

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

Определение концентрации основных носителей заряда в полупроводниках методом эффекта Холла.

Цель работы: определение постоянной Холла и концентрации основных носителей заряда в полупроводниках на основании измерений эффекта Холла.

Приборы и оборудование: вольтметр, пульт управления, миллиамперметр, электромагнит, источник питания УИП – 1.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

Гальваномагнитные явления – явления, происходящие в полупроводниках с током в присутствии внешнего магнитного поля. К гальваномагнитным явлениям относятся: эффекты Холла, Эттинсгаузена и Нернста.

Эффект Эттинсгаузена. В невырожденных полупроводниках электроны обладают самыми различными скоростями теплового движения. В этих условиях равенство $qvB = qE_x$ (условие равновесия силы Лоренца и силы Кулона) может выполняться не для всех электронов, а только для части из них, движущихся с некоторой средней скоростью v_0 . Для электронов же, движущихся со скоростью $v > v_0$, $qvB > qE_x$, вследствие чего они отклоняются к правой грани пластины (рис. 1а).

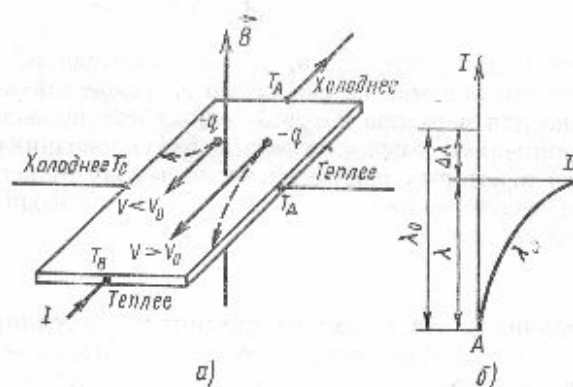


Рис. 1

Для электронов, имеющих $v < v_0$, $qvB < qE_x$, отклонение происходит к левой грани пластины.

Быстрые электроны, падая на правую грань пластины отдают ей свою избыточную энергию и нагревают ее. Медленные электроны, скапливающиеся на левой грани, пополняют свою энергию за счет тепловой энергии кристалла и охлаждают эту грань. Возникает поперечная разность температур $T = T_D - T_C$. Явление возникновения такой разности температур называют *эффектом Эттинсгаузена*.

Эффект Нернста. Электроны, попав в однородное магнитное поле B , перпендикулярное скорости движения v , начинают перемещаться по круговой траектории с радиусом кривизны

$$r = \frac{m_n v}{qB} \quad (1)$$

Из (1) видно, что быстрые электроны «закручиваются» в магнитном поле слабее, чем медленные (рис. 1а). Поэтому передняя грань пластины будет обогащаться быстрыми электронами и нагреваться, задняя грань обогащается медленными электронами и охлаждается. Возникает продольная разность температур ($T_B - T_A$). Появление такой разности температур и составляет содержание *эффекта Нернста*.

Изменение электропроводности проводника в магнитном поле (магнетосопротивление). Искривление траектории электронов, движущихся в магнитном поле со скоростью, отличной от v_0 (рис. 1а), приводит к уменьшению их эффективной длины свободного пробега λ в направлении электрического тока (рис. 1б). Если при отсутствии поля длина свободного пробега в направлении тока была равна λ_0 , то в магнитном поле она равна проекции дуги AD на направление тока I , т.е. $\lambda = \lambda_0 - \Delta\lambda$.

Так как подвижность носителей тока μ пропорциональна длине свободного пробега, то уменьшение под действием магнитного поля эффективной длины свободного пробега на $\Delta\lambda$ должно вызывать уменьшение подвижности носителей тока на $\Delta\mu$ и электропроводности полупроводников на $\Delta\sigma$, при этом

$$\Delta\sigma/\sigma = \Delta\mu/\mu = \Delta\lambda/\lambda_0.$$

Для примесных полупроводников с одним типом носителей тока теория приводит к следующему выражению для относительного увеличения удельного сопротивления $\Delta\rho/\rho$:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c\mu^2 B^2, \quad (2)$$

где B – индукция поля, c – коэффициент, зависящий от механизма рассеяния носителей тока.

