

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Цель работы состоит в определении коэффициента Холла и оценке значений наиболее важных характеристик основных носителей заряда полупроводника: концентрации, знака и подвижности.

Общие сведения

Эффекта Холла заключается в появлении электрического поля, перпендикулярного как направлению тока в твёрдом проводнике, так и направлению линий магнитной индукции поля, в которое помещен исследуемый проводник.

Для исследования эффекта Холла прямоугольные пластины из исследуемого вещества (рис.1) длиной a , значительно большей ширины b и толщины d , помещают в поле \vec{B} , направление которого перпендикулярно плоскости пластины. Если вдоль пластины направлен электрический ток I , плотностью \vec{j} , то из-за искривления траектории носителей заряда q од действием силы Лоренца происходит их накопление на верхней или нижней гранях исследуемой пластины, что приводит к появлению “холловского” электрического поля \vec{E}_x [4]:

$$\vec{E}_x = R_x [\vec{B}, \vec{j}] \quad (1)$$

Здесь R_x – коэффициент Холла, который является основной количественной характеристикой эффекта Холла и содержит информацию о концентрации, подвижности и знаке основных носителей заряда в проводнике.

В свою очередь, электрического поля \vec{E}_x обуславливает возникновение напряжения U_x между верхней и нижней гранями исследуемой пластины, равное:

$$U_x = E \cdot b = \frac{R \cdot B \cdot I}{d} . \quad (2)$$

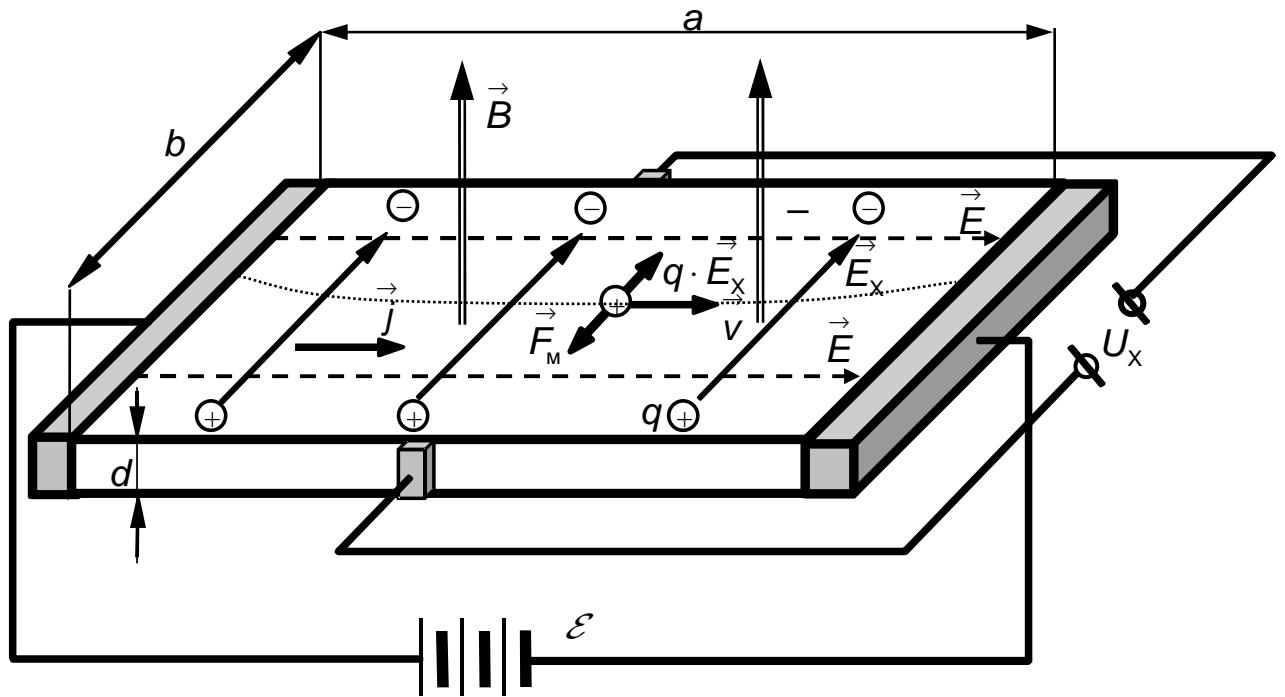


Рис.1

Эффект Холла можно объяснить следующим образом. При отсутствии магнитного поля \vec{B} в проводнике носители заряда направлены движутся со скоростью \vec{v} под действием сил внешнего поля напряжённостью \vec{E} , которое создаётся источником ЭДС \mathcal{E} . магнитного поля \vec{B} вызывает изменение траектории движения носителей заряда q под действием силы Лоренца

$$\vec{F}_M = q[\vec{v}, \vec{B}] \quad (3)$$

и их смещение к верхней или нижней граням пластины.

