

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Кинетические эффекты, имеющие место при одновременном воздействии на носители заряда электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей, называются гальваномагнитными эффектами.

Явление возникновения поперечного электрического поля и разности потенциалов в полупроводнике, по которому протекает ток, помещённом в магнитное поле, перпендикулярное току, называется эффектом Холла (рис.1). Этот эффект открыт в 1879 г. Дрейфовая скорость электронов в плоскости (X, Y) под действием электрического поля  $E_x$  равна

$$\vec{V}_x = -j/en, \quad (1)$$

Где  $e$  – абсолютная величина заряда электронов,

$j$  – плотность тока,

$n$  – концентрация электронов.

Заряд, движущийся в магнитном поле вдоль оси X со скоростью  $V_x$ , отклоняется от направления движения под действием силы Лоренца  $F_L$ . Для положительного заряда силы Лоренца определяется выражением

$$F_L - e[\vec{V} \vec{B}] = eV_x B \sin(\vec{V}_x \wedge \vec{B}). \quad (2)$$

Направление силы Лоренца определяется правилом левой руки или векторным произведением  $[\vec{V} \vec{B}]$ . При этом в выражении (2) необходимо

учитывать как знак заряда “ $e$ ”, так и направление вектора скорости  $\vec{V}$  вдоль оси “X”. В соответствии с этим сила Лоренца отклоняется и положительные, и отрицательные заряды к одной и той же боковой грани в направлении, перпендикулярном оси “X”. Для электронного полупроводника грань, на которую направлена сила Лоренца, приобретает отрицательный потенциал, а для дырочного полупроводника – положительный.

В направлении, перпендикулярном движению носителей, возникает разность потенциалов, обуславливающая появление электрического поля. Это поле ортогонально по направлению к начальному электрическому полю и носит название поля Лоренца. Отклонение носителей заряда будет происходить до тех пор, пока сила  $eE_y$  со стороны поля Лоренца не скомпенсирует силу Лоренца  $F_L$ . На рис. 1. показаны силы Лоренца и поля Лоренца для электронов и дырок, движущихся в скрещенных электрическом и магнитном полях.

$$eE_y = eV_x B = -Bj/n \quad (3)$$

для электронов при  $\vec{V} \perp \vec{B}$ .

Так как  $V_x = \mu_e E_x$ , где  $\mu_e$  – подвижность электронов, составляющая электрического поля  $E_x$ , параллельная току, определится из равенства

$$j = e\mu_e n E_x. \quad (4)$$

Наблюдение эффекта Холла сводится к измерению поперечной эдс, возникающей между узкими боковыми сторонами образца с током под действием магнитного поля, перпендикулярного току. Эффект Холла описывается с помощью коэффициента Холла  $R_H$ , определяемого из равенства:

$$E_y = E_H = V_x B = -V_x j / en = R_H B j, \quad (5)$$

Где  $E_H$  – напряжённость холловского поля.

Из (5) видно, что для вещества с электронной проводимостью (металла или полупроводника)

$$R_H = - 1/en. \quad (6)$$

В слабых магнитных полях  $R_H$  не зависит от магнитной индукции и характеризует только свойства вещества.

Так как

$$I = jbd, \text{ а } E_H = V_H / b, \quad (7)$$

То

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{B \cdot I}, \quad (8)$$

Где  $I$  – ток,  $b$  – ширина образца,  $d$  – толщина образца вдоль линии магнитного поля,  $V_H$  – ЭДС Холла.

В общем, виде в выражение (6) необходимо поставить множитель ( $r$ ), учитывающий механизм рассеяния и зависящий от степени вырождения электронов в зоне проводимости, т.е.

