

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждено
учебным управлением КГЭУ

**Лабораторная работа №1
по курсу**

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ
ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

**Тема: Исследование эффекта Холла в металлах и
полупроводниках**

(Продолжительность лабораторного занятия - 4 часа)

Казань 2019

Исследование эффекта Холла в металлах и полупроводниках

Кинетические явления, возникающие в твердых телах при совместном действии на носители заряда электрического и магнитного полей, называются гальваномагнитными. Цель данного исследования: познакомиться с одним из гальваномагнитных явлений – эффектом Холла и его практическим использованием.

Эффект Холла

В 1879 г. американский физик Э. Холл обнаружил, что в проводнике с током, помещенном в поперечное к току магнитное поле, возникает дополнительное электрическое поле, направленное перпендикулярно и к току, и к вектору магнитной индукции. Это явление получило название – эффект Холла.

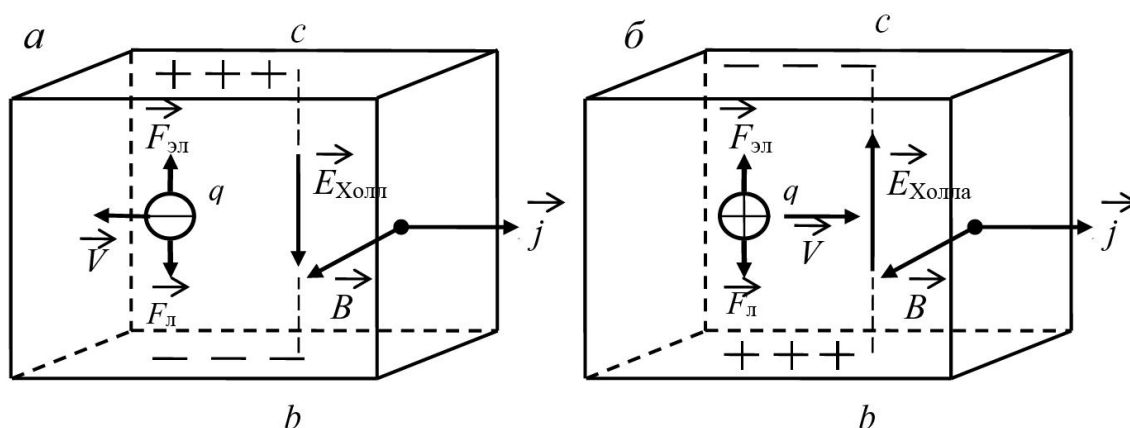


Рис. 1. Положение датчика Холла с током в магнитном поле:

a – свободные носители заряда – электроны; *б* – свободные носители заряда – дырки

Рассмотрим проводник, имеющий форму прямоугольной пластины, по которой течет электрический ток плотностью \vec{j} (рис. 1). Возьмем на противоположных гранях проводника две точки *b* и *c*, между которыми в отсутствие поперечного магнитного поля разность потенциалов равна нулю.

При включении однородного магнитного поля B , перпендикулярного к току, между этими точками возникнет разность потенциалов U , значение которой, как установил Холл, равно

$$U = R \frac{IB}{d}, \quad (1)$$

где I – ток в образце; B – магнитная индукция; d – толщина образца; R – постоянная Холла.

В настоящее время эффект Холла используется как один из методов исследования свойств твердого тела. Кроме того, он нашел практическое применение в приборах для измерения магнитной индукции, силы тока, а также в различных устройствах – генераторах, модуляторах и т. д.

