

Московский физико-технический университет
Факультет радиотехники и кибернетики

Вопрос по выбору на основе лабораторной работы № 3.3.4
(Общая физика: электричество и магнетизм)

Эффект Холла в полупроводниках

Работу выполнил:
Милославов Глеб, группа Б01-103

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).

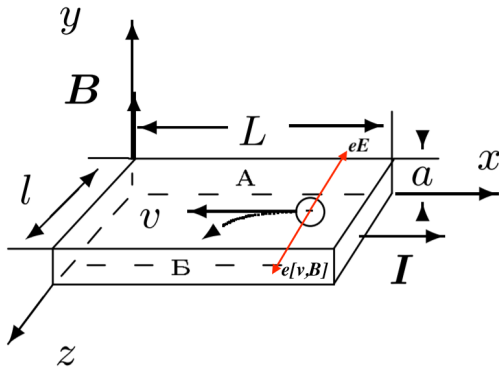


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

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:

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

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

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

В этом и состоит эффект Холла.

Замечая, что сила тока

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

найдем ЭДС Холла:

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

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

2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

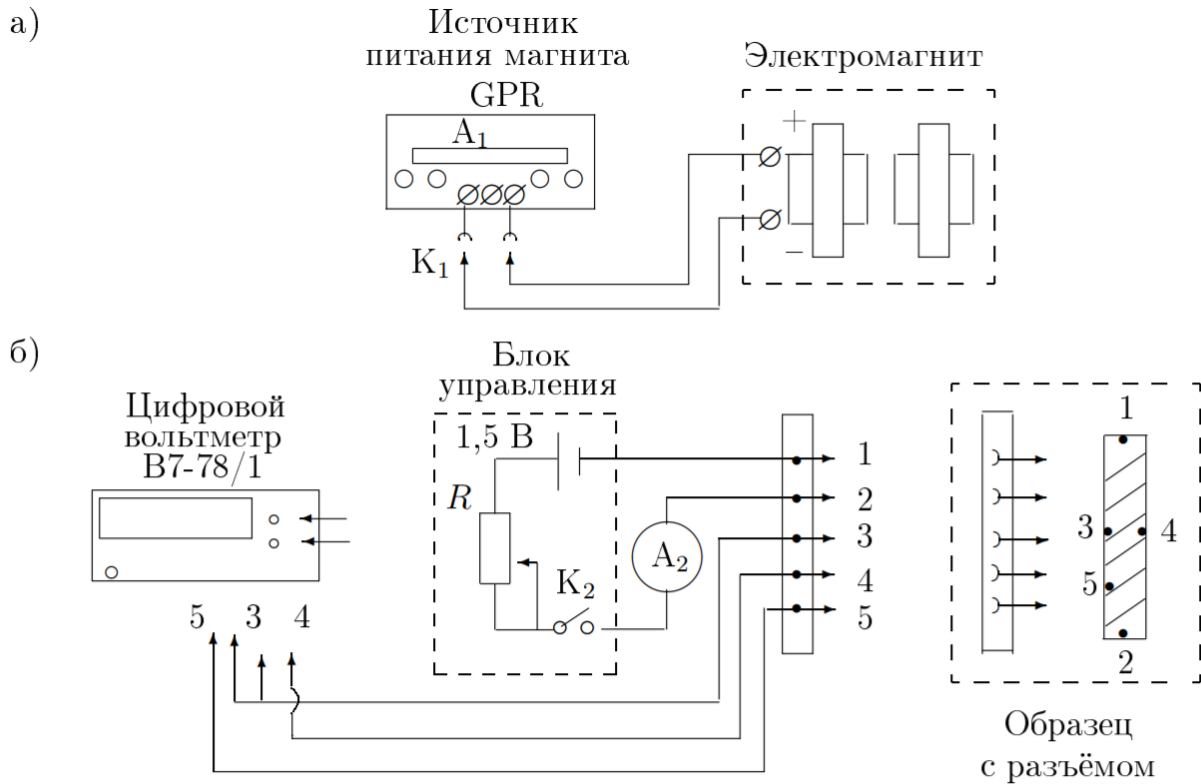


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

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 \mathcal{E}_H 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:

$$\mathcal{E}_H = U_{34} \pm U_0$$

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

По знаку \mathcal{E}_H 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 Выполнение работы