В результате этого смещения в проводнике происходит пространственное разделение зарядов, которое вызывает появление “холловского” электрического поля \vec{E}_x . В свою очередь поле Холла действует на заряд и уравнивает силу Лоренца. При наступлении равновесия:

$$\vec{F}_M = -q\vec{E}_x$$

Приравняв правые части записанного выражения к правой части выражения (3) и учтя свойство антикоммутативности для векторного произведения $[\vec{v}\vec{B}] = -[\vec{B}\vec{v}]$, получим выражение для напряжённости “холлов-

ского” поля:

$$\vec{E}_x = [\vec{B}\vec{v}].$$

Так как скорость направленного движения \vec{v} связана с плотностью тока \vec{j} и концентрацией носителей заряда n выражением

$$\vec{v} = \vec{j} \cdot (q \cdot n)^{-1} \quad (4)$$

то выражение для напряжённости “холловского” поля можно преобразовать к виду:

$$\vec{E}_x = \frac{[\vec{B}\vec{j}]}{q \cdot n} \quad (5)$$

Сравнение соотношений (1) и (5) позволяет выразить коэффициент Холла через концентрацию и заряд носителей:

$$R_x = (q \cdot n)^{-1} \quad (6)$$

Важнейшей характеристикой любого проводника с током является подвижность носителей заряда μ , которая определяет среднюю скорость направленного движения носителей заряда под действием электрического поля:

$$\vec{v} = \mu \cdot \vec{E} \quad (7)$$

Подвижность можно связать с удельной проводимостью проводника $\gamma = \vec{j}/\vec{E}$, приравняв выражения (4) и (7)

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu$$

Выразив из последнего соотношения произведение $q \cdot n$ и подставив его в выражение (6), получаем

$$R_x = \frac{\mu}{\gamma}. \quad (8)$$

Таким образом, если экспериментальным путём определить постоянную Холла R_x , то по формулам (6) и (8) можно определить концентрацию n и подвижность μ носителей заряда q в проводнике. Как можно видеть из выражений (6) и (8), значение коэффициента Холла увеличивается с уменьшением концентрации и увеличением подвижности носите-

лей тока. В связи с этим эффект Холла слабо выражается у металлов ($10^{-9} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$) и сильно у полупроводников ($10^{-1} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$) [4].

В качестве примера в табл.1 приведены значения коэффициентов Холла для наиболее используемых материалов (металлов и полупроводников). В табл.1 указаны также толщины d , которые обеспечивает современная промышленная технология при изготовлении пластин и плёнок для различных технических устройств, работающих на основе эффекта Холла [5].

Таблица 1

Материал	$R_x,$ $\text{м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$	d , мм	Материал	$R_x,$ $\text{м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$	d , мм
Кристаллические полупроводники			Плёночные Полупроводники		
Кремний	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,1	Селенид ртути	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Германий	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,1	Теллурид ртути	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Сурьмистый индий	$3 \cdot 10^{-4}$	0,1	Сурьмистый индий	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Арсенид индия	$1 \cdot 10^{-4}$	0,1	Арсенид индия	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Металлы					
Алюминий	$-3,3 \cdot 10^{-11}$	0,1	Золото	$-7,3 \cdot 10^{-11}$	0,1
Молибден	$18 \cdot 10^{-11}$	0,1	Вольфрам	$11 \cdot 10^{-11}$	0,1

Электрический заряд в полупроводниковой пластине может пере-

носиться как положительно заряженными частицами (“дырками”), движущимися вдоль направления тока, так и отрицательно заряженными частицами (электронами), движущимися навстречу направлению тока. Движение частиц, имеющих разноимённые заряды, происходит в полупроводнике в противоположных направлениях. При внесении исследуемого образца в магнитное поле происходит смещение заряженных частиц под действием силы Лоренца \vec{F}_m в одном направлении независимо от знака их заряда (т.е. и электроны и “дырки” отклоняются к одной и той же грани пластины). Следовательно, измерив знак “холловской” разности потенциалов, можно определить тип основных носителей заряда в полупроводнике.

