

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2-06<sup>а</sup>**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ ОСНОВНЫХ  
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

**Методические указания к выполнению  
лабораторной работы по курсу “Общая физика” по теме  
“Электричество и магнетизм” для студентов всех  
специальностей**

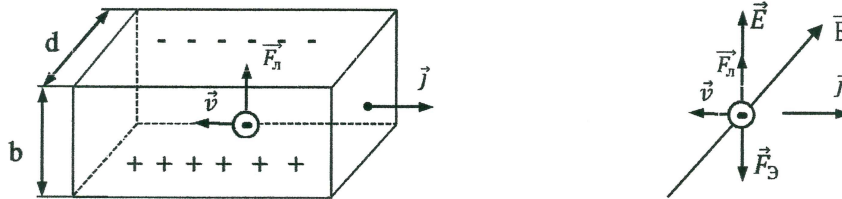
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

**Цель работы:** определить концентрацию и подвижность носителей заряда в полупроводниках на основании измерений эффекта Холла. Измерения проводятся при постоянном токе в постоянном магнитном поле на образцах арсенида галлия.

**Приборы и принадлежности:** образец арсенида галлия, электромагнит, источник постоянного тока, цифровой вольтметр, цифровой миллиамперметр.

### КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Холл обнаружил в 1880 году следующее явление: если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между параллельными току и полю гранями возникает разность потенциалов. Это явление называют эффектом Холла или гальваномагнитным явлением. Холловская разность потенциалов определяется выражением  $\Delta\varphi = R_H b j B$  (1), где  $b$  – ширина пластинки,  $R_H$  – коэффициент пропорциональности,  $j$  – плотность тока,  $B$  – индукция магнитного поля. Эффект Холла просто объясняется электронной теорией.



Проводник с током  $I$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . На каждый электрон, имеющий скорость упорядоченного движения  $\vec{v}$  действует сила Лоренца  $F_L = evB$ . Она всегда перпендикулярна к скорости движения заряда  $\vec{v}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ :  $\vec{F}_L \perp \vec{v} \perp \vec{B}$ . Сила Лоренца не совершает работы над частицей, следовательно, кинетическая энергия не меняется. Сила Лоренца изменяет только направление скорости движения. На верхней поверхности проводника появится избыточное количество электронов, и она зарядится отрицательно. На нижней поверхности – недостаток электронов, и она зарядится положительно. Между верхней и нижней поверхностями образуется разность потенциалов. Возникает поперечное электрическое поле перпендикулярно к  $\vec{v}$  и на электрон действует сила  $F_E = eE$ . Когда напряженность этого поля достигает такой величины, что его действие уравнивает силу Лоренца, установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. В установившемся состоянии должно соблюдаться равенство  $evB = eE$ .

Связь между  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ :

$$E = vB \quad (2)$$

Разность потенциалов, возникающая между гранями равна произведению напряженности поля на расстояние между ними.

$$\Delta\varphi = bE \quad (3)$$

Подставляем (2) в (3) и получаем

$$\Delta\varphi = bvB \quad (4)$$

Плотность тока  $j = nev$ , где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – число электронов в единице объема (концентрация). Выразим среднюю скорость направленного движения электронов  $v$  через концентрацию электронов и плотность тока

$$v = \frac{j}{ne} \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$\Delta\varphi = \frac{bBj}{ne} \quad (6)$$

Сравнивая (1) и (6), видим, что постоянная Холла определяется концентрацией электронов и зарядом электрона:  $R_H = \frac{1}{ne}$ . Исходя из этого, получаем разность потенциалов:

$$\Delta\varphi = R_H b j B \quad (7)$$

Разность потенциала пропорциональна плотности тока и индукции магнитного поля.

Выразим постоянную Холла через силу тока  $I = jS$  и напряженность магнитного поля  $B = \mu_0 H$ .

$$\Delta\varphi = R_H \frac{I\mu_0 H b}{bd} = R_H \frac{I\mu_0 H}{d} \quad (8)$$

Где  $d$  – линейный размер полупроводника в направлении вектора  $\vec{B}$ .

