

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского
Радиофизический факультет

Кафедра электроники

Отчёт по лабораторной работе
Эффект Холла

Выполнили (430 гр):
Горюнов О.А., Индисов А.И.

2023 г.

Содержание

1	Теоретическая часть	3
1.1	Элементарная теория Эффекта Холла в полупроводниках	3
1.2	Измерительная установка и принципиальная схема	6
2	Практическая часть	7
2.1	ВАХ образца и измерение паразитного напряжения	7
2.2	Определение типа основных носителей	9
2.3	Определение постоянной Холла, подвижности и концентрации носителей . .	11
3	Вывод	12

Цель работы

Используя Эффект Холла, экспериментально определить тип носителей заряда в образце, постоянную Холла R , концентрацию основных носителей и их подвижность μ .

1 Теоретическая часть

1.1 Элементарная теория Эффекта Холла в полупроводниках

Эффект Холла представляет собой поперечный гальваномагнитный эффект, суть которого заключается в следующем: если поместить полупроводниковую пластину во внешнее магнитное поле \vec{B} (рис. 1) и пропустить вдоль нее ток, создав скрещенное с магнитным электрическое поле, то вследствие смещения движущихся зарядов к одной из граней пластины возникает поперечная разность потенциалов, называемая ЭДС Холла.

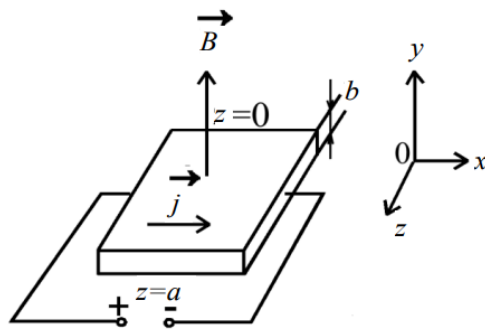


Рис. 1: Схема эксперимента по наблюдению эффекта Холла.

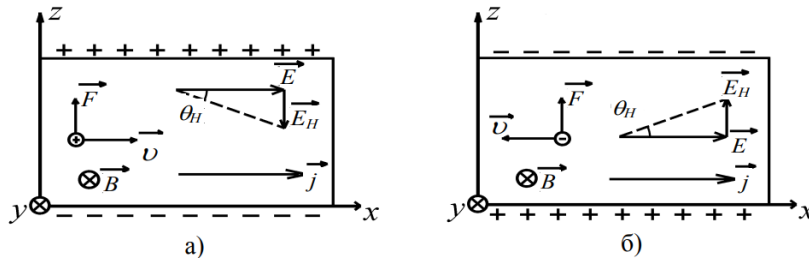


Рис. 2: Смещение основных носителей заряда в дырочном (а) и электронном (б) полупроводниках, соответственно.

Рассмотрим эффект Холла более подробно. На рис. 1 показан полупроводниковый образец, две грани которого подключены через омические контакты к внешней батарее. Выберем ось x в направлении плотности тока \vec{j} . Магнитное поле \vec{B} при этом пусть будет приложено в направлении оси y . Рассмотрим на примере электрона, движущегося со скоростью \vec{v} . На движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}] \quad (1)$$

где e - абсолютная величина заряда электрона.

В результате действия этой силы траектория электрона будет искривляться в направлении оси z , и, поскольку в этом направлении ток протекать не может, электроны будут накапливаться на боковой поверхности до тех пор, пока не установится электрическое поле Холла \vec{E}_H , достаточное для создания силы, равной силе Лоренца по величине, но противоположной по направлению. Приравнявая эти силы, получим:

$$\vec{E}_H = [\vec{v}, \vec{B}] \quad (2)$$

Закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3)$$

где $\sigma = en\mu$ - удельная электропроводность; n - концентрация электронов, μ_n - их подвижность.

$$\vec{j} = en\mu \cdot \vec{E} = -e \cdot n \cdot \vec{v} \quad (3a)$$

Исключая v из соотношения (2):

$$\vec{E}_H = -\frac{1}{en} [\vec{j}, \vec{B}] = R [\vec{j}, \vec{B}] \quad (4)$$

Учитывая, что полный ток через образец $I = j ab$, а поперечная ЭДС $U_H = E_H a$, получим соотношение:

$$U_H = R \frac{IB}{b} \quad (5)$$

Величина R называется **постоянной Холла** и для полупроводника n -типа определяется как

$$R = -\frac{1}{en} \quad (6)$$

Но это значение не точно, оно не учитывает дрейфовую скорость, которую приобретает электрон под действием электрического поля, и механизмы рассеивания. В общем виде постоянная Холла может быть записана как:

$$R = -\frac{A}{ne} \text{ для полупроводника } n \text{ типа} \quad (7a)$$

$$R = \frac{A}{pe} \text{ для полупроводника } p \text{ типа} \quad (7b)$$

где множитель A может принимать значения от 1 до 1.7.

