

## Работа № 41

# Изучение эффекта Холла, определение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводнике

### Цель работы

На основании измерений постоянной Холла и электропроводности определить концентрацию и подвижность носителей заряда в полупроводнике. Сравнить полученные результаты с табличными.

### Эффект Холла

Эффект Холла состоит в следующем. Пусть по полупроводнику, имеющему форму прямоугольной пластины, протекает электрический ток (рис. 1). Контакты: 1,2 - токовые, 3,4 - холловские, находящиеся на одной эквипотенциальной поверхности; 3,5 либо 4,5 служат для измерения электропроводности.

Если образец поместить в однородное магнитное поле  $\vec{B}$ , перпендикулярное направлению тока, то между контактами 3 и 4 возникнет разность потенциалов. Это явление называется эффектом Холла, а поперечная разность потенциалов  $\mathcal{E}_x$  - ЭДС Холла.

Опыт показывает, что ЭДС Холла пропорциональна индукции магнитного поля  $B$ , величине тока  $I$ , протекающего через пластину, и обратно пропорциональна ее толщине  $d$ :

$$\mathcal{E}_x = RIB/d . \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $R$  называется постоянной Холла.

Рассмотрим механизм появления ЭДС Холла в примесном электронном полупроводнике. Допустим, что все свободные электроны движутся с одинаковой дрейфовой скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле  $\vec{B}$ .

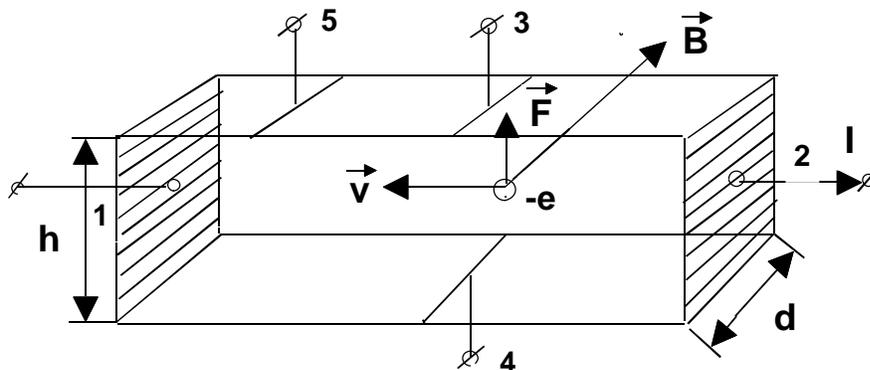


Рисунок 1

На электроны действует магнитная сила

$$\vec{F}_M = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Под действием этой силы электроны смещаются к верхней грани пластины (рис.1) так, что между верхней и нижней гранями возникает поперечное холловское электрическое поле  $E_x$ . Отклонение электронов будет продолжаться до тех пор, пока электрическое поле  $E_x$  не уравнивает отклоняющее действие магнитного поля. При этом электрическая сила станет равной магнитной силе:

$$eE_x = evB. \quad (3)$$

Умножим равенство (3) на число электронов  $n$  в единице объема (т.е. на концентрацию электронов):

$$neE_x = nevB. \quad (4)$$

Известно, что  $nev$  есть плотность тока  $j$ , равная отношению тока  $I$  к сечению образца  $S = hd$ . Поэтому

$$E_x = \frac{1}{ne} \frac{IB}{hd}. \quad (5)$$

Заменим напряженность холловского электрического поля из соотношения

$$E_x = \mathcal{E}_x / h . \quad (6)$$

Получаем выражение для ЭДС Холла

$$\mathcal{E}_x = \frac{1}{ne} \frac{IB}{d} . \quad (7)$$

При выводе выражения (7) не был учтен статистический характер распределения носителей заряда по скоростям, в результате чего ход рассуждений неправилен по крайней мере по двум причинам:

1) равенство (3) не может выполняться одновременно для всех электронов, имеющих различные по величине и направлению скорости;

2) в действительности стационарное состояние наступает, когда перестает накапливаться заряд на боковых гранях, т.е. когда ток, создаваемый холловским полем  $E_x$ , компенсирует ток, создаваемый магнитным полем  $B$ .

