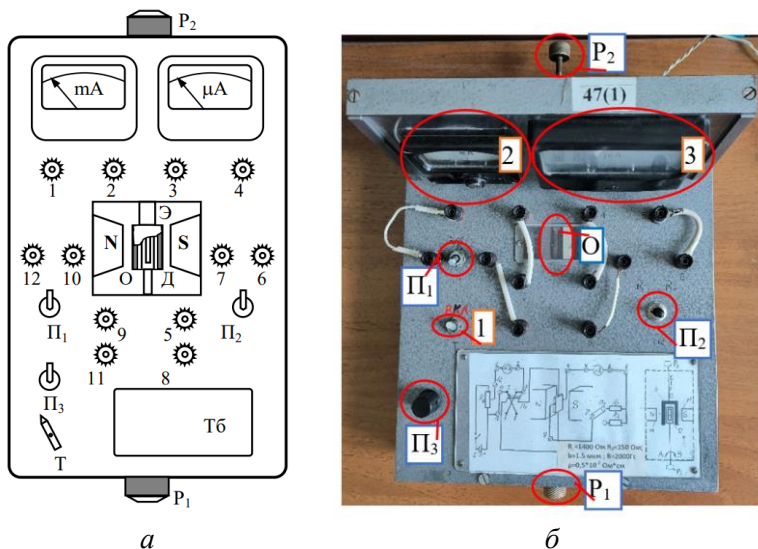


Рис. 2. Общий вид установки:
а – рисунок; б – фото

Исследуемый образец О, представляющий собой тонкий слой арсенида галлия, вмонтирован в прозрачный диэлектрический держатель Д, который можно поворачивать на 180° с помощью рукоятки P_1 в поле постоянного магнита.

Цилиндрический экран Э, изготовленный из ферромагнетика, который можно перемещать с помощью рукоятки P_2 позволяет производить магнитную экранировку образца. Батарея гальванических элементов, расположенная внутри прибора и включаемая тумблером 1, служит для создания продольного тока через образец. Величина тока регулируется потенциометром Π_3 и измеряется миллиамперметром 2, а его направление изменяется с помощью переключателя Π_1 . Микроамперметр μA 3 с симметричной относительно нуля шкалой, включаемый последовательно с

сопротивлением R_1 или R_2 с помощью переключателя Π_2 , служит для определения тока, вызванного разностью потенциалов Холла. В панели имеется окно для наблюдения за взаимным расположением магнитного экрана, исследуемого образца и постоянного магнита, южный и северный полюса которого обозначены буквами S и N. На лицевой части плиты расположена таблица Тб, в которой приводятся значения магнитной индукции поля постоянного магнита, удельной проводимости и толщины исследуемого образца, величины сопротивлений R_1 и R_2 и электрическая схема измерительной установки.

В данной работе исследуется поперечная (холловская) разность потенциалов в зависимости от величины протекающего по образцу продольного тока I при постоянном значении внешнего магнитного поля.

Для определения разности потенциалов Холла используют метод, основанный на измерении с помощью микроамперметра μA , нагружаемого на два различных сопротивления R_1 и R_2 двух токов i_1 и i_2 в холловской цепи. Расчет U_X производится по формуле, получаемой из решения уравнения Кирхгофа для холловской цепи:

$$U_X = \frac{i_1 i_2 (R_1 - R_2)}{i_2 - i_1}. \quad (11)$$

Для исключения паразитных ЭДС, возникающих из-за наличия асимметрии холловских контактов и температурного градиента в образце, окончательное значение U_X рассчитывается как среднее арифметическое из четырех измерений: двух при разном направлении продольного тока и двух – при разном направлении магнитного поля.

Порядок выполнения работы

Измерения в лаборатории

1. Экранируйте образец рукояткой P_2 (отслеживается визуально в окошке образца О). При экранированном исследуемом образце включите тумблер 1, установите потенциометром Π_3 максимально возможное значение продольного тока, измеряемого миллиамперметром mA 2, и по показаниям микроамперметра μA 3 убедитесь в отсутствии паразитных ЭДС. После этого

потенциометром **П₃** сведите продольный ток до минимально возможного значения и сдвиньте рукояткой **Р₂** магнитный экран Э с исследуемого образца О: подготовка установки к эксперименту закончена.

