

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Методические указания к лабораторной работе Э10 по курсу общей физики.
Под редакцией С.Н.Тараненко.
Издательство МГТУ, 1993.

Рассмотрено гальваномагнитное явление - эффект Холла, экспериментальное изучение которого проведено на образце из германия. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

Цель работы: изучение эффекта Холла; исследование проводимости материала образца - определение знака и концентрации носителей тока, постоянной Холла, удельной проводимости, а также сопротивления материала образца.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Если к граням AA' и CC' проводящей одномерной пластины приложена некоторая разность потенциалов (рис. 1, фронтальная проекция пластины), то в ней возникает электрический ток (для определенности считаем, что носители тока - положительные).

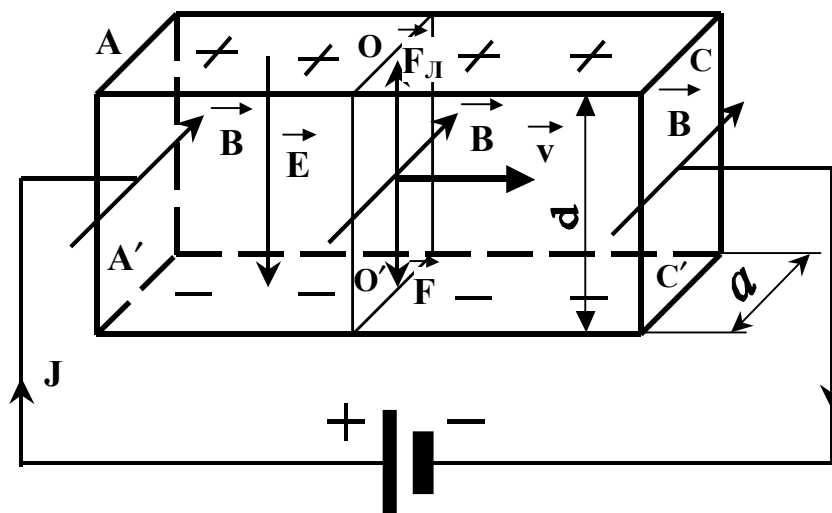


Рис. 1

У однородной пластины, при отсутствии магнитного поля, падение потенциала вдоль граней AC и A'C' будет равномерным и, следовательно, потенциалы в симметричных точках O и O' одинаковы. Если же пластину с током поместить в магнитное поле, направленное перпендикулярно боковым граням, то между точками O и O' возникнет разность потенциалов U, которую можно измерить вольтметром, подключенным к этим точкам.

Наблюдаемое явление называют **эффектом Холла**, а возникающую поперечную разность потенциалов - **холловским напряжением**.

Опытным путем в 1879 г. Холл установил, что возникающая разность потенциалов

$$U = R_H \frac{BJ}{a} \quad (1)$$

где R_H - коэффициент пропорциональности (постоянная Холла), зависящий от материала пластины; B - индукция магнитного поля; J - ток в образце; a - ширина пластины.

Исследования показали, что эффект Холла наблюдается во всех проводниках и полупроводниках. При изменении направления тока или направления магнитного поля на противоположное меняется знак разности потенциалов в выражении (1).

Возникновение эффекта Холла можно объяснить следующим образом. Пусть ток J в пластине обусловлен движением положительных зарядов e , концентрация которых p , а средняя скорость упорядоченного движения v . Тогда сила тока

$$\mathbf{J} = epv\mathbf{S} \quad (2)$$

где S - площадь поперечного сечения пластины.

При наложении магнитного поля, индукция которого равна \vec{B} , на каждый носитель тока действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}, \quad (3)$$

направленная (в рассматриваемом примере) вверх. Под действием этой силы заряды e отклоняются к верхней грани пластины, где возникает их избыток, а вблизи нижней грани обнаруживается их недостаток. Таким образом, в пластине возникает поперечное электрическое поле с напряженностью \vec{E} . Это поле действует на носители тока с силой

$$\vec{F} = e\vec{E}, \quad (4)$$

направленной противоположно силе Лоренца. Когда электрическая сила уравновесит силу Лоренца, наступит динамическое равновесие и между гранями пластины установится холловская разность потенциалов U . Из уравнений (3) и (4) следует, что

$$e\vec{E} = e\vec{v} \times \vec{B}, \quad (5)$$

отсюда напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}. \quad (6)$$

Полагая поперечное электрическое поле однородным, можно записать

$$U = \vec{E}d = \vec{v}Bd. \quad (7)$$

где d - высота пластины.

