



Московский государственный университет

им. М.В.Ломоносова

Физический факультет

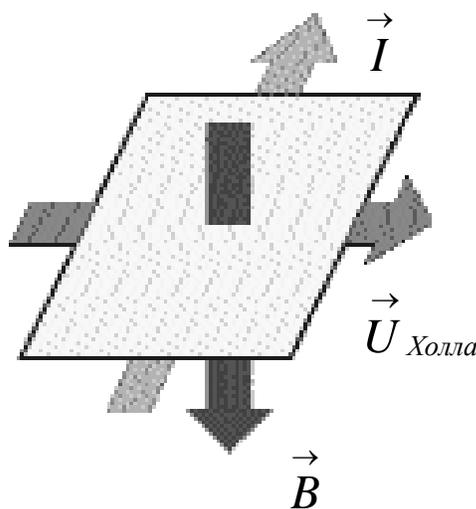
Кафедра общей физики

*Лабораторный практикум по
общей физике
(электричество и магнетизм)*

Лабораторная работа № 308

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

**Дурасова Ю.А.,
Козлов В.И., Матюнин А.В.**



МОСКВА – 2011

Изучается зависимость ЭДС Холла в полупроводниковом образце от напряженности магнитного поля, определяется электропроводность образца, концентрация носителей тока и некоторые другие параметры.

Введение

Общие сведения

Экспериментальное исследование эффекта Холла является эффективным методом изучения движения электрических зарядов, обуславливающих электрический ток в проводниках как с металлической, так и с полупроводниковой проводимостью. Эффект Холла несет информацию о таких важнейших характеристиках проводников, как концентрация носителей тока и знак носителей тока. В полупроводниках он позволяет установить принадлежность полупроводника к n -типу (с электронной проводимостью) или к p -типу (с дырочной проводимостью), благодаря чему является одним из важнейших методов исследования полупроводников.

Эффект Холла заключается в следующем. Пусть образец имеет форму прямоугольной пластинки длиной l , шириной b и толщиной d (рис. 1).

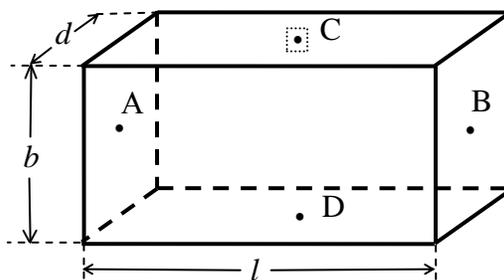


Рис. 1. Геометрия образца для исследования эффекта Холла.

Если вдоль длины образца (направление оси y) пропустить электрический ток \vec{I} , перпендикулярно плоскости пластинки (направление оси x) приложить магнитное поле \vec{B} , то в направлении, перпендикулярном \vec{I} и \vec{B} (направление оси z), возникнет электрическое поле, называемое полем Холла, с напряженностью $\vec{E}_{\text{Холла}}$ (рис. 2). На практике, как правило, поле Холла характеризуют разностью потенциалов, которую измеряют между

симметричными точками C и D на боковых поверхностях образца. Эта разность потенциалов называется холловской разностью потенциалов или ЭДС Холла $\mathcal{E}_{Холла}$.

Введение в теорию эффекта Холла

В классической теории проводимости эффект Холла объясняется тем, что в магнитном поле на движущиеся электрические заряды действует сила Лоренца, величина и направление которой определяется векторным выражением

$$\vec{F} = e[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (1)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{v} – скорость движения зарядов, e – заряд носителей тока с учетом знака: “+ e ” – для дырочной проводимости, “- e ” – для электронной проводимости.

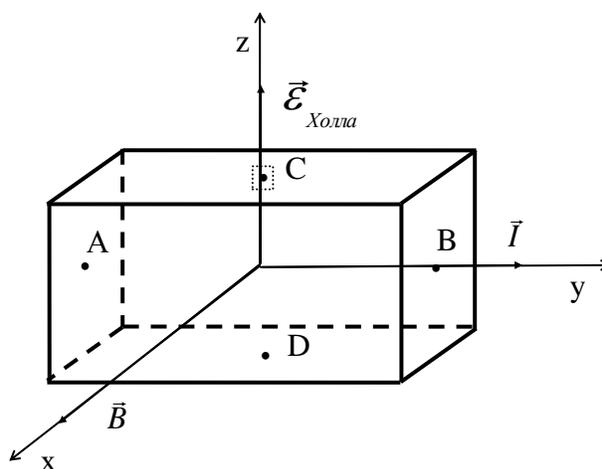


Рис. 2. Взаимная ориентация индукции магнитного поля \vec{B} , электрического тока \vec{I} и поля Холла $\vec{\mathcal{E}}_{Холла}$.