2. Поставьте переключатель **П₁** в нижнее положение и потенциометром **П₃** установите продольный ток равным 2 мА.

3. Микроамперметром **3** измерьте токи i_1 и i_2 , возникшие в холловской цепи (меняя с помощью переключателя **П₂** сопротивления R_1 и R_2).

4. Установите переключатель **П₁** в верхнее положение и проведите измерения i_1 и i_2 .

5. Рукояткой **Р₁** поверните образец на 180°, изменив тем самым направление магнитного поля на противоположное, и опять измерьте токи i_1 и i_2 в цепях с R_1 и R_2 сначала в нижнем положении переключателя **П₁**, а затем – в верхнем положении **П₁**.

В итоге в результате измерений по пп. 2-5 при продольном токе $I = 2$ мА будут получены четыре значения тока i_1 и четыре – тока i_2 . Результаты изменений (по модулю) запишите в таблицу 1.

6. Далее процесс измерений, описанных в пп. 2-4, повторите для значений продольного тока 4, 6, 8 и 10 мА.

По окончании измерений выключите питание тумблером Т.

Таблица 1

№ п/п	I, мА	Ориен- тация Р₁	i ₁ , мкА		i ₂ , мкА		i _{1cp} , А	i _{2cp} , А	U _x , В	U _x /I, В/А
			П ₁ ↑	П ₁ ↓	П ₁ ↑	П ₁ ↓				
1	2	0°								
		180 °								
2	4	0°								
		180 °								
3	6	0°								
		180 °								
4	8	0°								
		180 °								
5	10	0°								
		180 °								

Обработка результатов измерений

7. Усредните значения токов через резисторы R_1 и R_2 для каждого значения продольного тока.

8. Рассчитайте значения разности потенциалов Холла по формуле (11), взяв значения сопротивлений R_1 и R_2 из таблицы на приборе Тб.

9. Оцените ошибку при расчете холловской разности потенциалов для одного (указанного преподавателем) значения продольного тока I :

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta i_1}{i_1} + \frac{\Delta i_2}{i_2} + \frac{2\Delta R}{(R_1 - R_2)} + \frac{2\Delta i}{(i_2 - i_1)},$$

где $\Delta i_1 = \Delta i_2 = \Delta i$ – приборная ошибка, равная половине цены деления шкалы, а ΔR – точность заданных значений R (единица наименьшего разряда числа).

10. Постройте график функции $U_x = f(I)$ и определите по нему среднее значение отношения U_x/I .

11. Вычислите средние значения постоянной Холла, концентрации носителей заряда по формуле (8), а подвижность – по формуле (10).

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 – приборная ошибка, равная половине цены деления шкалы, а Δb и ΔB – точность заданных значений b и B (единица наименьшего разряда числа).

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

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

13. Найдите абсолютные погрешности величин:

$$\Delta R_x = \delta R_x \cdot R_{xCP}, \quad \Delta n = \delta n \cdot n_{CP}, \quad \Delta u = \delta u \cdot u_{CP}.$$

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

$$R_X = R_{XCP} \pm \Delta R_X.$$

$$n = n_{CP} \pm \Delta n.$$

$$u = u_{CP} \pm \Delta u.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. От чего зависит постоянная Холла R_X ?
3. Что называется подвижностью электронов и дырок и как она зависит от температуры?
4. Чему равна сила Лоренца и как определить ее направление?
5. Какие типы проводимости полупроводников вам известны?
6. Как определить знак носителей тока при помощи эффекта Холла?
7. Укажите возможные области применения эффекта Холла.
8. Будет ли возникать эффект Холла в случае экранировки образца рукояткой P_2 ? Почему?
9. Как можно изменить знак тока, вызванного разностью потенциалов Холла?
10. Как в работе нивелируются паразитные ЭДС, возникающих из-за наличия асимметрии холловских контактов и температурного градиента в образце?

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.