

Лабораторная работа № 3.3.4
Эффект Холла в полупроводниках

Струков О. И.
Б04-404

Цель работы: измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

В работе используются: электромагнит с источником питания, миллиамперметр, милливольтметр, реостат, цифровой вольтметр, источник питания, образец полупроводника.

Теоретическая часть

Эффект Холла - явление возникновения поперечной разности потенциалов при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле.

Например, рассмотрим однородную металлическую пластину, по которой течёт ток I вдоль оси x (рис. 1). При помещении пластины в магнитное поле, направленное по оси y , в результате данного эффекта между гранями А и Б возникает разность потенциалов.

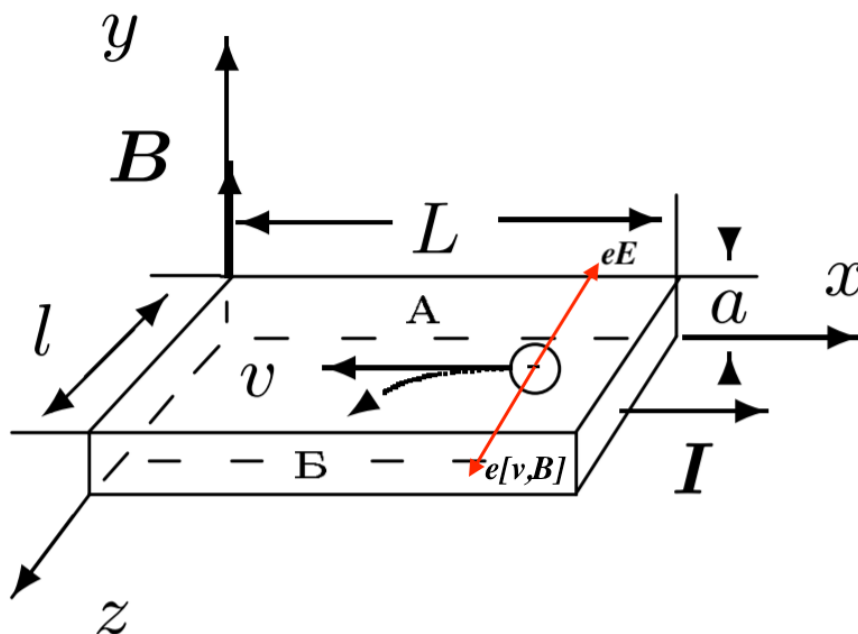


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

На электрон, движущийся со средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B},$$

где e — заряд электрона, \vec{E} — напряжённость электрического поля, \vec{B} — индукция магнитного поля.

В проекции на ось z :

$$F_B = e|\langle v_x \rangle|B.$$

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, создавая на ней избыточный отрицательный заряд. На грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды, что приводит к возникновению электрического поля E_z , направленного от А к Б. В установившемся режиме:

$$F_E = eE_z = F_B \Rightarrow E_z = |\langle v_x \rangle|B.$$

Разность потенциалов между гранями:

$$U_{AB} = E_z l = |\langle v_x \rangle| B l.$$

Силу тока в данном случае можно выразить как

$$I = ne|\langle v_x \rangle| la,$$

где n — концентрация носителей, a — толщина пластины.

Тогда ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_X = U_{AB} = \frac{IB}{nea} = R_X \frac{IB}{a},$$

где $R_X = \frac{1}{ne}$ — постоянная Холла.

Случай полупроводников

В полупроводниках носителями заряда кроме электронов могут быть дырки, поэтому в этом случае постоянная Холла выражается следующим образом:

$$R_X = \frac{nb_e^2 - pb_p^2}{e(nb_e + pb_p)^2},$$

где n, p — концентрации электронов и дырок, b_e, b_p — их подвижности.

Экспериментальная установка

Электрическая установка для измерения ЭДС Холла представлена на рисунке 2.

