

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работы 3.3.5
Эффект Холла

Выполнил студент:
Сериков Василий Романович
группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

Аннотация

Цель работы:

Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

В работе используются:

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

Теоретические сведения:

В работе изучаются особенности проводимости металлов в геометрии мостика Холла. Ток пропускается по плоской прямоугольной металлической пластинке, помещённой в перпендикулярное пластинке магнитное поле. Измеряется разность потенциалов между краями пластинки в поперечном к току направлении. По измерениям определяется константа Холла, тип проводимости (электронный или дырочный) и на основе соотношения (3.28) вычисляется концентрация основных носителей заряда.

Во внешнем магнитном поле B на заряды действует сила Лоренца:

$$F = qE + qU \times B$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с E . Действительно, траектории частиц будут либо искривляться, либо, если геометрия проводника этого не позволяет, возникнет дополнительное электрическое поле, компенсирующее магнитную составляющую силы Лоренца. Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

Мостик Холла. В данной схеме ток вынуждают течь по оси x вдоль плоской пластинки (ширина пластинки a , толщина h , длина l). Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, «прибивает» носители заряда к краям образца, что создаёт холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу. Поперечное напряжение между краями пластинки (холловское напряжение) равно $U_{\perp} = E_y a$, где:

$$E_y = \rho_{yx} \cdot j_x = j_x B / nq$$

Плотность тока, текущего через образец, равна $j_x = I / ah$, где I — полный ток, ah — поперечное сечение. Таким образом, для холловского напряжения имеем

$$U_{\perp} = B n q h I = R_H B h I$$

где константу $R_H = 1/nq$ называют постоянной Холла. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей.

Экспериментальная установка:

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.

$$U_{\perp} = U_{24} - U_0$$

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 формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al} \quad (1)$$

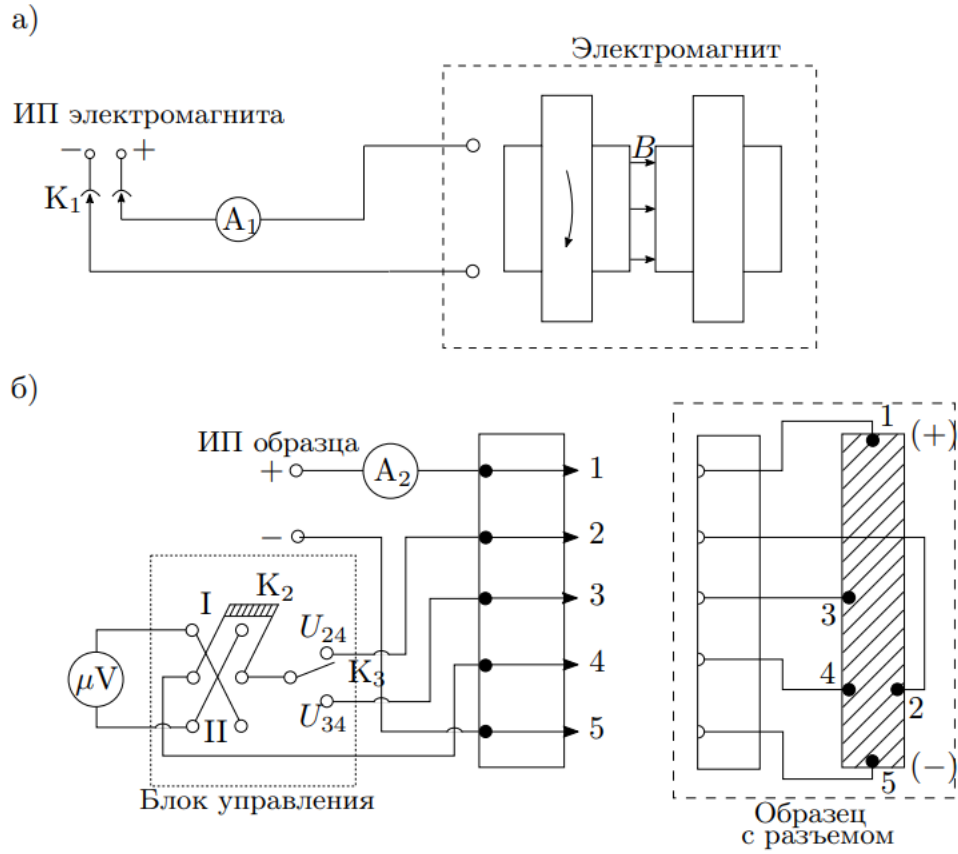


Рис. 1: Экспериментальная установка.