Описание установки

Электрическая схема установки, предназначенная для исследования эффекта Холла в полупроводниках, показана на рис.2. Исследуемый образец полупроводника А, имеющий форму прямоугольной пластины, закреплён на круглой монтажной плате Б и помещён в однородное магнитное поле. К электродам 1 и 2 исследуемой пластины подведён ток питания I от источника ЭДС E_1 . Для контроля и регулировки тока питания последовательно с источником в цепь включены переменное сопротивление R_1 и миллиамперметр A_1 . Ключ S_1 предназначен для изменения направления тока I в полупроводнике. Условно полагаем, что положение 1 и 2 ключа S_1 соответствуют прямому и обратному току питания пластины, соответственно. Для измерения “холловского” напряжения U_x вольтметр V подключён к точечным электродам 3 и 4.

Из-за неточности установки “холловских” электродов 3 и 4 на противоположных гранях пластины при протекании тока через полупроводник кроме “холловского” напряжения U_x возникнет омическое падение напряжения, равное:

$$U_{\text{ом}} = \frac{I \cdot \Delta z}{d \cdot b \cdot \gamma}$$

где Δz – смещение “холловских” электродов 3 и 4 в направлении протекания тока I .

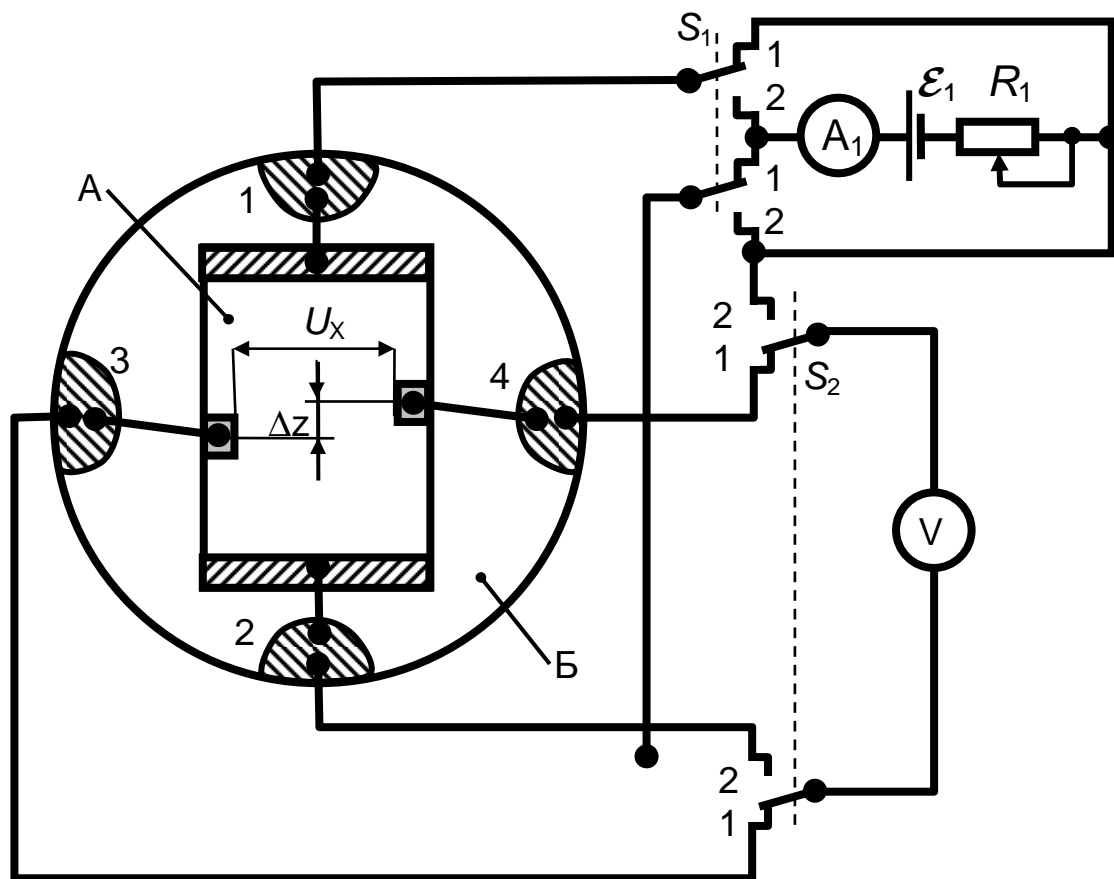


Рис. 2

Для исключения омического падения напряжения проводится измерение напряжения на «холловских» контактах при различном направлении магнитного поля. Направление магнитного поля изменяется с помощью ключа S_3 (см.рис.3), перевод которого из состояния 1 в состояние 2 меняет направление тока в катушках электромагнита. При этом, измеряемое напряжение на контактах 3 и 4 будет определено выражениями

