

Работа 3.3.5

Эффект Холла в металлах

Валеев Рауф Раушанович
группа 825

8 сентября 2019 г.

Цель работы.

Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

В работе используются.

Электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр, амперметры, милливеберметр, образцы из меди и цинка.

Теоретическая справка.

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

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 $\langle v \rangle$ в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$F_l = -eE - e \langle v \rangle \times B \quad (1)$$

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

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

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 $F_B = F_E$ найдем

$$E_z = | \langle v_x \rangle | B \quad (2)$$

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

$$U_{AB} = -E_z l = -| \langle v_x \rangle | B l \quad (3)$$

В этом и состоит эффект Холла. Второе слагаемое в силе Лоренца, с которым связан эффект, называют "холловским".

$$I = ne | \langle v_x \rangle | l \cdot a \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a} \quad (5)$$

Константа R_x называется постоянной Холла. Как видно, она равна

$$R_x = \frac{1}{ne} \quad (6)$$

Экспериментальная установка.

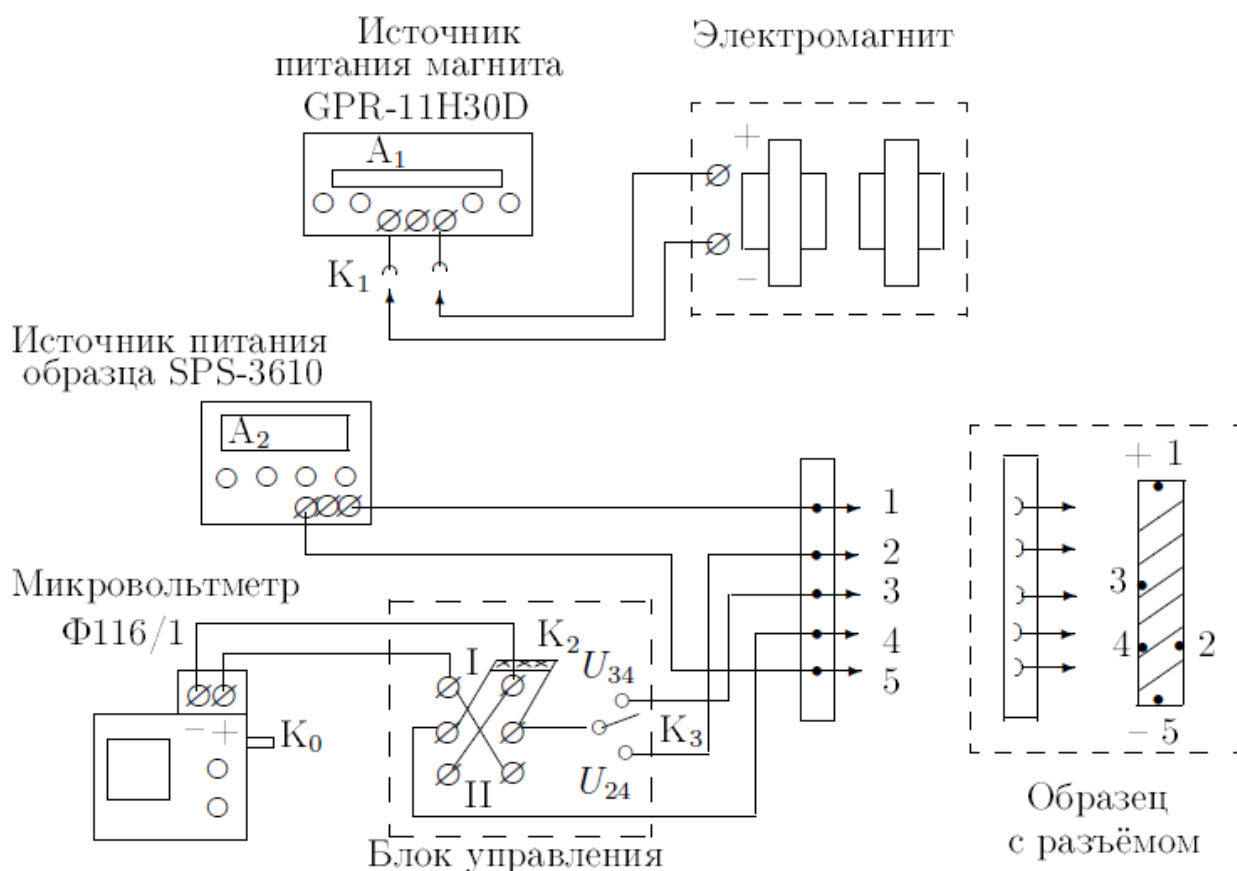


Рисунок 1. Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах.

