

**5040**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

# **ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Методические указания  
к лабораторной работе

Рязань 2016

УДК 621.315.592

Измерение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Т.Г. Авачева, Д.В. Кирюшин. Рязань, 2016. 8 с.

Изложены элементы теории электронной и дырочной проводимости полупроводников, описан эффект Холла. Показан порядок выполнения работы и даны указания по обработке результатов экспериментов. Приведены контрольные вопросы.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

*Эффект Холла, концентрация носителей заряда, подвижность, проводимость, полупроводники*

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой М.В. Дубков)

Измерение концентрации и подвижности носителей заряда в  
полупроводниках

Составители: А в а ч ё в а Татьяна Геннадиевна

К и р ю ш и н Дмитрий Вячеславович

Редактор Р.К. Мангутова.

Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 27.06.16 . Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы:** используя эффект Холла, определить концентрацию и подвижность носителей заряда в полупроводнике.

**Приборы и принадлежности:** электромагнит, исследуемый полупроводниковый образец, источник питания электромагнита и образца УИП-2, миллиамперметр, милливольтметр.

## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Важными величинами, характеризующими свойства полупроводника, являются концентрация носителей заряда и их подвижность. В данной работе эти величины измеряются одним из наиболее распространенных методов, основанным на измерении проводимости полупроводника и постоянной Холла.

Прохождение тока в полупроводниках объясняется зонной теорией твердого тела, по которой проводимость связывается с наличием двух видов носителей заряда: электронов (проводимость  $n$ -типа) и дырок (проводимость  $p$ -типа). Электронная проводимость обусловлена движением валентных электронов, имеющих отрицательный заряд, в зоне проводимости. Дырочная проводимость возникает в результате движения вакансий электронов (дырок) валентной зоны и эквивалентна проводимости положительных по знаку носителей заряда.

Проводимость полупроводника зависит от концентрации  $n$  и подвижности  $\mu$  носителей заряда.

Подвижностью носителей называют отношение средней скорости упорядоченного движения  $\langle v \rangle$  электронов или дырок к величине напряженности  $E$  электрического поля, вызывающего его:

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E}, \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right].$$

Удельная электропроводность полупроводника определяется формулой:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1)$$

где  $n$  и  $p$  — концентрации электронов и дырок,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — их подвижности,  $e$  — величина заряда электрона.

Электропроводность полупроводников в сильной степени зависит от наличия примесей. Примеси могут обуславливать электронную или дырочную электропроводность полупроводника. В случае примесной проводимости концентрация носителей одного типа обычно преобладает над другим, и в формуле (1) можно пренебречь одним из слагаемых.

В данной работе используется полупроводник с примесной проводимостью  $n$ -типа, т.е. концентрация электронов гораздо больше концентрации дырок.

Пусть образец полупроводника выполнен в виде прямоугольной пластины с линейными размерами  $a$ ,  $b$  и  $c$  (рис. 1), тогда в соответствии с законом Ома

$$\frac{U}{I} = R = \frac{b}{\sigma a c},$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность полупроводника.

Поэтому

$$\sigma = \frac{Ib}{Uac},$$

(2)

где  $I$  — сила тока,  $U$  — падение напряжения на полупроводниковом образце с сопротивлением  $R$ .

Концентрацию носителей заряда в полупроводнике с примесной проводимостью можно определить с помощью эффекта Холла, который заключается в возникновении поперечной разности потенциалов в полупроводнике с током под действием магнитного поля. Если исследуемый полупроводниковый образец поместить в магнитное поле индукцией  $\vec{B}$  и пропустить по нему ток силой  $I$ , как показано на рис. 1, то между гранями 3 и 4 появится разность потенциалов, называемая холловской.

