

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.3.5

Эффект Холла в металлах

выполнил студент группы Б02-103

Силаев Вадим

Долгопрудный, 2022 г.

Аннотация

В работе произведен расчет параметров, характеризующих эффект Холла в металлах, например, постоянная Холла и концентрация носителей заряда. Для проведения измерений была использована одна из классических схем — мостик Холла, позволяющая определить все искомые параметры с помощью вольтметра, амперметра и проградуированного электромагнита. Измерения проводились для медного и цинкового образцов, в результате были определены типы проводимости в данных металлах, а также получены значения постоянной Холла и концентрации зарядов. При этом измеренные количественные характеристики совпадают с общеизвестными значениями только по порядку, что поставило под сомнение достоверность эксперимента.

Введение

Эффект Холла — это возникновение в электрическом проводнике разности потенциалов на краях образца, помещённого в поперечное магнитное поле, при протекании тока, перпендикулярного полю. Количественно эффект Холла можно охарактеризовать с помощью коэффициента Холла, который определяется как отношение индуцированного электрического поля к произведению плотности тока и приложенного перпендикулярного магнитного поля. Наиболее распространенное применение эффекта — датчик Холла, позволяющий без труда измерять магнитное поле. Данная работа посвящена измерению коэффициента Холла, количественно характеризующему эффект и определяемому как отношение индуцированного электрического поля к произведению плотности тока и приложенного перпендикулярного магнитного поля, а также определению типа проводимости и концентраций носителей заряда для различных проводников.

Методика

Для исследования влияния магнитного поля на проводимость среды удобно использовать такую схему как мостик Холла (рис. 1)

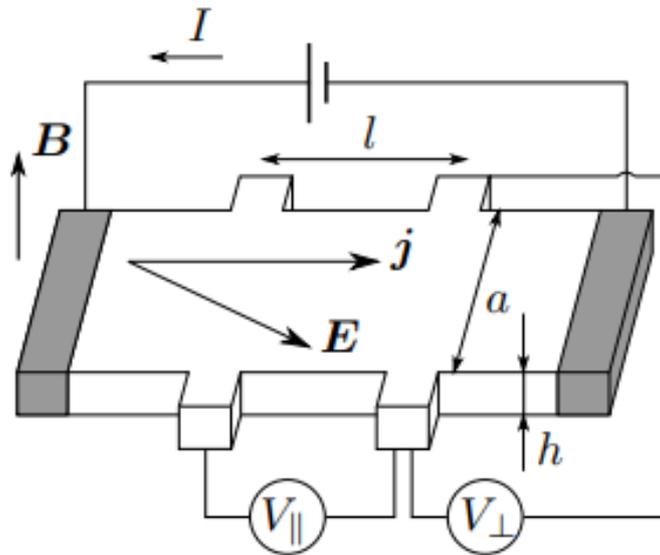


Рис. 1: Мостик Холла

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 $E_y = \frac{j_x B}{nq}$, E_y — напряженность электрического поля вдоль оси y , j_x — плотность тока вдоль оси x , n — концентрация носителей заряда, q — заряд носителя заряда.

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

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} \cdot I = R_H \cdot \frac{B}{h} \cdot I,$$

где R_H — постоянная Холла.

Продольное сопротивление в данной схеме от магнитного поля не зависит.

По зависимости U_{\perp}/B от I определяется R_H , и, соответственно, концентрация носителей заряда.

Схема установки

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 2. 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 . 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, в котором высокая чувствительность по напряжению сочетается с малой величиной тока, потребляемого измерительной схемой.

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 2 и 4 возникает холловская разность потенциалов U_{\perp} , 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 током через образец. При нейтральном положении ключа входная цепь микровольтметра разомкнута.