Отношение $\Delta\rho/\rho$ называют *магнетосопротивлением*. Из (2) видно, что измерение магнетосопротивления позволяет прямым путем определить подвижность носителей тока в полупроводнике.

Из гальваномагнитных явлений наиболее широкое практическое применение получил эффект Холла. Помимо исследования электрических свойств материалов он послужил основой для устройства большого класса приборов: магнитометров, преобразователей постоянного тока в переменный и переменного в постоянный, усилителей постоянного и переменного тока, генераторов сигналов переменного тока, фазометров, микрофонов и т.д.

Эффект Холла. Предположим, что по пластинке проводника, имеющего ширину a и толщину b , течет ток плотностью i (рис. 2). Выберем на боковых сторонах пластины точки C и D , разность потенциалов между которыми равна нулю. Если эту пластину поместить в магнитное поле с индукцией B , то между точками C и D возникает разность потенциалов V_x , называемая ЭДС Холла. Опыт показывает, что в не слишком сильных полях

$$V_x = R_H B i a. \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности R_H называют *постоянной Холла*. Она имеет размерность L^3/Q (L – длина, Q – электрический заряд) и измеряется в кубических метрах на кулон, ($m^3/Кл$).

Рассмотрим физическую природу эффекта Холла.

На электрон, движущийся справа налево со скоростью v , действует сила Лоренца F_L (рис. 2):

$$F_L = q[vB].$$

При $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ эта сила равна

$$F_{\text{Л}} = qvB.$$

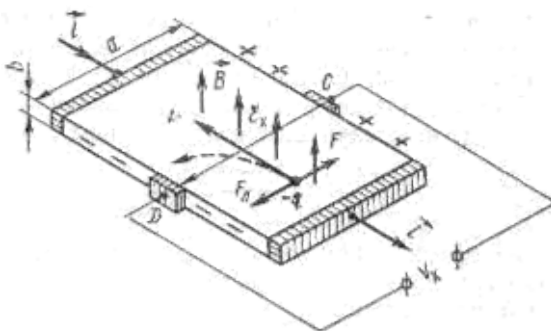


Рис. 2

Под действием силы Лоренца электроны отклоняются к внешней грани пластины (пунктир на рис. 2), заряжая ее отрицательно. На противоположной грани накапливаются нескомпенсированные положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля, направленного от С к D и равного

$$E_x = \frac{V_x}{a},$$

где V_x – разность потенциалов между точками С и D (ЭДС Холла).

Поле E_x действует на электроны с силой $F = qE_x$, направленной против силы Лоренца. При $F = F_{\text{Л}}$ поперечное электрическое поле уравнивает силу Лоренца и дальнейшее накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Из условия равновесия

$$qvB = qE_x \tag{4}$$

найдем

$$E_x = vB.$$

Умножая это соотношение на расстояние a между точками С и D, найдем

$$V_x = aE_x = vBa.$$

Учитывая, что $i = qnv$, и, следовательно, $v = i/(qn)$, получим

$$V_x = \frac{1}{nq} B ia \tag{5}$$

Таким образом, теория приводит к выражению для V_x , совпадающему с (3), установленному экспериментально. Постоянная Холла оказывается при этом равной

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (6)$$

Из (6) следует, что, зная абсолютное значение и знак постоянной Холла, можно определить концентрацию и знак носителей тока в проводнике. У электронных проводников R_H отрицательна, у дырочных – положительна.

