

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА  
В ПОЛУПРОВОДНИКЕ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА**

**Методические указания к лабораторной работе № 98  
по дисциплине «Физика»**

**Уфа 2016**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА  
В ПОЛУПРОВОДНИКЕ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Методические указания к лабораторной работе № 98  
по дисциплине «Физика»

Уфа 2016

Составитель В. В. Лазарев

УДК  
ББК

Определение концентрации и подвижности носителей тока в полупроводнике методом эффекта Холла: методические указания к лабораторной работе № 98 по дисциплине «Физика» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. В. В. Лазарев. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2016. – 15 с.

Цель методических указаний – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Физика» и формирование умений их применять для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, возникающих в последующей профессиональной деятельности выпускников технического университета.

Рассмотрена теория эффекта Холла, приведен приближенный вывод постоянной Холла. Определяются постоянная Холла, подвижность и концентрация носителей тока, удельное сопротивление полупроводникового образца.

Предназначены для студентов технических вузов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Атомная физика. Элементы физики твердого тела» дисциплины «Физика» на всех направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. Трофимова Е.В.,  
канд. физ.-мат. наук, доц. Шатохин С.А.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2016

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 4  |
| 1. Цели работы .....  | 5  |
| 2. Задачи.....  | 5  |
| 3. Теоретическая часть .....  | 5  |
| 3.1. Эффект Холла.....  | 5  |
| 3.2. Физическая природа эффекта Холла.....  | 6  |
| 4. Экспериментальная установка.....   | 11 |
| 5. Требования по технике безопасности .....   | 12 |
| 6. Задания.....   | 12 |
| 7. Методика выполнения заданий .....  | 13 |
| 7.1 Определение постоянной Холла .....  | 13 |
| 7.2. Определение концентрации, подвижности и удельного<br>сопротивления полупроводникового образца..... | 14 |
| Контрольные вопросы .....   | 14 |
| Требования к содержанию и оформлению отчета .....   | 15 |
| Критерии результативности выполнения лабораторной работы .....  | 15 |
| Список литературы .....   | 15 |

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на заряды, движущиеся в магнитном поле. Сила, действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, называется силой Лоренца. Одним из проявлений силы Лоренца в металлах или полупроводниках является эффект Холла – взаимодействие носителей тока (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем. При изучении эффекта Холла используются такие физические величины, как концентрация и подвижность носителей тока, удельная электропроводность, постоянная Холла.

Данная лабораторная работа посвящена усвоению понятия силы Лоренца, исследованию эффекта Холла в полупроводниках и определению подвижности, концентрации носителей зарядов и удельной электропроводности.

В результате выполнения лабораторной работы формируются следующие компетенции:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;
- способность проводить эксперименты по заданной методике и обработку результатов;
- способность сопоставлять экспериментальные данные с теоретическими положениями;
- способность оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы;
- способность применять полученные теоретические знания в экспериментальной работе.

Перечисленные компетенции формируются через умения:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;
- анализировать результаты опыта;
- оформлять отчет;
- использовать знания, полученные в опыте для подтверждения теоретических знаний.

Перечисленные компетенции формируются через владения:

- теоретическим материалом;
- навыками измерений физических величин по приборам;
- технологией графической обработки экспериментальных данных.

## Лабораторная работа № 98

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

### 1. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение эффекта Холла в полупроводнике.
2. Экспериментальное измерение постоянной Холла, концентрации, подвижности носителей тока в полупроводнике и удельного сопротивления образца с помощью определения ЭДС Холла.

