

Московский физико-технический институт

Лабораторная работа № 3.3.4

(Общая физика: электричество и магнетизм)

Эффект Холла в полупроводниках

Работу выполнили:

Фитэль Алёна

Попеску Полина

Б06-103

г. Долгопрудный

2022 год

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

Оборудование: электромагнит с источником питания, батарейка, амперметр, реостат, цифровой вольтметр, милливеберметр, образцы легированного германия.

1 Теоретическая справка

Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси x течет ток I (рис. 1).

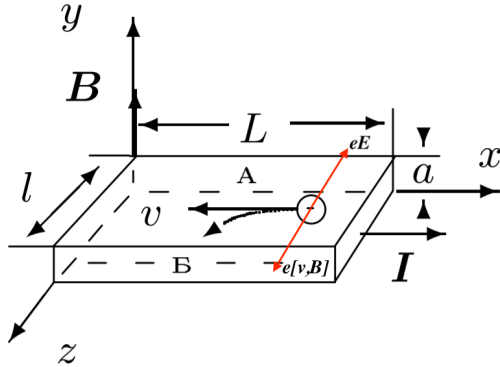


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

Если эту пластину поместить в магнитное поле, направленное по оси y , то между гранями А и Б появляется разность потенциалов.

В самом деле, на электрон (для простоты рассматриваем один тип носителей), движущийся со средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

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

где e - абсолютный заряд электрона, \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{B} - индукция магнитного поля.

В проекции на ось z получаем

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

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, заряжая ее отрицательно. На грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля E_z , направленного от А к Б, которое действует на электроны с силой $F_E = eE_z$. В установившемся режиме $F_E = F_B$, поэтому накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Отсюда

$$E_z = |\langle v_x \rangle|B.$$

С этим полем связана разность потенциалов

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

В этом и состоит эффект Холла.

Замечая, что сила тока

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

найдем ЭДС Холла:

$$E_X = U_{AB} = \frac{IB}{nea} = R_X \frac{IB}{a} \quad (1)$$

Константа $R_X = \frac{1}{ne}$ называется постоянной Холла.

В полупроводниках, когда вклад в проводимость обусловлен и электронами и дырками, выражение для постоянной Холла имеет более сложный вид:

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

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

2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

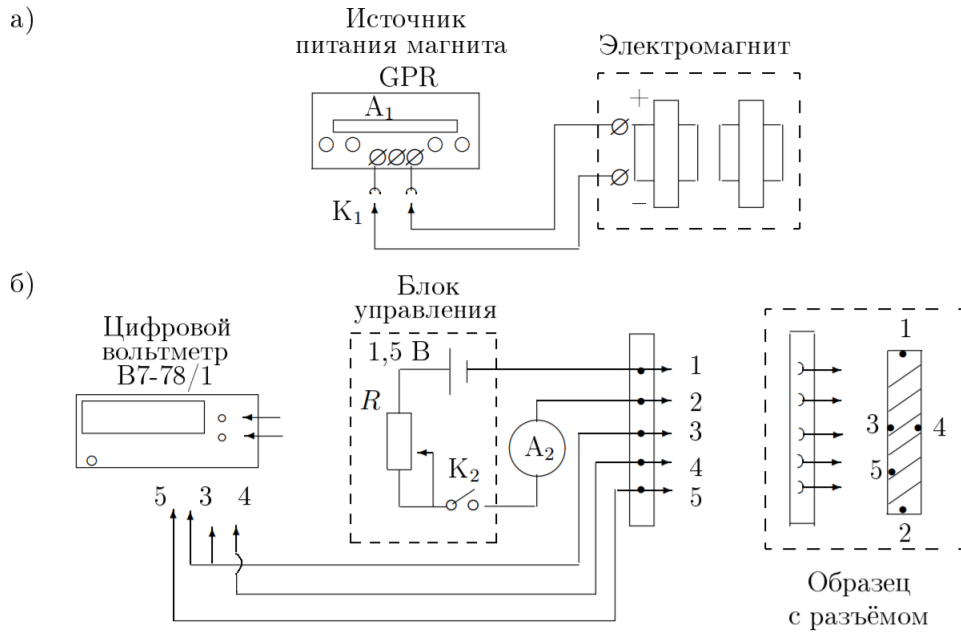


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания. Ток измеряется амперметром источника питания A_1 . Разъем K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 1б), подключается к батарее. При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца течет ток, величина которого регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром A_2 .

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов U_{34} , которая измеряется с помощью цифрового вольтметра.

Контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки не всегда лежат на одной эквипотенциали, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения, вызванным протеканием основного тока через образец.