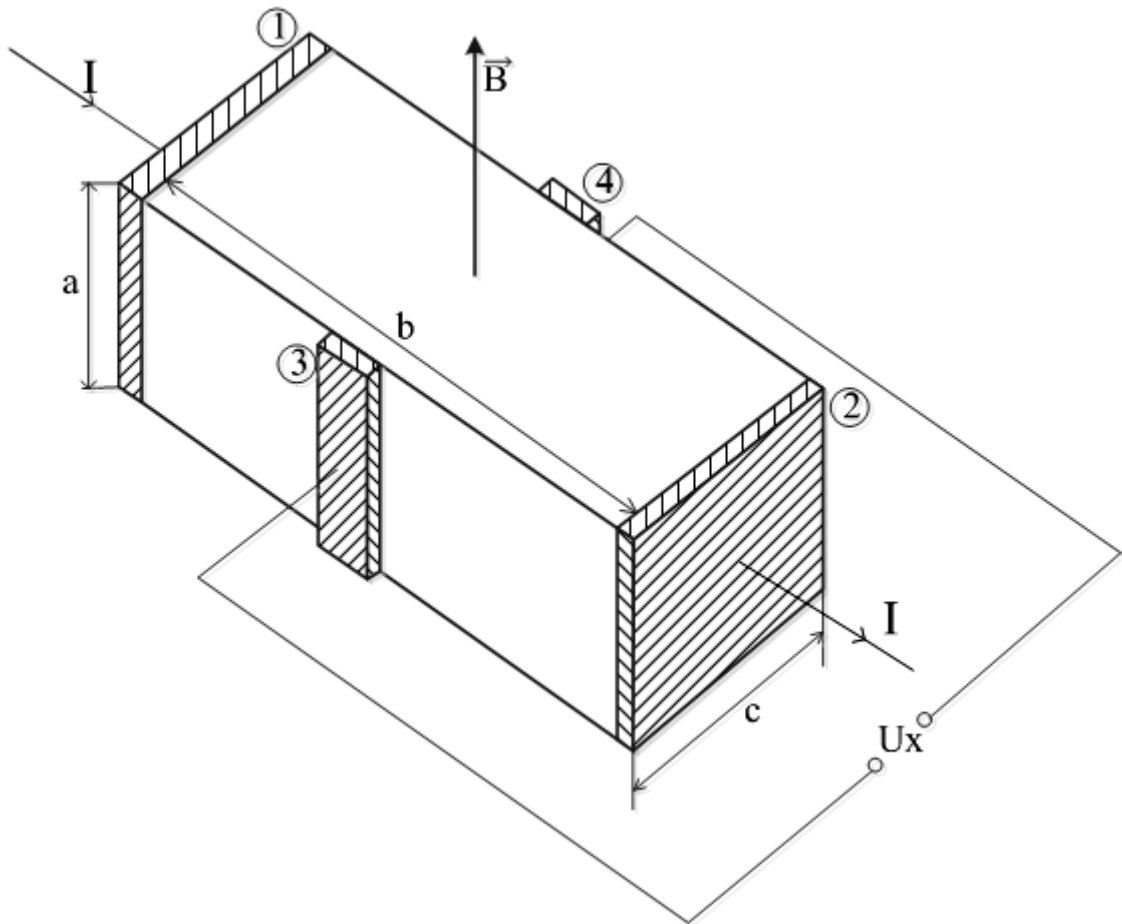


Рис. 1 – Полупроводниковый образец:  
 $a$  – толщина,  $b$  – расстояние между токовыми электродами 1 и 2;  
 $c$  – расстояние между холловскими электродами 3 и 4