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

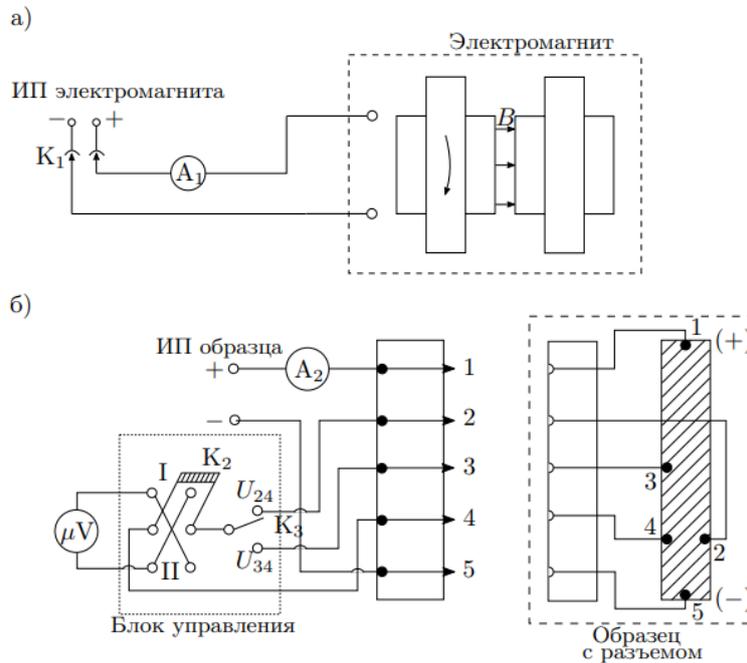


Рис. 2: Схема установки

Контакты 2 и 4 вследствие неточности подпайки могут лежать не на одной эквипотенциали. Тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения вдоль пластинки. Влияние омического падения напряжения можно исключить, если при каждом значении тока через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла: $U_{\perp} = U_{24} - U_0$.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{34} между контактами 3 и 4 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать удельное сопротивление ρ_0 и проводимость σ_0 материала образца по формуле:

$$\rho_0 = \frac{U_{34}ah}{Il},$$

где l — расстояние между контактами 3 и 4, a — ширина образца, h — его толщина.

Практическая часть

Перед началом работы была произведена градуировка электромагнита (рис. 3)

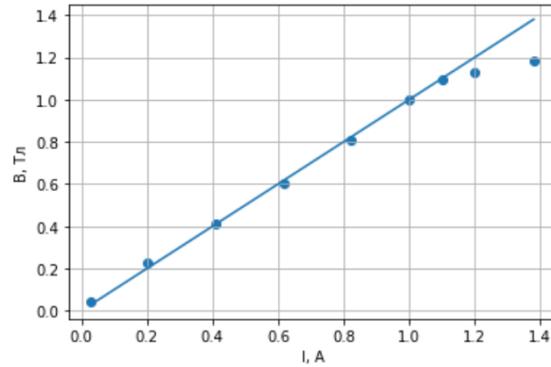


Рис. 3: Зависимость магнитной индукции в зазоре электромагнита от пропускаемого тока

Далее была получена зависимость холловского напряжения от магнитного поля для медного образца (рис. 4)

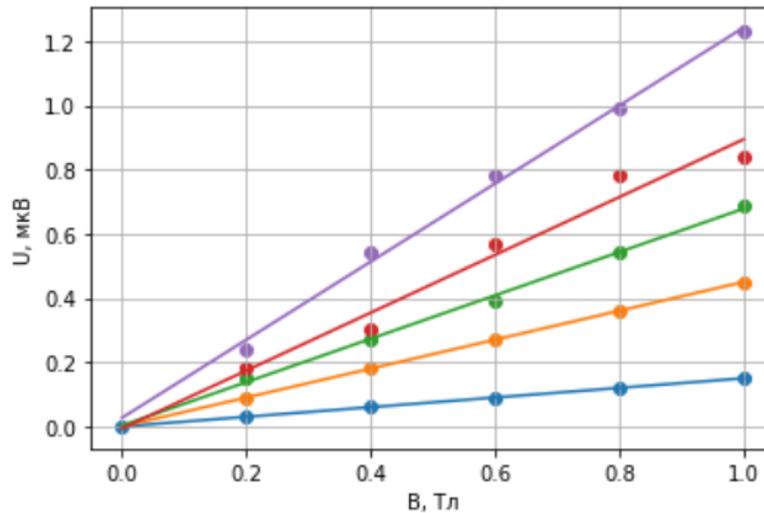


Рис. 4: Зависимость холловского напряжения от магнитной индукции для медного образца

- Синяя линия — ток через образец $I = 0,2 \text{ А}$
- Оранжевая линия — ток через образец $I = 0,4 \text{ А}$
- Зеленая линия — ток через образец $I = 0,6 \text{ А}$
- Красная линия — ток через образец $I = 0,8 \text{ А}$
- Фиолетовая линия — ток через образец $I = 1,0 \text{ А}$

