

Работа 3.3.5.

Эффект Холла в металлах

Корнеев Е.С.

Эффект Холла в металлах

Цель работы: измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

Оборудование: электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр, амперметры, измеритель магнитной индукции, образцы из серебра и цинка.

Суть эффекта Холла заключается в следующем: пусть через однородную пластину металла вдоль оси x течет ток I . Если поместить пластину в однородное магнитное поле B , направленное по y , то между гранями А и Б появится разность потенциалов. Действительно, на движущийся с $\langle \vec{v} \rangle$ заряд будет действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_Л = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B}$$

где e - абсолютная величина заряда, \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{B} - индукция магнитного поля.

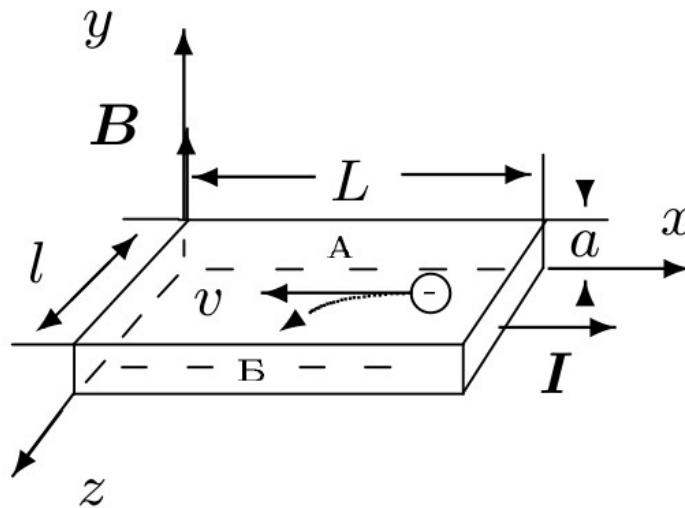


Рис. 1: Эффект Холла

В нашем случае сила, обусловленная вторым слагаемым, направлена вдоль z и равна

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

где $|\langle v_x \rangle|$ - дрейфовая скорость заряда вдоль оси x . Под действием силы F_B электроны отклоняются к грани Б, заряжая ее отрицательно, а на грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды, из-за чего возникает электрическое поле E_z , направленное вдоль оси z . Его действие на заряды можно

описать уравнением $F_{E_z} = eE_z$, причем сила F_{E_z} действует против силы F_B . Через некоторое время наступает установившийся режим, когда накопление зарядов прекращается и $F_{E_z} = F_B$. Отсюда нетрудно получить

$$E_z = |\langle v_x \rangle| B$$

С полем E_z связана разность потенциалов U_{AB} :

$$U_{AB} = -E_z l = -|\langle v_x \rangle| B l$$

В этом и состоит эффект Холла. Замечая, что $I = ne|\langle v_x \rangle| la$, получим

$$\varepsilon_{AB} = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a}$$

Константа R_x называется *постоянной Холла*:

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

Экспериментальная установка

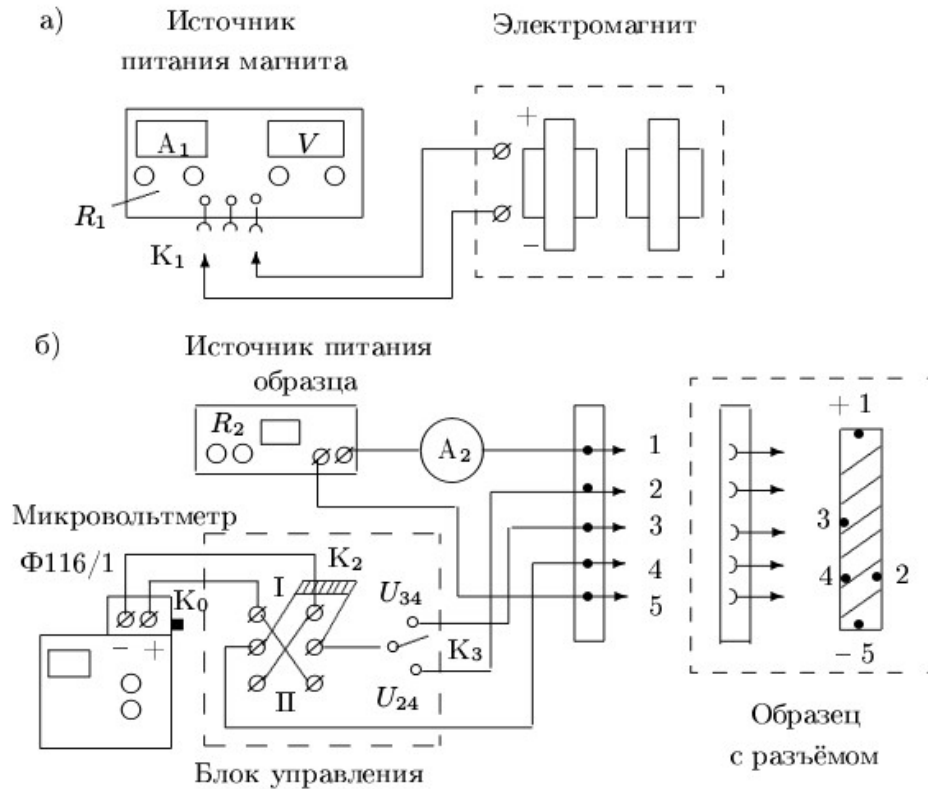


Рис. 2: Экспериментальная установка

В зазоре электромагнита создается постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью источника питания. Направление тока можно

менять, переключая ключ K_1 , ток через электромагнит измеряется амперметром A_1 . Перед использованием электромагнита проградуируем его при помощи миллиамперметра. Ток через металлические образцы в форме пластинок регулируется реостатом R_2 и измеряется амперметром A_2 . ЭДС Холла измеряется микровольтметром.

Вследствие неточности подпайки контактов к образцу не лежат на одной эквипотенциали, вследствие чего напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения. Чтобы исключить это сопротивление, будем измерять напряжение U_0 между контактами образца в отсутствие магнитного поля, и затем вычитать это значение из снимаемого напряжения.

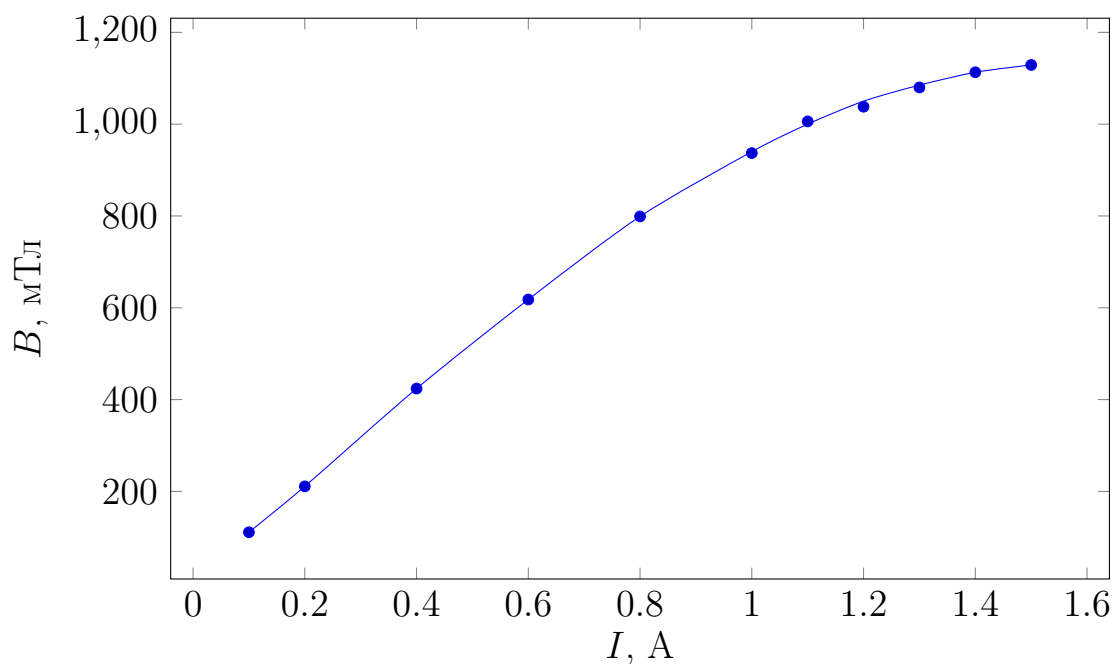
Ход работы.