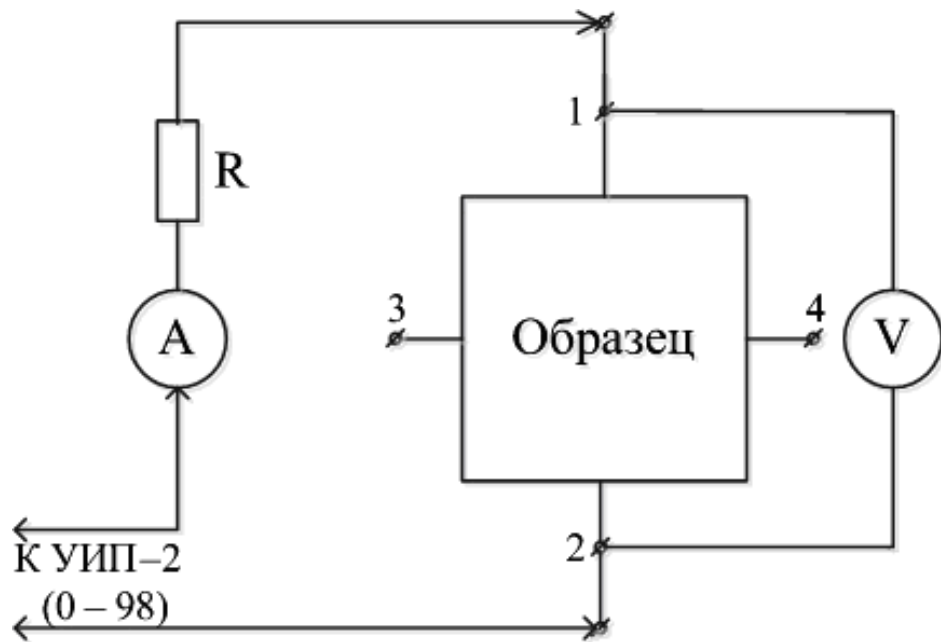


Рис. 2 – Схема измерений

Как известно, на движущиеся в магнитном поле заряды действует сила Лоренца

$$\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}],$$

где  $e$  – величина заряда,  $\vec{v}$  – его скорость,  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля. В нашем случае  $\vec{B} \perp \vec{v}$ , поэтому  $F_z = evB$ . Под действием этой силы  $F_z$  электроны (или дырки) отклоняются в сторону грани 4, на противоположной грани возникает дефицит носителей заряда; из-за разности концентраций заряда возникает поле и, следовательно, появляется разность потенциалов. Обозначим напряженность этого поля через  $E_x$ , тогда холловская разность потенциалов  $U_x$  граней 4 и 3:

$$U_x = E_x \cdot c. \quad (3)$$

В стационарном состоянии действующая на носители заряда сила Лоренца уравновешивается электростатической силой, обусловленной появлением поля  $E_x$ :

$$evB = E_x e \text{ или } vB = E_x \quad (4)$$

Так как плотность тока связана со скоростью упорядоченного движения носителей заряда соотношением:

$$j = env,$$

то сила тока  $I$  в образце с примесной проводимостью:

$$I = j \cdot S = envac. \quad (5)$$

Решив совместно (3) – (5), найдем для холловской разности потенциалов:

$$U_x = \frac{1}{en} \frac{IB}{a} = R_x \frac{IB}{a}. \quad (6)$$

Константа

$$R_x = \frac{1}{en} \quad (7)$$

называется постоянной Холла и зависит от свойств полупроводника.

Измеряя экспериментально  $U_X$ ,  $I$ ,  $V$  и  $a$ , можно с помощью соотношения (6) определить величину  $R_X$ . После этого с помощью (7) можно найти концентрацию носителей заряда  $n$ , а по знаку возникающей между гранями 4 и 3 разности потенциалов установить характер проводимости –электронный или дырочный.

Зная удельную электропроводность полупроводника  $\sigma$ , можно далее найти подвижность носителей заряда. Действительно, плотность тока

$$j = env = en\mu E,$$

где  $E$  — продольная составляющая напряженности электрического поля; таким образом,

$$\sigma = \frac{j}{E} = en\mu, \mu = \frac{1}{en} \sigma, \mu = R_X \sigma. \quad (8)$$

При выводе допускалось, что все носители заряда в полупроводнике обладают одной и той же скоростью  $v$ . Такое допущение может быть оправданно лишь для вырожденных полупроводников с большим содержанием донорной или акцепторной примеси. Именно такой полупроводник и исследуется в данной работе. В полупроводниках со смешанной проводимостью ток обусловлен перемещением одновременно электронов и дырок. Так как они обладают разными по знаку зарядами и под действием внешнего электрического поля перемещаются в противоположные стороны, то сила Лоренца отклоняет их в одну и ту же сторону. Поэтому при прочих равных условиях холловская разность потенциалов у таких полупроводников меньше, чем у полупроводников с одним типом носителей заряда.