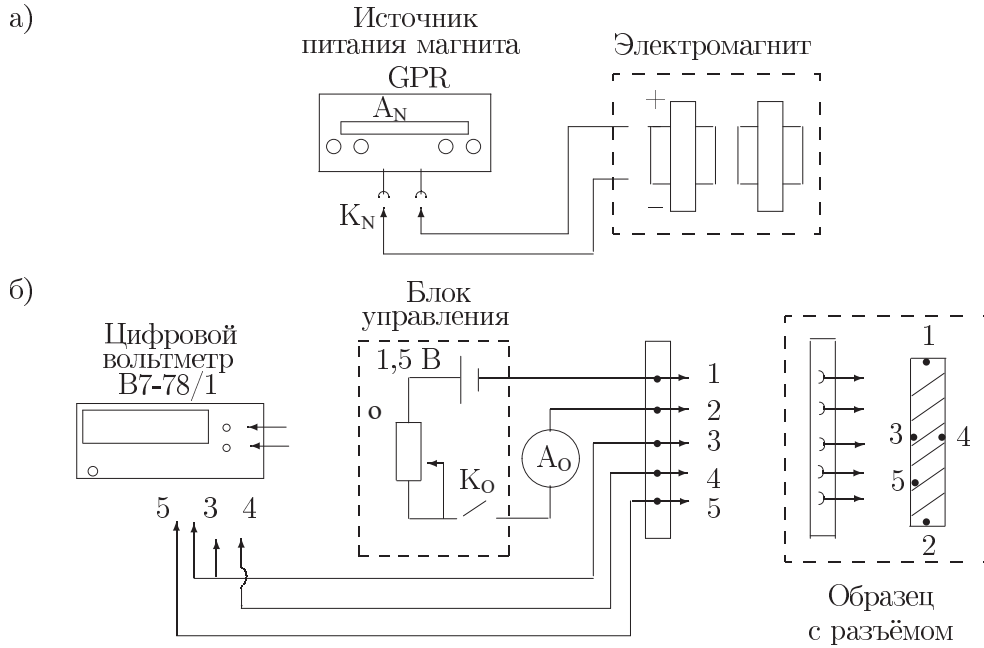


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках.

В зазоре электромагнита создаётся постоянное магнитное поле, регулируемое источником питания (рис. 1а). Направление тока в обмотках изменяется через разъём K_1 .

Изучаемый образец (рис. 1б) подключается к батарее. Ток через него регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром A_2 .

При помещении образца в магнитное поле между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов U_{34} , измеряемая цифровым вольтметром.

Возможная погрешность

Из-за неточности подпайки контакты 3 и 4 могут не лежать на эквипотенциали, что приводит к дополнительному омическому падению напряжения. Для исключения этой погрешности применяются два метода:

1. Измерение при противоположных направлениях магнитного поля:

$$\mathcal{E}_X = \frac{U_{34}(+B) - U_{34}(-B)}{2}$$

2. Измерение напряжения U_0 между контактами 3 и 4 в отсутствие поля:

$$\mathcal{E}_X = U_{34} - U_0$$

Результат измерений

По знаку \mathcal{E}_X определяется тип проводимости (электронный или дырочный). Проводимость материала рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{I \cdot L_{35}}{U_{35} \cdot a \cdot l}$$

где I — ток через образец, U_{35} — напряжение между контактами 3 и 5 в отсутствие поля, L_{35} — расстояние между контактами, a и l — геометрические параметры образца.

Ход работы

Расстояние между контактами 3 и 5 L_{35} , мм	Толщина образца a , мм	Ширина образца l , мм	Постоянная катушки SN , см ² ·вит.
15	2	8	75

Таблица 1: Параметры установки и исследуемого образца.