Определив по формуле (2) величину v и подставив ее в (7), получим

$$U = \frac{1}{ep} \cdot \frac{JB}{a} \quad (8)$$

Таким образом, найденная разность потенциалов совпадает с экспериментальной (1). Сравнивая формулы (1) и (8), видим, что постоянную Холла можно записать в виде

$$R_H = \frac{1}{ep} \quad (9)$$

Формулу (9) можно обобщить на случай одновременного присутствия двух типов носителей заряда: электроны с концентрацией n и дырки с концентрацией p в полупроводниках.

Вектор плотности продольного тока

$$\vec{j}_{||} = -en\vec{v}_n + ep\vec{v}_p \quad (10)$$

где e - заряд дырки ($e > 0$); $-e$ - заряд электрона ($-e < 0$). Векторы скорости электронов и дырок в зависимости от напряженности продольного электрического поля $\vec{E}_{||}$:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}_{||}; \quad \vec{v}_p = \mu_p \vec{E}_{||}, \quad (11)$$

где μ_n, μ_p - величины подвижностей электронов и дырок.

Подвижность (физический смысл) - средняя скорость направленного движения, приобретаемая носителем тока в электрическом поле, напряженность которого равна единице, т.е. 1 В/м,

Таким образом, вектор продольной плотности тока

$$\vec{j}_{||} = (en\mu_n + ep\mu_p) \vec{E}_{||} \quad (12)$$

Согласно закону Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j}_{||} = \sigma \vec{E}_{||}$$

Сравнивая (11) и (12), находим удельную проводимость материала

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (13)$$

Из соотношений (11) следует, что электроны и дырки двигаются в разные стороны вдоль пластины, однако сила Лоренца действует на них в одну сторону, в данном случае - к верхней грани:

$$\vec{F}_{Лн} = (-e)\vec{v}_n \times \vec{B} = e\mu_n \vec{E}_{\parallel} \times \vec{B}, \quad (14)$$

$$\vec{F}_{Лр} = e\vec{v}_p \times \vec{B} = e\mu_p \vec{E}_{\parallel} \times \vec{B}, \quad (15)$$

Итак, на положительные и отрицательные заряды в поперечном направлении действуют напряженности поля сторонних сил

$$\mathbf{E}_p = \mu_p \mathbf{E}_{\parallel} \mathbf{B}; \quad \mathbf{E}_n = -\mu_n \mathbf{E}_{\parallel} \mathbf{B} \quad (16)$$

Скорость дрейфа положительных и отрицательных зарядов в поперечном направлении:

$$\mathbf{v}_{p\perp} = \mu_p (\mathbf{E}_p + \mathbf{E}_{\perp}) \quad (17)$$

$$\mathbf{v}_{n\perp} = \mu_n (\mathbf{E}_n + \mathbf{E}_{\perp}) \quad (18)$$

где \mathbf{E}_{\perp} - напряженность поперечного электрического поля, возникающего при появлении поверхностных зарядов на верхней и нижней гранях (за положительное направление поперечной оси принимается направление от нижней к верхней грани пластины).

Полная плотность тока в поперечном направлении с учетом (16)... (18) имеет вид

$$\mathbf{j}_{\perp} = ep\mathbf{v}_{p\perp} - en\mathbf{v}_{n\perp} = (ep\mu_p^2 - en\mu_n^2) \mathbf{E}_{\parallel} \mathbf{B} + (ep\mu_p + en\mu_n) \mathbf{E}_{\perp} \quad (19)$$

Плотность поперечного тока \mathbf{j}_{\perp} характеризует скорость накопления поверхностных зарядов. В установившемся (стационарном) режиме $\mathbf{j}_{\perp} = \mathbf{0}$, следовательно, напряженность поперечного электрического поля (Холла);

$$\mathbf{E}_{\perp} = \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{p\mu_p + n\mu_n} \mathbf{E}_{\parallel} \mathbf{B} \quad (20)$$