Направление силы Лоренца \vec{F} , действующей на положительные и отрицательные заряды, при некоторых заданных направлениях скорости заряда \vec{v} и индукции магнитного поля \vec{B} показано на рис. 3.

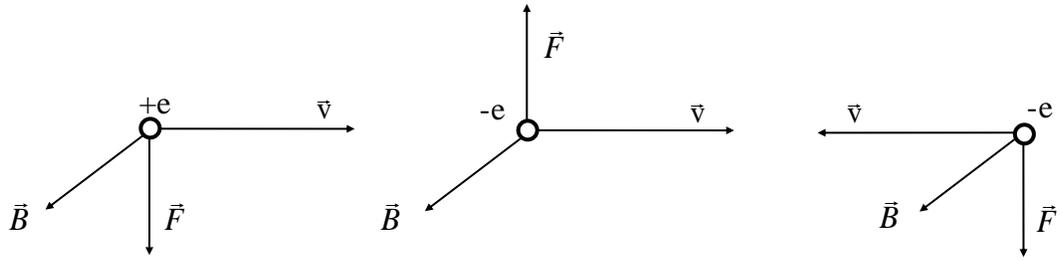


Рис. 3. Направление силы Лоренца \vec{F} , действующей на положительные и отрицательные заряды, при некоторых заданных направлениях скорости заряда \vec{v} и индукции магнитного поля \vec{B} .

Рассмотрим, каким образом возникает эффект Холла в результате действия силы Лоренца. Пусть электрический ток (движение положительных зарядов) \vec{I} направлен вдоль оси y , как показано на рис. 2, при этом точки C и D , расположенные на боковых поверхностях образца симметрично по отношению к току, будут находиться на одной эквипотенциальной поверхности, так что между этими точками в отсутствие магнитного поля разность потенциалов равна нулю. При включении магнитного поля \vec{B} под действием силы Лоренца траектория движущихся зарядов искривляется, заряды отклоняются к одной из боковых поверхностей образца в зависимости от знака зарядов, скорости их движения \vec{v} и направления магнитного поля \vec{B} .

В случае движения положительных зарядов направления вектора скорости \vec{v} и электрического тока \vec{I} совпадают. Тогда, в соответствии с рис. 2 и 3, сила Лоренца отклоняет заряды к нижней поверхности образца, в результате чего на ней создается избыток положительных зарядов. На противоположной стороне образца появится избыток отрицательных зарядов. Эти заряды и создают электрическое поле Холла $\vec{E}_{\text{Холла}}$, которое, в свою очередь, действует на движущийся заряд $+e$ с силой

$$F' = e \cdot E_{\text{Холла}} \cdot \quad (2)$$

Сила F' направлена вдоль поля $\vec{E}_{\text{Холла}}$, т.е. противоположно действию силы Лоренца \vec{F} .

Заряды на боковых поверхностях образца будут накапливаться до тех пор, пока поле Холла не уравновесит действие силы Лоренца. Таким образом, в равновесном состоянии

$$F' = F . \quad (3)$$

В рассматриваемом нами случае, когда $\vec{F} \perp \vec{v} \perp \vec{B}$, величина силы \vec{F} , согласно (1), равна

$$F = evB . \quad (4)$$

Следовательно,

$$eE_{\text{Холла}} = evB , \quad (5)$$

откуда

$$E_{\text{Холла}} = vB . \quad (6)$$

Выведем выражение для ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}$, возникающей между точками C и D , находящимися на расстоянии b (рис.1):

$$\mathcal{E}_{\text{Холла}} = U_{\text{Холла}} = E_{\text{Холла}} \cdot b = v \cdot b \cdot B . \quad (7)$$

Выразим скорость движения зарядов v через силу тока I . Пусть число носителей тока в единице объема образца (концентрация носителей тока) равно n . Тогда сила тока, протекающего через единицу поверхности образца, т.е. плотность тока:

$$j = env , \quad (8)$$

а сила тока

$$I = jbd = envbd . \quad (9)$$

Отсюда получаем

$$v = \frac{I}{enbd} . \quad (10)$$

Учитывая это соотношение, получаем

$$\mathcal{E}_{\text{Холла}} = \frac{IB}{\text{end}}. \quad (11)$$

Анализируя полученное выражение, прежде всего заметим, что ЭДС Холла пропорциональна силе тока I и обратно пропорциональна толщине образца d .

