

# Лабораторная работа 3.3.5

## "Эффект Холла в металлах"

20 ноября 2020 г.

### Цель:

Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах

### Оборудование:

Электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр, амперметры, магнитометр, образцы из серебра и цинка.

### 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.

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:

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

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), найдём 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):

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

## Экспериментальная установка:

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис.1. 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 милливексметра.

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  $A_2$ .

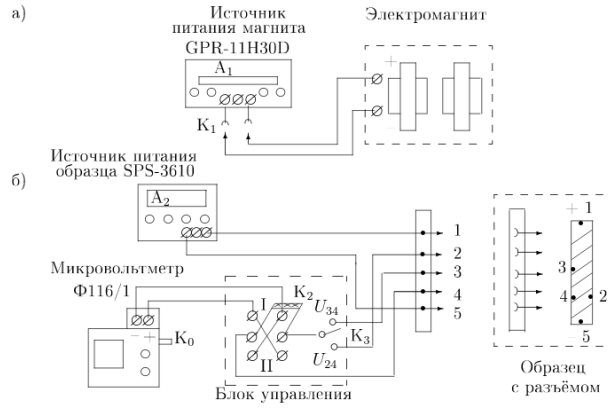


Рис. 1. Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах

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.

## Результаты измерений и обработка результатов

данные для калибровочной кривой электромагнита

B,mT	Im,A
123.3	0.1
356	0.29
597	0.49
705	0.6
976	0.9
1068	1.1
1107	1.2

Построим график зависимости  $B(I_m)$  для того, чтобы в дальнейшем по нему считать В

Найдем ЭДС Холла и построим графики зависимостей  $U(B)$  для серебра и меди

Юбр,А	0.2		0.4			0.6		
U,0.04мкВ	Im,A	B,mT	U,0.04мкВ	Im,A	BmT	U,0.04мкВ	Im,A	BmT
0	0	0	-1.5	0	0	-3	0	0
1	0.1	123.3	1	0.2	245	1	0.2	240
2	0.3	356	4	0.39	480	5	0.4	480
3	0.6	705	6	0.6	705	8	0.6	705
5	0.8	920	9	0.9	976	11	0.8	920
6	1	1025	11	1.2	1107	13	1	1025
0.8			1					
U,0.04мкВ	Im,A	BmT	U,0.04мкВ	Im,A	BmT			
-5	0	0	-7	0	0			
0	0.2	240	0	0.2	240			
5	0.4	480	6	0.4	480			
10	0.6	705	12	0.6	705			
15	0.8	920	18	0.8	920			
17	1	1025	20	1	1025			