Экспериментальная установка состоит из электромагнита и схемы измерений (рис. 2). Электромагнит служит для создания магнитного поля. Исследуемый образец изготовлен из полупроводникового материала в виде прямоугольной пластины и помещен в пластиковый футляр. К полупроводниковой пластине припаяны две пары электродов,

клеммы которых выведены на держатель, с помощью которого образец устанавливается между полюсами электромагнита. Для создания и изменения электрического тока в полупроводнике и питания катушек электромагнита используются два выхода источника питания УИП-2. Катушки электромагнита питаются от выхода  $0 \div 300$  В,  $0 \div 250$  мА. Для изменения направления магнитного поля изменяют направление тока в катушках электромагнита. Величина индукции магнитного поля между полюсами электромагнита определяется по силе тока в электромагните из градуировочного графика, приложенного к установке. Ток электромагнита измеряется миллиамперметром, расположенным в источнике питания УИП-2.

Для создания тока через образец, контролируемого миллиамперметром, к сдвоенным клеммам 1-2 (рис. 2) через ограничительное сопротивление  $R$  подводится напряжение от регулируемого выхода  $0 \div 9$  В источника УИП-2. Ограничительное сопротивление  $R=100$  Ом установлено с целью предохранения образца от больших токов.

Падение напряжения  $U$  и холловская разность потенциалов  $U_x$  на образце из полупроводника измеряются милливольтметром.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определите удельную электропроводность полупроводника. Для этого соберите схему, изображенную на рис. 2. Установите силу тока через образец  $I=40$  мА и измерьте падение напряжения на образце при помощи милливольтметра. Вычислите по формуле (2) удельную электропроводность (линейные размеры полупроводникового образца указаны на держателе). Повторите измерения и вычисления для токов 60 и 80 мА.



2. Определите постоянную Холла полупроводника. Для этого установите силу тока в цепи электромагнита  $100 \div 150$  мА, переключите милливольтметр к клеммам 3, 4 образца (рис. 2) и измерьте холловское падение напряжения  $U_X$  для нескольких (8 – 10) значений силы тока через образец  $I$  при неизменном значении индукции магнитного поля  $B$ . Указанные измерения повторить для 4 – 6 значений индукции  $B$ . По данным измерений постройте график зависимости  $U_X = f(I)$  для разных значений  $B$  и определите  $R_X$  по углу наклона полученных прямых к оси тока, используя соотношение (6).

3. По формулам (7) и (8) определите концентрацию  $n$  и подвижность  $\mu$  носителей заряда в полупроводнике, используя среднее значение удельной электропроводности  $\langle \sigma \rangle$ . Результаты измерений занесите в таблицы 1 и 2.

Таблицы экспериментальных данных

Таблица 1

$a =$                        $b =$                        $c =$

№ п/п	$I$ , мА	$U$	$\sigma$
1	40		
2	60		
3	80		

$\langle \sigma \rangle =$

Таблица 2

$B$	№ п/п	1	2	3	...	10	$R_X$	$n$	$\mu$
	$I$								
	$U_X$								
	$I$								
	$U_X$								
	...								

## ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется силой Лоренца? Как определить величину и направление этой силы?
2. Какими основными параметрами характеризуется полупроводник?
3. Как возникает электрическое поле Холла? От чего зависит его величина?
4. Получите выражение для холловской разности потенциалов.
5. Покажите траектории движения электрона и дырки в полупроводнике при воздействии на полупроводник ортогонально направленных электрического и магнитного полей.
6. Почему в металлах эффект Холла проявляется гораздо слабее, чем в полупроводниках?
7. У каких веществ – полупроводников или металлов постоянная Холла сильнее зависит от температуры? Почему?
8. Почему в собственных полупроводниках эффект Холла проявляется слабее, чем в примесных?
9. Объясните метод определения концентрации и подвижности носителей заряда, используемый в данной работе. При каких условиях он применяется?
10. Получите выражение для постоянной Холла для полупроводников с двумя типами носителей заряда.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1982. С. 226-228.
2. Елифанов Г.И. Физика твердого тела. М.: ВШ, 1977. С. 269-272.
3. Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С. Краткий справочник по физике. М.: ВШ, 1964. С. 206, 493-497.