### 2. ЗАДАЧИ

1. Закрепление теоретических знаний студентами по теме «Элементы физики твердого тела».
2. Приобретение навыков проведения физических измерений и умения обработки получаемых при этом данных.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Эффект Холла

Эффектом Холла называется появление в металле (или полупроводнике) с током плотностью  $\vec{j}$ , помещённом в магнитное поле  $\vec{B}$ , электрического поля  $\vec{E}_H$ , перпендикулярного  $\vec{B}$  и  $\vec{j}$ . При этом напряжённость электрического поля, называемого ещё полем Холла, равна

$$E_H = R B j \sin \alpha, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{j}$  ( $\alpha < 180^\circ$ ). Когда  $\vec{B} \perp \vec{j}$ , то величина поля Холла  $E_H$  максимальна:  $E_H = R B j$ . Коэффициент пропорциональности  $R$  называется постоянной Холла, является основной характеристикой эффекта Холла. Эффект был открыт американским физиком Эдвином Холлом в 1879 г. в тонких пластинках золота.

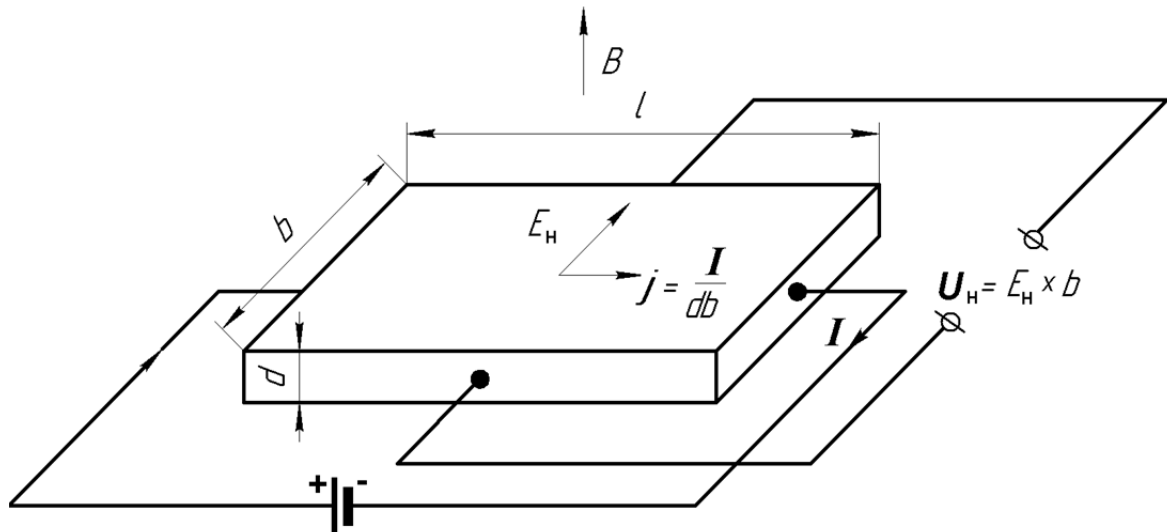


Рис. 3.1

Для наблюдения эффекта Холла вдоль прямоугольной пластины из исследуемого вещества (рис. 3.1), длина которых  $l$  значительно больше ширины  $b$  и толщины  $d$ , пропускается ток

$$I = jS = jbd, \quad (3.2)$$

на рисунке магнитное поле перпендикулярно плоскости пластинки.

На середине боковых граней, параллельных направлению тока, расположены электроды, между которыми измеряется ЭДС Холла  $U_H$

$$U_H = E_H b = R j b B. \quad (3.3)$$

Так как ЭДС Холла меняет знак на обратный при изменении направления магнитного поля на противоположное направление, то эффект Холла относится к *нечётным гальваномагнитным явлениям*.

### 3.2. Физическая природа эффекта Холла

Ток в пластинке обусловлен упорядоченным движением частиц – носителей тока с зарядом  $q$ . Под действием электрического поля носители тока приобретают направленное движение (дрейф), средняя скорость которого (дрейфовая скорость)  $v_{др} \neq 0$ . Если концентрация носителей тока –  $n_0$ , а средняя скорость их упорядоченного движения частиц –  $\vec{v}_{др}$ , то плотность тока равна

$$\vec{j} = n_0 \vec{v}_{др} q. \quad (3.4)$$

Если заряд частиц, образующих ток  $q > 0$ , то их скорость  $\vec{v}_{др}$  совпадает с направлением тока, если же заряд  $q < 0$ , то скорость частиц  $\vec{v}_{др}$  противоположна по направлению вектору  $\vec{j}$ .