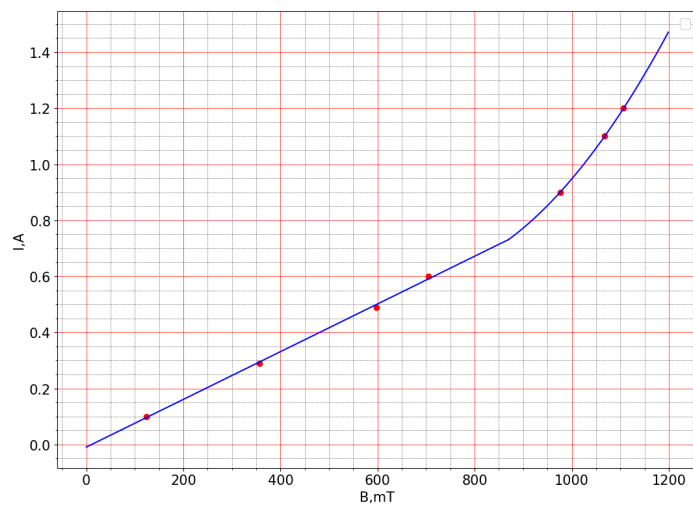


Рис. 1: Калибровочный график зависимости  $B(I_m)$

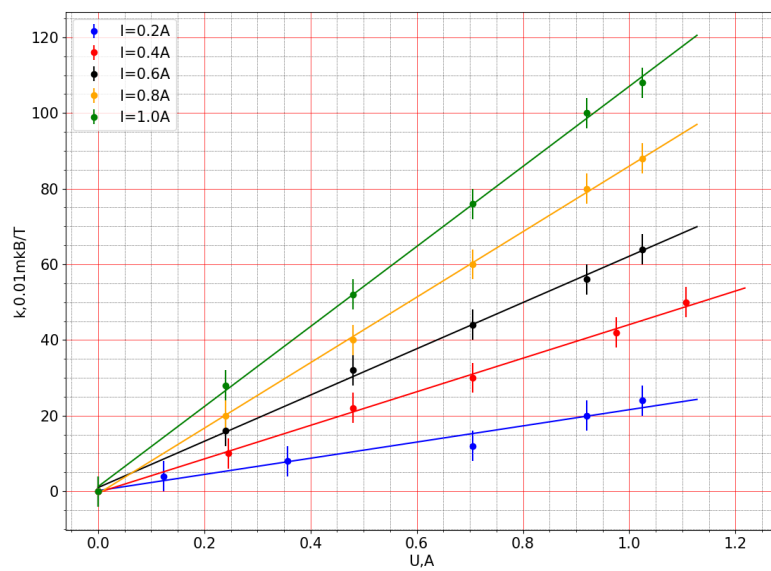


Рис. 2: зависимость  $U(B)$  для разных токов для серебра

Io <sub>бп</sub> ,A	0.2		0.4			0.6		
U,0.04mkB	Im,A	B,mT	U,0.04mkB	Im,A	B,mT	U,0.04mkB	Im,A	B,mT
7	0	0	6	0	0	6	0	0
11	0.4	480	15	0.4	480	18	0.4	480
13	0.6	705	17	0.6	705	25	0.6	705
15	0.8	920	22	0.8	920	29	0.8	920
16	1	1025	24	1	1025	32	1	1025
17	1.2	1107	25	1.2	1107	35	1.2	1107
0.8			1					
U,0.04mkB	Im,A	B,mT	U,0.04mkB	Im,A	B,mT			
6	0	0	7	0	0			
22	0.4	480	26	0.4	480			
30	0.6	705	37	0.6	705			
38	0.8	920	46	0.8	920			
41	1	1025	50	1	1025			
44	1.2	1107	53	1.2	1107			