Знание электропроводности и постоянной Холла позволяет найти как концентрацию носителей, так и их подвижность.

Обозначим через холловский угол ϑ_H малый угол, который образует с осью x вектор напряженности суммарного электрического поля (рис.2):

$$\vartheta_H \approx \operatorname{tg} \vartheta = \frac{E_H}{E} \quad (8)$$

С учётом (3) и (5) получим:

$$\vartheta_H = \mu \cdot B \quad (9)$$

Численное значение холловской подвижности может расходиться с величиной подвижности, определенной другими методами. Определенная таким образом подвижность называется дрейфовой. Её можно определить из выражения (4), если преобразовать его к виду:

$$\vec{E}_H = -\frac{A}{en} \cdot [\vec{j}, \vec{B}] = -A\mu \cdot [\vec{E}, \vec{B}] \quad (10)$$

Используя выражения (7а, 7б) можно получить:

$$\mu = R \cdot \sigma \quad (11)$$

1.2 Измерительная установка и принципиальная схема

Приборы и оборудование представлены на рис.3 ниже.

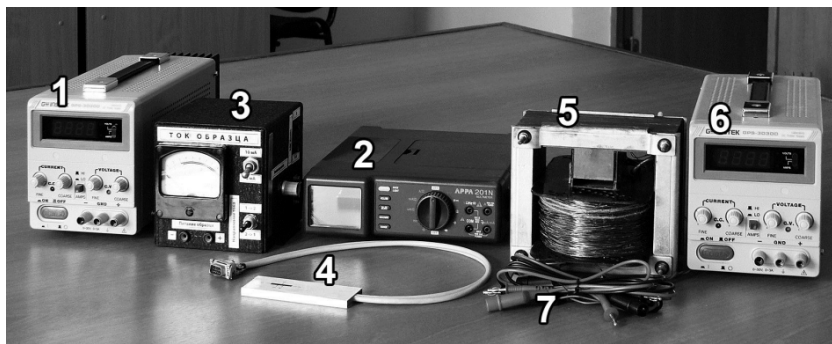


Рис. 3: Оборудование для исследования эффекта Холла: 1 - источник питания образца GPS-3030D, 2 - мультиметр APPA-201N, 3 - согласующий модуль, 4 - исследуемый образец, 5 - электромагнит, 6 - источник питания электромагнита GPS-3030D, 7 - соединительные провода.

Принципиальная схема установки представлена на рис.4 ниже:

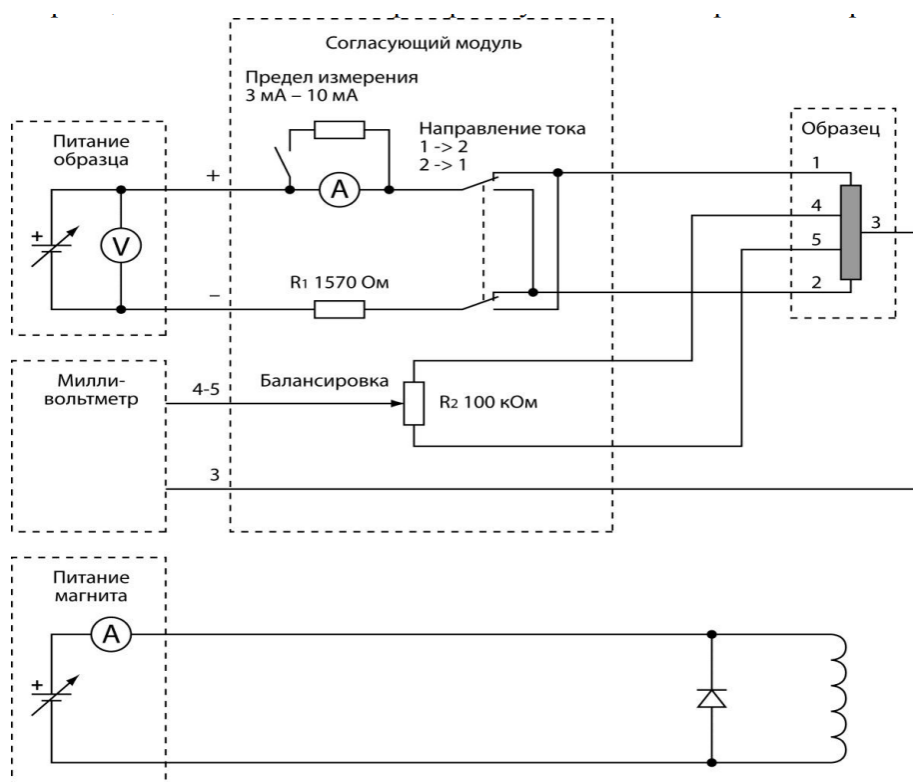


Рис. 4: Принципиальная схема лабораторной установки.

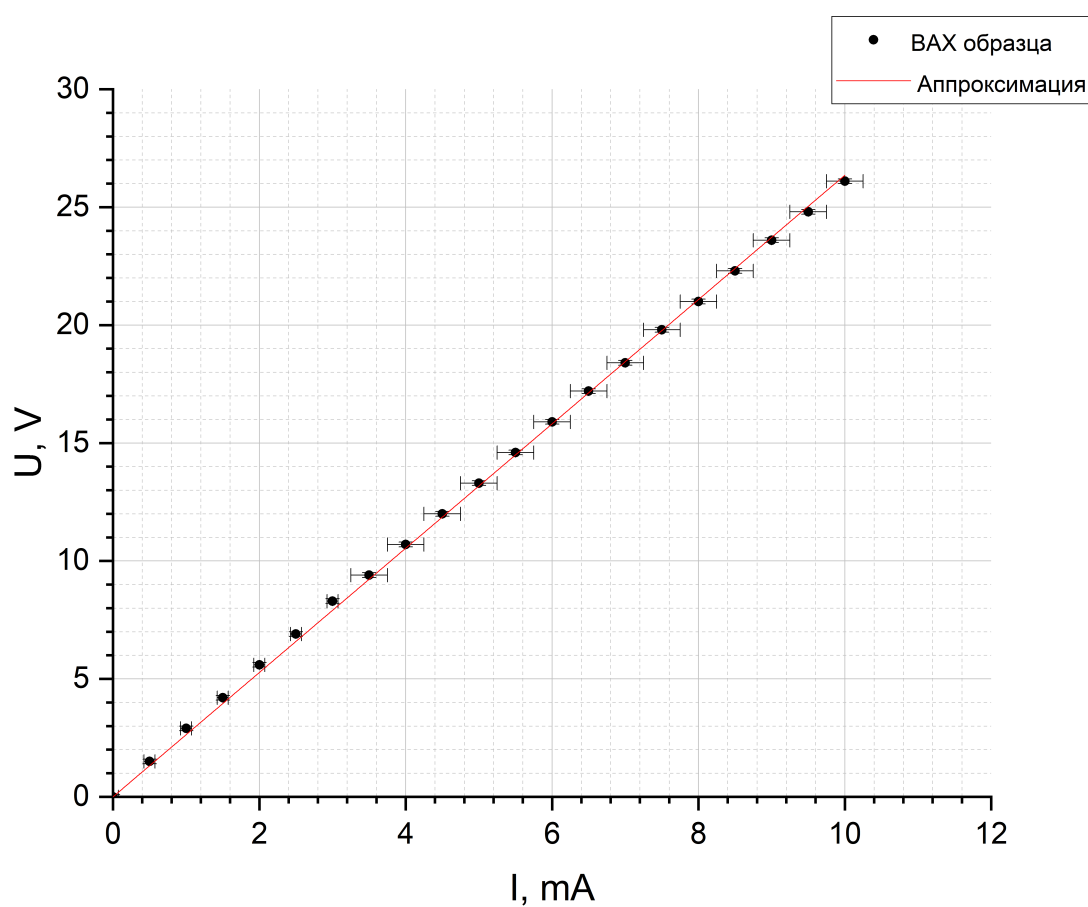
2 Практическая часть

2.1 ВАХ образца и измерение паразитного напряжения

Определить удельное сопротивление образца (а следовательно и проводимость) можно сняв его ВАХ. Т.е. измерения проводились с выключенным магнитным полем. Используя закон Ома:

$$U = I \cdot R$$

т.е. R определяется как коэффициент наклона прямой.