В зазоре электромагнита создается постоянное магнитное поле, которое можно регулировать с помощью источника питания электромагнита.

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 напряжением, вызванным протеканием основного тока через образец.

Неточности измерений можно избежать путем фиксирования этого омического напряжения при нулевом значении силы тока и отсчитывании от него Холловского напряжения.

$$\varepsilon_x = U_{24} \pm U_0$$

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

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al} \quad (7)$$

Ход работы.

Проводим измерение зависимости магнитного потока от величины силы тока. Результаты приведены в таблице и на графике ниже.

	I_M, A	σ_{I_M}, A	$B, \text{мТл}$	$\sigma_B, \text{мТл}$
1	0,20	0,01	230	10
2	0,35	0,01	400	20
3	0,50	0,01	580	30
4	0,65	0,01	780	40
5	0,80	0,01	930	50
6	0,96	0,01	1050	55

Таблица 1. $B = f(I_M)$

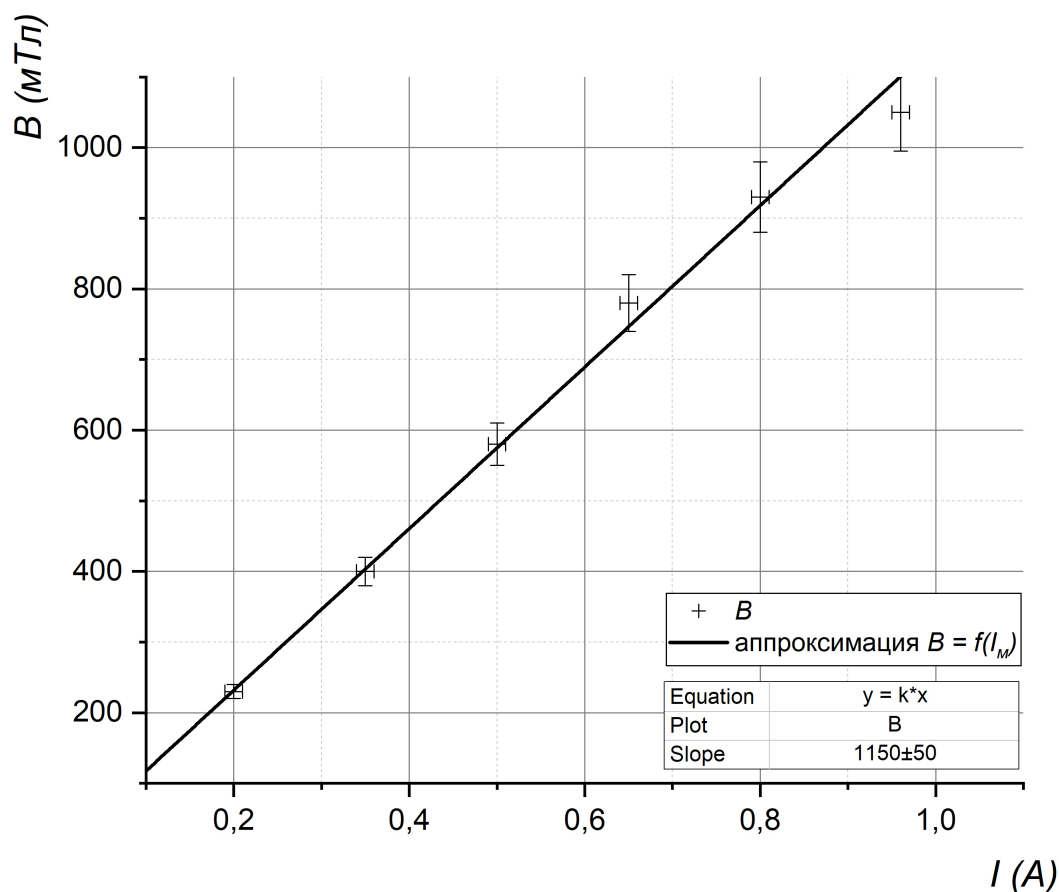


График 1. Нахождение $B = f(I_M)$

Проводим измерения ЭДС Холла. Для этого вставляем образец в зазор выключенного электромагнита и определяем U_0 между контактами 2 и 4. Это значение следует принять за 0.