На частицу, движущуюся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_л = q [ \vec{v}_{др} \times \vec{B} ]$ . При указанных на рис. 3.2 направлениях тока в пластинке, вектора  $\vec{B}$  и знака заряда  $q$  сила  $\vec{F}_л$  направлена вверх.

Под действием силы  $\vec{F}_л$  частицы отклоняются к верхней грани пластинки, так что на верхней грани возникает избыток отрицательных зарядов, а на нижней – избыток зарядов противоположного знака.

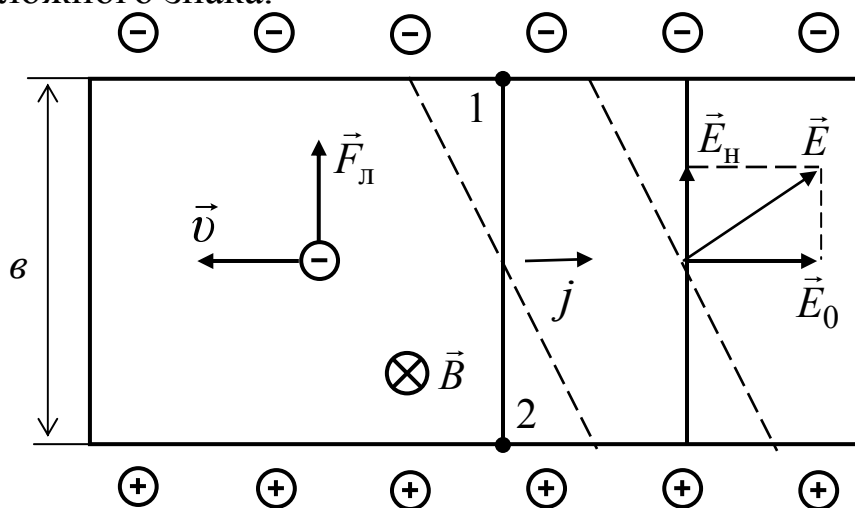


Рис. 3.2

Следовательно, возникает дополнительное поперечное электрическое поле  $\vec{E}_н$ . Сила  $\vec{F}_э = q \vec{E}_н$ , действующая со стороны поперечного электрического поля на заряд  $q$ , направлена в сторону, противоположную силе  $\vec{F}_л$ . В случае установившегося стационарного распределения зарядов в поперечном направлении полная сила Лоренца, действующая на заряд  $q$  равна нулю

$$q \vec{E}_н + q [ \vec{v} \times \vec{B} ] = 0. \quad (3.5)$$

В скалярном виде уравнение (3.5) имеет вид

$$q E_н - q v B = 0. \quad (3.6)$$

Отсюда



$$E_H = vB. \quad (3.7)$$

Поле  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_H$ . Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны к вектору напряжённости поля  $\vec{E}$  поэтому, они повернутся и займут положение, изображённое на рис. 3.2 пунктиром. Точки 1 и 2, которые прежде лежали на одной и той же эквипотенциальной поверхности, теперь имеют разные потенциалы. Чтобы найти напряжение, возникающее между этими точками, нужно умножить расстояние между ними на напряженность  $E_H$

$$U_H = \Delta \varphi = E_H b = b v B. \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.4) следует, что

$$v = \frac{j}{n_0 q}. \quad (3.9)$$

Следовательно,

$$U_H = \frac{1}{n_0 q} b j B. \quad (3.10)$$

Таким образом, полученный результат совпадает с экспериментальной формулой (3.3). Из сравнения (3.3) и (3.10) следует, что постоянная Холла равна