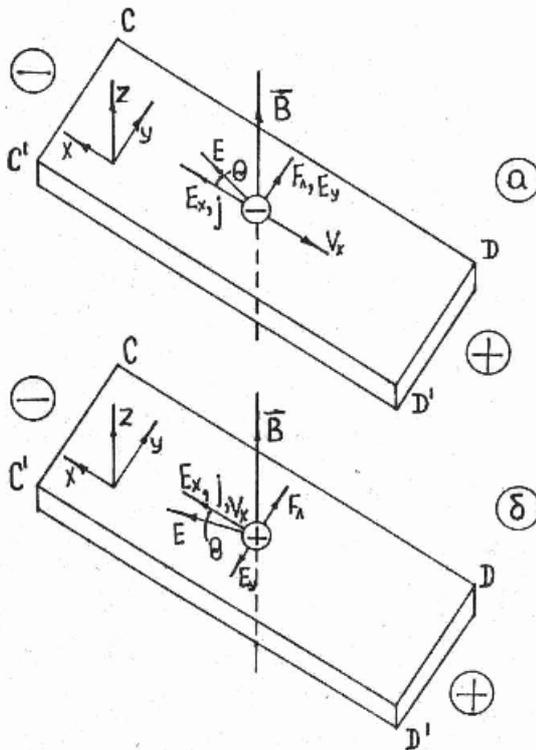


Рис.1. Эффект Холла в слабом поле: а) электроны, б) дырки.

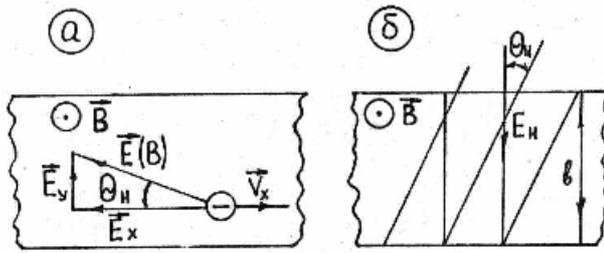


Рис.2: а) угол Холла, б) изменение эквипотенциалей на угол Холла под влиянием магнитного поля.

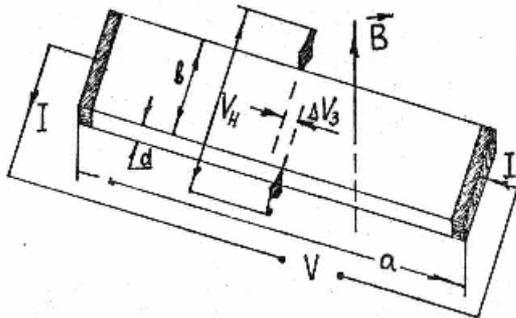


Рис.3.

для электронов  $R_H = -r/ en$  (9)  
 для дырок,  $R_H = r/ ep$   
 где  $I \leq r < 2$ .

Как видно из (9), знак коэффициента Холла совпадает со знаком основных носителей заряда в полупроводниках. Поэтому измерение постоянной Холла позволяет судить о характере электропроводности данного материала (электронная или дырочная проводимость). В собственном полупроводнике ( $n = p$ ) коэффициент Холла чаще всего отрицателен из-за большей подвижности электронов. Эффект Холла хорошо проявляется у полупроводников с большой концентрацией носителей.

Коэффициент Холла имеет размерность  $L^3 Q^{-1}$ , где  $Q$  – электрический заряд. В формуле (8) необходимо “I” и “V” задавать в амперах и вольтах, “B” в теслах, а “d” в метрах. Однако концентрацию носителей заряда удобно выражать в  $см^{-3}$ .

Тогда размерность  $R_H$  будет  $см^3 Кл^{-1}$ .

Удельная электропроводность, обусловленная электронами или дырками, выражается формулами

$$\begin{aligned} \delta_n &= en \mu_e, & (10) \\ \delta_p &= ep \mu_p, \end{aligned}$$

где  $p$  и  $\mu_p$  - концентрация и подвижность дырок, соответственно. В общем виде можно записать

$$R_H \delta/r = \mu \quad (11)$$

или

$$R_H \delta = \mu_H \quad (12)$$

где  $\mu_H = r\mu$ ,  $\mu_H$  имеет размерность подвижности и называется холловской подвижностью.

Из рис. 1 видно, что магнитное поле заставляет электроны и дырки дрейфовать в одну и ту же сторону относительно направления тока, а именно: в правую сторону по ходу тока, в то время как в электрическом поле их дрейф направлен в противоположные стороны. То обстоятельство, что заряды разного знака дрейфуют под действием силы Лоренца в одном направлении, позволяет определять тип носителя заряда (электрон или дырка) по знаку потенциала грани, к которой отклоняются заряды.

