

*Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования*
**«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

Лабораторная работа № 3.3.5

по курсу общей физики

на тему:

«Эффект Холла в металлах»

*Работу выполнил:
Баринов Леонид
(группа Б02-827)*

Долгопрудный
2019

1 Аннотация

В работе будет проведено измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

2 Теоретические сведения

Формула проводимости

$$\sigma = enb \quad (1)$$

b – подвижность, n – концентрация, e – элементарный заряд, показывает что исследование электрической проводимости проводников позволяет определить произведение nb . Как мы увидим ниже, исследование эффекта Холла позволяет находить плотность носителей n , после чего можно найти и их подвижность b . Таким образом, одновременное исследование электрической проводимости и эффекта Холла позволяет экспериментально находить важнейшие параметры, определяющие состояние электронов в металлах и полупроводниках. Эффект Холла позволяет также определить преобладающий тип проводимости — электронный или дырочный.

Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси x течёт ток I (рис. 1).

Если эту пластину поместить в магнитное поле, направленное по оси y , то между гранями А и Б появляется разность потенциалов. В самом деле, на электрон, движущийся со скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_л = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B} \quad (2)$$

где e — абсолютная величина заряда электрона, E — напряжённость электрического поля, B — индукция магнитного поля. В нашем случае сила, обусловленная вторым слагаемым, направлена вдоль оси z :

$$F_B = e|\langle v_x \rangle|B$$

Здесь $|\langle v_x \rangle|$ — абсолютная величина дрейфовой скорости электронов вдоль оси x , возникающая под действием внешнего электрического поля.

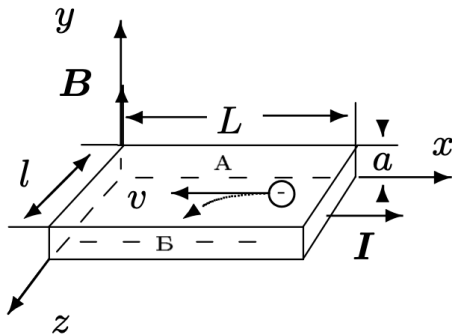


Рис. 1. Образец с током в магнитном поле

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, заряжая её отрицательно (для простоты рассматриваем только один тип носителей). На грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля E_z , направленного от А к Б, которое действует на электроны с силой $F_E = eE_z$, направленной против силы F_B . В установившемся режиме сила F_E уравнивает силу F_B , и накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Из условия равновесия $F_B = F_E$ найдём

$$E_z = |\langle v_x \rangle|B \quad (3)$$

Поле E_z даёт вклад в общее поле E , в котором движутся электроны. С полем E_z связана разность потенциалов U_{AB} между гранями А и Б:

$$U_{AB} = -E_z l = -|\langle v_x \rangle| B l \quad (4)$$

В этом и состоит эффект Холла. Второе слагаемое в силе Лоренца (2), с которым связан эффект, часто называют «холловским».

Замечая, что сила тока

$$I = ne|\langle v_x \rangle| l \cdot a, \quad (5)$$

и объединяя (3) и (5), найдем ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a} \quad (6)$$

Константа R_x называется постоянной Холла. Как видно из (6):

$$R_x = \frac{1}{ne}$$

3 Оборудование

В работе используются: электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр Ф116/1, амперметры, миллиамперметр, образцы из меди и цинка.

Экспериментальная установка

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 2.