$$R = \frac{1}{n_0 q}. \quad (3.11)$$

Из формулы (3.11) следует, что знак разности потенциалов, а следовательно, и постоянной Холла совпадает со знаком заряда  $q$  частиц, обуславливающих проводимость данного материала. Для металлов, у которых концентрация носителей (электронов проводимости) близка к плотности атомов ( $n_0 \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ),  $R \approx 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , у полупроводников концентрация носителей значительно меньше и  $R \approx 0,1 \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Постоянная Холла может быть выражена через подвижность носителей заряда  $\mu = q \tau / m^*$  и удельную электропроводность

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{q n_0 v_{др}}{E}, \quad (3.12)$$

где  $m^*$  – эффективная масса носителей,  $\tau$  – среднее время между двумя последовательными соударениями с рассеивающими центрами, тогда

$$R = \frac{\mu}{\sigma}. \quad (3.13)$$

Подвижностью  $\mu$  носителей тока называется отношение средней упорядоченной скорости  $v_{др}$  носителей (электронов и дырок) к напряженности внешнего электрического поля  $E$ :  $\mu = \frac{v_{др}}{E}$ , тогда удельная проводимость образца определяется формулой

$$\sigma = n_0 q \mu. \quad (3.14)$$

На рис. 3.3 сопоставлен эффект Холла для образцов с положительными и отрицательными носителями.

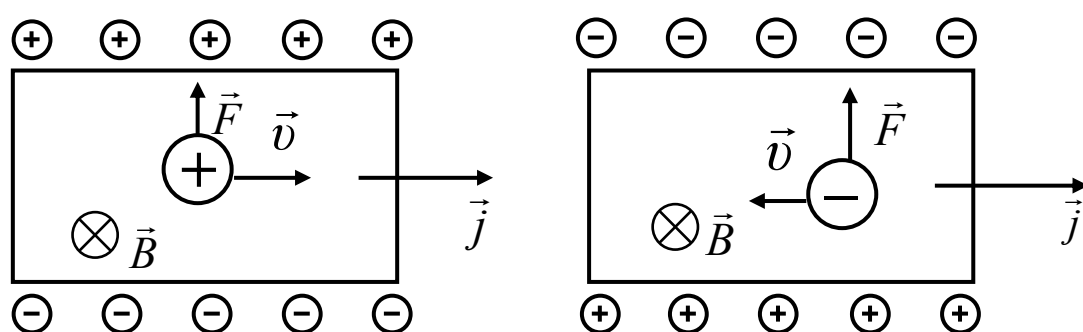


Рис. 3.3

Направление силы Лоренца изменяется на противоположное как при изменении направления движения заряда, так и при изменении его знака. Следовательно, при одинаковом направлении тока и магнитного поля сила Лоренца, действующая на положительные и отрицательные носители, имеет одинаковое направление. Поэтому в случае положительных носителей потенциал верхней грани (на рис. 3.3) выше, чем нижней, а в случае отрицательных носителей – ниже. Таким образом, определив знак холловской разности потенциалов, можно установить знак носителей тока. Значение постоянной Холла позволяет определить концентрацию носителей заряда, если характер проводимости и их заряд известны.

Поскольку все металлы обладают электронной проводимостью, то, казалось бы, что знак эффекта у всех у них должен быть одинаков, так как под действием магнитного поля поток электронов отклоняется вполне определённым образом. Тем не менее, у ряда металлов знак эффекта Холла оказался как раз противоположным. Эту закономерность объясняет зонная теория твёрдого тела. Если зона проводимости металла укомплектована менее чем наполовину,