Экспериментальное определение ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}$ проводят на образце с заданной толщиной d при фиксированном токе через образец I . При этом полученное значение ЭДС Холла, как принято, рассчитывают на единицу толщины образца и единицу силы тока, т.е. рассчитывают величину

$$\mathcal{E}^*_{\text{Холла}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{Холла}} \cdot d}{I}, \quad (12)$$

которую называют **удельной или приведенной ЭДС Холла**. Как видно из формул (11) и (12), приведенная ЭДС Холла пропорциональна индукции магнитного поля B :

$$\mathcal{E}^*_{\text{Холла}} = RB, \quad (13)$$

где коэффициент пропорциональности

$$R = \frac{1}{en} \quad (14)$$

является характеристикой изучаемого вещества и называется **коэффициентом Холла** или **постоянной Холла**.

Границы применимости теории

1. Рассмотренный эффект Холла, причиной которого является действие на движущиеся в магнитном поле заряды силы Лоренца, называется классическим эффектом Холла. Как следует из формулы (12), для классического эффекта Холла характерна линейная зависимость $\mathcal{E}^*(B)$. Опыт между тем показывает, что в природе есть вещества, для которых эта зависимость нелинейна. Это свидетельствует о существовании другой

причины эффекта Холла, которая, однако, может быть понята только с позиций квантовой теории твердого тела.

Мы будем изучать эффект Холла в **полупроводниках**, поскольку в них эффект Холла имеет в основном классическую природу, и, следовательно, для его описания справедливо выражение (13).

2. Выражение (14) для классической постоянной Холла получено в предположении, что все носители тока имеют одинаковую скорость движения \bar{v} , которая к тому же не изменяется при движении носителей тока в веществе. Мы не учли, следовательно, что при движении в реальном веществе носители тока испытывают столкновения и потому рассеиваются на примесях, на колебаниях решетки. Учет рассеяния носителей тока в веществе приводит к несколько иному выражению для R , вид которого зависит от механизма рассеяния. Так, для чистых полупроводников с собственной проводимостью, когда рассеяние происходит главным образом на колебаниях решетки, для постоянной Холла получается выражение

$$R = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en}. \quad (15)$$

Определение параметров полупроводников

Полученную теоретически зависимость постоянной Холла от концентрации носителей тока используют для экспериментального определения типа носителей тока.

Через образец толщины d пропускают электрический ток и при разных значениях индукции магнитного поля B измеряют ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}$. По формуле (12) вычисляют

удельную ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}^*$ и строят график ее зависимости от B , который должен быть

линейным. По крутизне наклона прямой $\mathcal{E}_{\text{Холла}}^*(B)$ определяют постоянную Холла R .

Используя формулу (15) и полагая, что абсолютное значение заряда носителей тока равно заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, вычисляют **концентрацию носителей тока**:

$$n = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{eR} \approx 7,4 \cdot 10^{18} \cdot \frac{1}{R}. \quad (16)$$

При экспериментальном определении $\mathcal{E}_{\text{Холла}}$ следует обратить внимание, что наряду с эффектом Холла имеют место также некоторые другие эффекты: гальваномагнитный эффект, термомагнитный эффект и др. Для исключения влияния этих побочных эффектов используют свойство их четности, т. е. их независимости от направления магнитного поля. Между тем эффект Холла, являясь нечетным эффектом, меняет свой знак при изменении направления магнитного поля (рис. 4).

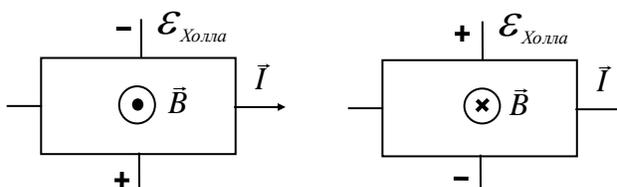


Рис. 4. Изменение знака ЭДС Холла с изменением ориентации магнитного поля.