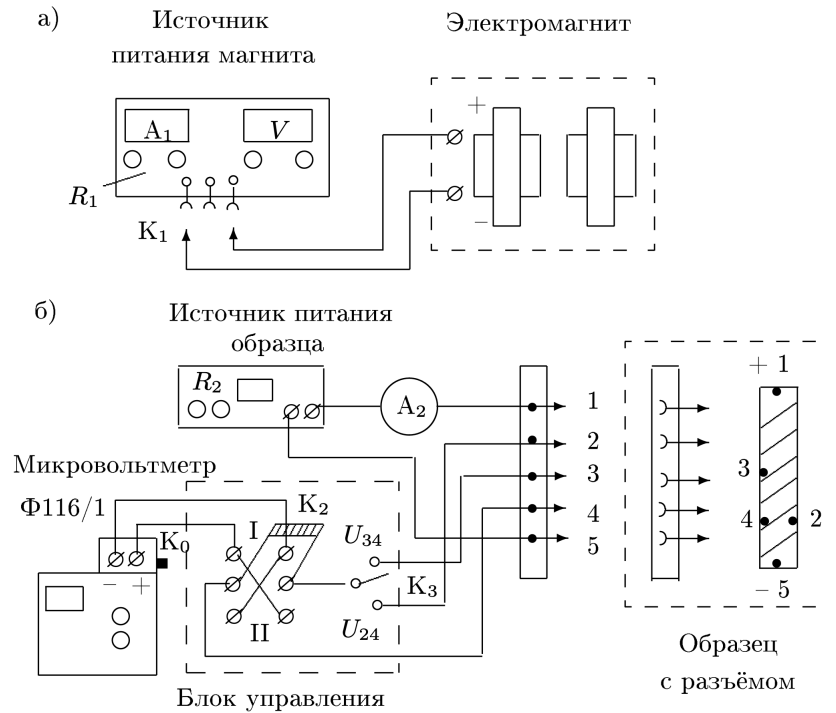


Рис. 2. Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах

В зазоре электромагнита (рис. 2а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью источника питания электромагнита. Разъём K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром A_1 . Градуировка магнита проводится с помощью милливеберметра.

Металлические образцы в форме тонких пластинок, смонтированные в специальных держателях, подключаются к блоку питания через разъём (рис. 2б). Ток через образец регулируется реостатом R_2 и измеряется амперметром A_2 .

Для измерений ЭДС Холла используется микровольтметр Ф116/1, в котором высокая чувствительность по напряжению сочетается с малой величиной тока, потребляемого измерительной схемой: минимальный предел измерения напряжения составляет 1,5 мкВ, а потребляемый ток — всего 10^{-8} А.

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 2 и 4 возникает холловская разность потенциалов, которая измеряется с помощью микровольтметра, если переключатель K_3 подключён к точке 2 образца. При подключении K_3 к точке 3 микровольтметр измеряет омическое падение напряжения U_{34} , вызванное основным током через образец. При нейтральном положении ключа входная цепь микровольтметра разомкнута.

Ключ K_2 позволяет менять полярность напряжения, поступающего на вход микровольтметра.

Иногда контакты 2 и 4 вследствие неточности подпайки не лежат на одной эквипотенциали, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения, вызванным протеканием основного тока через образец. Измеряемая разность потенциалов при одном направлении магнитного поля равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а при другом — их разности. В этом случае ЭДС Холла \mathcal{E}_x может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение U_0 между точками 2 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{24} \pm U_0 \quad (7)$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку \mathcal{E}_x можно определить характер проводимости — электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{34} между контактами 3 и 4 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по очевидной формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al}, \quad (8)$$

где L_{34} — расстояние между контактами 3 и 4, a — толщина образца, l — его ширина.

4 Результаты измерений и обработка результатов

Снимем зависимость индукции магнитного поля от тока через магнит:

$I_M, \text{ A}$	0	0,11	0,34	0,54	0,76	0,95	1,03	1,27
$B, \text{ мТл}$	20	133	414	660	862	978	1012	1080