Физическая природа эффекта Холла

При наличии в металлическом образце электрического тока электроны проводимости движутся с некоторой дрейфовой скоростью \vec{v} в направлении, противоположном вектору плотности тока \vec{j} . В магнитном поле с индукцией B на движущиеся с этой скоростью электроны действует сила Лоренца $\vec{F}_n = e[\vec{v} \times \vec{B}]$, направленная перпендикулярно к векторам \vec{v} и \vec{B} . Поскольку заряд электронов отрицателен ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), под действием силы Лоренца они отклоняются в сторону, противоположную вектору $[\vec{v} \times \vec{B}]$ (на рис. 1, *а* – вниз). В результате на нижней грани образца накапливается отрицательный электрический заряд, а на противоположной грани возникает избыточный положительный заряд. Это приводит к возникновению поперечного электрического поля E , направленного вертикально вниз.

Нетрудно убедиться, что если свободными носителями заряда являются дырки ($e_+ = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), то верхняя грань образца заряжается отрицательно, а нижняя – положительно (см. рис. 1, *б*). Таким образом, направление поля Холла \vec{E} при заданных направлениях магнитного поля и тока зависит от знака носителей заряда.

Процесс разделения электрических зарядов противоположных знаков продолжается до тех пор, пока напряженность поля \vec{E} не достигнет значения, при котором электрическая сила $\vec{F}_e = e\vec{E}$ уравнивает магнитную силу $\vec{F}_n = e[\vec{v} \times \vec{B}]$, после чего наступит стационарное состояние. Условие равновесия имеет вид

$$eE = evB. \quad (2)$$

Сокращение левой и правой частей уравнения (2) на e и умножение на расстояние между точками b и c дают

$$aE = avB. \quad (3)$$

Как известно, плотность тока в случае носителей заряда одного знака $j = env$, отсюда $v = j/(en)$.

После подстановки этого выражения в формулу (3) с учетом $aE = U$ получим

$$U = \frac{1}{en} jaB, \quad (4)$$

где n – концентрация носителей заряда. Так как площадь поперечного сечения проводника $S = ad$, а плотность тока $j = I/(ad)$, имеем

$$U = \frac{1}{en} \frac{IB}{d}. \quad (5)$$

Таким образом, теория приводит к выражению для холловской разности потенциалов U , совпадающему с установленной экспериментально формулой (1). При этом постоянная Холла оказывается равной

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

Если учесть статистическое распределение носителей заряда по скоростям, то в формуле (6) появляется безразмерный множитель A , называемый Холл-фактором

$$R = \frac{A}{en}. \quad (7)$$

Практически для большинства металлов $A=1$, а для полупроводников $A = \frac{3\pi}{8}$; тогда из формулы (7) можно рассчитать

концентрацию носителей заряда (для случая одинаковых носителей одного знака):

$$\text{в металлах} \quad n = \frac{1}{eR}, \quad (8)$$

$$\text{в полупроводниках} \quad n = \frac{3\pi}{8eR}. \quad (9)$$

Концентрация носителей заряда в полупроводниках мала по сравнению с металлами, поэтому постоянная Холла металлов намного меньше, чем полупроводников. В связи с этим для создания заметной холловской разности потенциалов в металлах необходима значительно большая сила тока, чем в полупроводниках.

Собственные полупроводники

В собственных полупроводниках электрический ток создается движением как электронов, так и дырок. Дрейфовая скорость \vec{v}_+ движения дырок совпадает по направлению с вектором \vec{j} . Так как заряд дырок положителен, действующая на них сила Лоренца имеет такое же направление, как и в случае электронов, т. е. вертикально вниз (см. рис. 1, б). Следовательно, при заданных направлениях векторов \vec{B} и \vec{j} дырки и электроны отклоняются силой Лоренца в одну и ту же сторону, в результате чего направления холловских электрических полей, созданных за счет движения дырок и электронов, противоположны. Постоянная Холла в таких полупроводниках может быть рассчитана по формуле

$$R = \frac{A}{e} \cdot \frac{\mu_+^2 n_+ - \mu_-^2 n_-}{(\mu_+ n_+ + \mu_- n_-)^2}, \quad (10)$$

где n_- и n_+ – концентрации электронов и дырок; μ_- и μ_+ – их подвижности (напомним: подвижностью называют отношение дрейфовой скорости носителей тока к напряженности электрического поля, вызывающего дрейф, $\mu = \frac{v}{E_0}$).

В собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок одинаковы: $n_+ = n_-$. В этом случае формула (10) приобретает вид

$$R = \frac{A}{en} \cdot \frac{\mu_+ - \mu_-}{\mu_+ + \mu_-}. \quad (11)$$

Если бы подвижности электронов и дырок в собственном полупроводнике были равны друг другу, постоянная Холла обратилась бы в нуль и эффект бы не наблюдался. Однако в действительности $\mu_+ \neq \mu_-$, и постоянная Холла отлична от нуля.

Примесные полупроводники и металлы

В примесных полупроводниках основными носителями заряда являются либо электроны (примесные полупроводники n -типа), либо дырки (примесные полупроводники p -типа). В металлах ток создается электронами. Постоянная Холла связана с концентрацией носителей заряда в полупроводниках и металлах формулами (8) и (9) (для носителей одного знака). Следовательно, определив экспериментальное значение постоянной Холла по формуле (1), можно рассчитать концентрацию основных носителей заряда по формулам (8) и (9) (в модели с одним типом носителей!). Если известна удельная электрическая проводимость σ , равная в случае носителей одного знака $\sigma = en\mu$, то можно определить подвижность носителей заряда для металлов

$$\mu = R\sigma, \quad (12)$$

для полупроводников

$$\mu = \frac{8}{3\pi} R\sigma. \quad (13)$$

Проведение эксперимента

При исследовании эффекта Холла обычно используются так называемые датчики Холла, представляющие собой тонкие прямоугольные пластинки с четырьмя контактами (рис. 2).

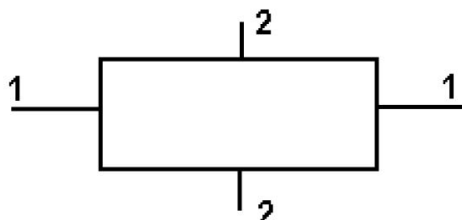


Рис. 2. Схематическое изображение датчика Холла

Контакты 1–1 используются для пропускания тока через датчик, контакты 2–2 – для измерения холловской разности потенциалов. Датчики могут быть вырезаны из металлической фольги, из полупроводникового кристалла или получены в виде тонких пленок проводника путем напыления его в вакууме на изолирующую подкладку.

Цель настоящего исследования – экспериментальное определение электрических характеристик примесного полупроводника и металла на основе эффекта Холла, а также градуировка поля электромагнита с помощью датчика Холла.

Описание установки

Принципиальная схема установки, используемой в работе, изображена на рис. 3. Цепь *a* состоит из электромагнита ЭМ, источника постоянного тока (выпрямителя), амперметра A_1 и коммутатора П, позволяющего изменять направление тока в обмотке электромагнита.

В цепь (рис. 3, б) включены датчик Холла Д (металл или полупроводник), источник постоянного тока ε и амперметр A_2 (в случае металла) или миллиамперметр (в случае полупроводника). Выходные контакты датчика 2–2 подключаются к потенциометру

(полупроводник) или к микровольтметру (металл) для измерения напряжения Холла.