$\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$  (магнитная постоянная)

Из формулы (8) постоянная Холла

$$R_H = \frac{\Delta\varphi d}{I\mu_0 H}$$

Подвижность носителей тока численно равна средней скорости, приобретаемой носителями при напряженности поля, равной единице.

$$\mu = \frac{v}{E}$$

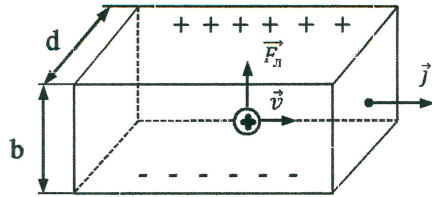
$[\mu] = \text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Проводимость  $\sigma = \frac{j}{E} = \frac{nev}{E} = ne\mu$ . Тогда подвижность носителей определим через проводимость и постоянную Холла

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = \sigma R_H \quad (9)$$

Измерив постоянную Холла  $R_H$  и проводимость можно определить концентрацию и подвижность носителей заряда в соответствующем образце.

Эффект Холла наблюдается не только в металлах, но и в полупроводниках. В полупроводниках постоянная Холла больше, чем у металлов примерно в  $10^5$  раз. Например, для алюминия  $R_H = 0,30 \cdot 10^{-10} \text{м}^3/\text{Кл}$ , а для окиси цинка  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{м}^3/\text{Кл}$ . У некоторых полупроводников эффект Холла имеет противоположный знак. При том же направлении тока и индукции магнитного поля, верхняя грань заряжается положительно



Можно предположить, что проводимость в этих веществах осуществляется за счет движения положительных зарядов. Классическая электронная теория объяснить это явление не может.

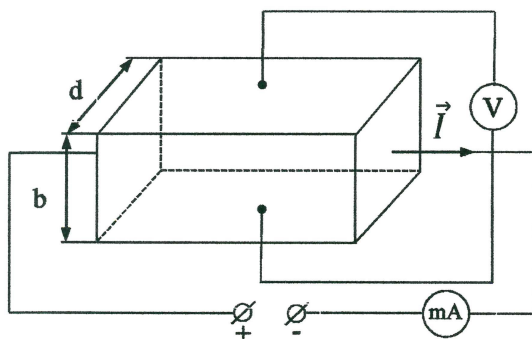
На базе классической электронной теории невозможно объяснить, почему в металлах концентрация электронов проводимости не зависит от температуры, а у полупроводников такая зависимость имеется. Объяснение этих отличий дает квантовая теория проводимости. Измерение постоянной Холла для полупроводника позволяет судить о типе его проводимости: в случае электронной проводимости (n-типа)  $R_H < 0$ , в случае дырочной проводимости (p-типа)  $R_H > 0$ .

Если в проводнике наблюдаются оба типа проводимости, то по знаку постоянной Холла можно определить, какой тип проводимости преобладает.

Эффект Холла широко используется для измерительных цепей. Датчики Холл-эффекта сделаны из небольшой полупроводниковой пластины, или из тонкого слоя полупроводника на слюдяной пластинке: два электрода служат для подвода тока, два-для измерения поперечной разности потенциалов.

В работе используется образец арсенида галлия. Арсенид галлия – полупроводниковое соединение, образованное элементами III и IV групп периодической системы. Арсенид галлия имеет определенную концентрацию и подвижность носителей заряда. Кристаллы арсенида галлия применяются для изготовления фотоэлементов, лазеров, генераторов СВЧ-диапазона.

Схема экспериментальной установки:



V – цифровой вольтметр для измерения разности потенциалов.  
mA – цифровой миллиамперметр для измерения силы тока, проходящего через прямоугольный образец.

Образец (тонкая пластинка) толщиной  $d = 4,5 \cdot 10^{-6}$  м помещается между полюсами электромагнита.

Формула для расчета постоянной Холла с учетом поправок:

$$R_H = \frac{\Delta\varphi d}{k\mu_0 I H} \quad (10)$$

$I$  – сила тока, проходящего через образец арсенида галлия,  
 $\mu_0$ - магнитная постоянная,  
 $H$ - напряженность магнитного поля, создаваемого электромагнитом,  
 $\Delta\varphi' = \Delta\varphi - \Delta\varphi_0$  – разность потенциалов, возникающая между гранями за счет действия магнитного поля электромагнита.  
 $k=100$  – коэффициент усиления.