Таблица 1. Зависимость индукции магнитного поля B от тока через магнит I_M

По результатам в таблице 1 построим график $B = f(I_M)$

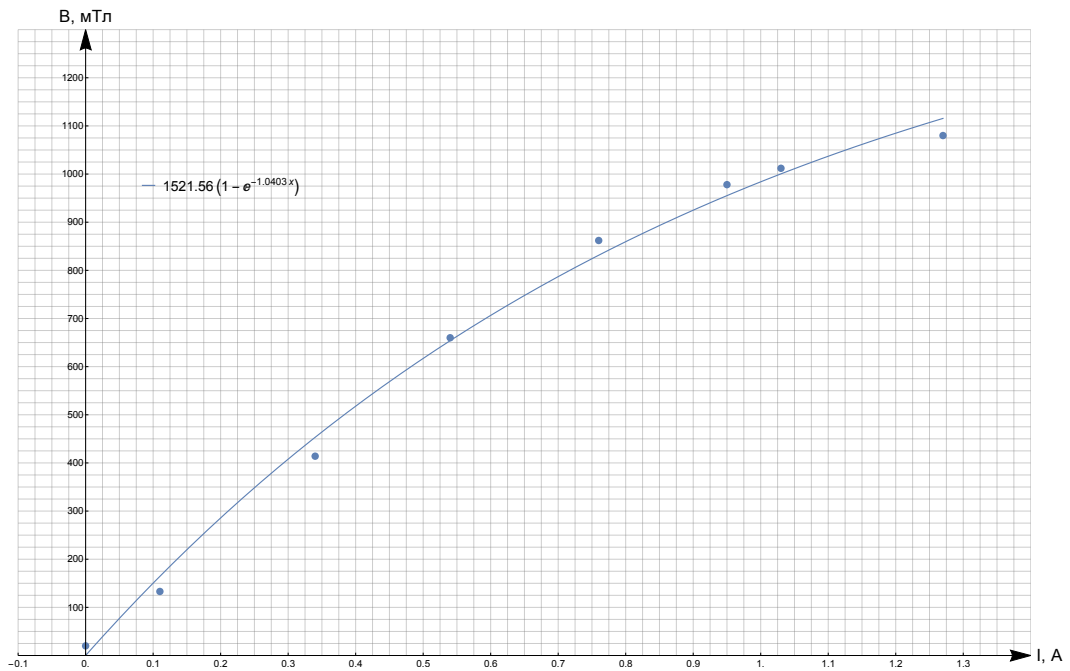


Рис. 3. График зависимости индукции магнитного поля B от тока через магнит I_M

Рассчитаем ЭДС Холла и построим семейство характеристик $\mathcal{E} = f(B)$ при разных значениях тока I через образец из меди.

$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$
0,2	436,31	0,03	0,8	178,87	0,06	1,01	178,87	0,09
	569,47	0,06		267,64	0,12		267,64	0,18
	640,49	0,09		356,42	0,18		356,42	0,27
	1013,33	0,12		445,19	0,24		445,19	0,36
	1208,63	0,12		533,96	0,33		533,96	0,45
0,4	205,50	0,06	0,8	631,61	0,42	1,01	622,73	0,54
	267,64	0,09		711,50	0,48		720,38	0,63
	383,05	0,12		800,28	0,54		800,28	0,69
	480,70	0,18		889,05	0,57		889,05	0,75
	604,98	0,24		986,70	0,6		986,70	0,78
	782,52	0,3		1066,59	0,63		1075,47	0,81

$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$
0,63	1013,33	0,33	0,9	1199,75	0,66	1,01	1190,87	0,84
	1199,75	0,33		178,87	0,06		178,87	0,06
	187,75	0,06		267,64	0,12		267,64	0,15
	276,52	0,12		356,42	0,21		356,42	0,24
	374,17	0,18		445,19	0,3		445,19	0,36
	462,94	0,24		533,96	0,39		533,96	0,45
	560,59	0,3		640,49	0,51		631,61	0,57
	675,99	0,36		711,50	0,54		711,50	0,63
	782,52	0,42		800,28	0,6		800,28	0,72
	889,05	0,45		906,80	0,66		889,05	0,75
0,63	1048,84	0,48	0,9	986,70	0,69	1,01	995,57	0,81
	1199,75	0,51		1075,47	0,72		1066,59	0,87
				1190,87	0,75		1190,87	0,87

Таблица 2. Зависимость тока I через образец от магнитной индукции B магнитного поля, в котором находится образец