Напряжение Холла U (разность потенциалов между верхней и нижней гранями пластины);

$$U = -\mathbf{E}_{\perp} \mathbf{d} = \mathbf{R}_H \mathbf{B} \mathbf{j}_{\parallel} \mathbf{d} \quad (21)$$

С учетом (4), (5), (12) постоянная Холла в общем случае

$$\mathbf{R}_H = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{e(p\mu_p + n\mu_n)^2} \mathbf{E}_{\parallel} \mathbf{B} \quad (22)$$

При наличии только положительных носителей тока ($n=0$) формула (22) идентична (9).

Как следует из (22), постоянная Холла \mathbf{R}_H зависит от материала пластины, а ее знак совпадает со знаком заряда основных носителей тока. Поэтому по постоянной Холла для проводников и полупроводников можно судить о природе их проводимости. При электронной проводимости $\mathbf{R}_H < \mathbf{0}$, а при дырочной $\mathbf{R}_H > \mathbf{0}$.

Если в полупроводнике существуют одновременно оба типа проводимости, то по знаку \mathbf{R}_H можно судить о том, какой из них преобладает.

Этот факт можно использовать для экспериментального определения знака носителей тока. Подключим к точкам O и O' универсальный цифровой вольтметр В7-27 с указателем знака напряжения (рис. 2). Тогда по знаку напряжения Холла можно определить знак носителей тока. В используемом цифровом вольтметре положительное напряжение соответствует положительным носителям, отрицательное – отрицательным.

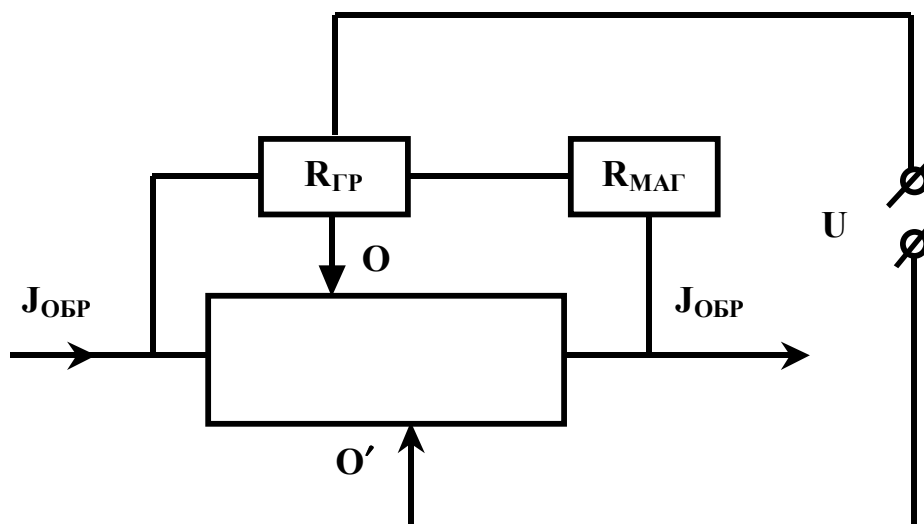


Рис. 2

Однако, поскольку припаять проводники, идущие от вольтметра В7-27, к двум совершенно симметричным точкам O и O' практически невозможно, то и при отсутствии магнитного поля ($B=0$) вольтметр показывает некоторое напряжение, т.е. существует дополнительная поперечная разность потенциалов за счет несимметричности контактов O и O' . Эту погрешность можно устранить в данной работе с помощью компенсационного метода (см.ниже).

Если в материале преобладает один из типов проводимости, то через постоянную Холла можно выразить концентрацию и подвижность носителей тока.

Действительно, пусть, например, $p \gg n$, тогда из (13), (22) получаем:

$$p = \frac{1}{eR_H} \quad (23)$$

$$\mu_p = \frac{\sigma}{ep} = \sigma R_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (24)$$

где

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

удельное сопротивление. Подвижность, вычисленную таким образом, называют подвижностью Холла.