### Методика и техника эксперимента

- 1) Ознакомиться с приборами лабораторной установки.
- 2) Включить источник питания и установить напряжение на электромагните  $U_{эм} = 0$
- 3) Включить источник для подачи тока на образец Холла. Установить ток  $\approx 7$  мА.
- 4) Определить разность потенциалов  $\Delta\varphi_0$  и записать в таблицу.
- 5) По заданию преподавателя установить  $U_{эм}$  и определить разность потенциалов  $\Delta\varphi$ .
- 6) Повторить пункты 2,3,4,5, пропуская ток  $\approx 8,5$  мА, 10 мА. Для каждого значения тока устанавливать  $U_{эм}$  в пределах от 5 В до 12 В с шагом 2-3 В.

Таблица 1

$U_{эм}, В$	$I_1 = \quad , мА$		$I_2 = \quad , мА$		$I_3 = \quad , мА$	
	$\Delta\varphi_{01}$		$\Delta\varphi_{02}$		$\Delta\varphi_{03}$	
	$\Delta\varphi_1$	$\Delta\varphi'_1$	$\Delta\varphi_2$	$\Delta\varphi'_2$	$\Delta\varphi_3$	$\Delta\varphi'_3$
$U_{эм1} =$						
$U_{эм2} =$						
$U_{эм3} =$						

- 7) Рассчитать  $\Delta\varphi'_1 = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_{01}$ . Аналогично, рассчитать  $\Delta\varphi'_2$  и  $\Delta\varphi'_3$ . Полученные результаты занести в таблицу.
- 8) Значения напряженности магнитного поля  $H$  для заданных напряжений источника питания электромагнита определить по графику зависимости  $H = f(U_{эм})$ . Данные занести в таблицу 2

таблица 2

$U_{эм}, В$	$H, А/м$

- 9) По формуле (10) рассчитать значения постоянной Холла для всех серий измерений и определить среднее значение  $R_{Hcp} = \frac{\sum_i^n R_{Hi}}{n}$

- 10) Зная постоянную Холла, определить концентрацию носителей заряда  $n = \frac{1}{R_{Hcp}e}$ , где  $R_{Hcp}$  - среднее значение,  $e$  – заряд электрона.
- 11) Определить подвижность носителей заряда по формуле  $\mu = \sigma R_H$ , где  $\sigma = 2,35 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ .
- 12) Сравнить полученные значения подвижности носителей заряда с табличными значениями.  
Для арсенида галлия табличные значения:  
а) подвижность электронов равна  $0,92 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$   
б) подвижность дырок равна  $0,04 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
- 13) Рассчитать погрешность определения постоянной Холла.
- 14) Сделать вывод.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ И ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАБОТЫ

- 1) В чем состоит физический смысл эффекта Холла?
- 2) Почему на боковых гранях проводника с током в поперечном магнитном поле появляются электрические заряды?
- 3) Какова природа электрического поля в образце Холла?
- 4) Запишите условие равновесия для электрической и магнитной составляющих силы Лоренца.
- 5) Эффект Холла характерен только для полупроводников, или он наблюдается также для металлов? Ответ обосновать.
- 6) Получите размерность постоянной Холла, сравните ее с размерностью сопротивления, и сделайте вывод.
- 7) Почему знак постоянной Холла совпадает со знаком носителей заряда?
- 8) Как выбирают знак  $R_H$  при наличии нескольких носителей заряда в полупроводниках?
- 9) Изменяется ли кинетическая энергия частицы при ее движении в магнитном поле?
- 10) По какому правилу определяется направление силы Лоренца?
- 11) Как движется заряженная частица в магнитном поле, если направление скорости совпадает с направлением индукции магнитного поля?
- 12) Как связана магнитная индукция с напряженностью магнитного поля?
- 13) Вывести размерности подвижности носителей заряда.
- 14) Является ли зависимость  $R_H$  от  $B$  линейной? Ответ обосновать.
- 15) Является ли зависимость  $\Delta\varphi$  от  $B$  линейной? Ответ обосновать.

Методические указания составлены инженером кафедры общей физики ФТИ Петелиной В.М.

Рецензент:

*Сергей Кариснов В.А.*