Для того чтобы исключить побочные эффекты и определить истинное значение ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}$, напряжение между холловскими контактами измеряют при двух противоположных ориентациях магнитного поля. Действительно, пусть при выбранной ориентации поля напряжение между холловскими контактами: $U_1 = \mathcal{E}_{\text{Холла}} + \mathcal{E}_{\text{побочн}}$, а при изменении ориентации поля на противоположное напряжение: $-U_2 = -\mathcal{E}_{\text{Холла}} + \mathcal{E}_{\text{побочн}}$.

Отсюда

$$\mathcal{E}_{\text{Холла}} = \frac{|U_1| + |U_2|}{2}, \quad (17)$$

т.е. $\mathcal{E}_{\text{побочн}}$, обусловленное побочными четными эффектами, исключено.

Если наряду с постоянной Холла определить удельное электросопротивление проводника, то можно вычислить еще такую важную характеристику, как подвижность носителей тока.

Подвижностью носителей тока μ называется дрейфовая скорость носителей тока, которую они приобретают в электрическом поле с напряженностью 1 В/м. Очевидно, что если носители тока движутся в поле с напряженностью E , то их дрейфовая скорость:

$$v = \mu E. \quad (18)$$

Если концентрация носителей тока n , заряд e , то плотность электрического тока через образец (см. (8)):

$$j = env = en\mu E. \quad (19)$$

По закону Ома

$$j = \sigma E, \quad (20)$$

где σ — удельная электропроводность вещества, которая согласно (19) и (20) выражается через подвижность формулой

$$\sigma = en\mu. \quad (21)$$

Удельное электрическое сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{en\mu}, \quad (22)$$

откуда

$$\mu = \frac{1}{\rho en}. \quad (23)$$

С учетом выражения (15) для постоянной Холла R формула для подвижности носителей тока приобретает вид:

$$\mu = \frac{8}{3\pi} \frac{R}{\rho} \approx 0,85 \cdot \frac{R}{\rho}. \quad (24)$$

Для определения удельного электрического сопротивления изучаемого полупроводника измеряют электрическое сопротивление между контактами, расположенными на длинной поверхности образца на расстоянии Δl друг от друга. С этой целью пропускают электрический ток I вдоль образца и измеряют падение напряжения $U_{\Delta l}$ между указанными контактами. Тогда удельное сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{U_{\Delta l}}{I} \frac{b \cdot d}{\Delta l}, \quad (25)$$

где $b \cdot d$ — поперечное сечение образца (рис. 1).

Все величины, входящие в расчетные формулы, должны быть выражены в системе единиц СИ.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема установки для измерения эффекта Холла и удельного сопротивления приведена на рис. 6. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 7. Изучаемый образец приготовлен из полупроводникового вещества в форме прямоугольной пластинки, размеры которой указаны на установке. Здесь:

- 1–1 — контакты для пропускания электрического тока I через образец;
- 2–2 — контакты для измерения сопротивления образца;
- 3–3 — контакты для измерения ЭДС Холла.

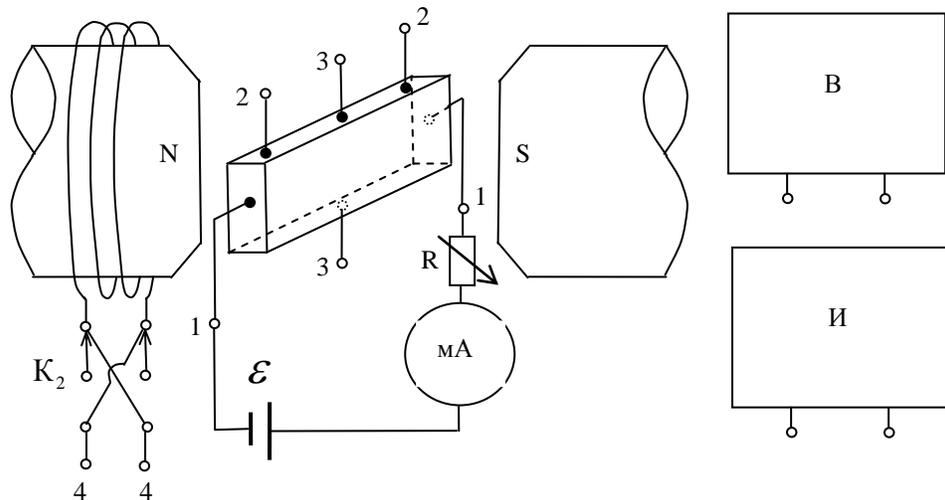


Рис. 6. Электрическая схема установки для измерения эффекта Холла и удельного сопротивления.