Из коэффициентов наклона графиков с рис. 4 построен график $k(I)$ (рис. 5) Коэффициентом наклона этого графика является постоянная Холла деленная на толщину образца $\frac{R_H}{h} = (1,29 \pm 0,03) \cdot 10^{-6} \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}$, поэтому $R_H = (6,4 \pm 0,11) \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$

По знаку холловского напряжения определен тип проводимости в медном образце — электронный, следовательно концентрация электронов $n = \frac{1}{eR_H} = (9,7 \pm 0,2) \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

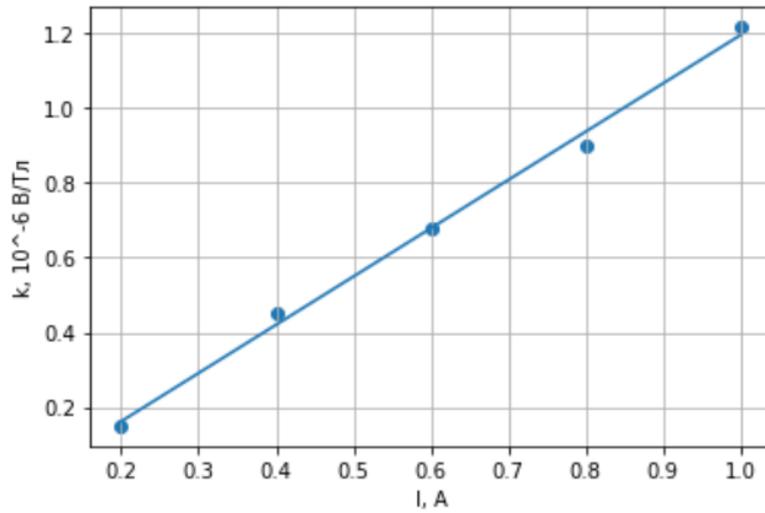


Рис. 5: Зависимость отношения холловского напряжения к магнитной индукции от тока через медный образец

Похожий опыт был проведен и для цинкового образца: зависимость холловского напряжения от магнитной индукции см. на рис. 6

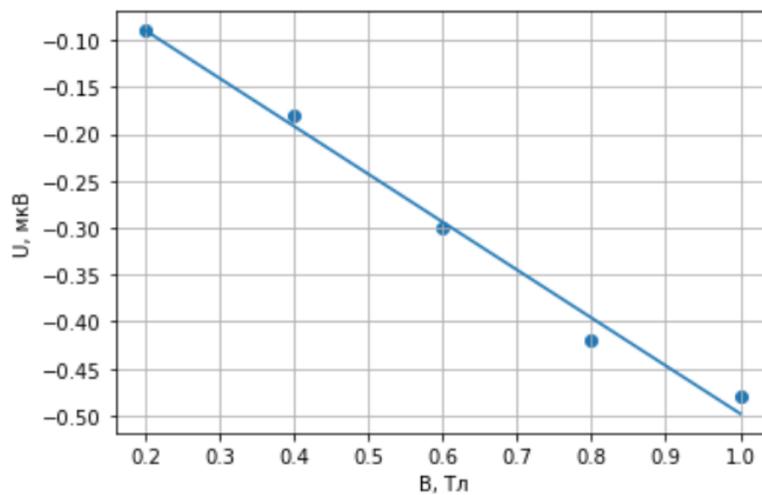


Рис. 6: Зависимость холловского напряжения от магнитной индукции для цинкового образца при токе $I = 0,8 \text{ A}$

Соответственно для цинка постоянная Холла: $R_H = -(5,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$, её отрицательность свидетельствует о дырочном типе проводимости.

Таким образом концентрация дырок в цинке: $n = (1,22 \pm 0,02) \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

Расчитаем также проводимость образцов: для медного — $\rho_0 = (2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для цинкового — $\rho_0 = (4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Вывод

Заметно, что значения довольно существенно отличаются от табличных (особенно для цинка), однако сходятся по порядку, что скорее всего говорит либо о неисправности микровольтметра, либо о несовпадении геометрии образцов с данными, написанными на них. Настолько большое отклонение результатов от теоретических ставит под сомнение достоверность полученных данных, а также делает бессмысленным определение дальнейших параметров. Для проверки выдвинутой гипотезы необходимо произвести ещё несколько серий экспериментов с другим оборудованием.