то электроны такой зоны ведут себя нормально, как частицы, обладающие положительной эффективной массой и отрицательным зарядом. Знак постоянной Холла у таких металлов будет отрицательным (к ним относятся металлы 1-й группы таблицы Менделеева). Если зона проводимости металла укомплектована почти полностью. То остающиеся в ней незаполненные уровни – дырки ведут себя как частицы, обладающие положительной эффективной массой и положительным зарядом. Такие металлы имеют дырочную проводимость, вследствие чего знак постоянной Холла у них положительный (аномальный эффект Холла). К таким металлам относятся Be, Cd, Zn и др. Более корректные вычисления, основанные на кинетическом уравнении Больцмана и классической статистике, приводит к результату

$$R = \frac{3\pi}{8 n_0 q}. \quad (3.15)$$

Если же применить к электронам в металле статистику Ферми-Дирака, то результаты таких вычислений совпадают с формулой (3.11).

Рассмотренный вывод постоянной Холла является весьма приближенным, так как не учитывает скорость хаотического движения электронов. Более строгий расчет приводит к выражению

$$R = \frac{A}{n_0 q}, \quad (3.16)$$

где  $A$  – постоянная, зависящая от механизма рассеяния носителей тока. Для полупроводников, обладающих решёткой типа алмаза (германий, кремний, InSb, GaSb, AlAs и др.) и имеющих носителей одного знака

$$A = \frac{3\pi}{8} = 1,17 \text{ и } R = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{n_0 q} = 1,17 \frac{1}{n_0 q}, \quad (3.17)$$

если основное значение имеет рассеяние носителей на тепловых колебаниях решётки, и

$$A = 1,93, \quad R = 1,93 \frac{1}{n_0 q}, \quad (3.18)$$

если основное значение имеет рассеяние на ионизированных атомах примесей.

Для полупроводников, имеющих два вида носителей – электроны и дырки постоянная Холла равна

$$R = \frac{A}{q} \frac{n_p^2 \mu_p^2 - n_n^2 \mu_n^2}{n_p (n_p \mu_p + n_n \mu_n)^2}, \quad (3.19)$$

где  $n_n$  и  $n_p$  – концентрации электронов и дырок,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – их подвижности,  $A = \text{const}$ , зависящая от механизма рассеяния.

В зависимости от типов носителей тока знак  $R$  может быть как положительный так и отрицательный, что позволяет не спутать в эксперименте эффект Холла с другими возможными эффектами, не зависящими от направления тока.

Эффект Холла получил широкое практическое применение. На его основе оказалось возможным создание ряда устройств и приборов, обладающих исключительно ценными свойствами – приборов для измерения постоянных и переменных магнитных полей, для измерения токов высокой частоты, электронных преобразователей, усилителей и генераторов электрических колебаний и др.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки для изучения эффекта Холла приведена на рис. 4.1.