Если учесть статистический характер распределения электронов по скоростям (распределение Максвелла-Больцмана), то в правую часть выражения (7) войдет множитель  $A$ , зависящий от механизма рассеяния носителей заряда в полупроводниках:

$$\mathcal{E}_x = \frac{A}{ne} \frac{IB}{d} . \quad (8)$$

Сравнивая выражения (1) и (8), найдем, что постоянная Холла равна

$$R = \frac{A}{ne} . \quad (9)$$

При комнатной и более высокой температуре в невырожденных (слабо легированных) полупроводниках длина свободного пробега носителя заряда (электрона либо дырки) не зависит от энергии. В этом случае преобладает рассеяние носителей заряда на колебаниях решетки (на акустических фононах) и имеет место

$$A = 3\pi/8 \approx 1.18 . \quad (10)$$

При низких температурах происходит рассеяние носителей заряда на ионах примеси и  $A \approx 1.93$ .

В вырожденных (сильно легированных) полупроводниках, так же как и в металлах, в электропроводности принимают участие только электроны или дырки, находящиеся на самых высоких энергетических уровнях вблизи уровня Ферми  $E_F$ . В этом случае  $E_F \gg kT$  и можно считать, что все носители заряда обладают одной и той же скоростью  $v_F$ , называемой фермиевской и определяемой соотношением

$$E_F = m^* v_F^2 / 2, \quad (11)$$

где  $m^*$  - эффективная масса носителя заряда. В металлах и вырожденных полупроводниках множитель  $A = 1$ .

Знак ЭДС Холла  $e_x$  зависит от знака свободных носителей заряда. Для электронного полупроводника  $R < 0$ , а для дырочного  $R > 0$ . Таким образом, по знаку постоянной Холла можно определить знак носителя заряда.

Зная постоянную Холла  $R$ , можно вычислить концентрацию свободных носителей заряда  $n$  по формуле

$$n = \frac{A}{Re}. \quad (12)$$

Для невырожденного полупроводника при комнатных и более высоких температурах

$$n \approx \frac{1.18}{Re}. \quad (13)$$

Зная для одного и того же образца постоянную Холла  $R$  и электропроводность  $\sigma$ , можно найти подвижность носителей заряда  $\mu$ . Из закона Ома плотность тока

$$j = \sigma E_l, \quad (14)$$

где  $E_l$  - напряженность продольного электрического поля. С другой стороны,

$$j = nev . \quad (15)$$

Из (12), (14) и (15) следует, что подвижность носителей заряда

$$\mu = \frac{v}{E_l} = \frac{\sigma}{ne} = \frac{R\sigma}{A} . \quad (16)$$

Для невырожденного полупроводника при комнатных и высоких температурах подвижность носителей заряда

$$\mu \approx \frac{R\sigma}{1.18} . \quad (17)$$

### Описание экспериментальной установки

Для определения ЭДС Холла  $\mathcal{E}_x$  и электропроводности  $\sigma$  в работе используется принципиальная схема, показанная на рис. 2.

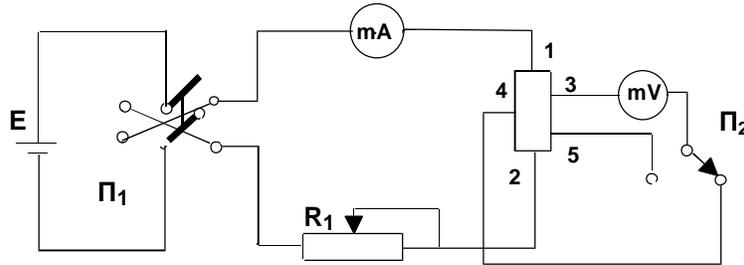


Рисунок 2

Разность потенциалов  $V_{34}$  измеряется при правом положении переключателя  $P_2$  и состоит из ЭДС Холла  $\mathcal{E}_x$  и дополнительной разности потенциалов  $V_0$ . Дополнительная разность потенциалов обусловлена тем, что контактные зонды 3 и 4 при отсутствии магнитного поля обычно не находятся на одной и той же эквипотенциальной поверхности. Поэтому  $V_{34} = V_0 + \mathcal{E}_x$ . Для исключения влияния  $V_0$  на ЭДС Холла измерения необходимо