$$U_1 = U_x + U_{\text{ом}};$$

$$U_2 = U_x - U_{\text{ом}}.$$

Исключив в записанных выражениях омического напряжения, значение “холловской” разности потенциала рассчитываем по формуле

$$U_x = 0,5 \cdot (U_1 + U_2). \quad (9)$$

Измерение напряжения питания U на электродах 1 и 2 полупровод-

никовой пластины позволяет определить удельную проводимость γ полупроводника

$$\gamma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot d} \quad (10)$$

где a, b, d — геометрические размеры исследуемой пластины.

Для подключения вольтметра V к точечным электродам 1 и 2 достаточно переключить ключ S_2 в положение 2.

В качестве источника однородного магнитного поля с индукцией в лабораторной работе использован электромагнит (рис.3), который состоит из обмоток 1 и 3, уложенных на стержневые сердечники 2 и 4, и замыкающего магнитный поток Φ внешнего сердечника 5. Данная конструкция электромагнита позволяет создать однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} в зазоре между внутренними сердечниками 2 и 4, где установлена плата 6 с исследуемым образцом полупроводника 7.

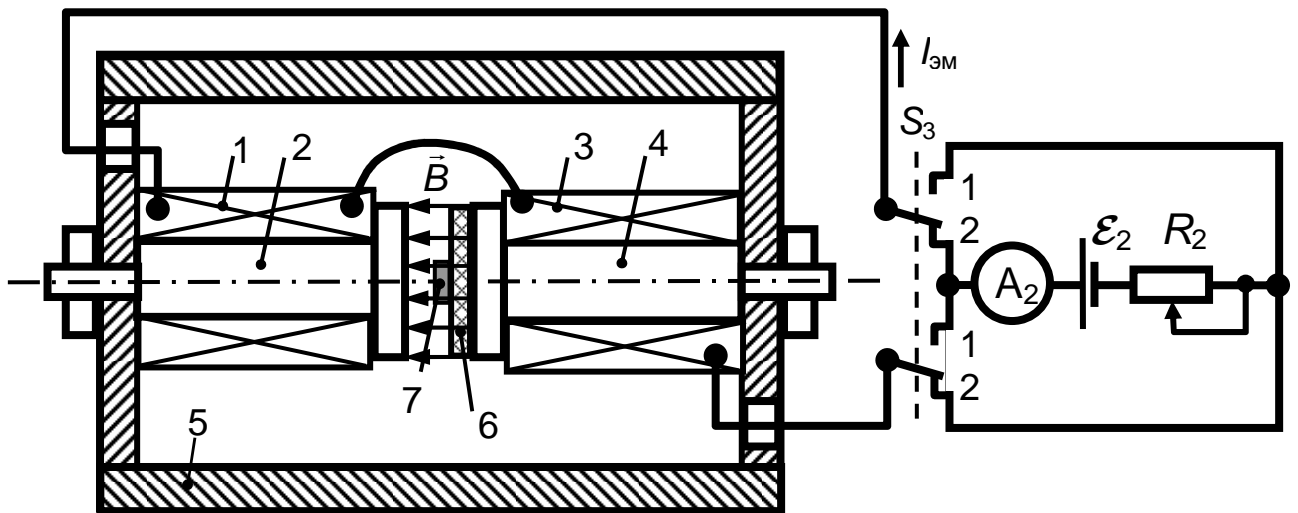


Рис. 3

Если пренебречь краевыми эффектами, что приводит к искажению поля в зазоре примерно на 5 %, то значение магнитной индукции \vec{B} можно определить из выражения [1,2,3] :

$$B = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{S} \quad (11)$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки, создаваемые обмотками 1 и 2 электромагнита, соответственно; S — площадь зазора: $S = \pi D^2$. Здесь D — диа-

метр внутренних сердечников в области зазора: $D=20$ мм .