Измеряя, кроме того, удельную электропроводность $\sigma = qn\mu$ проводника, можно определить подвижность μ носителей, так как произведение

$$R_H\sigma = \mu \quad (7)$$

При выводе (6) допускалось, что все носители тока в проводнике обладают одной и той же скоростью v . Такое допущение может быть оправдано для металлов и вырожденных полупроводников и совершенно неприменимо к невырожденным полупроводникам, скорость носителей тока в которых распределена по закону Максвелла. Более строгий вывод, учитывающий это обстоятельство, приводит к следующему выражению для R_H :

$$R_H = \frac{A}{qn}, \quad (8)$$

где A – постоянная, зависящая от механизма рассеяния носителей тока в кристаллах.

В полупроводниках со смешанной проводимостью перенос тока осуществляется одновременно электронами и дырками. Так как они обладают противоположными по знаку зарядами и под действием внешнего поля перемещаются в противоположные стороны, то сила Лоренца $\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ отклоняет их в одну и ту же сторону. Поэтому при прочих равных условиях ЭДС Холла и постоянная Холла у таких проводников меньше, чем у проводников с одним типом носителей тока. Расчет показывает, что R_H для них определяется следующим соотношением:

$$R_H = \frac{A}{q} \frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2}, \quad (9)$$

где n, p – концентрация электронов и дырок; μ_n, μ_p – их подвижность.

В зависимости от того, какой из слагаемых числителя больше, знак постоянной Холла может быть и положительным и отрицательным.

Для собственных полупроводников, у которых $n = n_i$, формула (9) приобретает следующий вид:

$$R_H = \frac{A}{n_i q} \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n} \quad (10)$$

Из (10) видно, что в области собственной проводимости знак постоянной Холла определяется знаком носителей, подвижность которых выше. Обычно такими носителями являются электроны. Поэтому в примесном дырочном полупроводнике при переходе к собственной проводимости ЭДС Холла проходит через нуль и изменяет знак. В качестве примера в таблице приведена постоянная Холла для некоторых металлов и полупроводников.

$R_H, 10^{11} \text{ м}^3/\text{К}$				
Cu – 5,5	Zn – 3,3	Bi – 10^3	Ge – 10^{16}	Si – 10^{19}

Из данных таблицы видно, что R_H у полупроводников на много порядков выше, чем у металлов. Объясняется это тем, что концентрация свободных носителей в полупроводниках значительно выше, чем в металлах.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для измерений используется прямоугольный образец с пятью омическими контактами (рис. 3).

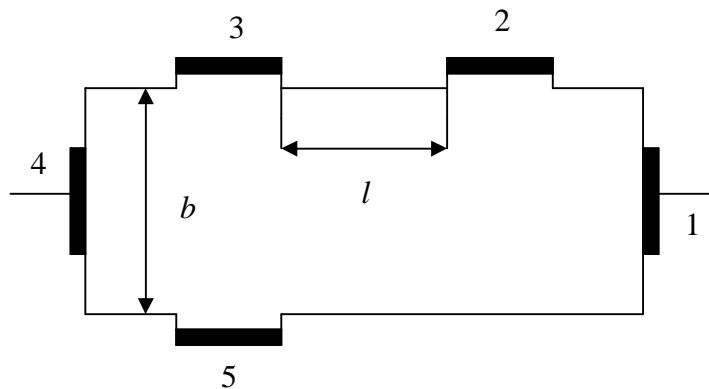


Рис. 3. Общий вид образца для измерений

Измерение электропроводности проводится на лабораторной установке, электрическая схема которой представлена на рис. 4. Установка включает пульт управления с источником питания УИП- 1, держатель с образцом, электромагнит вольтметр для измерения ЭДС Холла U_x и напряжения U_σ . Пульт управления предназначен для подачи, регулировки и измерения тока через образец, а также для проведения необходимых переключений в схеме установки. Схема задания, измерения и переключения тока через образец включает источник питания постоянного тока УИП - 1, тумблеры K_1 и K_2 , миллиамперметр “mA” на 100 мА, переменное сопротивление R . Источник питания обеспечивает подачу постоянного напряжения величиной 6В в схему. Ключ K_1 служит для включения или выключения тока через образец. Ключ K_2 служит для переключения полярности тока, подаваемого на образец. Миллиамперметр измеряет величину тока, а переменное сопротивление R изменяет величину тока. Обычно ток через образец задается 20 – 50 мА. Схема измерения напряжения включает ключи K_3 , K_4 и вольтметр.