0. Определим геометрические размеры образцов:

	L , мм	a , мм	l , мм
серебро	15.0	0.09	11.0
цинк	3.5	0.12	10.5

1. Проградуируем электромагнит, сняв зависимость $B(I)$:

I , А	B , мТл
0.1	111
0.2	211
0.4	424
0.6	618
0.8	799
1.0	937
1.1	1006
1.2	1038
1.3	1080
1.4	1113
1.5	1129



2. Теперь снимем зависимости $U(I_M)$ для разных значениях тока I через серебряный образец:

$I = 0.2 \text{ A}$			$I = 0.4 \text{ A}$			$I = 0.6 \text{ A}$		
$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$
0.0	1		0.0	0		0.0	-1	
0.2	2	0.04	0.2	1	0.04	0.2	2	0.12
0.4	3	0.08	0.4	3	0.12	0.4	5	0.24
0.6	4	0.12	0.6	4	0.16	0.6	7	0.32
0.8	5	0.16	0.8	6	0.24	0.8	10	0.44
1.0	5	0.16	1.0	7	0.28	1.0	11	0.48
1.2	6	0.20	1.2	8	0.32	1.2	13	0.56
1.4	6	0.20	1.4	8	0.32	1.4	13	0.56

$I = 0.8 \text{ A}$			$I = 1.0 \text{ A}$			$I = 1.2 \text{ A}$		
$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$
0.0	-1		0.0	-1		0.0	-1	
0.2	2	0.12	0.2	3	0.16	0.2	4	0.20
0.4	6	0.28	0.4	8	0.36	0.4	10	0.44
0.6	9	0.40	0.6	12	0.52	0.6	15	0.64
0.8	13	0.56	0.8	17	0.72	0.8	20	0.84
1.0	15	0.64	1.0	20	0.84	1.0	24	1.00
1.2	16	0.68	1.2	22	0.92	1.2	26	1.08
1.4	18	0.76	1.4	23	0.96	1.4	28	1.16

Обратное направление вектора магнитной индукции:

$I = 1.2 \text{ A}$		
$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$
0.0	6	
0.2	10	0.16
0.4	17	0.44
0.6	22	0.64
0.8	28	0.88
1.0	32	1.04
1.2	35	1.16
1.4	38	1.28

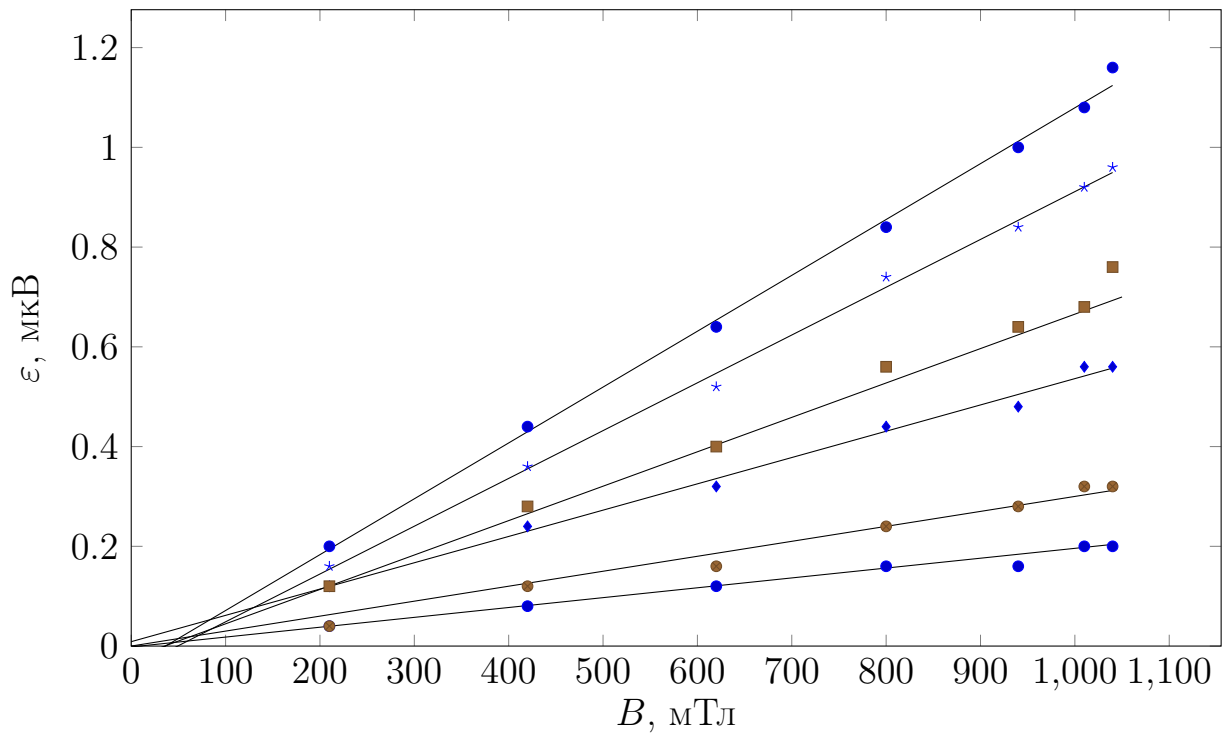
Пересчет из делений в милливольты осуществлялся исходя из соотношения 1 дел = 0.04 мкВ в данном режиме. Значение U_0 записано в первой строке для каждой из таблиц ($I_M = 0$), пересчет из делений в мВ осуществляется уже после вычитания U_0 из измеряемого напряжения. Погрешность приборную σ_U примем равной 0.02 мкВ, на ее фоне погрешностью силы тока σ_I , равно как и погрешностью σ_B , можно пренебречь.