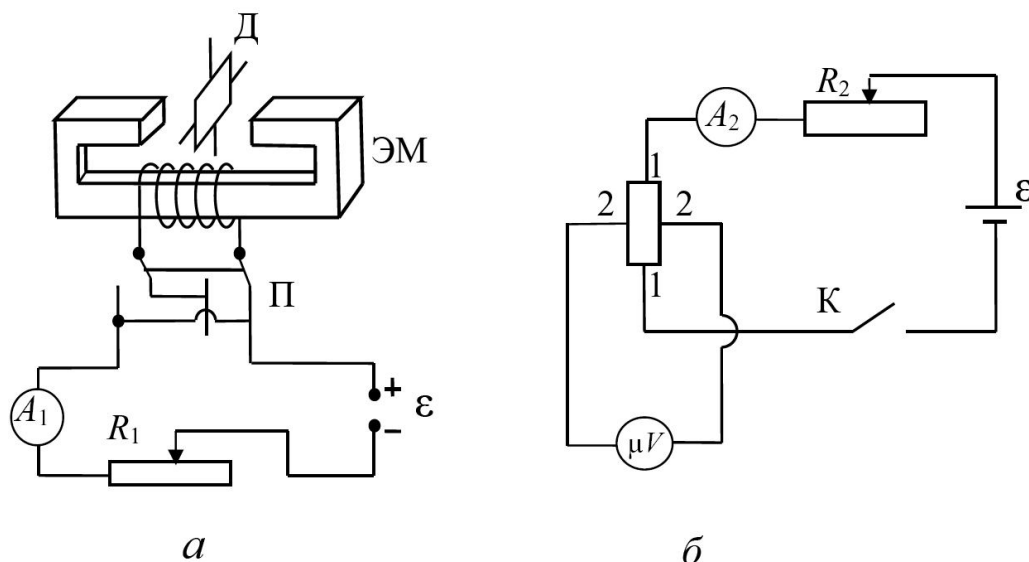


Рис. 3. Схема цепи: *а* – электромагнита; *б* – датчика Холла

Все элементы установки по изучению эффекта Холла в полупроводниках размещены в пластиковом корпусе с прозрачным верхом (рис. 4).

В качестве электромагнита используется тороид из ферромагнитного материала *1*, имеющий поперечную прорезь, в которую вставлен полупроводниковый датчик Холла. Все органы управления установкой: регуляторы силы тока в электромагните, в датчике Холла *3*, переключатели направления тока *4* размещены на лицевой панели установки. Все измеряемые в работе электрические сигналы поступают в аналого-цифровой преобразователь – АЦП *2*, где преобразуются в цифровой формат и по *USB*-кабелю передаются на компьютер.