В свою очередь потоки Φ_1 и Φ_2 связаны с потокоцеплениями Ψ_{12} и Ψ_{21} между обмотками электромагнита выражениями:

$$\Phi_1 = \frac{\Psi_{12}}{w_2}; \quad \Phi_2 = \frac{\Psi_{21}}{w_1}, \quad (12)$$

где w_1 и w_2 – количество витков в обмотках 1 и 3 электромагнита: $w_1=921$ виток, $w_2=884$ витка.

Подставив выражения (12) в выражение (11) и учитывая соотношение, связывающее потокоцепление между обмотками со взаимной индукцией M и током $I_{эм}$ в последовательно соединённых обмотках 1 и 2 электромагнита [1,2,3]:

$$\Psi_{12} = \Psi_{21} = M \cdot I_{эм}$$

получим выражение для расчёта магнитной индукции B в зазоре между сердечниками 2 и 4:

$$B = \frac{I_{эм} \cdot M}{S} \cdot \frac{w_1 + w_2}{w_1 \cdot w_2}. \quad (13)$$

Из последнего выражения следует, что изменение тока $I_{эм}$ в обмотках электромагнита, позволяет получить в зазоре между сердечниками любое значение магнитной индукции от 0 до B_{max} . Ток через последовательно соединённые обмотки электромагнита $I_{эм}$ задаётся по амперметру A_2 путём регулировки сопротивления R_2 , включённых последовательно с источником ЭДС \mathcal{E}_2 .

Порядок выполнения работы

Задание 1

Определить зависимости “холловского” напряжения от магнитной индукции поля.

Примечание. “Холловские” напряжения U_1 и U_2 отличаются направлением потока вектора магнитной индукции в зазоре электромагнита, где расположен кристалл. Для изменение направления потока используется ключ S_3 , с положением 1 и 2 которого связаны два различных направ-

ления тока в обмотках электромагнита.

1. Для подключения вольтметра V к “холловским” контактам исследуемой пластины установить ключ S_2 в положение 1. (Предел измерения вольтметра V равен 100 мВ.)
2. Перевести ключ S_3 в положение 1 и с помощью переменного сопротивления R_2 установить минимальное значение тока $I_{эл\ min}$ в обмотках электромагнита.
3. Установить максимальное значение тока I в исследуемой пластине с помощью амперметра A_1 и регулятора **грубой** и **точной** настройки R_1 . Результат занести в *табл.2*.
4. Определить значение напряжения U_1 при минимальном значении тока $I_{эл}=0$. Значение занести в *табл.2*, “Увеличение тока $I_{эл}$ ”.
5. Изменяя ток $I_{эл}$ от $I_{эл\ min}$ до 600 мА с интервалом $\Delta I_{эл}=100\text{ мА}$ с помощью регулятора R_2 и амперметра A_2 , измерить значение напряжения U_1 на “холловских” контактах исследуемого образца. Результаты занести в *табл.2*, “Увеличение тока $I_{эл}$ ”.
6. Изменяя ток $I_{эл}$ от 600 мА до $I_{эл\ min}$ с интервалом $\Delta I_{эл}=100\text{ мА}$, измерить значение напряжения U_1 . Результаты занести в *табл.2*, “Уменьшение тока $I_{эл}$ ”.
7. Изменить направление тока $I_{эл}$ в обмотках электромагнита на противоположное. Для этого перевести ключ S_3 в положение 2.
8. Определить значение напряжения U_2 при минимальном значении тока $I_{эл}=0$. Значение занести в *табл.2*, “Увеличение тока $I_{эл}$ ”.
9. Изменяя ток $I_{эл}$ от $I_{эл\ min}$ до 600 мА с интервалом $\Delta I_{эл}=100\text{ мА}$ с помощью регулятора R_2 и амперметра A_2 , измерить значение напряжения U_2 . Результаты занести в *табл.2*, “Увеличение тока $I_{эл}$ ”.
10. Изменяя ток $I_{эл}$ от 600 мА до $I_{эл\ min}$ с интервалом $\Delta I_{эл}=100\text{ мА}$, измерить значение напряжения U_2 . Результаты занести в *табл.2*, “Уменьшение тока $I_{эл}$ ”.
11. Вычислить значения “холловской” составляющей напряжения по форму-

ле (9) при увеличении и уменьшении тока электромагнита. Результаты занести в табл.2.