1. С помощью милливещеметра была исследована зависимость индукции B магнитного поля в зазоре электромагнита от силы тока через обмотку электромагнита, изображённая на графике ниже. Можно предположить, что в выбранном диапазоне значений I график можно аппроксимировать прямой $B = kI + B_0$. С помощью МНК были определены значения коэффициентов:

$$k = (0,917 \pm 0,020) \text{ Тл/А}, \quad B_0 = (0,023 \pm 0,013) \text{ Тл}$$

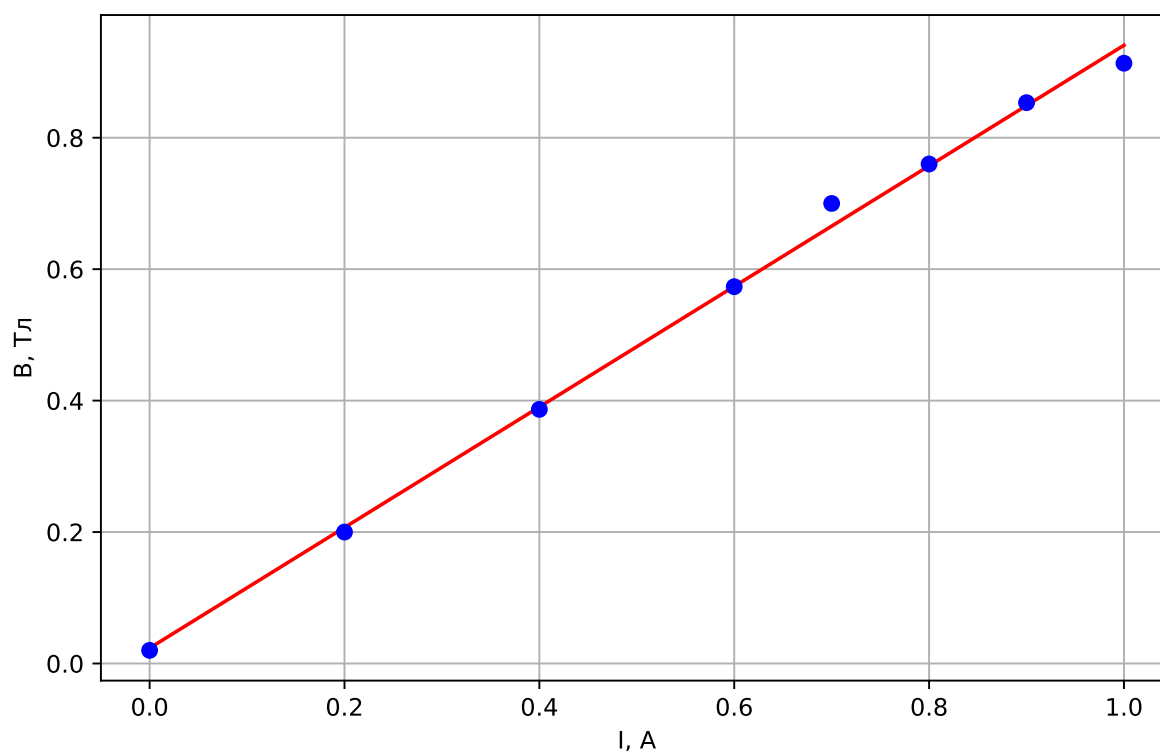


Рис. 3: Зависимость $B = f(I)$.

2. Для восьми значений силы тока, протекающего через образец, от 0,3 до 1 мА была измерена зависимость ЭДС Холла от индукции магнитного поля. Графики полученных зависимостей изображены на рисунке 4:

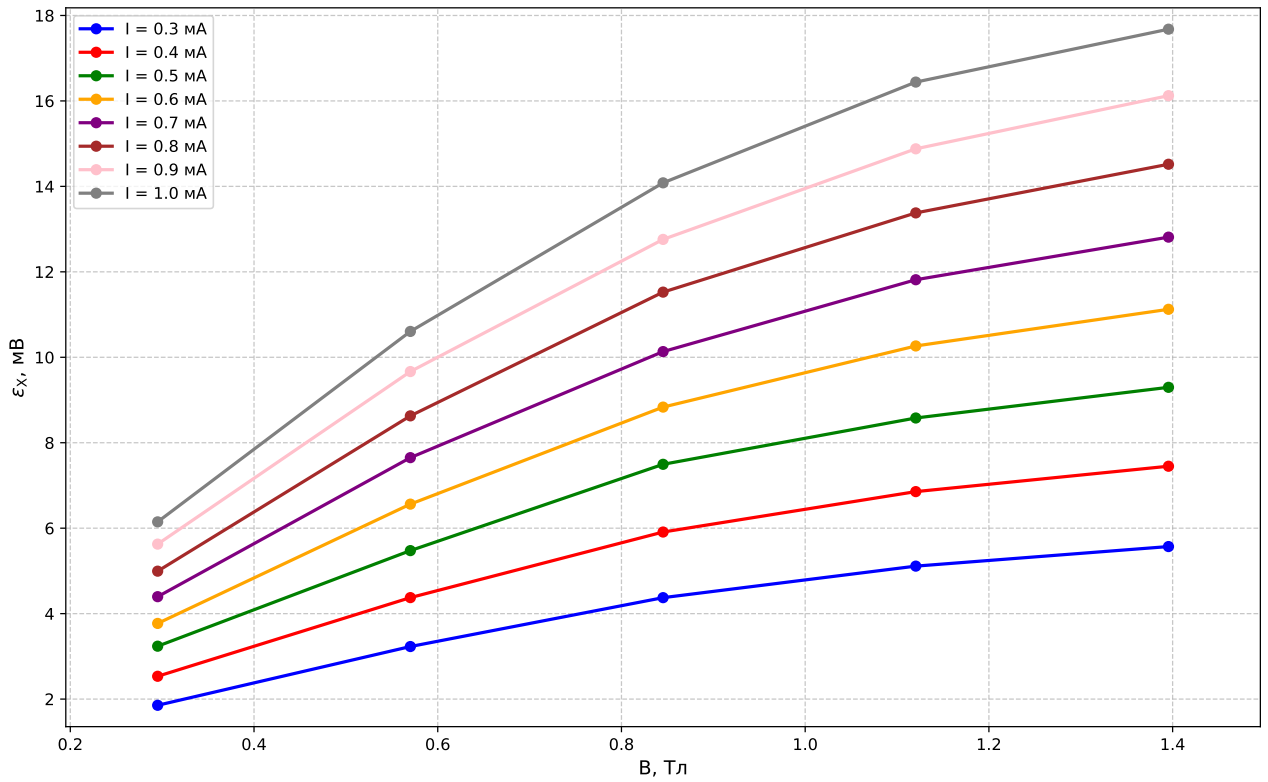


Рис. 4: Зависимость $\mathcal{E}_X = f(B)$.

3. Для каждой из полученных зависимостей с помощью МНК был определён коэффициент наклона $K(I)$:

I, мА	K(I), мВ/Тл
(0,30 ± 0,01)	(3,39 ± 0,3)
(0,40 ± 0,01)	(4,48 ± 0,3)
(0,50 ± 0,01)	(5,53 ± 0,3)
(0,60 ± 0,01)	(6,69 ± 0,4)
(0,70 ± 0,01)	(7,63 ± 0,4)
(0,80 ± 0,01)	(8,65 ± 0,4)
(0,90 ± 0,01)	(9,53 ± 0,5)
(1,00 ± 0,01)	(10,50 ± 0,5)

4. По полученным точкам проведена наилучшая прямая, получен график зависимости $K = f(I)$