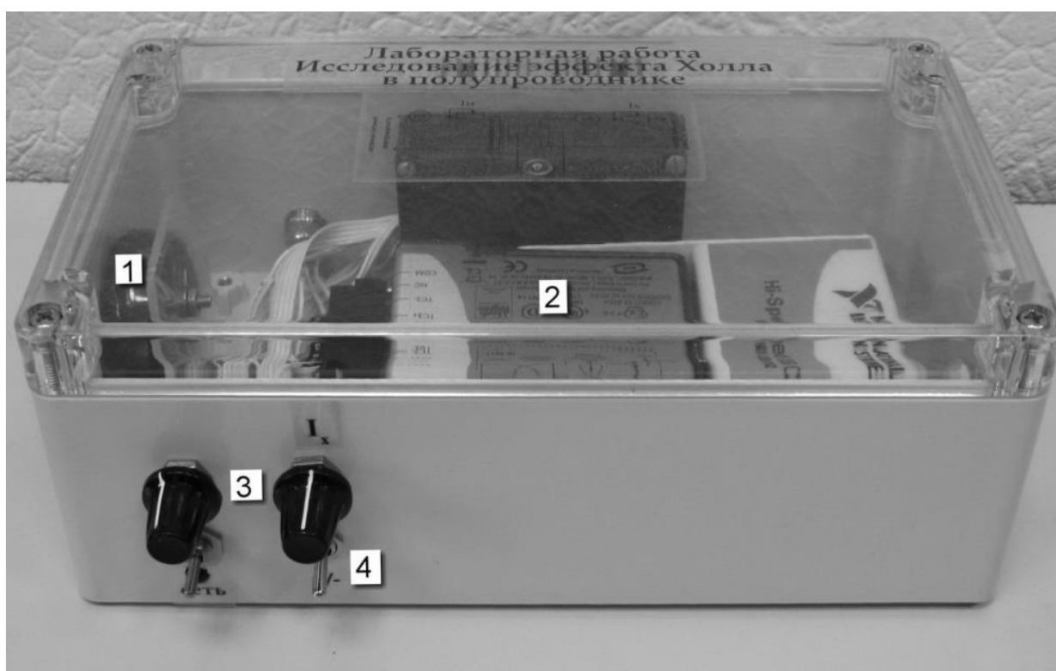


Рис. 4. Внешний вид установки по изучению эффекта Холла в полупроводнике

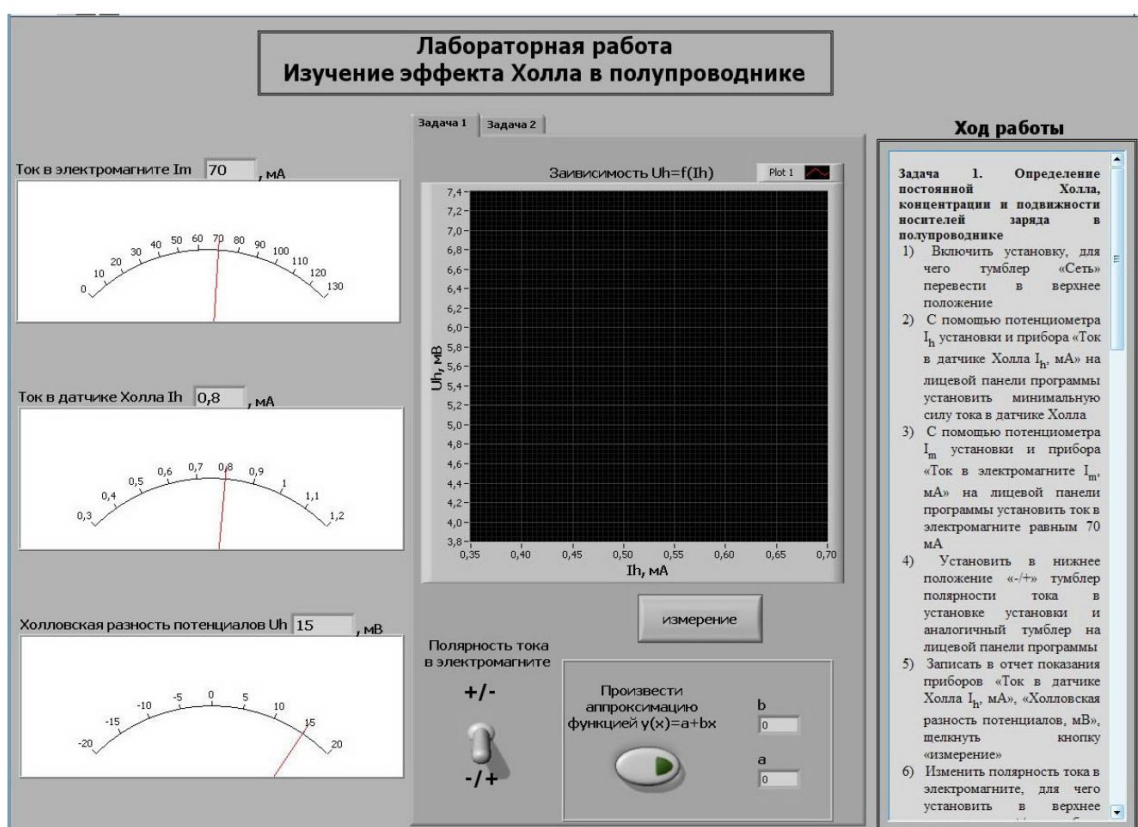


Рис. 5. Вид лицевой панели виртуального прибора для проведения измерений в работе

Написанная в графической среде *LabVIEW* программа отображает измеряемый сигнал на экране компьютера в виде показаний виртуальных измерительных приборов. Программа проведения измерений в работе представляет собой лицевую панель установки, отображаемую на экране монитора (рис. 5). На этой панели изображены измерительные приборы – миллиамперметр и милливольтметр, а также органы управления программой измерений: переключатель выполняемых задач, переключатель направления тока в электромагните, клавиша проведения дискретных измерений (по точкам), а также таблицы для отображения получаемых результатов. На лицевой панели виртуального прибора представлена также краткая инструкция по проведению измерений.