12. Воспользовавшись выражением (13), рассчитать значения магнитной индукции в зазоре электромагнита, соответствующие различным значениям тока в его обмотках. Результаты занести в табл.2.
13. Построить графики зависимостей $U_{x1} = f_1(B)$ и $U_{x2} = f_2(B)$ при увеличении тока в электромагните и его уменьшении, соответственно.
14. Для характерных линейных участков полученных зависимостей определить коэффициенты пропорциональности K_I :

$$K_I = \frac{U_x(B_{\max})}{B_{\max}}.$$

Здесь $U_x(B_{\max})$ – значение “холловского” напряжения, определённое с помощью линеаризующей результаты прямой при максимальном значении магнитной индукции B_{\max} .

15. Определить значения коэффициента Холла R_x , подставив коэффициенты пропорциональностей K_I в выражение:

$$R_x = \frac{K_I \cdot d}{I}.$$

Результаты занести в графу №1 и №2 табл.5.

Задание 2

Определение зависимости “холловского” напряжения от тока в исследуемой пластине.

1. Для подключения вольтметра V к “холловским” контактам исследуемой пластины установить ключ S_2 в положение 1. (Предел измерения вольтметра V равен 100 мВ.)
2. Перевести ключ S_3 в положение 1 и с помощью переменного сопротивления R_2 установить значение тока $I_{эл\ max}$ в обмотках электромагнита, указанное преподавателем. Результат занести в табл.3.
3. Изменяя с помощью регулятора грубой и точной настройки R_1 и ам-

- перметра A_1 значения тока I , протекающего через пластину исследуемого полупроводника, от 0 до 6 мА с интервалом 1 мА, измерить напряжение U_1 на “холловских” контактах пластины при увеличении тока I . Результаты занести в табл. 3.
4. Изменяя значения тока I от 6 до 0 мА с интервалом 1 мА, измерить напряжение U_1 при уменьшении тока I . Результаты занести в табл. 3.
 5. Изменить направление тока $I_{эл}$ в обмотках электромагнита, для чего ключ S_3 перевести в положение 2.
 6. Изменяя значения тока I в пределах от 0 до 6 мА с интервалом 1 мА, измерить напряжение U_2 при увеличении тока I . Изменяя значения тока I от 6 до 0 мА, измерить “холловское” напряжение U_2 при уменьшении тока I . Результаты занести в табл. 3. Результаты измерения напряжения U_2 при увеличении и уменьшении тока I занести в табл.3.
 7. Вычислить значения “холловских” составляющих напряжений при увеличении и уменьшении тока, протекающего в полупроводнике, по формуле (9). Результаты занести в табл.3.
 8. Воспользовавшись выражением (13), рассчитать значение магнитной индукции в зазоре электромагнита для заданного значения тока в его обмотках. Результаты занести в табл.2.
 9. Построить графики зависимостей $U_{х3} = f_3(I)$ и $U_{х4} = f_4(I)$ при увеличении и уменьшении тока, протекающего через пластину полупроводника, соответственно.
 10. Для характерных линейных участков полученных зависимостей определить коэффициенты пропорциональности K_B :

$$K_B = \frac{U_x(I_{\max})}{I_{\max}},$$

где $U_x(I_{\max})$ – значение “холловского” напряжения, определённое с помощью линеаризующей результаты измерения прямой для максимального значения тока питания I_{\max} .

11. Используя полученные коэффициенты пропорциональности K_B , Вы-

числить коэффициенты Холла R_x , с помощью выражения вида:

$$R_x = \frac{K_B \cdot d}{B_{\max}}.$$

Результаты расчёта занести в графы №3 и №4 *табл.5*.

Задание 3

Определение удельной проводимости исследуемого полупроводника.

1. Установить минимальное значение магнитного поля электромагнита, для чего повернуть регулятор R_2 по часовой стрелке.
2. Подключить вольтметр V к токовым контактам исследуемой пластины, для чего ключ S_2 установить в положение 1. При таком подключении предел измерения вольтметра V равен 20 В.
3. Изменяя значения тока I в пластине полупроводника от 1 до 6 мА, измерить пять значения падения напряжения U на токовых контактах пластины. Результаты занести в *табл.4*.