Результаты измерений и обработка данных:

Градуировка электромагнита

1. Измерим калибровочную кривую электромагнита — зависимость между индукцией B магнитного поля в его зазоре и током I_M через обмотки магнита. Полученные данные занесем в таблицу 1 и построим по ним график зависимости $B(I_M)$.

| $I_M, \text{А}$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| $B, \text{мТл}$ | 18,7 | 150,2 | 276,8 | 386,3 | 540,0 | 614,5 | 751,8 | 900,0 | 1031,7 | 1153,6 | 1220,0 |

Таблица 1: Данные для калибровочной кривой магнита

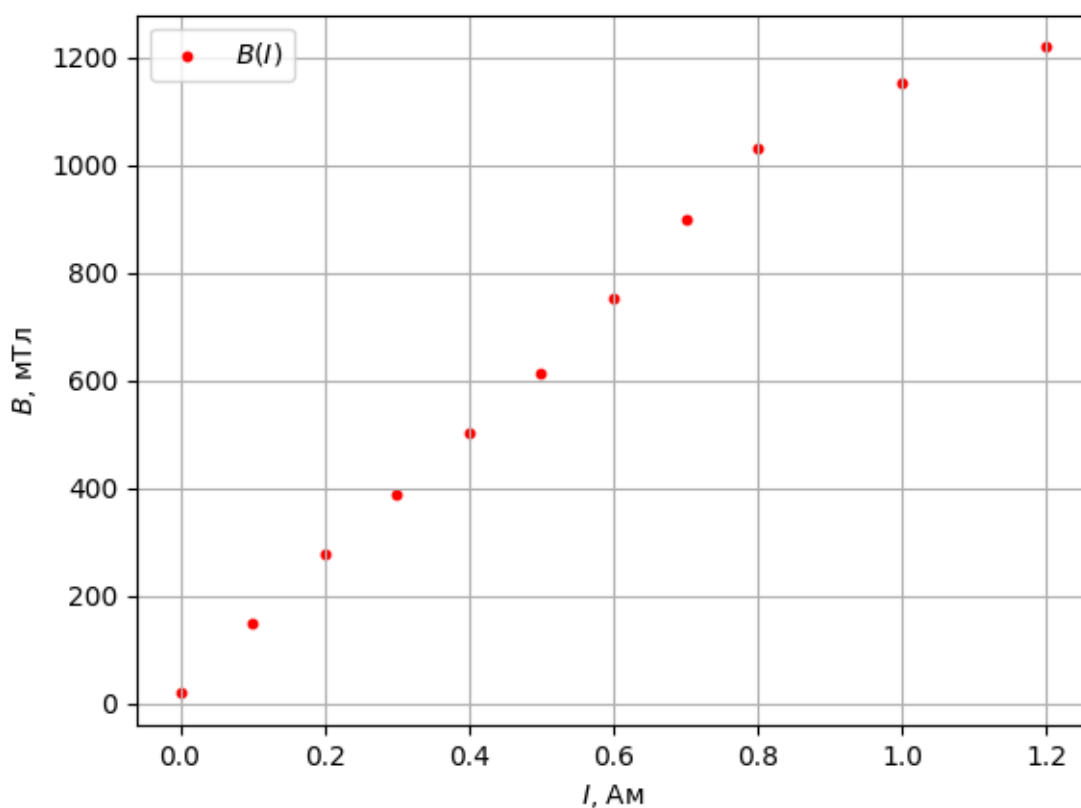


Рис. 2: График зависимости $B(I)$ для калибровочной кривой электромагнита.

Измерение ЭДС Холла

2. Получим зависимость напряжения U_{24} от тока электромагнита I_M при фиксированном токе I через образец меди, аналогично получим зависимость при других значениях тока I через образец. Аналогично для образца из цинка при одном значении тока $I = 1 \text{ Ам}$ Полученные данные занесем в таблицы 2-8. $\sigma_U = 1 \text{ дел} = 40 \text{ нВ}$

| | | | | | | | |
|-----------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|
| I_M , А | 0,1 | 0,19 | 0,39 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| U , дел | 4 | 5 | 6 | 7 | 8,5 | 9 | 10 |

Таблица 2: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 0,21$ А, $U_0 = 2$ дел

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| U , дел | 5 | 6 | 8 | 9 | 10,5 | 13 | 14 | 16 | 17 |

Таблица 3: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 0,4$ А, $U_0 = 3$ дел

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| U , дел | 6 | 8 | 10,5 | 12,5 | 15 | 17 | 19 | 22 | 23 |

Таблица 4: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 0,6$ А, $U_0 = 4$ дел

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| U , дел | 7 | 9,5 | 12,5 | 15,5 | 18 | 21 | 23 | 27 | 29 |

Таблица 5: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 0,8$ А, $U_0 = 4$ дел

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| U , дел | 7 | 11 | 15 | 18 | 22 | 25 | 28 | 32,5 | 35 |

Таблица 6: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 1$ А, $U_0 = 4$ дел

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,1 |
| U , дел | 8 | 13 | 17,5 | 21,5 | 26 | 30 | 33 | 39 | 42,5 |

Таблица 7: Зависимость $U(I_M)$ для меди при $I = 1,2$ А, $U_0 = 4$ дел

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-------|-------|
| I_M , А | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 |
| U , дел | 18,5 | 14,5 | 10 | 6 | 3,5 | 0 | -3 | -6 | -7,5 | -9 | -10,5 | -11,5 |

Таблица 8: Зависимость $U(I_M)$ для цинка при $I = 1$ А, $U_0 = 23$ дел

Определение удельной проводимости

3. При токе $I = 1$ А через образец измерим падение напряжения между контактами 3 и 4 для каждого из двух образцов.