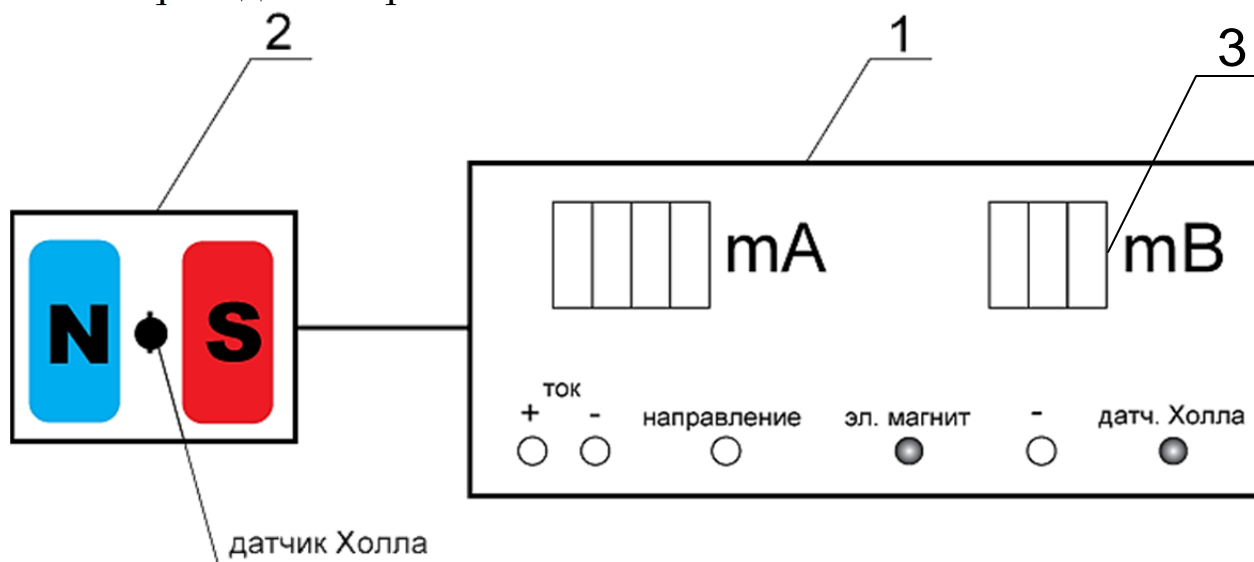


Рис. 4.1

В настоящей работе используется примесный полупроводник с концентрацией основных носителей зарядов, значительно большей концентрации неосновных носителей зарядов, поэтому для определения постоянной Холла воспользуемся формулой (3.16).

Установка состоит из двух блоков: блока управления и индикации 1, и блока 2, содержащего электромагнит с исследуемым образцом (датчиком Холла).

Блок управления позволяет регулировать токи через электромагнит и исследуемый образец и менять их полярность. Переход от регулировки тока датчика к регулировке тока электромагнита (тока соленоида) и обратно выполняется кнопкой «эл-магн – датч. Холла». Величины токов устанавливаются кнопками «+» «-» и контролируются по индикатору «mA». Направление тока меняется кнопкой «направление». ЭДС Холла измеряется с помощью 3-х значного цифрового милливольтметра 3.

Источник питания не следует использовать на предельных режимах. Переключать направление тока следует при его нулевом значении.

## **5. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. Перед началом выполнения лабораторной работы, внимательно ознакомьтесь с описанием экспериментальной установки.

2. Все электрические приборы, используемые в экспериментальной установке, должны быть обязательно заземлены.

3. Запрещается класть какие-либо посторонние предметы на приборы экспериментальной установки.

4. Запрещается прикасаться к оголённым участкам электрооборудования, предварительно их не обесточив. При обнаружении таковых – обратиться к преподавателю.

5. По окончании работы обесточьте приборы, приведите в порядок рабочее место.

## **6. ЗАДАНИЯ**

1. Определение постоянной Холла полупроводника.

2. Определение концентрации, подвижности носителей заряда и удельного электрического сопротивления полупроводникового образца.

## 7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

### 7.1 Определение постоянной Холла

1. Включить кнопку «Сеть». Должны высветиться индикаторы, указывающие наличие напряжения и тока.

2. Задать величину тока соленоида, по указанию преподавателя, согласно табл. 1.

Таблица 1

Зависимость магнитной индукции  $B$  от тока соленоида  $I_c$

|            |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|
| $I_c$ , мА | 5,7 | 7,1 | 8,5 | 9,9 |
| $B$ , мТл  | 3   | 4   | 5   | 6   |

3. Определить величину магнитной индукции  $B$  по нижней строке табл. 1, согласно заданному значению тока соленоида.

4. Измерить не менее 10 раз ЭДС Холла ( $\Delta\phi_1$ ) при различных значениях управляющего тока  $I_{упр}$ . Данные занести в табл. 2.