Постоянная Холла в этом случае

$$R_H = \frac{U \cdot d}{BJ} \quad (25)$$

где U - показания вольтметра В7-27.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Представленная на рис. 2 рабочая схема для изучения эффекта Холла дополнена резистивным компенсатором (рис. 3), позволяющим с помощью регуляторов грубой $R_{ГР}$ и точной $R_{МАГ}$ (магазин сопротивлений) настройки уменьшить значение побочной (нехолловской) разности потенциалов до допустимых значений - нескольких единиц младшего разряда показаний цифрового вольтметра.

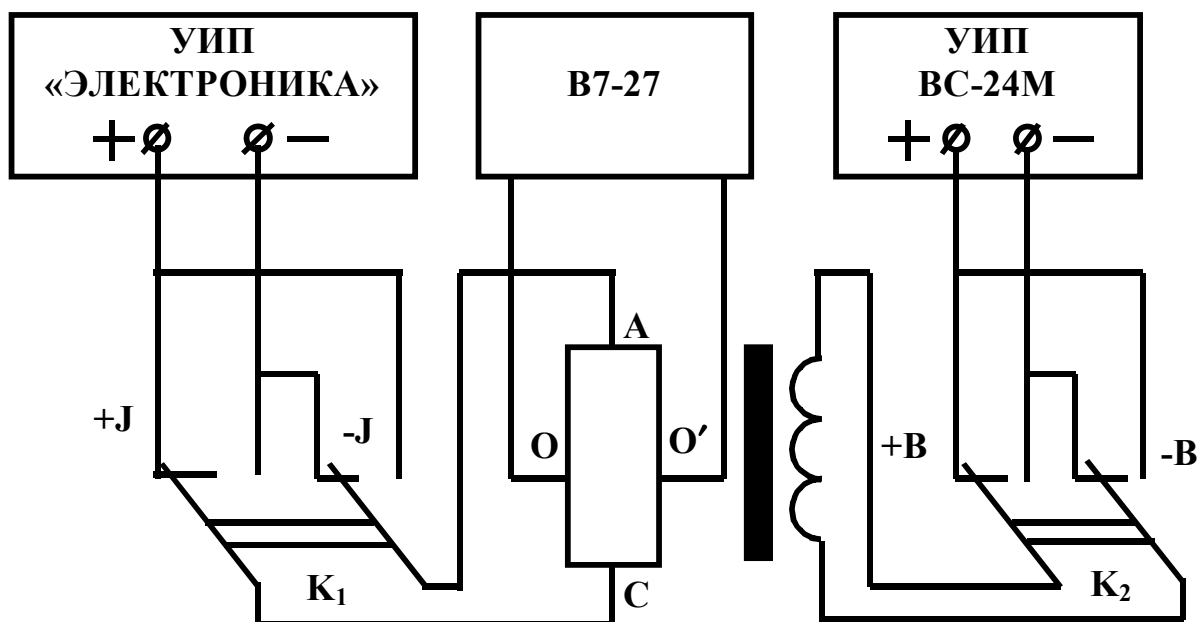


Рис. 3

При выполнении работы рекомендуется:

- 1) точную настройку проводить с использованием ручек «+100 Ом», «+10 Ом», «+1 Ом» от магазина сопротивления;
- 2) поддерживать ток в образце на заданном уровне;
- 3) периодически контролировать степень компенсации побочной разности потенциалов при отключенном источнике питания ВС-24М и проводить, если это необходимо, коррекцию.

Задание № 1. Определение знака носителей тока.

1. Переключатель режимов измерений цифрового вольтметра В7-27 установить в положение 1V.
2. Переключатель K_1 перевести в положение «+J».
3. Переключатель K_2 перевести в положение «+B».
4. Установить с помощью источника питания «Электроника» ток $J_{\text{ОБР}}=20$ мА, протекающий через образец.

Замечание. Так как в катушке электромагнита ток отсутствует, то индукция магнитного поля, а также холловская разность потенциалов равны нулю, и, следовательно, цифровой вольтметр показывает в этом случае побочную разность потенциалов.