Вследствие появления в полупроводнике дополнительного электрического поля  $E_y$  направление результирующего электрического поля  $\vec{E}$  теперь не совпадает с направлением тока  $j$ , а повернуто относительно  $j$  на некоторый угол  $\Theta_H$ , который получил название угла Холла. Угол  $\Theta_H$  между током и результирующим электрическим полем  $\vec{E}$  (рис.2) можно найти как

$$\operatorname{tg}\Theta = E_y/E_x = B \mu_e. \quad (13)$$

Угол Холла (13) учитывает направление результирующего электрического поля. Если угол  $\Theta$  мал, то  $\mu_e B \ll I$ , что является условием слабого поля. Величина влияния магнитного поля оценивается из сравнения поля Холла с тянущим полем.

Так как

$$\mu_e = e\tau/m, \quad (14)$$

где  $\tau$  – время свободного пробега электрона, а  $m$  – эффективная масса электрона, то из (13) получаем

$$\operatorname{tg}\theta_H = -e\tau/m \cdot B = \omega_e \tau = \omega_e / \omega_\tau, \quad (15)$$

где  $\omega_e = B_e/m$  – частота циклотронного резонанса, которая характеризует частоту вращения электрона по круговой орбите;

$\omega_e = 1/\tau$  – частота столкновений.

Макроскопически угол Холла описывает искривление силовых линий электрического поля (или эквипотенциальных поверхностей) под действием магнитного поля (рис.2), а микроскопический ( $\omega_e \tau$ ) в радианах ( $\operatorname{tg}\Theta = -\omega_e \tau$ ) – часть орбиты Ландау, которую в среднем проходит электрон между двумя столкновениями. Знак угла Холла, как и постоянной Холла, определяется знаком носителей заряда и позволяет, таким образом, различать электронную и дырочную проводимости.

Для веществ с малой подвижностью в слабых магнитных полях угол Холла мал и наблюдение малых отклонений эквипотенциалей затруднено, то есть проявление эффекта Холла, связанное с возникновением холловской разности потенциалов, мало.

Эффект Холла чрезвычайно широко используется в технике полупроводников в качестве одного из основных методов исследования параметров материала. Измерив на опыте величины  $V_H$ ,  $I$ ,  $B$ ,  $d$ , входящие в

формулу (8), можно найти коэффициент Холла, а зная  $R_H$ , рассчитать, исходя из формулы (9), концентрацию носителей заряда в полупроводнике в области примесной проводимости. Измеряя, кроме того, удельную проводимость  $\delta$ , можно согласно (11) определить подвижность носителей заряда.

Помимо исследования электрических свойств материалов эффект Холла служит основой для устройства многих полупроводниковых приборов, например, датчиков Холла, которые используются при измерении индукции постоянных и переменных магнитных полей, преобразовании постоянного тока в переменный, измерении мощности электромагнитных полей на сверхвысоких частотах и в других областях техники.

### Порядок выполнения работы

Работа проводится на установке, собранной по схеме, представленной на рисунке 4. Ток в соленоиде обеспечивается источником питания (ИП – 1). Ток через образец задаётся источником питания (ИП – 2), на выходе которого собран дополнительный делитель напряжения, обеспечивающий плавную регулировку тока. Величина и знак эдс Холла определяются с помощью микровольтметра (МВ).

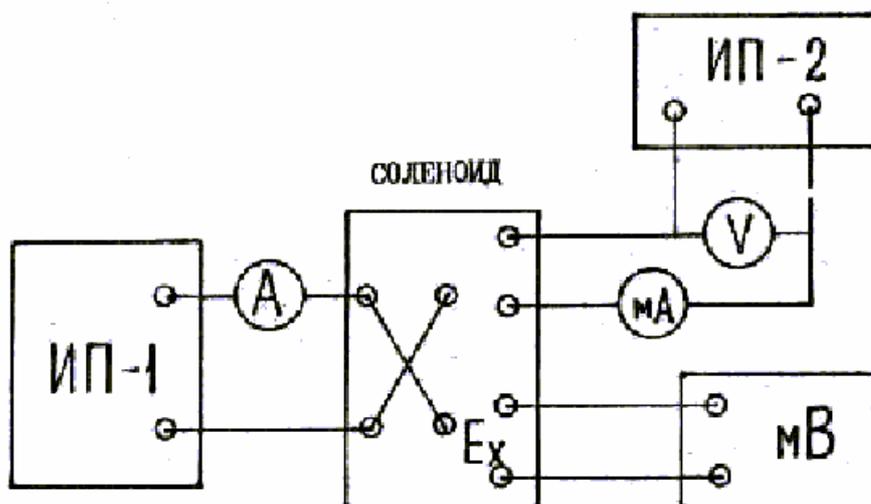
Следует иметь в виду, что эдс  $V_{изм.}$ , измеряемая на поперечных электродах, представляет сумму эдс Холла  $V_H$  и эдс, связанной с неоднородностью образца и асимметрией зондов  $\Delta V_3$  (рис.3), последняя обеспечивает некоторое значение эдс даже в отсутствие магнитного поля.