Проведение эксперимента

Работа может выполняться как на установке, описанной выше, так и на установке, смонтированной на стенде. В этом случае электромагнит расположен на отдельном столе и имеет мощный источник питания, а измерительные приборы и элементы управления смонтированы на стенде, закрепленном на лабораторном столе.

Перед началом работы необходимо включить компьютер и загрузить программу измерений. Для этого необходимо на рабочем столе включенного компьютера щелкнуть мышкой по ярлыку программы *Работа № 35*. После загрузки программы на экране монитора появится лицевая панель виртуального прибора (см. рис. 5). При проведении измерений во всех задачах следует придерживаться рекомендуемого **порядка работы, представленного на лицевой панели виртуального прибора.**

Задача 1. Определение постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей заряда

а) в полупроводнике (монокристалл кремния *n*-типа)

При работе на установке, выполненной в **стендовом варианте**, следует придерживаться следующего порядка выполнения работы:

1. *Создание в зазоре электромагнита магнитного поля известной индукции.* Включить выпрямитель и при произвольном положении переключателя П ручкой регулировки тока установить рекомендуемую силу тока в обмотке электромагнита. Рекомендуемое значение силы тока и соответствующее значение магнитной индукции B указаны в паспорте установки, который находится на рабочем месте.

2. *Измерение холловской разности потенциалов.* Замкнуть ключом K цепь датчика. Установить реостатом R_2 начальное значение силы тока в датчике и измерить холловскую разность потенциалов U_1 цифровым вольтметром. Повторить измерения при нескольких значениях силы тока I в датчике (рекомендуемые значения силы тока указаны в паспорте установки). Полученные данные занести в табл. П. 1.

3. *Изменение направления магнитного поля в зазоре электромагнита на противоположное.* Для этого следует уменьшить до нуля силу тока в электромагните, поставить переключатель П на выпрямителе в другое положение и снова установить рекомендуемое значение силы тока. Повторить измерения холловской разности потенциалов U_2 .

Обработка результатов

Необходимость измерения холловской разности потенциалов при различных направлениях тока в электромагните вызвана тем, что между выходными контактами 2–2 датчика имеется некоторая дополнительная разность потенциалов U_0 . Величина U_0 в основном

обусловлена недостаточно симметричным расположением контактов и зависит от величины тока I , текущего через датчик. Измерительный прибор показывает разность потенциалов $U_1 = U_0 + U$. При изменении направления тока в электромагните и, следовательно, направления магнитного поля холловская разность потенциалов U в отличие от U_0 меняет знак. Разность потенциалов становится равной $U_2 = U_0 - U$. Если рассчитать U по формуле

$$U = \frac{(U_0 + U) - (U_0 - U)}{2} = \frac{U_1 - U_2}{2}, \quad (14)$$

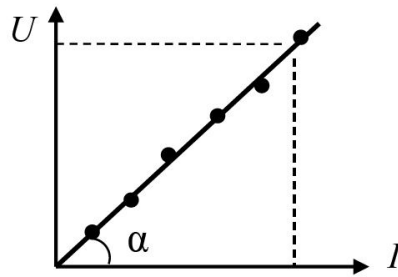
то ошибка, вносимая неэквипотенциальностью контактов 2–2, исключается. Поскольку для полупроводникового датчика в данных условиях $|U_0| < |U|$, то величина U_2 отрицательная, поэтому для ее измерения необходимо изменить полярность входного сигнала. Холловскую разность потенциалов при этом можно рассчитать по формуле

$$U = \frac{U_1 - U_2}{2} = \frac{|U_1| + |U_2|}{2}. \quad (15)$$

4. Найти средние значения холловской разности потенциалов, соответствующие разным значениям силы тока в датчике, по формуле (15). Внести эти значения в табл. П. 1.