3. Имея зависимость $B(I_M)$, получим зависимости $\varepsilon(B)$:

$I = 0.2 \text{ A}$		$I = 0.4 \text{ A}$		$I = 0.6 \text{ A}$	
$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$
0.04	210	0.04	210	0.12	210
0.08	420	0.12	420	0.24	420
0.12	620	0.16	620	0.32	620
0.16	800	0.24	800	0.44	800
0.16	940	0.28	940	0.48	940
0.20	1010	0.32	1010	0.56	1010
0.20	1040	0.32	1040	0.56	1040

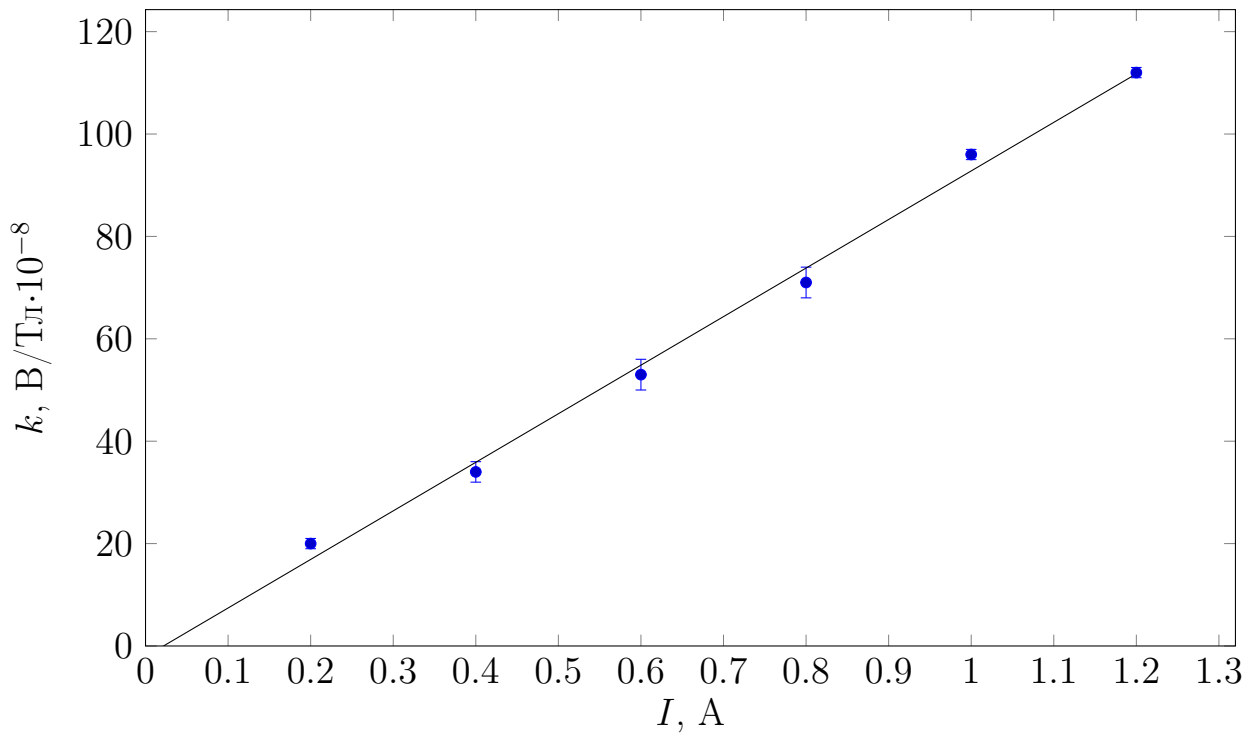
$I = 0.8 \text{ A}$		$I = 1.0 \text{ A}$		$I = 1.2 \text{ A}$	
$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$
0.12	210	0.16	210	0.20	210
0.28	420	0.36	420	0.44	420
0.40	620	0.52	620	0.64	620
0.56	800	0.74	800	0.84	800
0.64	940	0.84	940	1.00	940
0.68	1010	0.92	1010	1.08	1010
0.76	1040	0.96	1040	1.16	1040