5. Используя регуляторы $R_{\text{ГР}}$ и $R_{\text{МАГ}}$, скомпенсировать побочную разность потенциалов до значений одной-двух единиц младшего разряда показаний цифрового вольтметра.
6. Установить с помощью источника питания ВС-24М ток $J_{\text{КАТ}}$ в катушке электромагнита $J_{\text{КАТ}}=2$ А.
7. По показанию цифрового вольтметра, измеряющего напряжение Холла, определить знак носителей тока (положительным носителем тока соответствуют значения напряжения Холла со знаком «плюс»).

Задание № 2. Изучение зависимости напряжения Холла от величины и направления магнитного поля при различных значениях тока в образце.

1. Перевести переключатели « K_1 » и « K_2 » в положения «+J» и «+B». Установить ток в образце равным 10 мА. Записать в табл. 1 соответствующее этому току падение напряжения на образце $U_{\text{ОБР}}$. Получить зависимость напряжения Холла U от тока в катушке электромагнита, увеличивая $J_{\text{КАТ}}$ на 0,5 А в интервале от 0 до 3 А. Данные занести в табл. 1. Повторить измерения для токов в образце, равных 15 мА и 20 мА. Данные занести в табл. 1.
2. Изменить направление магнитного поля относительно образца, для чего перевести переключатель « K_2 » в положение «-B». Повторить измерения по п. 1. Данные занести в табл. 2

Таблица 1

$J_{\text{КАТ}}, \text{А}$	«+В», Тл	$J_{\text{ОБР}}=10 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	$J_{\text{ОБР}}=15 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	$J_{\text{ОБР}}=20 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	
		U, В	U, В	U, В	R, м ³ /Кл
0					
.					
.					
3,0					

Таблица 2

$J_{\text{КАТ}}, \text{А}$	«-В», Тл	$J_{\text{ОБР}}=10 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	$J_{\text{ОБР}}=15 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	$J_{\text{ОБР}}=20 \text{ мА},$ $U_{\text{ОБР}}=\dots$	
		U, В	U, В	U, В	R, м ³ /Кл
0					
.					
.					
3,0					

Замечание. Значения индукции магнитного поля В определяются по графику $V=V(J_{\text{КАТ}})$.

Анализ и обработка результатов измерений

1. С помощью формулы (25) вычислить значения постоянной Холла R_H при токе в образце 20 мА и различных значениях индукции магнитного поля. Вычисления провести дважды - по данным табл. 1 и 2.

Найти в обоих случаях среднее значение постоянной Холла $\langle R_H \rangle$.

2. Определить относительную погрешность δR_H полученного значения постоянной Холла.

$$\delta R_H = \delta U + \delta J_{\text{ОБР}} + \delta B + \delta a \quad (26)$$

где δa - относительная погрешность измерений стрелочными приборами.

Ток $J_{\text{КАТ}}$ рассчитать по формуле

$$\delta J_{\text{КАТ}} = k \frac{a_N}{z} \quad (27)$$

k - класс точности прибора; a_N - нормирующее значение. Относительная погрешность измерений холловской разности потенциалов цифровым вольтметром

$$\delta U = \pm \left[0,2 + 0,1 \left(\frac{U_{\text{МАХ}}}{|U|} - 1 \right) \right]$$

где $U_{\text{МАХ}}$ - приведенное значение напряжений на шкале вольтметра; U - показание вольтметра.

Замечание. Относительную погрешность измерения индукции магнитного поля δB принять равной относительной погрешности измерения силы тока в катушке электромагнита $\delta J_{\text{КАТ}}$.

Погрешностью измерения ширины пластины δa пренебречь.

Контрольные вопросы.

1. В чем состоит сущность эффекта Холла?
2. Как определить направление силы Лоренца?
3. Объясните принцип нахождения знака носителей тока в образце.
4. Что такое подвижность носителей тока и как она связана с проводимостью?
5. Зависит ли постоянная Холла от геометрических размеров образца?

6. Какова размерность постоянной Холла?

7. Почему меняется ток, проходящий через образец, при изменении тока в катушке электромагнита?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. М.: Наука, Т. 2.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 5 т. М.: Наука, 1977, Т.3.
3. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результата измерений при проведении физического эксперимента: Метод. указан. М.: Изд-во МГТУ, 1990.