5. Построить график зависимости U от силы тока I , аппроксимируя экспериментальные точки прямой линией (рис. 6). По графику определить величину $\text{tg}\alpha$. Из формулы (1) следует, что $\text{tg}\alpha = \frac{RB}{d}$. Используя значения B и d , указанные в паспорте установки,

вычислить постоянную Холла R . **Примечание.** Значение $\text{tg}\alpha$ также может быть получено непосредственно в ходе выполнения работы путем аппроксимации зависимости $U = f(I)$ линейной функцией с помощью компьютерной программы.

Рис. 6. Зависимость $U(I)$

Относительную систематическую погрешность измерения R вычислить по формуле

$$\gamma = \frac{\theta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\theta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\theta_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\theta_U}{\langle U \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\theta_I}{\langle I \rangle}\right)^2}. \quad (16)$$

θ_d и θ_B указаны в паспорте установки, а θ_U и θ_I определяются по классу точности соответствующих приборов, $\langle U \rangle$ и $\langle I \rangle$ определяются как средние арифметические из всех полученных значений. Абсолютная погрешность $\Delta_R = \gamma R$. Случайная погрешность не определяется, так как она много меньше систематической.

6. По формуле (9) рассчитать концентрацию, а по формуле (13) – подвижность носителей заряда в n -кремнии (значение удельной электрической проводимости σ приведено в паспорте установки).

б) в металле (медь)¹

Отличие от измерений в полупроводнике заключается в том, что силу тока в датчике (0–30 А) измеряют с помощью амперметра, а холловскую разность потенциалов (0–50 мкВ) – микровольтметром. Кроме того, поскольку для металлов в данных условиях $|U_0| > |U|$, то изменение направления магнитного поля не приводит к изменению полярности входного сигнала на микровольтметре, поэтому холловская разность потенциалов рассчитывается по формуле (15).

Аналогично строится график $U = f(I)$, рассчитываются R , n , μ для меди.

Задача 2. Градуировка магнитного поля электромагнита при помощи полупроводникового датчика Холла

Под градуировкой электромагнита понимается определение зависимости магнитной индукции между полюсными наконечниками магнита от силы тока в обмотке при заданном межполюсном расстоянии. Для этой цели можно использовать датчик Холла и полученное в задаче 1 значение постоянной Холла R .

Согласно формуле (5), при постоянной силе тока I в датчике магнитная индукция B пропорциональна холловской разности потенциалов U :

$$B = \frac{Ud}{RI}. \quad (17)$$

С другой стороны, значение B определяется величиной силы тока I_M в обмотке электромагнита. Если изменять значение I_M , то, измеряя U и рассчитывая соответствующие значения B по формуле (17), можно получить зависимость магнитной индукции электромагнита от силы тока в его обмотке. Измерения проводятся в таком порядке:

1. Установить определенную силу тока в полупроводниковом датчике

(5–10 мА).

2. Изменяя силу тока I_M в обмотке электромагнита (от 1 до 7 А через 1 А), провести измерения U цифровым вольтметром. Во время измерений следить, чтобы сила тока в датчике оставалась неизменной.

3. Рассчитать значения B по формуле (17), используя при этом величину R , полученную в задаче 1. Результаты измерений занести в табл. П. 3.