Ключ K_3 является переключателем рода измерения. В верхнем положении замыкаются контакты 1, 2 ключа и на вольтметр подается напряжение с контактов 3, 5 образца, т.е. измеряется ЭДС Холла. В нижнем положении замыкаются контакты 2, 3 ключа и на вольтметр подается для измерения напряжения U_σ с контактов 2, 3 образца. Ключ K_4 служит для смены полярности измеряемых напряжений перед подачей их на вольтметр.

Для получения магнитного поля используют электромагнит. Электромагнит питается от сети.

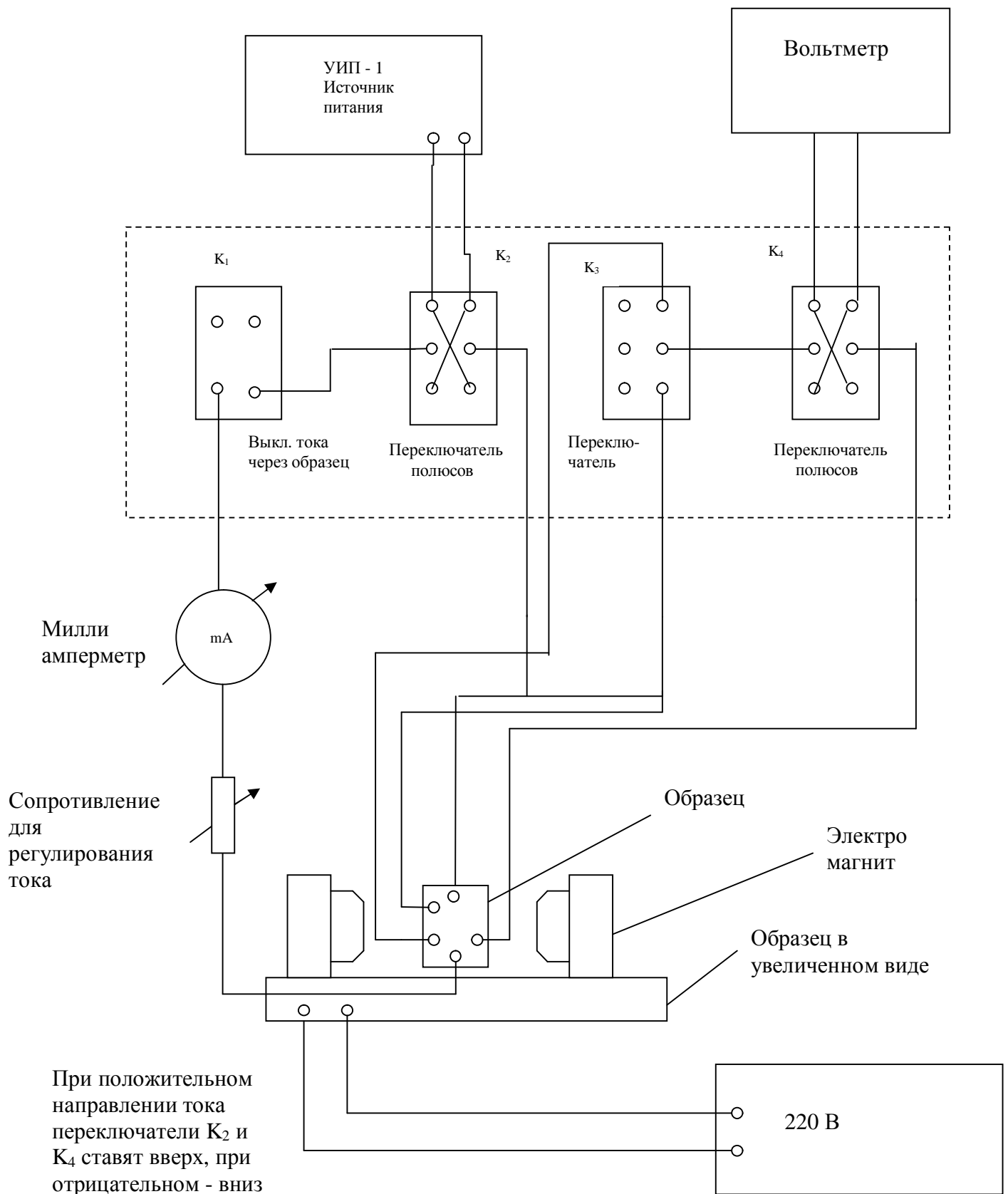


Рис. 4. Схема установки для измерения эффекта Холла.

ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.

1. Вначале работы проверяется и устанавливается рабочий ток вольтметра. Так как напряжения могут быть разных знаков, то в пульте управления предусмотрен переключатель K_4 полярности измеряемого напряжения.

2. Для измерения “холловской” разности потенциалов U_x необходимо для исключения влияния паразитной разности потенциалов, получающейся за счет разности несимметричного расположения “холловских” контактов, брать полусумму измерений “холловской” разности потенциалов, сделанных при различных направлениях тока через образец (U_x^+ и U_x^-).

Измерения проводить при токе через образец – 20 мА, 30 мА в двух направлениях.

3. Вычислите коэффициент Холла R_x и концентрацию носителей заряда n . Вектор индукции магнитного поля \mathbf{B} перпендикулярен направлению тока \mathbf{J} в образце толщиной d . Тогда “холловское” напряжение будет максимально и равно:

$$U_x = IR_x B/d \quad (11)$$

После согласования размерностей, входящих в формулу $R_x = U_x d / JB$ величин

U_x – мВ, J – мА, d – см она принимает вид:

$$R_x = (U_x d 10^8 / JB) \text{ см}^3/\text{Кл.}$$

4. Концентрацию носителей заряда (электронов) можно вычислить по формулам

$$R_x = +1/en, \quad n = r/R_x e, \quad r = 1,18.$$

5. Для измерения удельного сопротивления переключатель K_3 поставить в положение “ σ ”. Измерения проводить при тех же значениях тока, что и при определении постоянной Холла в двух направлениях тока.

Удельное сопротивление рассчитать по формуле:

$$\rho = U_p S / I l,$$

а подвижность по формуле:

$$\mu = - R_x / \rho.$$

Данные записать в таблицу:

$B = 0,7 \text{ Тл}$ ($1 \text{ Тл} = 10000 \text{ Э}$), $b = 4 \text{ мм}$, $l = 5 \text{ мм}$, $d = 1 \text{ мм}$, $e = - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

J,	U_x^+ ,	U_x^- ,	R_x ,	n,	U_ρ^+ ,	$U_{-\rho}^-$,	U_ρ ,	U_x ,	ρ ,	μ ,
A	B	B	$\text{см}^3/\text{Кл}$	см^{-3}	B	B	B	B	$\text{Ом} \cdot \text{см}$	$(\text{см}^2/\text{В}) \cdot \text{с}$

Рассчитать ошибку эксперимента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Какая сила действует на электрический заряд, движущийся в магнитном поле?
Запишите формулу для этой силы.
2. Объясните схему возникновения ЭДС Холла в полупроводнике n – типа.
3. Запишите формулу для постоянной Холла.
4. Как найти концентрацию носителей заряда?
5. Как определить подвижность носителей?
6. Опишите общее устройство лабораторной установки для данной работы.
7. Изложите порядок работы.
8. Как подсчитываются ошибки измерений подвижности и концентрации носителей заряда?

ЛИТЕРАТУРА.

1. Спецпрактикум по физике полупроводников. В.В. Остроградский, В.Д. Егорова.
2. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. Шалимовой.
3. Физика твердого тела. Г.И. Епифанов.