Поэтому суммарная измеряемая величина эдс равна

$$V_{изм.}^I = V_H + \Delta V_3. \quad (16)$$

При изменении направления магнитного поля (то есть при изменении направления тока, текущего через соленоид) изменяется знак эдс Холла, тогда измеряемая эдс будет равна

$$V_{изм.}^{II} = -V_H + \Delta V_3. \quad (17)$$



Исключая из (16) и (17) величину  $\Delta V_3$ , получим уравнение для расчёта эдс Холла.

$$V_H = 1/2 (V_{изм}^I - V_{изм}^{II}). \quad (18)$$

Следует иметь в виду, что если  $\Delta V_3 > |V_H|$ , то одно из значений  $V_{изм}^I$  или  $V_{изм}^{II}$  будет отрицательным.

### ЗАДАНИЕ

Получить зависимость эдс Холла от тока через образец при двух значениях магнитного поля. Рассчитать коэффициент Холла, концентрацию носителей, холловскую подвижность, угол Холла, время свободного пробега носителей заряда, приняв  $m = m_0$  – масса свободного электрона. Определить тип носителя заряда для данного материала.

### ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЯ

- I. Установить ток через соленоид 1 А произвести измерения эдс Холла для токов через образец от 1 мА до 0,6 мА с шагом 0,1 мА. Для каждого значения тока измерения проводить при двух направлениях магнитного поля два раза.
- II. Прodelать то же самое при токе через соленоид 0,5 А.
- III. По значениям тока через образец и соответствующим им значениям падения напряжения на образце определить удельную проводимость  $\delta$  образца с учётом его геометрии (рис.3):

$$\delta = j/E_x = I/bd \cdot a/V, \quad (19)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $d$  – геометрические размеры образца.

### РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

- I. Построить зависимость  $V_H = f(I)$ ;  $H_{1,2} = \text{Const}$ , используется метод наименьших квадратов.
- II. Определить средние значения коэффициента Холла и концентрации носителей, используя зависимость  $V_H = f(I)$  и формулы (8) и (9).
- III. Построить векторный график  $F_L = e[VB]$  для конкретного включения и определить знак коэффициента Холла и тип носителей заряда по знаку потенциала грани, к которой отклоняются заряды.
- IV. Рассчитать холловскую подвижность  $\mu_H$  (12), угол Холла (13) при  $r = I$ , время свободного пробега носителей (14), частоту циклотронного резонанса (15), напряжённость поля вдоль оси  $y$   $E_y = V_H/b$  и силу Лоренца, действующую на заряд  $F_L = E_y \cdot e$ .

### ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

- I. Питание приборов производится от сети с напряжением 220В.
- II. Подключение приборов установки производится только с разрешения преподавателя или инженера.
- III. Все переключения в собранной цепи производятся при отключенном источнике питания.
- IV. Запрещается прикасаться к незащищённым участкам цепи, находящимся под напряжением.
- V. Запрещается оставлять включённую установку без присмотра.
- VI. Не оставляйте соленоид под напряжением на длительное время, т.е. ток через соленоид пропускать только в момент снятия показаний.

VII. После окончания измерений установку отключить от сети с помощью тумблеров лицевой панели приборов.

Литература

- I. Практикум по полупроводниковым приборам и полупроводникам/  
Под ред. К.В. Шалимовой, 1968, 463 с.
- II. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1975,  
583 с.
- III. Горбачёв В.В., Спицина И.Г. Физика полупроводников и металлов.  
М.: Металлургия, 1982, 334 с.
- IV. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат,  
1985, 390 с.
- V. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых  
материалов. М.: Высшая школа, 1987, 238 с.