Далее включаем электромагнит и измеряем $U = f(I_M)$ для образца из меди.

Проводим серию для 5 значений тока через образец.

То же делаем для образца из цинка при одном фиксированном значении тока через образец.

Определяем знак носителей заряда для каждого из материалов.

Для цинка получается -.

Для меди - +.

	$(I = 0,4 \pm 0,01) \text{ А}$			$U_0 = (2 \pm 1) \text{ ед.}$			
	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$\sigma_{I_{\text{м}}}, \text{ А}$	$\sigma_B, \text{ мТл}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	130	230	3	40	20
2	0,39	0,01	80	450	5	120	20
3	0,60	0,01	70	700	7	200	20
4	0,80	0,01	65	900	9	280	20
5	1,01	0,01	70	1150	10	320	20
6	1,20	0,01	80	1400	11	360	20

Таблица 2: Для тока через материал $I = 0,4 \text{ А}$

	$(I = 0,6 \pm 0,01), \text{ А}$			$U_0 = (3 \pm 1) \text{ ед.}$			
	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$\sigma_{I_{\text{м}}}, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$	$\sigma_{B, \text{ мТл}}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	230	90	8	240	20
2	0,40	0,01	450	80	12	400	20
3	0,60	0,01	700	70	16	560	20
4	0,80	0,01	900	65	20	720	20
5	1,00	0,01	1150	70	24	880	20
6	1,20	0,01	1400	80	28	1040	20

Таблица 3: Для тока через материал $I = 0,6 \text{ А}$

	$(I = 0,8 \pm 0,01), \text{ А}$			$U_0 = (4 \pm 1) \text{ ед.}$			
	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$\sigma_{I_{\text{м}}}, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$	$\sigma_{B, \text{ мТл}}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	230	90	8	160	20
2	0,40	0,01	450	80	12	320	20
3	0,60	0,01	700	70	16	480	20
4	0,80	0,01	900	65	20	640	20
5	1,00	0,01	1150	70	24	800	20
6	1,20	0,01	1400	80	28	960	20

Таблица 4: Для тока через материал $I = 0,8 \text{ А}$

	$(I = 0,9 \pm 0,01), \text{ А}$			$U_0 = (5 \pm 1) \text{ ед.}$			
	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$\sigma_{I_{\text{м}}}, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$	$\sigma_{B, \text{ мТл}}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	230	90	10	200	20
2	0,40	0,01	450	80	16	440	20
3	0,60	0,01	700	70	20	600	20
4	0,80	0,01	900	65	24	760	20
5	1,00	0,01	1150	70	26	840	20
6	1,20	0,01	1400	80	28	920	20

Таблица 5: Для тока через материал $I = 0,9 \text{ А}$

	$(I = 1,0 \pm 0,01), \text{ А}$			$U_0 = (5 \pm 1) \text{ ед.}$			
	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$\sigma_{I_{\text{м}}}, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$	$\sigma_{B, \text{ мТл}}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	230	90	9	160	20
2	0,40	0,01	450	80	15	400	20
3	0,60	0,01	700	70	21	640	20
4	0,80	0,01	900	65	27	880	20
5	1,00	0,01	1150	70	30	1000	20
6	1,20	0,01	1400	80	33	1120	20