Источником тока I через образец служит источник питания \mathcal{E} (рис. 7 – 1). Сила тока на выходе источника тока регулируется магазином сопротивлений R (рис. 7 – 2) и измеряется с помощью цифрового миллиамперметра mA (рис. 7 – 3).

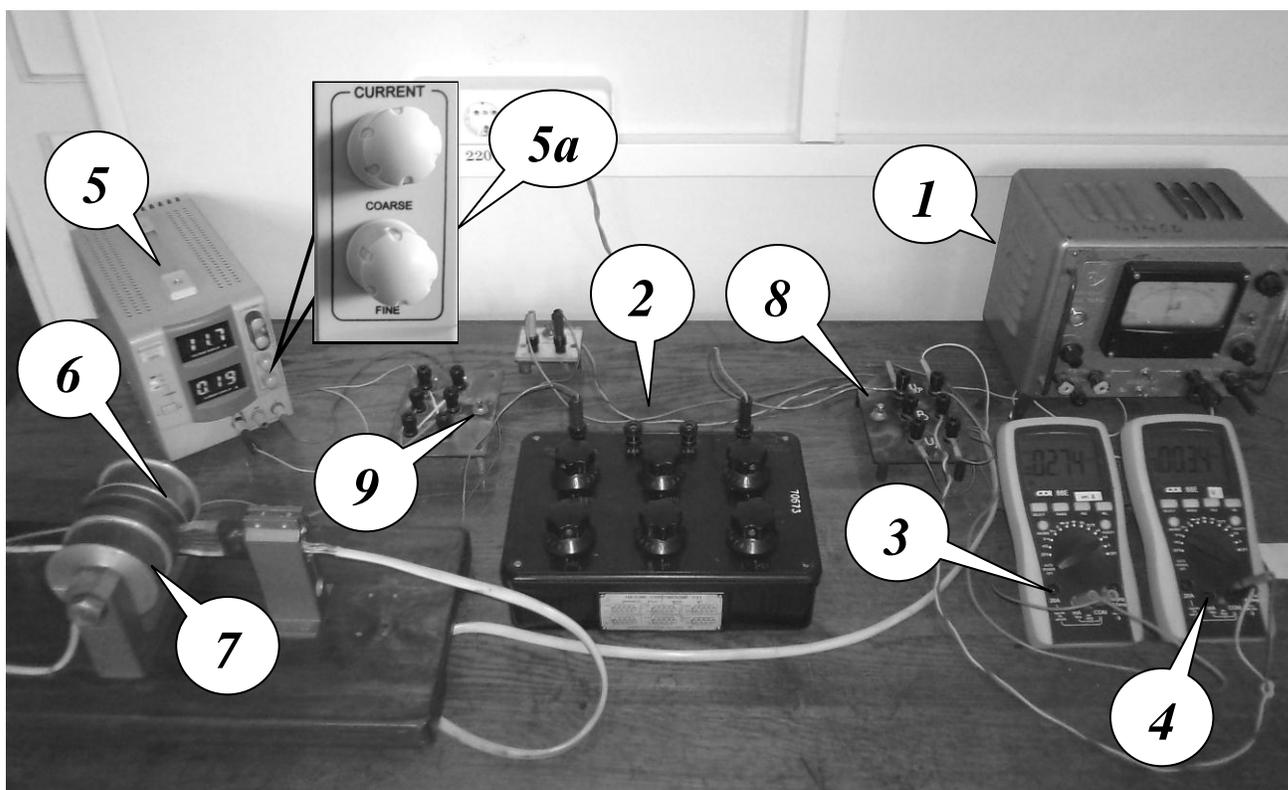


Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки.