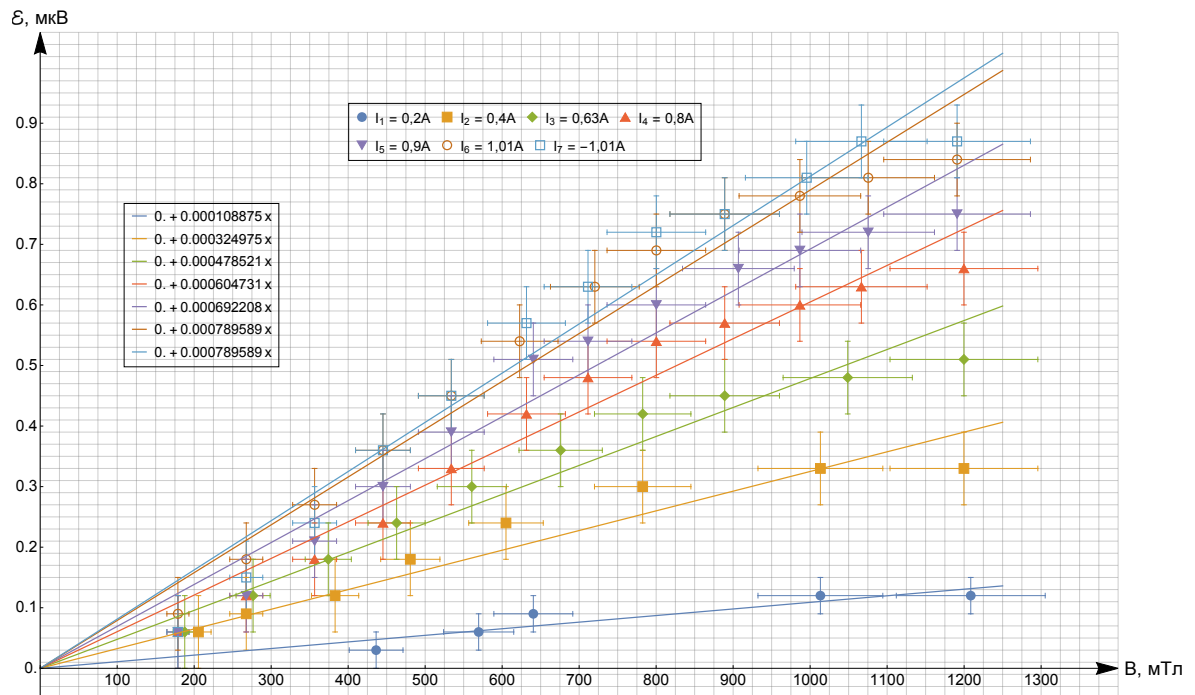


Рис. 4. Семейство характеристик $\mathcal{E} = f(B)$ при разных значениях тока I через образец

Определим угловые коэффициенты $k(I) = \Delta\mathcal{E}/\Delta B$ полученных прямых. Построим график $k = f(I)$

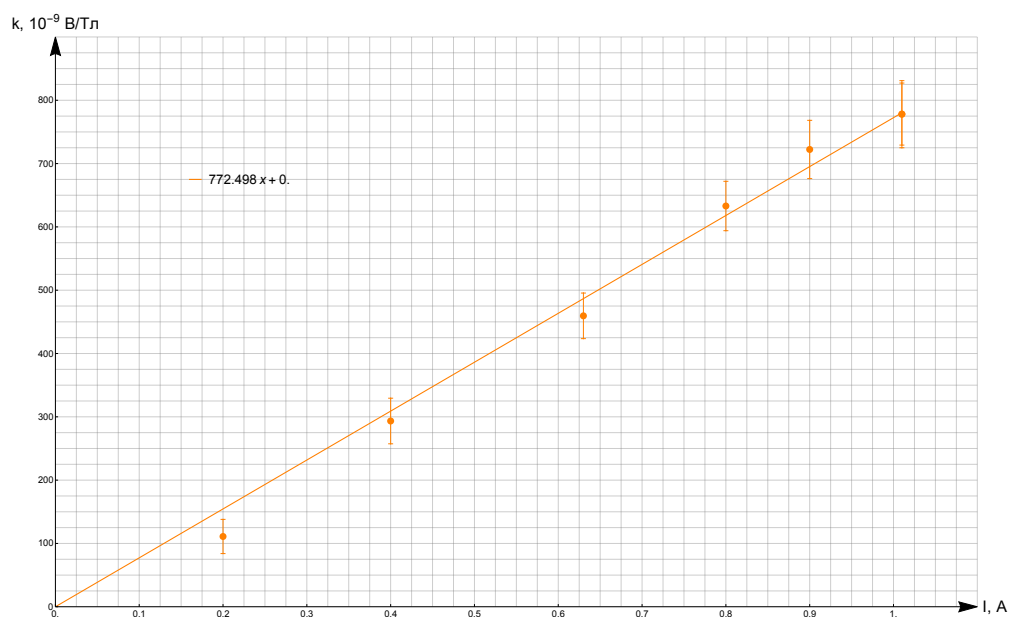


Рис. 5. График зависимости углового коэффициента $k = \Delta \mathcal{E} / \Delta B$ от тока через образец I

Вычислим постоянную Холла по углу наклона графика на рис. 5. $R_x = -a \cdot t$, где t – тангенс угла наклона графика $k = f(I)$; a – толщина образца из меди. ($a = 0,05 \text{ мм}$)

$$R_x^{\text{медь}} = -(0,42 \pm 0,08) \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