Таким образом, получаем семейство графиков:



Определим $k = \Delta\varepsilon/\Delta B$ по МНК:

$I, \text{ A}$	$k, \text{ В/Тл}\cdot 10^{-6}$	$\sigma_k, \text{ В/Тл}\cdot 10^{-6}$
0.2	0.20	0.01
0.4	0.34	0.02
0.6	0.53	0.03
0.8	0.71	0.03
1.0	0.96	0.01
1.2	1.12	0.01



Теперь определим угловой коэффициент по МНК, пользуясь формулами:

$$k = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2},$$

$$\sigma_k \approx \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2},$$

где предполагается линейная зависимость $y = kx + b$. Таким образом, $\Delta k / \Delta I = 95 \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{А} \cdot \text{Т}_\text{Л}}$. Зная его, получаем

$$R_x = -k \cdot a = -0.86 \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{К}_\text{Л}}$$

Определим по МНК случайную погрешность:

$$\sigma_{\text{случ}} = 0.02 \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{К}_\text{Л}}$$

Приборную оценим по формуле

$$\sigma_{\text{приб}} = \sqrt{\left(\sum_{i=0}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2},$$

считая R_x функцией от U, I :

$$\sigma_{\text{приб}} \approx 0.04 \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{К}_\text{Л}}$$

тогда

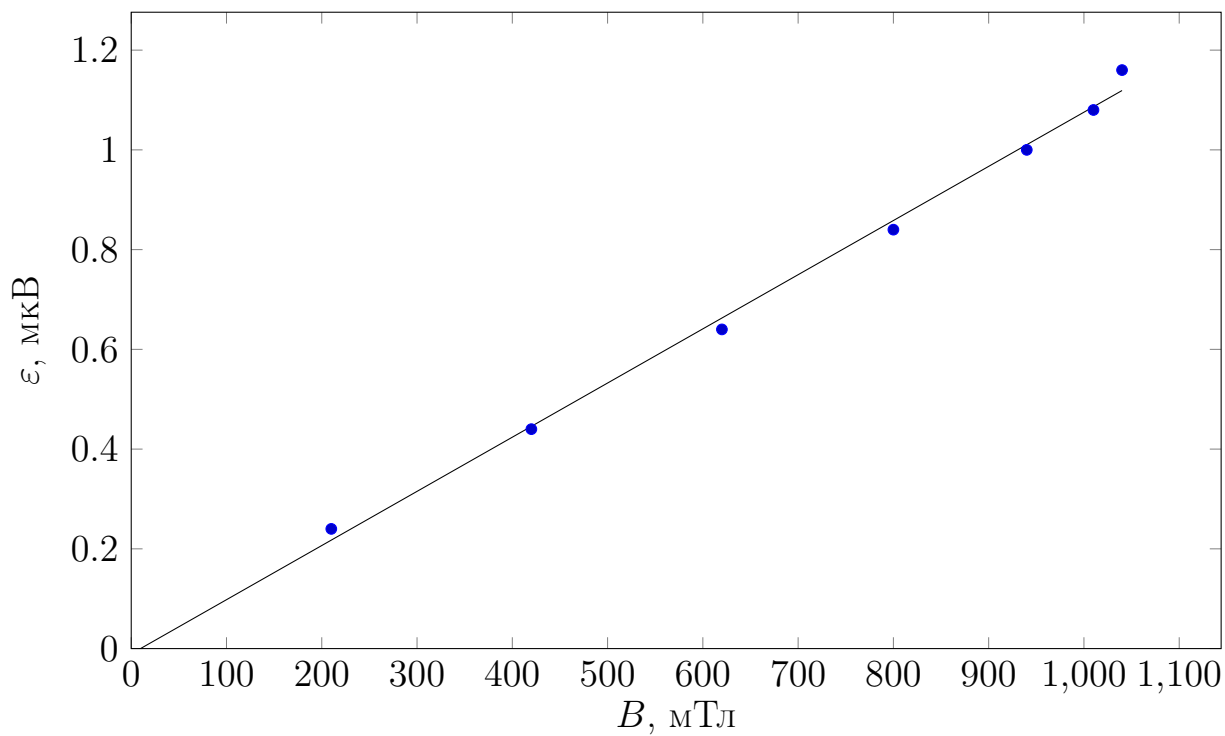
$$\sigma_{R_x} = \sqrt{\sigma_{\text{приб}}^2 + \sigma_{\text{случ}}^2} = 0.04 \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$$