Таблица 6: Для тока через материал $I = 1,0 \text{ А}$

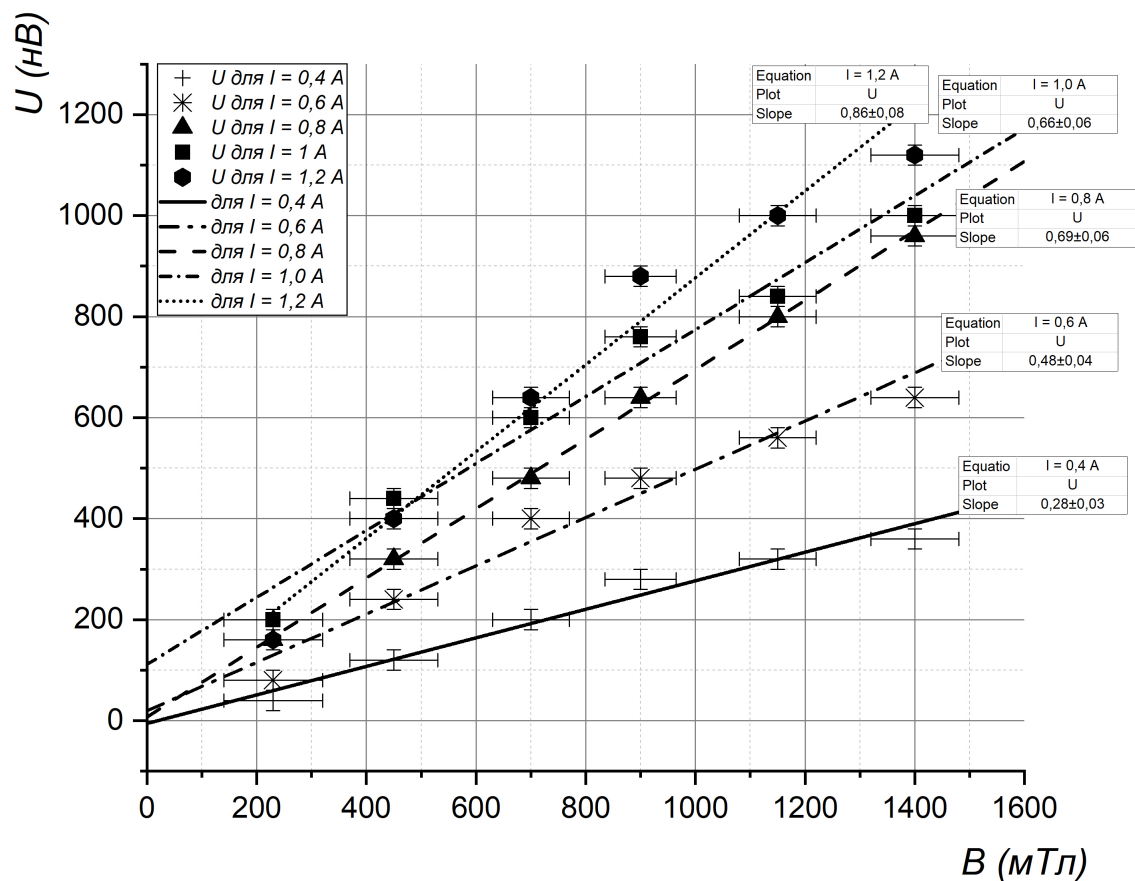


График 2. Нахождение $\varepsilon_x = f(B)$

Далее находим функцию зависимости $k = f(I)$, где k - коэффициент угла наклона для каждого из токов.

	I, A	σ_I, A	$k, \frac{мкВ}{Тл}$	$\sigma_k, \frac{мкВ}{Тл}$
1	0,4	0,01	0,28	0,03
2	0,6	0,01	0,48	0,04
3	0,8	0,01	0,69	0,06
4	0,9	0,01	0,66	0,06
5	1	0,01	0,86	0,08