5. Провести измерения  $\Delta\phi_2$  с противоположным направлением тока. Данные занести в табл. 2. Легко видеть, что при одном направлении  $I_{упр}$   $\Delta\phi$  равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения вдоль образца, а при противоположном направлении – их разности, поэтому  $\Delta\phi$  необходимо вычислить по формуле

$$\Delta\phi = (\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2) / 2. \quad (7.1)$$

Таблица 2

ЭДС Холла при различных значениях управляющего тока  $I_{упр}$

|                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| № измерения         | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $I_{упр}$ , мА      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| $\Delta\phi_1$ , мВ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| $\Delta\phi_2$ , мВ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| $\Delta\phi$ , мВ   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

6. По результатам измерений из табл. 2 строят график  $\Delta\phi = f(I_{упр})$ .

7. По графику  $\Delta\phi = f(I_{упр})$  определяют угловой коэффициент.

8. Вычислить постоянную Холла, используя формулу

$$R = \frac{\Delta\phi}{\Delta I_{упр}} \cdot \frac{b}{B} = \operatorname{tg} \alpha \frac{b}{B}, \quad (7.2)$$

где  $b$  – ширина образца (табл. 3),  $B$  – значение магнитной индукции поля соленоида (согласно табл. 1),  $\alpha$  – угол наклона графика  $\Delta\varphi = f(I_{\text{упр}})$ .

## 7.2. Определение концентрации, подвижности и удельного сопротивления полупроводникового образца

1. По формуле 
$$n_0 = \frac{A}{q R}, \quad (7.3)$$

где  $A = \frac{3\pi}{8} = 1,17$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, вычислить концентрацию носителей заряда в полупроводнике.

2. По формулам (7.4) и (7.5) рассчитать удельное сопротивление  $\rho$  образца и подвижность носителей  $\mu$ , зная геометрические размеры образца  $b$  и  $d$ , его длину  $l$ , и сопротивление  $r$  из табл. 3.

$$\rho = \frac{r b d}{l}, \quad (7.4)$$

$$\mu = \frac{1}{\rho q n_0}. \quad (7.5)$$

Таблица 3

Геометрические размеры и параметры образца

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| ширина, $b$        | $(0,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м |
| высота, $d$        | $(0,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м |
| длина, $l$         | $(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м |
| сопротивление, $r$ | 139 Ом                          |

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Что называется постоянной Холла, от чего она зависит? Как с помощью постоянной Холла определить знак носителей заряда?
3. Почему у одних металлов наблюдается электронная проводимость, у других – дырочная?
4. Что происходит с заряженной частицей при движении в электрическом и магнитном поле?
5. Что называется подвижностью носителей тока, и от каких факторов она зависит?

6. В каких приборах и устройствах применяется эффект Холла?
7. С какой целью в эксперименте мы меняем направление тока в образце и повторяем измерение?

### **Требования к содержанию и оформлению отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности для выполнения работы.
4. Краткую теорию.
5. Блок-схему установки и основные расчётные формулы.
6. Результаты измерений и вычислений в форме табл. 2, график зависимости  $\Delta\varphi = f(I_{\text{упр}})$ .
7. Формулы и вычисления погрешностей измерений.
8. Выводы по результатам работы (обобщение того, что сделано в работе, сравнение экспериментально измеренных значений постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей тока с табличными значениями, предложения по усовершенствованию лабораторной установки и по проведению работы).

### **Критерии результативности выполнения лабораторной работы**

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- составил отчет, соответствующий предъявляемым к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- подготовил ответы на все контрольные вопросы.

### **Список литературы**

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 3. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2016.
2. *Детлаф А. Н., Яворский Б. М.* Курс физики. – М.: Академия, 2014.
3. *Трофимова Т. И.* Курс физики. – М.: Академия, 2015.
4. *Сивухин Д. В.* Курс общей физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т.3. 4-е изд., стереот. – М.: Физматлит., Изд-во МФТИ, 2005.



Составитель ЛАЗАРЕВ Владимир Валентинович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА  
В ПОЛУПРОВОДНИКЕ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Методические указания к лабораторной работе № 98  
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2016. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman.  
Усл. печ. л. 1,1. Уч-изд.л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ №  
ФГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный  
технический университет»  
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12