или

$$R_x^{\text{серебро}} = (-0.84 \pm 0.04) \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$$

4. Построим аналогичные зависимости для цинкового образца.
Соответствующая зависимость для образца из цинка:

$I = 1.0 \text{ A}$			
$I_M, \text{ A}$	$U, \text{ дел}$	$U, \text{ мкВ}$	$B, \text{ мТл}$
0.0	13		
0.2	19	0.24	210
0.4	24	0.44	420
0.6	29	0.64	620
0.8	34	0.84	800
1.0	38	1.00	940
1.2	40	1.08	1010
1.4	42	1.16	1040



Аналогично найдем угловой коэффициент и определим его погрешность, используя МНК:

$$k = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta B} = 108 \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

$$\sigma_{\text{случ}} = 3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

Считая $k = f(U, I)$:

$$\sigma_{\text{приб}} \approx 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

Отсюда получаем:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_{\text{приб}}^2 + \sigma_{\text{случ}}^2} = 6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

Таким образом:

$$k = (108 \pm 6) \cdot 10^{-8} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

Отсюда несложно получить:

$$R_x^{\text{цинк}} = -k \cdot \frac{a}{I} = (-1.30 \pm 0.07) \cdot 10^{-10} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$$

5. Определим напряжения U_{34} для серебра и цинка в отсутствие магнитного поля:

	U_{34} , дел	U_{34} , мкВ
серебро	27	270
цинк	24	240

В данном режиме измерений 75 делениям соответствовало 750 мкВ, откуда 1 дел = 10 мкВ. Отсюда погрешность $\sigma_{U_{34}}$ примем равной 5 мкВ. Тогда можем найти удельные проводимости по формуле

$$\sigma = \frac{I L_{34}}{U_{34} a l} :$$

$$\sigma^{\text{серебро}} = (56.1 \pm 1.0) \cdot 10^6 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

$$\sigma^{\text{цинк}} = (11.5 \pm 0.2) \cdot 10^6 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

Определим n , зная значение постоянной Холла:

$$n = -\frac{1}{R_x q} = -\frac{1}{R_x e}$$

При этом погрешность можно определить, считая $n = f(R)$:

$$n^{\text{серебро}} = (0.74 \pm 0.04) \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$$

$$n^{\text{цинк}} = (0.48 \pm 0.03) \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$$

6. Теперь, зная основной тип носителей заряда и их концентрацию, можем найти подвижность:

$$\sigma = enb \Rightarrow b = \frac{\sigma}{en},$$

$$\Delta b = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial n} \sigma_n\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} \Delta \sigma\right)^2}$$

$$b^{\text{серебро}} = (47 \pm 3) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$b^{\text{цинк}} = (15 \pm 3) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Таким образом, в данной лабораторной работе мы определили концентрацию носителей зарядов в металлах, таких как серебро и цинк, а также исследовали проявления эффекта Холла в этих металлах.