Таблица 7: Функция $k = f(I)$

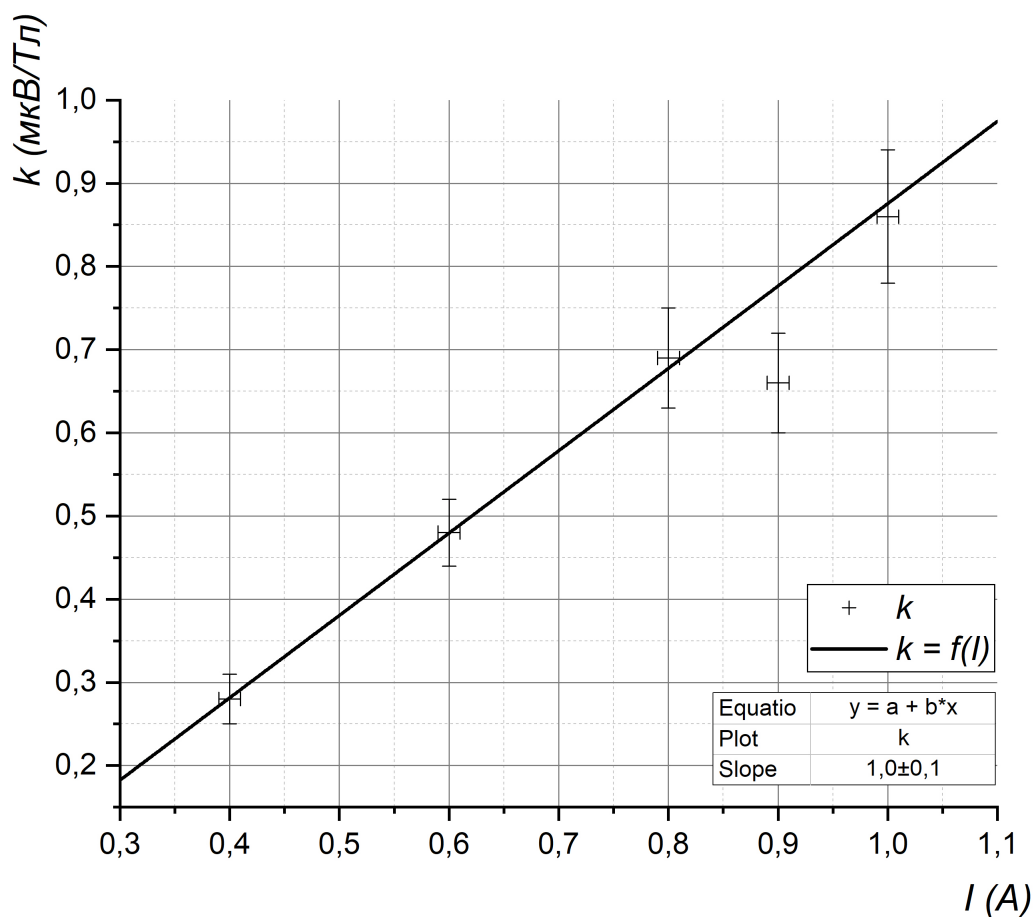


График 3. Нахождение $k = f(I)$

	Цинк	Медь
L_{34} , мм	4	6
a , мм	0,08	0,05
l , мм	10	8
U_{34} , мкВ	26	23

Таблица 8. Некоторые характеристики образцов.

Из угла наклона графика зависимости $k = f(I)$ мы получаем, что угол наклона этого графика $A = (1,0 \pm 0,1) \frac{\text{мкОм}}{\text{Тл}}$

Из этого мы получаем, что из формулы (5) следует, что

$$R_x = -A \cdot a = -(5 \pm 0,5) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Сравнивая с таблицей из лабораторного практикума по общей физике, удостоверяемся, что наше значение, в пределах ошибки, совпадает с табличным, равным $-5,3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$

	$I = 0,6 \text{ A}$			$U_0 = 10 \text{ нВ}$			
	$I_M, \text{ A}$	$\sigma_{I_M}, \text{ A}$	$\sigma_B, \text{ мТл}$	$B, \text{ мТл}$	$U, \text{ ед}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0,20	0,01	130	230	16	240	20
2	0,40	0,01	80	450	22	480	20
3	0,60	0,01	70	700	27	680	20
4	0,80	0,01	65	900	30	800	20
5	1,00	0,01	70	1150	33	920	20
6	1,20	0,01	80	1400	36	1040	20

Таблица 9: $\varepsilon_x = f(B)$ для цинка.