Погрешность напряжения определялась по цене деления источника ($\Delta U = 0,1$ мВ), а погрешность тока образца по классу точности ($=2.5$).

Из графика:

$$R \approx 2635 \text{ Ом}$$

А погрешность оценим по максимальному и минимальному наклону прямой, проходящей через погрешности:

$$R_{max} \approx 2684 \text{ Ом}, R_{min} \approx 2544 \text{ Ом}$$

$$\Rightarrow R \approx (2635 \pm 91) \text{ Ом}; \quad (\delta R = 3,5\%)$$

Но нужно учесть, что в цепь с образцом последовательно включен резистор $R_1 = 1570 \text{ Ом}$. Тогда искомое сопротивление образца:

$$R_{\text{обр}} \equiv R = (1065 \pm 91) \text{ Ом}$$

Размеры образца указаны на рис.5. $a = 22 \text{ мм}$, $b = 1,9 \text{ мм}$, $d = 0,33 \text{ мм}$. Тогда по определению удельного сопротивления:

$$\rho = \frac{R \cdot b \cdot d}{a} \approx (0,0304 \pm 0,0011) \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{1}{\rho} \approx (32,895 \pm 1,151) \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$$

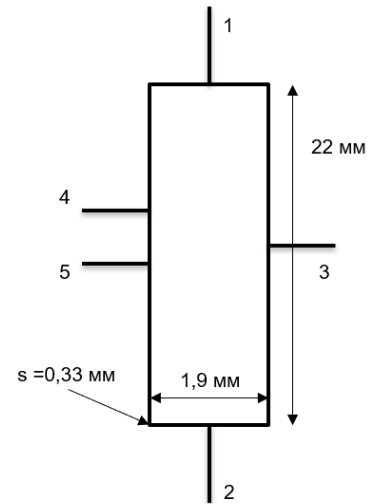


Рис. 5: Размеры образца.

При подсоединении измерительных контактов к образцу невозможно их расположить абсолютно точно друг напротив друга, в результате чего между этими выводами появится паразитная разность потенциалов, обусловленная током образца, которая будет давать систематическую аддитивную ошибку измерения ЭДС Холла. Чтобы её уменьшить, с одной из сторон делаются два контакта (4 и 5), к которым подсоединяются крайние выводы переменного резистора R_2 . Изменяя положение движка резистора R_2 , можно найти точку с потенциалом, равным потенциалу контакта 3.

Для того чтобы исключить паразитную разность потенциалов в дальнейшем, сняли, как U_H зависит от тока образца. И далее просто будем её вычитать из снятых значений \mathcal{E}_H при включенном магнитном поле.

2.2 Определение типа основных носителей

Ток подавался от контакта 1 к 2. При этом во внешнем магнитном поле, мультиметр снимал разность потенциалов $U_H = \phi_3 - \phi_{45}$, при этом $U_H > 0$. Это говорит о том, что со стороны контакта 3 копиться положительный заряд, а со стороны 4-5 отрицательный. Предположим, что движется дырка. Тогда на неё будет действовать сила Лоренца:

$$F_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

Сила будет как раз отклонять частицы к 3 контакту. Если предположить, что двигается электрон, то его скорость будет противоположна \vec{E} . И так как заряд электрона отрицательный, сила Лоренца будет так же направлена к клемме 3. И там бы копился отрицательный заряд.

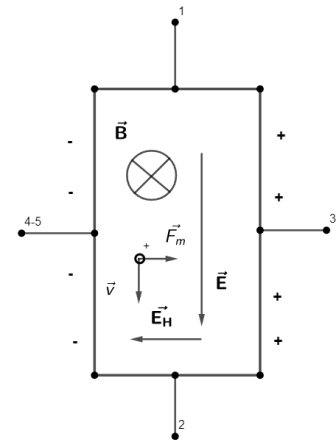


Рис. 6: Размеры образца.

Основной тип носителей заряда - дырки.