для цинка: $U = 310 \pm 5$ мкВ, $L_{3,4} = 3,5$ мм, $a = 0,12$ мм, $l = 9$ мм

для меди: $U = 470 \pm 5$ мкВ, $L_{3,4} = 6$ мм, $a = 0,05$ мм, $l = 8$ мм

4. Построим графики зависимости $U(B)$ для полученных значений. По коэффициентам полученных прямых построим график зависимости $k(I)$ для меди.

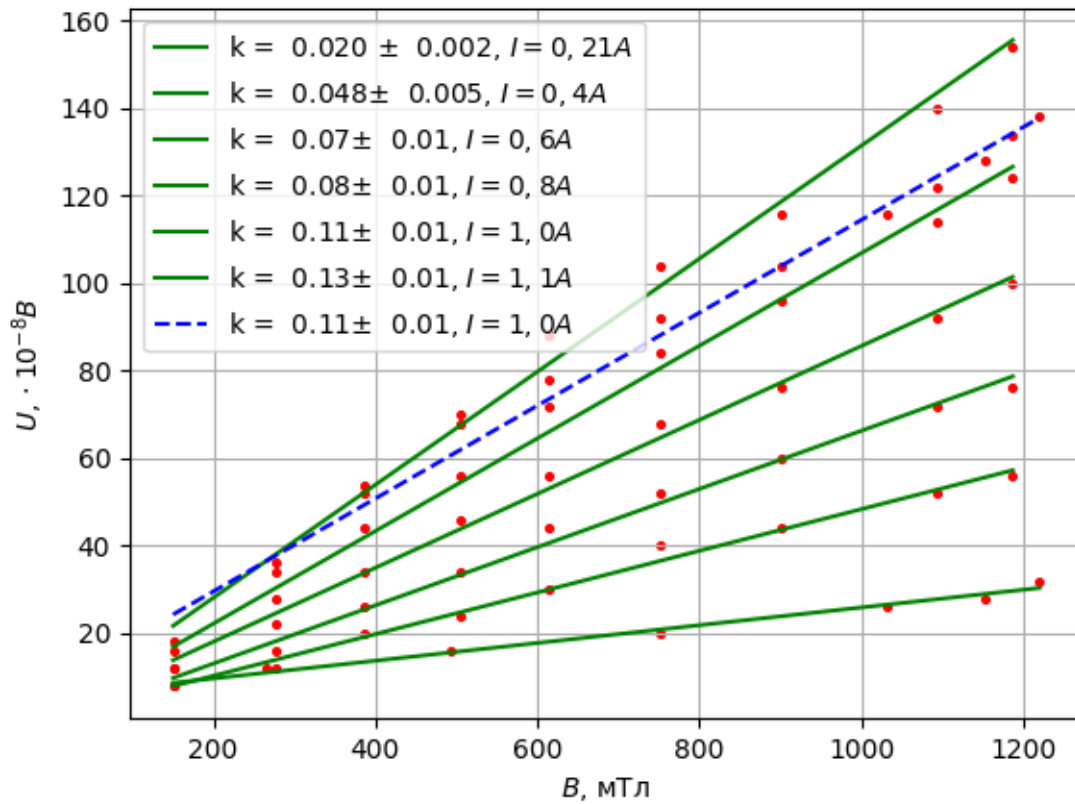


Рис. 3: График зависимости $U(B)$ для меди (сплошная) и цинка (пунктир).