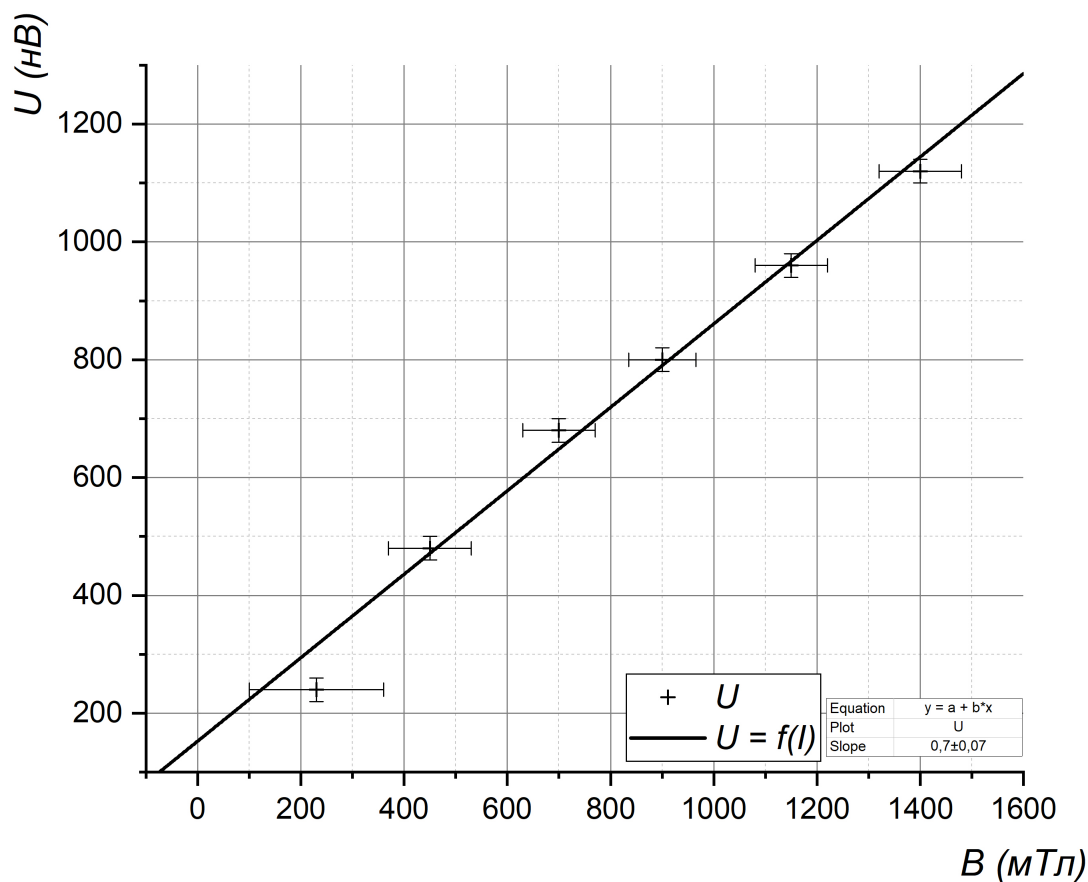


График 4. Нахождение $U = f(B)$ для цинка (ток течет в обратном направлении).

Теперь ищем то же самое для цинка:

$$B = (0,7 \pm 0,07) \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$$

$$R_x = -\frac{B \cdot a}{I} = (9,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Сравнивая с табличным значением, взятым из той же таблицы, что и для меди, удостоверяемся, что наше значение, с учетом погрешности совпадает с табличным, равным $1,04 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$

Далее рассчитаем концентрацию носителей тока по формуле (6)

$$\text{Для меди: } n = \frac{1}{R_x \cdot e} = -(0,12 \pm 0,01) \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{м}^3}$$

$$\text{Для цинка: } n = (0,60 \pm 0,06) \cdot 10^{30} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Рассчитаем удельную проводимость σ для образцов по формуле (7).

$$\text{Для меди: } \sigma = (0,63 \pm 0,06) \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\text{Для цинка: } \sigma = (0,19 \pm 0,02) \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Сверяя с табличными данными, получаем, что в пределах ошибки наши данные с ними совпадают ($5,6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ для меди и $1,6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ для цинка)

Используя найденные значения рассчитываем подвижность носителей по формуле

$$b = \frac{\sigma}{n \cdot e} = R_x \cdot \sigma$$

$$\text{Для меди: } b = (32 \pm 3) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\text{Для цинка: } b = (18 \pm 2) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Удостоверяемся, что наши данные в пределах ошибки совпадают с табличными ($32 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ для меди и $17,5 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ для цинка).

Используемая литература.

1. **Лабораторный практикум по общей физике:** Учебное пособие. В трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм /Гладун А.Д., Александров Д.А., Берулёва Н.С. и др.; Под ред. А.Д. Гладуна - М.: МФТИ, 2007. - 280 с.
2. **Дополнительное описание лабораторной работы 3.3.5:** Эффект Холла в металлах; Под ред. МФТИ, 2016. - 5 с.