Измеряемая разность потенциалов при одном направлении магнитного поля равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а при другом их разности. В этом случае ЭДС Холла E_X может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остается неизменным. От него следует (с учетом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

Таблица 1: Зависимость $B(I_M)$

№ $\Delta\Phi$, мВб	I_M , А B , Тл	Φ_0 , мВб	Φ , мВб
1	0,24	1,4	0,019
2	0,48	2,7	0,036
3	0,73	3,9	0,052
4	0,97	5,1	0,068
5	1,21	5,9	0,079
6	1,45	6,4	0,085

$$E_X = U_{34} \pm U_0$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку E_X можно определить характер проводимости - электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{35} между контактами 3 и 5 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} \quad (2)$$

где L_{35} - расстояние между контактами 3 и 5, a - толщина образца, l - его ширина.

3 Ход работы

1. Запишем данные установки:

$a = 2,2$ мм, $L_{35} = 6,0$ мм, $l = 7,0$ мм, $SN = 75$ см² · вит - площадь сечения контура катушки на число витков в ней.

2. Настроим приборы согласно инструкции.
3. Запишем предельное значение тока через электромагнит:

$$I_{max} = 2,13 \text{ А.}$$

4. Исследуем зависимость потока Φ магнитного поля в зазоре электромагнита от тока через обмотки магнита. Данные занесём в табл. 1.

Индукцию B найдем по формуле

$$B = \frac{\Delta\Phi}{SN}, \quad (3)$$

По этим данным построим график зависимости $B = B(I_M)$ (рис. 3).

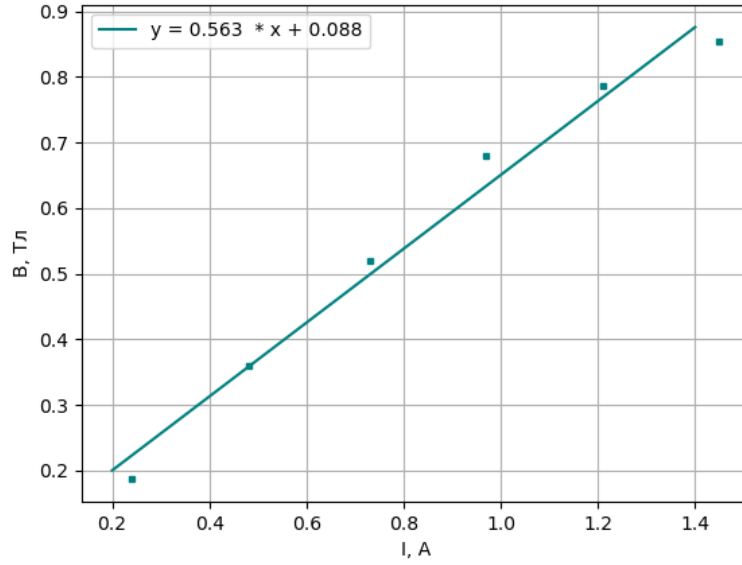


Рис. 3: График зависимости $B(I_M)$

5. Снимем зависимость $U_{34}(I_M)$ различных токах через образец (табл. 2). А именно, он изменяется от 0,23 до 1,07 мА. При этом в отсутствие магнитного поля вольтметр покажет напряжение U_0 . Результаты занесём в таблицу 2, подписывая сверху I, U_0 в мА и мкВ соответственно. В последнем опыте изменим направление магнитного поля.

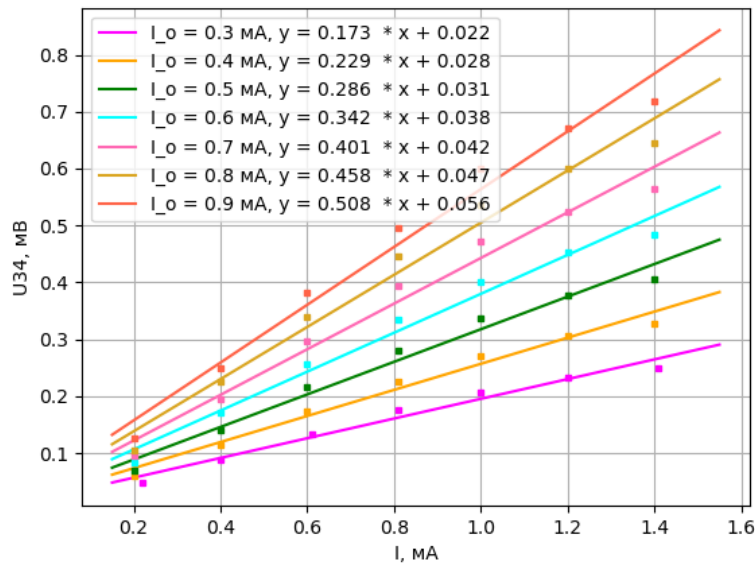


Рис. 4: График зависимости $U_{34}(I_M)$

6. Рассчитаем ЭДС Холла и построим на одном графике семейство характеристик $\mathcal{E}_x = f(B)$ при разных токах, определим угловые коэффициенты $k(I) = \Delta \mathcal{E} / \Delta B$. Построим график $k = f(I)$, рассчитаем угловой коэффициент и по формуле $\mathcal{E}_x = -R_x \cdot \frac{IB}{a}$ рассчитаем постоянную Холла R_H