Обработка результатов измерения

1. Вычислить среднее значение коэффициента Холла R_x . Используя полученное значение R_x , по *табл.1* определить тип полупроводника из которого изготовлен исследуемый образец.
2. Случайную погрешность ΔR_x рассчитать по результатам вычисления R_{xi} по выражению

$$\Delta R_x = t_{pN} \cdot \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{xi} - \bar{R}_x)^2}$$

где N — количество полученных значений коэффициента Холла (см. *табл.5*); t_{pN} — коэффициент Стьюдента: при $p=0,95$ и $N=4$ значение коэффициента принять равным $t_{pN}=3,18$.

3. Систематическую погрешность ΔR_{xc} определения коэффициента Холла вычислить, используя выражение

$$\frac{\Delta R_{xc}}{\bar{R}_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_c}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{\text{ЭМС}}}{I_{\text{ЭМ}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}$$

где $\Delta U_C, \Delta I_C, \Delta I_{ЭМС}$ — абсолютные значения погрешностей, найденные исходя из класса точности соответствующих измерительных приборов; $\bar{U}, \bar{I}, \bar{I}_{ЭМ}$ — средние значения, измеряемые с помощью приборов в процессе эксперимента; Δd — технологическая погрешность, обусловленная неточностью изготовления полупроводника: $\Delta d = 0,02 \text{ мм}$ при $d = 0,2 \text{ мм}$.

4. Рассчитать абсолютную погрешность измерения коэффициента R_x с помощью выражения

$$\Delta R_x = \sqrt{\Delta R_x^2 + \Delta R_{xC}^2}.$$

Заполнить *табл.5*.

5. Используя формулу (6), оценить концентрацию n основных носителей заряда в полупроводнике. В качестве заряда носителя принять заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
6. Рассчитать ошибку, допущенную при оценке концентрации носителей основного заряда в исследуемом полупроводнике, используя соотношение

$$\frac{\Delta n}{\bar{n}} = \frac{\Delta R_x}{\bar{R}_x}.$$

7. Записать полученные результаты в виде

$$n = (\bar{n} \pm \Delta n);$$

$$R_x = (\bar{R}_x \pm \Delta R_x).$$

8. Пользуясь выражениями (8) и (10), определить удельную проводимость γ и подвижность μ основных носителей заряда в полупроводнике. Результаты записать в *табл.4*.
9. Рассчитать средние значения удельной проводимости γ и подвижности μ основных носителей заряда. Результаты записать в *табл.4*.

Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся все вещества по их электрическим свойствам?
2. Как объяснить эффект Холла с помощью законов классической электродинамики?
3. В чём состоит особенность явления Холла в полупроводниках и в металлах? Какой знак у основных носителей заряда для следующих металлов: алюминий, золото и вольфрам.
4. Каким образом можно определить знак основных носителей заряда в полупроводнике, используя эффект Холла.
5. Как зависит “холловское” напряжение от тока, магнитной индукции и размеров образца полупроводника?
6. Какие измерения позволяют определить коэффициент Холла?
7. Для определения каких физических параметров полупроводников можно использовать эффект Холла? Какие измерения необходимо для этого произвести?

Л и т е р а т у р а

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.— М.: Наука, 1988. — 496 с.
2. Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс общей физики. — М.: Высш. шк., 1989. — 608 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. — М.: Высш. шк., 1990.— 478 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. — М.: 1977.
5. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. — Пер. с польского под ред. Хомерики О.К., — М.: Энергия, 1971. — 352 с.

Таблица 2

I_{\max} , мА			Увеличение тока $I_{эм}$			Уменьшение тока $I_{эм}$		
№	$I_{эм}$, мА	B , мТл	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_x , мВ	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_x , мВ
1								
...								
10								

Таблица 3

$I_{эм}$, мА; B , мТл			Увеличение тока I			Уменьшение тока I		
№	I , мА		U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_x , мВ	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_x , мВ
1								
...								
10								

Таблица 4

№	I , мА	U , мВ	γ , См/м	μ , м ² В ⁻¹ с ⁻¹
1				
2				
3				
4				
5				
Σ				

Таблица 5.

№	$R_x, \text{ м/(А·с)}$	$\bar{R}_x, \text{ м/(А·с)}$	$\Delta R_x, \text{ м/(А·с)}$	$\gamma_R, \%$
1				
2				
3				
4				
Σ				