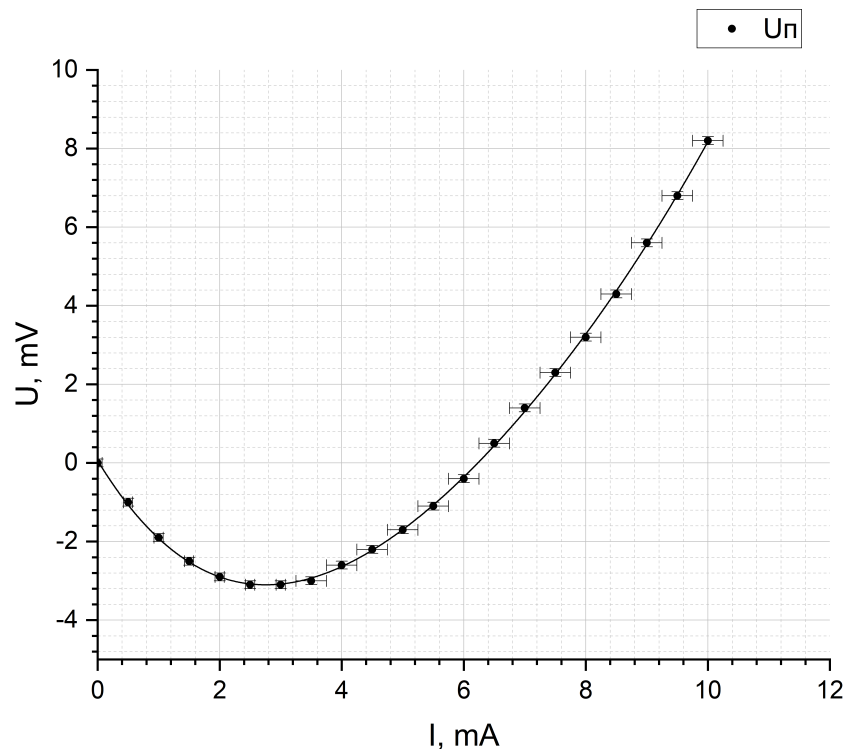
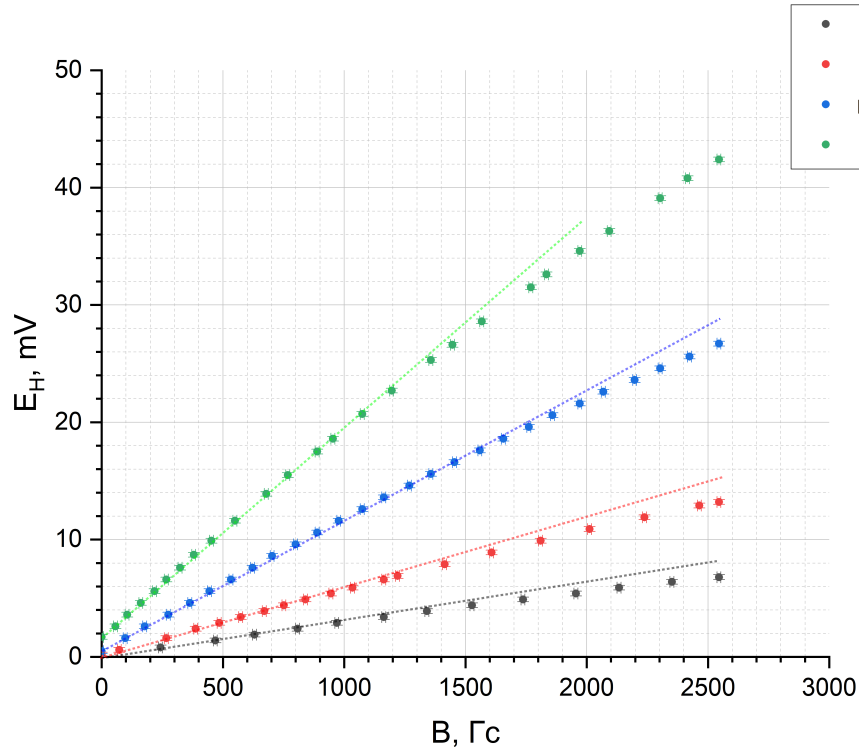
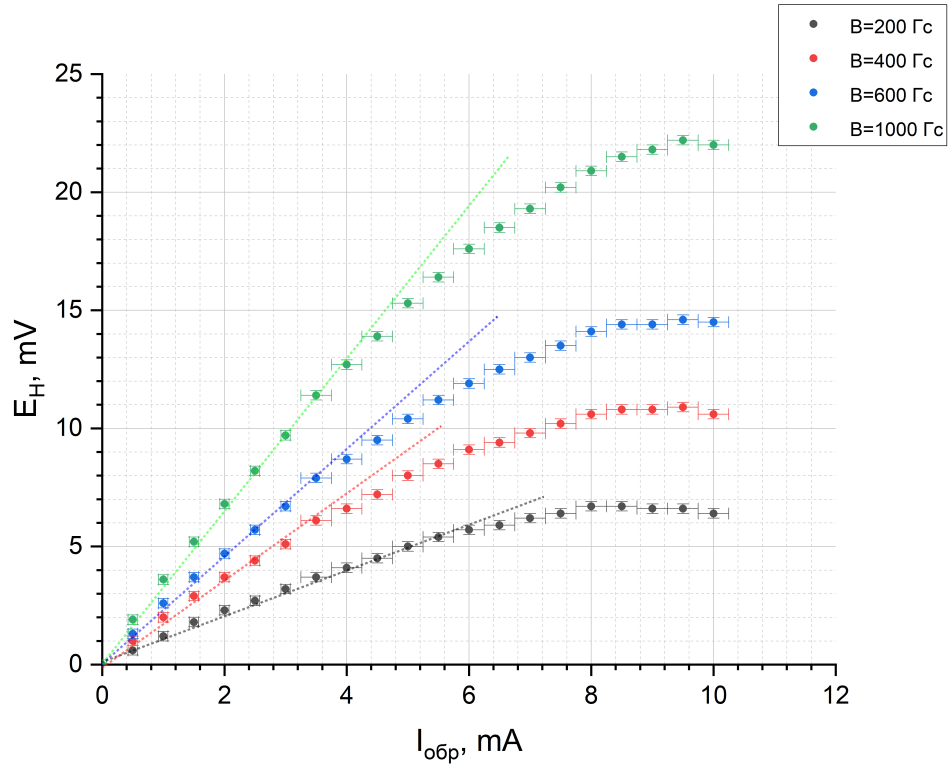