проводить два раза при противоположных направлениях магнитного поля  $\vec{B}$ . При этом надо различать два случая: первый, когда  $|V_0| > |\mathcal{E}_x|$ , и второй, когда  $|V_0| < |\mathcal{E}_x|$ . Измеренные соответственно для двух противоположных направлений магнитного поля напряжения можно записать как

$$V_{34}^+ = V_0 + \mathcal{E}_x, \quad V_{34}^- = V_0 - \mathcal{E}_x,$$

откуда

$$\mathcal{E}_x = \frac{|V_{34}^+| - |V_{34}^-|}{2} \quad \text{при} \quad |V_0| > |\mathcal{E}_x|, \quad (18)$$

$$\mathcal{E}_x = \frac{|V_{34}^+| + |V_{34}^-|}{2} \quad \text{при} \quad |V_0| < |\mathcal{E}_x|. \quad (19)$$

Однородное магнитное поле создается соленоидом, подключенным к источнику постоянного тока. Принципиальная электрическая схема для создания магнитного поля показана на рис.3.

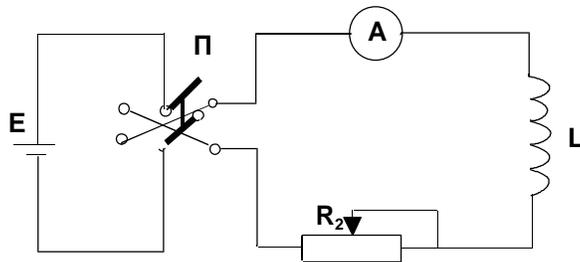


Рисунок 3

Величина индукции магнитного поля  $B$  пропорциональна току, проходящему через соленоид. Шкала амперметра проградуирована в единицах индукции магнитного поля, т.е. амперметр является магнитометром.

Постоянная Холла, как следует из выражения (1), определяется по формуле

$$R = \frac{e_x d}{IB} . \quad (20)$$

Значение толщины образца  $d$  указано в паспорте установки.

Для определения электропроводности переключатель  $\Pi_2$  (см. рис. 2) переводится в левое положение. При этом вольтметр измеряет разность потенциалов  $V_{35}$  между точками 3 и 5. Электропроводность определяется по формуле

$$s = \frac{I l}{V_{35} S} . \quad (21)$$

Значения расстояния  $l$  между контактами 3 и 5 и сечения образца  $S$  указаны в паспорте установки.

Для исключения влияния продольной термоЭДС измерения необходимо проводить при двух противоположных направлениях тока и  $V_{35}$  находить как среднее из двух измерений

$$V_{35} = \frac{|V_{35}^+| + |V_{35}^-|}{2} . \quad (22)$$

#### Задание к работе

1. Исследовать зависимость ЭДС Холла  $e_x$  от величины тока  $I$  через образец и от индукции магнитного поля  $B$ . Значения  $I$  и  $B$  устанавливать с помощью реостатов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 2 и 3). Каждый раз опыт проводить при двух противоположных направлениях магнитного поля.
2. Построить график зависимости ЭДС Холла от произведения  $BI$ .
3. Определить графически постоянную Холла  $R$ .
4. Определить электропроводность  $\sigma$  полупроводника. Опыт повторить 3 раза. Каждый из опытов не забывайте проводить при двух противоположных направлениях тока через образец. Вычислить электропроводность как среднее из трех измеренных значений  $\sigma$ .
5. Вычислить концентрацию носителей заряда  $n$ .
6. Вычислить подвижность носителей заряда  $\mu$ .
7. Вычислить среднеквадратичное отклонение полученных значений концентрации и подвижности.
8. Сравнить полученные результаты с табличными.

## Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Получите рабочую формулу для определения постоянной Холла  $R$ .
3. Получите рабочую формулу для определения электропроводности  $s$  образца.
4. Получите формулу для вычисления концентрации носителей заряда в слабо легированном (невырожденном) полупроводнике.
5. Получите формулу для определения подвижности носителей заряда в исследуемом образце.
6. Как, изучая эффект Холла, можно определить знак носителей заряда?
7. Как вы будете определять ЭДС Холла  $e_x$ ?
8. Как вы будете определять в работе электропроводность  $\sigma$ ?

## Литература

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 1965. - Гл. IV, § 2, гл. V, §§ 2,3, гл. VI, § 5, гл. VII, §§ 1-7, 10 (и другие годы издания).
2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982. - Т.2, §§ 34, 79.