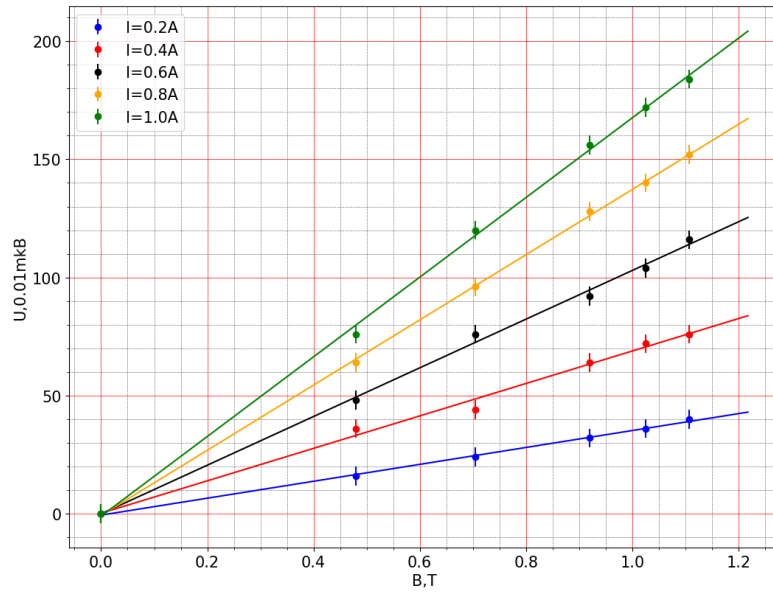


Рис. 3: зависимость  $U(B)$  для разных токов для меди

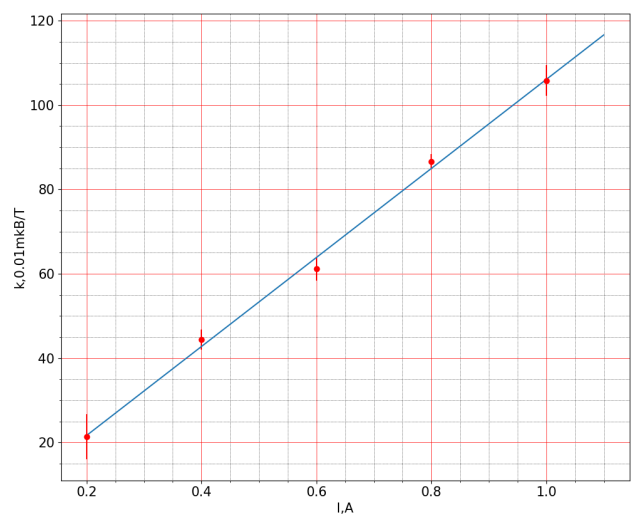


Рис. 4: зависимость  $k(I)$  для серебра

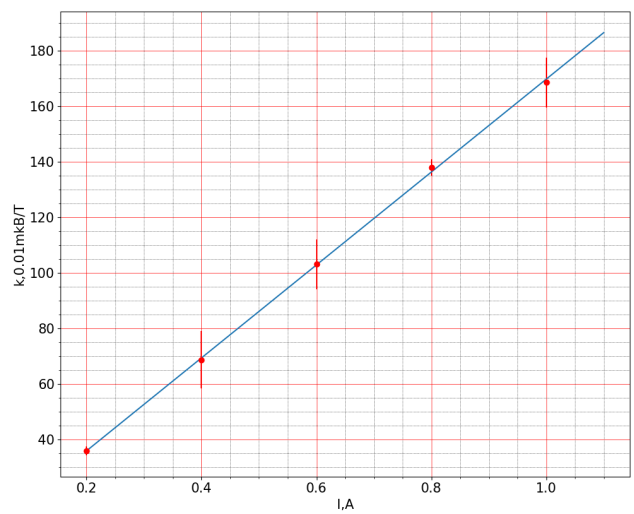


Рис. 5: зависимость  $k(I)$  для меди

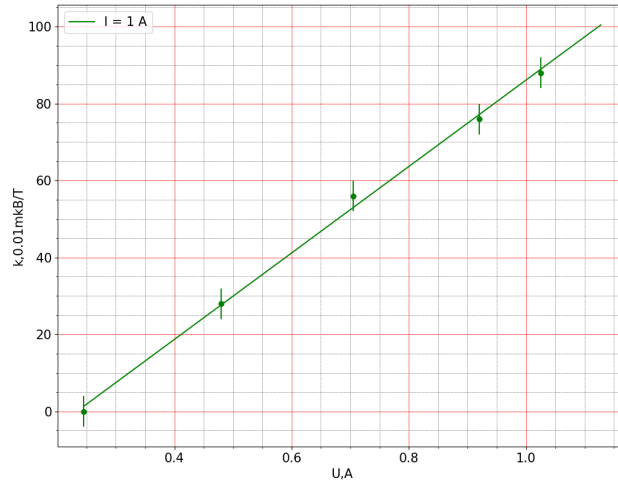


Рис. 6: зависимость  $U(B)$  для цинка

Найдя из графиков зависимости  $k(I)$  построим графики для серебра и меди из них найдем  $\frac{U}{BI}$  и подставив в формулу 6 получим:

$$|R(Ar)| = (0.95 \pm 0.15) * 10^{-10} \frac{m^3}{Kl}$$

$$|R(Cu)| = (0.8 \pm 0.2) * 10^{-10} \frac{m^3}{Kl}$$

построим аналогичный график для цинка, правда только для  $I=1A$  из графика для цинка найдем  $R(Zn)$

$$|R(Zn)| = (1.3 \pm 0.3) * 10^{-10} \frac{m^3}{Kl}$$

Для каждого из образцов рассчитаем концентрацию носителей тока  $n$ , удельную проводимость  $\sigma_0$  и подвижность носителей тока  $\mu$

$$n = \frac{1}{qR}$$

$$\sigma_0 = \frac{IL_{34}}{U_{34}al}$$

$$b = \frac{\sigma_0}{qn}$$



Металл	$(R_h \pm \Delta R_h),$ $10^{-10} \frac{m^3}{Kl}$	табл $R_h,$ $10^{-10} \frac{m^3}{Kl}$	знак	$(n \pm \Delta n),$ $10^{28} m^{-3}$	$(\sigma \pm \Delta \sigma),$ $10^7 (Om * m)^{-1}$	$b \frac{cm^2}{B * c}$
Ar	$-(0.95 \pm 0.15)$	-0.9	-	$-(6.5 \pm 1.0)$	$(4.1 \pm 0.2)$	$(40 \pm 8)$
Cu	$-(0.8 \pm 0.2)$	-0.55	-	$-(7.8 \pm 2.0)$	$(3.9 \pm 0.2)$	$(31 \pm 6)$
Zn	$(1.3 \pm 0.3)$	1.04	+	$(4.8 \pm 1.1)$	$(1.12 \pm 0.08)$	$(15 \pm 3)$

## Вывод

Мы измерили некоторые постоянные металлов с точностью порядка 30%, значения напряжения оказались завышены, на это могло повлиять несколько факторов: из-за некомпетентности лаборанта, магнитное поле менялось слишком быстро создавая дополнительное напряжение на образце, кроме того неизвестно с какой точностью были измерены параметры проводника, они могли внести дополнительную погрешность. Табличные данные брались из лабника, кроме цинка, для него данные из лабник отличались от данных из интернета в 2 раза.