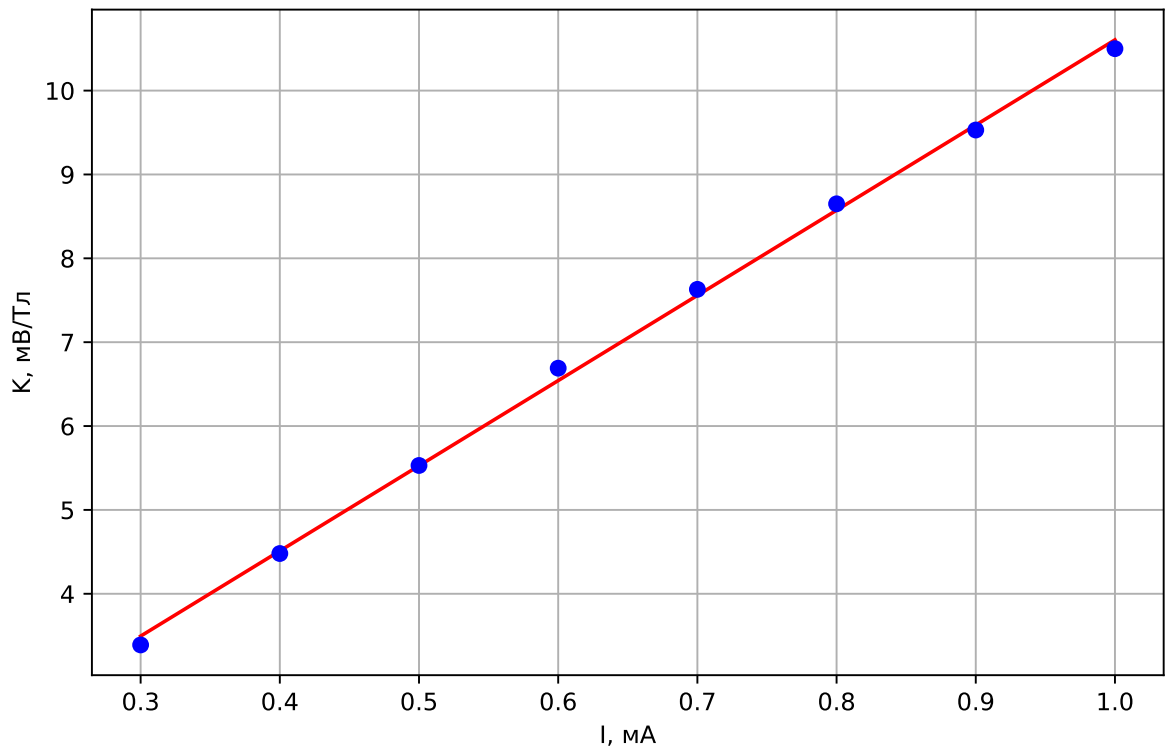


Рис. 5: Зависимость $K = f(I)$.

5. С помощью МНК найден угловой коэффициент полученной прямой $\kappa = (10,2 \pm 0,6) \frac{\text{В}}{\text{А} \cdot \text{Тл}}$.

$$R_X = \kappa a$$

Таким образом, $R_X = (0,020 \pm 0,001) \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{Тл}}$

6. Отсюда можно найти концентрацию носителей тока в образце: $n = (3,1 \pm 0,2) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

7. Определено напряжение между контактами 3 и 5 в отсутствие поля: $U_{35} = (0,172 \pm 0,001) \text{ В}$. По формуле из введения найдена проводимость материала: $\sigma = (5,45 \pm 0,04) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$.

8. Используя полученные значения концентрации n и проводимости σ с помощью формулы $b = \frac{\sigma}{ne}$ вычислена подвижность b носителей тока в общепринятых внесистемных единицах: $b = (1050 \pm 60) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$

Вывод

Итоги работы сведены в конечную таблицу:

$R_X,$ $\text{м}^3/\text{Кл}$	Знак носителей	$n,$ $10^{20}, \text{м}^{-3}$	$\sigma,$ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$b,$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
$0,020 \pm 0,001$	+	$3,1 \pm 0,2$	$5,45 \pm 0,04$	1050 ± 60

В результате выполнения работы были определены постоянная Холла образца, концентрация носителей в нём, удельная проводимость и подвижность носителей. Сами носители имеют положительный заряд, поэтому их тип является дырочным. Поскольку нам не было известно, из какого материала изготовлен образец, полученные данные нельзя сравнить с какими-либо конкретными табличными, однако в общем случае видно, что все они, за исключением почтовой Холла по порядку совпадают с имеющимися данными в справочнике.