Рис. 7: Зависимость U_H от $I_{\text{обр}}$.

Рис. 8: Зависимость \mathcal{E}_H от B .Рис. 9: Зависимость \mathcal{E}_H от $I_{обр}$.

2.3 Определение постоянной Холла, подвижности и концентрации носителей

Согласно формуле (5), коэффициент Холла можно определить как:

$$R = \frac{U_H \cdot b}{I_{\text{обр}} B}$$

По графикам его можно определить по коэффициенту наклона (на линейном участке). Рассмотрим все зависимости отдельно и определим для них постоянную Холла:

При постоянном токе:

$$I_{\text{обр}} = 1 \text{ мА} : R_1 \approx 6,06 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}}; \quad I_{\text{обр}} = 2 \text{ мА} : R_2 \approx 5,34 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}};$$

$$I_{\text{обр}} = 4 \text{ мА} : R_3 \approx 5,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}}; \quad I_{\text{обр}} = 4 \text{ мА} : R_4 \approx 4,88 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}};$$

При фиксированной магнитной индукции:

$$B = 200 \text{ Гс} : R_5 \approx 9,43 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}}; \quad B = 400 \text{ Гс} : R_6 \approx 8,62 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}};$$

$$B = 600 \text{ Гс} : R_7 \approx 7,25 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}}; \quad B = 1000 \text{ Гс} : R_8 \approx 6,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}};$$

Тогда среднее значение (включая погрешность $\delta R \sim 20\%$):

$$R_{\text{ср}} \approx (6,66 \pm 1,33) \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом} \cdot \text{см}}{\text{Гс}}$$

Или в СИ:

$$R_{\text{ср}} \approx (6,66 \pm 1,33) \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{Тл}}$$

Тогда подвижность основных носителей заряда:

$$\mu = R_{\text{ср}} \cdot \sigma \approx 2,19 \left[\frac{1}{\text{Тл}} \right] \equiv 2,19 \left[\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$$

$$\delta \mu = \delta \sigma + \delta R \approx 23,5\%$$

Концентрацию носителей можно оценить по формуле:

$$R_{\text{ср}} \approx \frac{1}{p \cdot e} \Rightarrow p \approx \frac{1}{R_{\text{ср}} \cdot e}$$

$$p \sim 10^{20} [\text{м}^{-3}]$$

3 Вывод

Выполнив лабораторную работу, мы:

1) Определили удельную проводимость образца:

$$\sigma \approx (32,895 \pm 1,151) \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$$

2) По графикам определили значения постоянной Холла. Среднее значение:

$$R_{\text{ср}} \approx (6,66 \pm 1,33) \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{Тл}}$$

3) Оценили подвижность основных носителей в образце и их концентрацию:

$$\mu \approx (2,19 \pm 0,51) \left[\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$$

$$p \sim 10^{20} [\text{м}^{-3}]$$