N	I_M, A	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0
		0, 30, 3	0, 40, 3	0, 50, 3	0, 60, 4	0, 70, 5	0, 80, 5	0, 90, 6	0, 90, -17
	$U_{34}, \text{ мВ}$								
1	0.20	50	63	73	88	100	110	131	-139
2	0.40	92	118	145	174	201	230	256	-256
3	0.60	137	177	219	260	301	345	387	-304
4	0.80	171	228	285	338	399	451	501	-512
5	1.00	209	274	341	406	476	542	605	-614
6	1.20	235	309	381	456	530	605	677	-685
7	1.40	0,252	331	409	489	570	649	725	-735

Таблица 2: Результаты измерений U_{34}

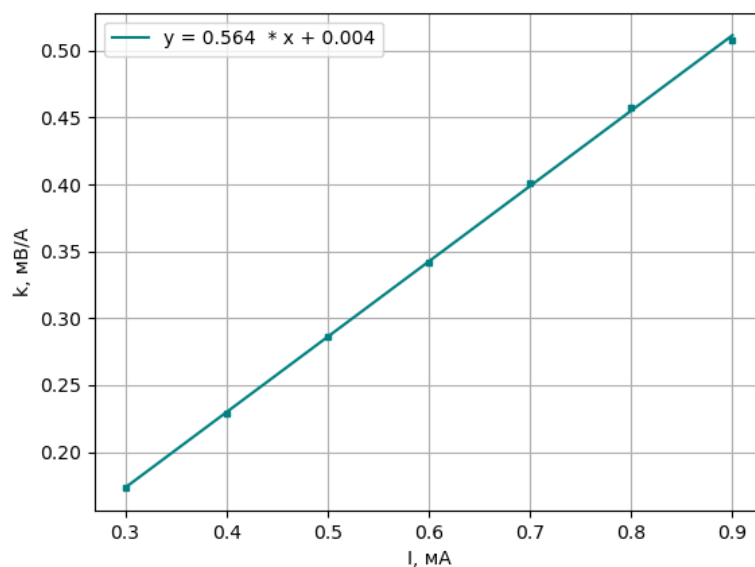


Рис. 5: График зависимости $k(I)$

$k, \text{ мВ/Вб}$	0.173	0.229	0.286	0.342	0.401	0.458	0.508
$I, \text{ А}$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

$$R_x = \frac{\varepsilon_x}{IB} a = \frac{\varepsilon_x}{I \cdot I_M} \frac{I_M}{B} a = \frac{k_2}{k_1} a = (750 \pm 50) \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}$$

- Определим, что наши частицы движутся к клемме №4 образца. Зная направление магнитного поля в электромагните и тока через образец, мы определяем, что наши частицы заряжены отрицательно, т.е. являются электронами.
- Теперь определим концентрацию электронов:

$$n = \frac{1}{eR_x} = (8,3 \pm 0,6) \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{м}^3} \quad (4)$$

- Для определения удельной проводимости выключим источник питания и измерим падение напряжения U_{35} (1 мА) = -4,036 мВ.

$$\sigma = \frac{IL}{U_{35}al} = 156,6 \pm 3 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \quad (5)$$

10. По формуле посчитаем подвижность электронов:

$$b = \frac{\sigma}{en} = \sigma R_x = (0,12 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad (6)$$

4 Вывод

В ходе работы изучено явление Холла на основе образца. Также вычислена постоянная Холла для исследуемого образца $R_x = (750 \pm 50) \cdot 10^{-6} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}$ ($\varepsilon \approx 7\%$), концентрация носителей заряда $n = (8,3 \pm 0,6) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$ ($\varepsilon \approx 8\%$), удельная проводимость $\sigma = 156,6 \pm 3 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ ($\varepsilon \approx 2\%$) и подвижность носителей заряда $b = 120 \pm 10 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ($\varepsilon \approx 9\%$). Полученные данные могут отличаться от табличных в связи с сильной чувствительностью используемого прибора к нагреву, происходящему при проходе через него тока, и большим количеством примесей в рассматриваемом образце.