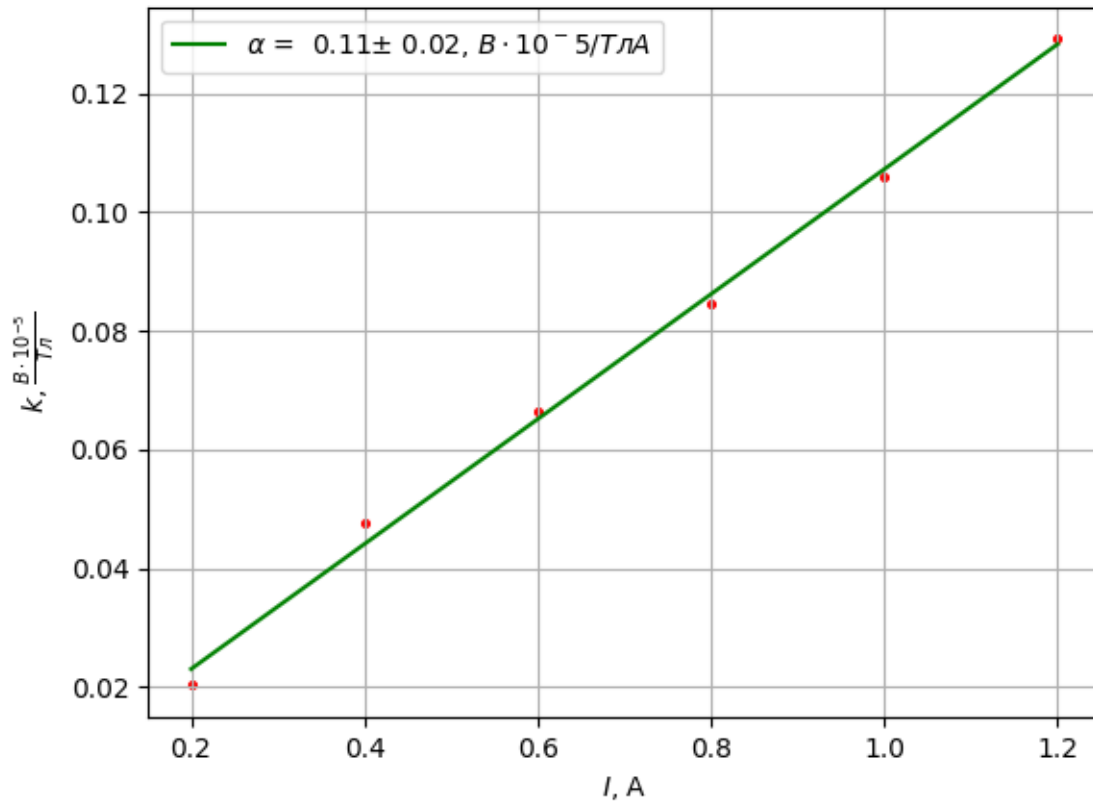


Рис. 4: График зависимости $k(I)$ для меди.

5. Для обоих образцов рассчитаем постоянную Холла R_H , концентрацию n носителей тока, удельное сопротивление $\rho_{уд}$ и удельную проводимость σ_0 материалов.

Медь:

$$R_H = -\alpha \cdot a = -(5,5 \pm 0,5 \cdot 10^{-11}) \text{ м}^3/\text{Кл}$$

$$n = \frac{1}{R_H e} = (1,3 \pm 0,3 \cdot 10^{29}) 1/\text{м}^3$$

$$\sigma_0 = \frac{IL_{34}}{aIU} = (0,32 \pm 0,06 \cdot 10^8) 1/\text{Ом м}$$

Цинк:

$$R_H = k \cdot a/I = (12 \pm 1 \cdot 10^{-11}) \text{ м}^3/\text{Кл}$$

$$n = \frac{1}{R_H e} = (0,5 \pm 0,1 \cdot 10^{29}) 1/\text{м}^3$$

$$\sigma_0 = \frac{IL_{34}}{aIU} = (0,11 \pm 0,02 \cdot 10^8) 1/\text{Ом м}$$

6. . Используя найденные значения концентрации n и удельной проводимости $\sigma_0 = 1/\rho$ вычислим подвижность μ носителей тока. Сведем все результаты в таблицу.

| Металл | $R_H, \text{ м}^3/\text{Кл}$ | Табл. $R_H, \text{ м}^3/\text{Кл}$ | $n, 1/\text{м}^3$ | $\sigma, 1/\text{Ом м}$ | $b, \text{ см}^2/Vc$ |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Медь | $-5,5 \pm 0,5 \cdot 10^{-11}$ | $-5,5 \cdot 10^{-11}$ | $1,3 \pm 0,3 \cdot 10^{29}$ | $0,32 \pm 0,06 \cdot 10^8$ | 17 ± 1 |
| Цинк | $12 \pm 1 \cdot 10^{-11}$ | $10 \cdot 10^{-11}$ | $0,5 \pm 0,1 \cdot 10^{29}$ | $0,11 \pm 0,02 \cdot 10^8$ | 13 ± 1 |

Таблица 9: Сводная таблица всех полученных результатов

Обсуждение результатов и выводы:

В данной работе мы изучали эффект Холла и измерили подвижность, концентрацию и постоянную Холла для образцов меди и цинка. Полученные нами постоянные Холла близки к табличным значениям, однако удельные проводимости не совпадают ($0,56 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ для меди и $0,16 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ для цинка), есть предположение, что мы не правильно сняли значения напряжения между контактами 3 и 4, что стало причиной такого отклонения от табличного значения.