Магнитное поле в образце (рис. 7 – 6) создается электромагнитом NS (рис. 7 – 7), питание которого осуществляется от источника постоянного тока “ IP ” (рис. 7 – 5) (путём подключения концов 4-4 обмотки электромагнита). Ток на выходе источника регулируется сначала верхней (“COARSE” – “грубо”), а затем нижней (“FINE” – “плавно”) ручками «CURRENT» (рис. 7 – 5а). Установленное значение силы тока I через электромагнит отображается на дисплее, расположенном на лицевой панели источника. Значения индукции магнитного поля в зазоре электромагнита при различных значениях силы тока I определяются по градуировочному графику или по таблице.

Образец расположен между полюсами электромагнита таким образом, чтобы магнитное поле было перпендикулярно плоскости образца. Изменение направления поля в образце на противоположное производится изменением направления тока I в электромагните с помощью переключателя K_2 (рис. 7 – 9).

Измерение падения напряжения U_ρ на образце между контактами 2–2 и напряжения $U_{\text{холл}}$ между холловскими контактами 3–3 производится с помощью цифрового вольтметра “В” (рис. 7 – 4).

Правила техники безопасности

1. Не касаться руками точек схемы, которые могут оказаться под напряжением.
2. Не оставлять без присмотра включенную установку.
3. Закончив работу, выключить источник питания электромагнита и разобрать схему.

Упражнение 1. Измерение удельного сопротивления образца

Включить ток I через образец. Перед включением проверить положение декад магазина R — магазин должен быть введен полностью. Переключив ключ K_1 (рис. 7 – 8) в положение “ ρ ” (тем самым подключив цифровой вольтметр “В” к контактам 2–2), установить ток величиной $I = 0,5$ мА. Измерить получающееся напряжение U_ρ .

Установить другую величину тока I через образец и измерить соответствующее ему напряжение U_ρ .

Выполнив измерения U_ρ при токе $I = 1, 2$ и 3 мА, вычислить величину удельного сопротивления ρ по формуле (25). Численное значение ρ определить как среднее из четырех измерений.

Упражнение 2. Изучение эффекта Холла

Переключить ключ K_1 в положение “ U ” (тем самым подключив цифровой вольтметр “В” к контактам 3–3).

Установить ток через образец величиной $I = 1$ мА. Включить источник питания электромагнита и установить ток через обмотку электромагнита величиной $I = 0,1$ А. Измерить напряжение $U_{\text{Холла}}$.

Затем, изменив направление тока в электромагните (с помощью переключателя K_2), вновь измерить $U_{\text{Холла}}$. Истинную величину холловской разности потенциалов $U_{\text{Холла}}$ определить как среднее арифметическое двух значений напряжений, полученных при двух направлениях поля, по формуле (17).

Провести измерения при различных величинах индукции магнитного поля, увеличивая ток I через электромагнит.

Далее необходимо вычислить удельную ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холла}}^*$ по формуле (12), построить зависимость $\mathcal{E}_{\text{Холла}}^*$ от индукции магнитного поля B и определить постоянную Холла R по крутизне наклона прямой $\mathcal{E}_{\text{Холла}}^*(B)$.

Установив ток через образец $I = 3$ мА, **повторить измерения.**

По найденным значениям удельного сопротивления ρ и постоянной Холла R вычислить концентрацию носителей тока n в изучаемом полупроводнике и их подвижность μ , используя формулы (16) и (24).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Что такое классический эффект Холла?
3. Записать выражение для силы Лоренца, действующей на носители заряда (в векторном виде). Определить направление силы Лоренца для двух разных направлений тока I и индукции магнитного поля \vec{B} .
4. Вывести основное выражение для ЭДС Холла. Написать выражение для постоянной Холла и рассказать, как ее экспериментально определяют.
5. Как вычисляется концентрация носителей тока?
6. Определить понятие «подвижность носителей тока». Как связана подвижность носителей тока с электропроводностью вещества? Как определяется подвижность носителей тока?
7. Почему в лабораторной работе для исследования взят не металлический образец, а полупроводниковый?
8. Какие типы проводимости имеют место в полупроводниках?
9. Почему не рекомендуется производить выключение и переключение тока в обмотке электромагнита при больших значениях силы тока в ней?

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 2008.
2. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 2005.