Повторим измерения для образца из цинка. Построим график зависимости $\mathcal{E}_x = f(B)$ и по наклону прямой рассчитаем постоянную Холла $R_x = -\mathcal{E}_x a / (BI)$ ($a = 0,12 \text{ мм}$, $I = 1 \text{ А}$)

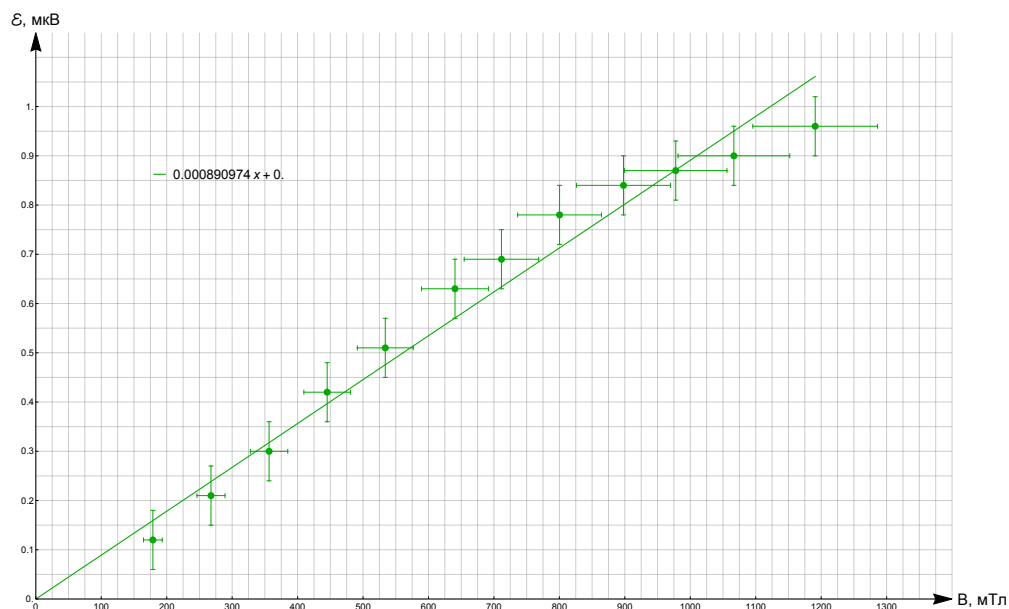


Рис. 6. График зависимости ЭДС Холла \mathcal{E} от магнитной индукции B для образца из цинка

$$R_x^{\text{цинк}} = (1,07 \pm 0,06) \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

Для определение удельной проводимости определим значение U_{34} при токе $I = 1 \text{ А}$

$$U_{34}^{\text{медь}} = 240 \pm 15 \text{ мкВ}$$

$$U_{34}^{\text{цинк}} = 300 \pm 15 \text{ мкВ}$$

Для обоих образцов рассчитаем концентрацию n носителей тока $n = 1/(R_x e)$. Также вычислим удельную проводимость σ материала образцов по формуле (8). По результатам рассчитаем подвижность b носителей тока.

Металл	$n, (\text{м}^3)^{-1}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$b, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Медь	$1,5 \pm 0,3 \cdot 10^{29}$	$7,8 \pm 0,5 \cdot 10^7$	33 ± 7
Цинк	$6,0 \pm 0,1 \cdot 10^{29}$	$1,1 \pm 0,1 \cdot 10^7$	$11,4 \pm 1,2$

Таблица 3. Плотность заряда n , электропроводность σ и подвижность носителей тока b для образца из меди и цинка

5 Обсуждение результатов и выводы

Результаты занесены в таблицу.

Металл	R_x $10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Табл. R_x , $10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Знак носит.	n $10^{29} (\text{м}^3)^{-1}$	σ , $10^7 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	b , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Медь	$-(0,42 \pm 0,08)$	$-0,53$	$-$	$1,5 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,5$	33 ± 7
Цинк	$1,07 \pm 0,06$	$1,04$	$+$	$6,0 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$11,4 \pm 1,2$

Таблица 4. Постоянная Холла R_x , плотность заряда n , электропроводность σ и подвижность носителей тока b для образца из меди и цинка