4. Построить график $B = f(I_M)$.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла и каков механизм возникновения холловской разности потенциалов?
2. Почему значения постоянной Холла в полупроводниках существенно больше, чем в металлах?
3. От каких характеристик носителей тока зависит постоянная Холла в собственных полупроводниках? В примесных полупроводниках? В металлах? Почему в собственных полупроводниках $R \neq 0$?
4. Какими способами можно добиться увеличения холловской разности потенциалов?
5. В чем различие измерения холловской разности потенциалов в металлах и полупроводниках?
6. В чем заключается графический метод определения постоянной Холла?
7. Каким образом производится градуировка электромагнита с помощью полупроводникового датчика Холла?

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчетные формулы:

1.1. Постоянная Холла:

$$R = \frac{d}{B} \operatorname{tg} \alpha,$$

где d – _____; B – _____;
 $\operatorname{tg} \alpha$ – _____.

1.2. Электрические характеристики датчиков Холла:

полупроводник $n = \frac{3\pi}{8eR},$

$$\mu = \frac{8R\sigma}{3\pi};$$

металл $n = \frac{1}{eR},$

$$\mu = R\sigma,$$

где σ – _____;
 n – _____;
 μ – _____.

1.3. Индукция магнитного поля в зазоре электромагнита:

$$B = \frac{Ud}{RI},$$

где R – _____; I – _____;
 U – _____.

2. Средства измерений и их характеристики:

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности или класс точности
1. Амперметр (I_M)			
2. Миллиамперметр (I)			
3. Милливольтметр			

Характеристики установки

Магнитная индукция в зазоре электромагнита при заданной силе тока в обмотке

$$I = \quad ; \quad B =$$

Параметры датчиков Холла

Датчик	d , мм	σ , Ом ⁻¹ м ⁻¹
п-кремний		
медь		

3. Результаты измерений:

Задача 1. Определение постоянной Холла

- в полупроводнике (кристалл кремния n-типа)

Таблица П.1

Сила тока I в датчике, мА	U_1 , мВ	U_2 , мВ	$U = \frac{ U_1 + U_2 }{2}$, мВ

- в металле (медь) ²

Таблица П.2

Сила тока I в датчике, А	U_1 , мкВ	U_2 , мкВ	$U = \frac{ U_1 - U_2 }{2}$, мкВ

Задача 2. Градуировка магнитного поля электромагнита при помощи полупроводникового датчика Холла³

$$d = \dots \text{ мм}; \quad R = \dots \text{ м}^3/\text{Кл}; \quad I = \dots \text{ мА}.$$

Таблица П.3

Сила тока I_M в электромагните, А											
U , мВ											
B , Тл											

5. Построение графиков $U = f(I)$ по данным табл. П.1 и П.2.
Определение тангенса угла наклона прямых.

6. Расчет значений R , n , μ для полупроводника и металла.

7. Оценка систематических погрешностей:

$$n\text{-кремний: } \gamma = \frac{\theta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\theta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\theta_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\theta_U}{\langle U \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\theta_I}{\langle I \rangle}\right)^2},$$

$$\gamma =$$

$$\Delta_R = \gamma R = \dots \text{ м}^3/\text{Кл};$$

$$\text{медь: } \gamma = \frac{\theta_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\theta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\theta_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\theta_U}{\langle U \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\theta_I}{\langle I \rangle}\right)^2},$$

$$\gamma =$$

$$\Delta_R = \gamma R = \dots \text{ м}^3/\text{Кл}.$$

8. Запись результатов измерений:

$$n\text{- кремний: } R = (\dots \pm \dots) \text{ м}^3/\text{Кл},$$

$$n = \dots \text{ м}^{-3},$$

$$\mu = \dots \text{ м}^2(\text{В}\cdot\text{с});$$

$$\text{медь: } R = (\dots \pm \dots) \text{ м}^3/\text{Кл},$$

$$n = \dots \text{ м}^{-3},$$

$$\mu = \dots \text{ м}^2(\text{В}\cdot\text{с}).$$

9. Построение градуировочной кривой для электромагнита $B = f(I_M)$.

10. Выводы.