3.1 Градуировка электромагнита

Свяжем силу тока и индукцию поля в электромагните с помощью градуировки, воспользовавшись милливеберметром. Внесём данные в таблицу:

I, А	Φ1, мВб	Φ2, мВб	ΔΦ, мВб	B, Тл
0,3	1,5	3,4	1,9	0,26
0,6	1,6	4,9	3,3	0,46
0,9	1,6	6,5	4,9	0,68
1,2	1,7	7,9	6,2	0,86
1,5	1,7	8,9	7,2	1,00
1,8	1,7	9,5	7,8	1,08
2,1	0,1	8,4	8,3	1,15

Рис. 3: Данные градуировки

Погрешности прямых измерений: $\sigma_I = 0.05$ А и $\sigma_\Phi = 0,05$ мВб. Посчитаем погрешности косвенных измерений:

$$\sigma_B = B \cdot \frac{\sigma_{\Delta\Phi}}{\Delta\Phi} = B \cdot \frac{\sqrt{\sigma_{\Phi_1}^2 + \sigma_{\Phi_2}^2}}{\Delta\Phi} = B \cdot \frac{0,05\sqrt{2}}{\Delta\Phi} = \frac{0,05\sqrt{2}}{SN} \approx 0,01 \text{ Тл}$$

Построим график по полученным данным:

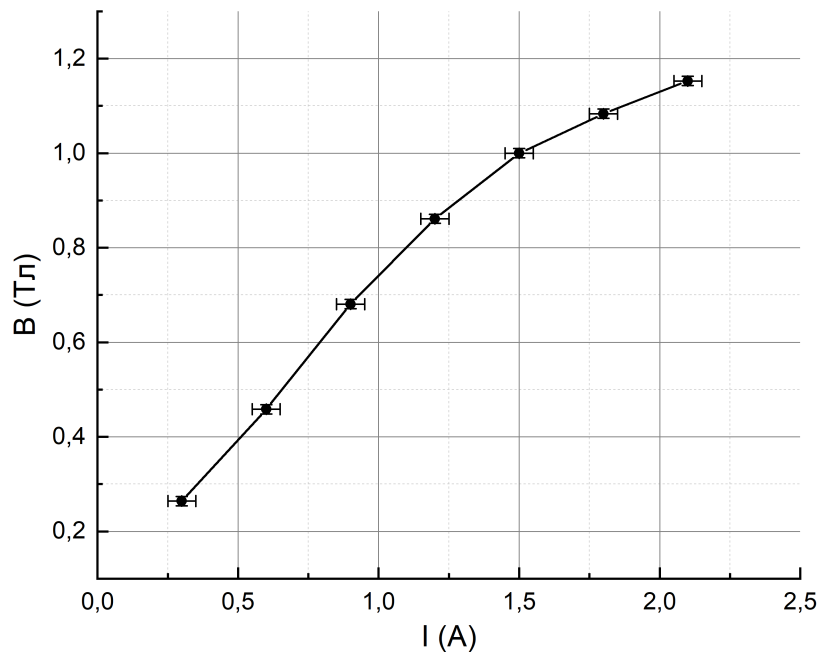


Рис. 4: Кривая зависимости $B(I)$

3.2 Измерение ЭДС Холла

Снимем прямые измерения при разных токах через образец I и разных токах через электромагнит I_m , внесём их в таблицу:

I , мкА	12,5	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I_m , А	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ	U_{34} , мкВ
0	-7	-11	-19	-26	-33	-42	-50	-57	-63	-72
0,3	-20	-30	-47	-62	-78	-96	-112	-128	-144	-161
0,6	-30	-49	-73	-100	-127	-151	-178	-202	-227	-259
0,9	-40	-66	-100	-134	-170	-203	-239	-273	-309	-345
1,2	-50	-81	-122	-165	-209	-251	-293	-332	-374	-420
1,5	-56	-93	-139	-186	-236	-283	-331	-377	-424	-476
1,8	-60	-100	-150	-200	-253	-303	-355	-405	-457	-510
2,1	-63	-109	-158	-212	-267	-319	-373	-424	-478	-530

Рис. 5: Измерение ЭДС Холла для разных I и I_m

Построим график для $\mathcal{E}_X(B) = U_{34} - U_0$ и для каждой зависимости при $I = const$ проведём линейную аппроксимацию:

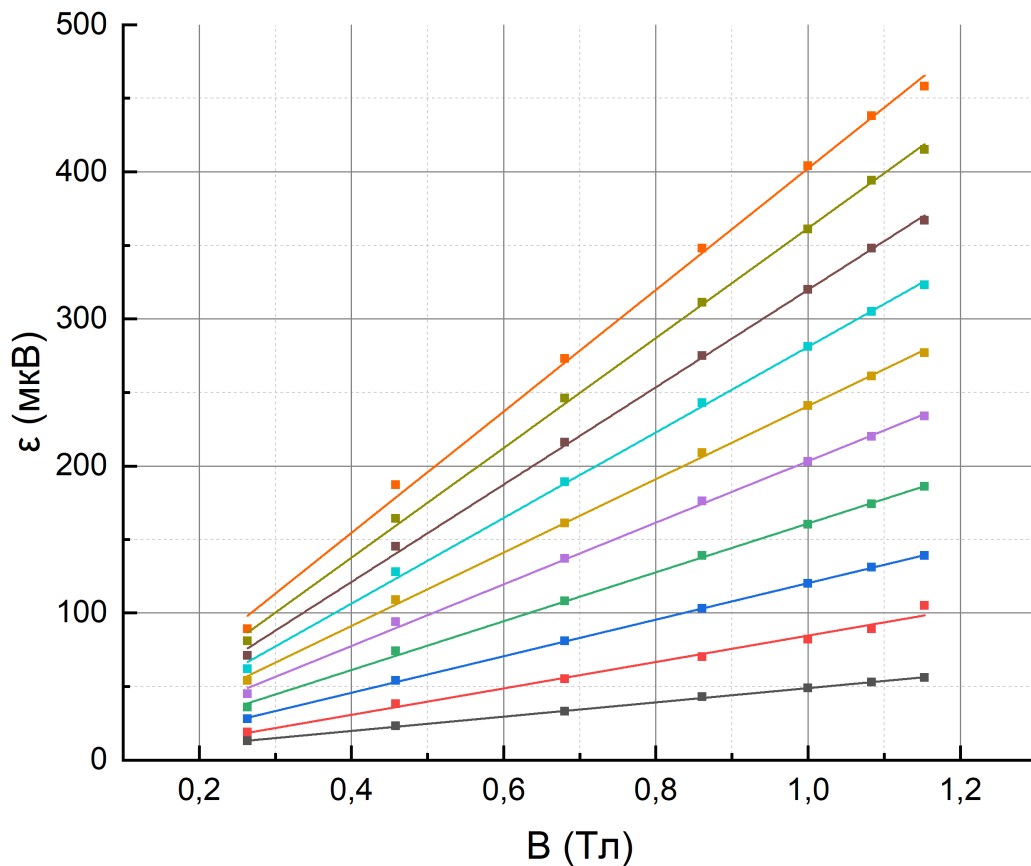


Рис. 6: График для ЭДС Холла и его линейная аппроксимация

Видно, что точки ложатся на прямые с достаточно высокой точностью

3.3 Определение постоянной Холла

Внесём значения $k = d\mathcal{E}_X/dB$ в таблицу:

I, A	12,5	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$k, \text{мкВ/Тл}$	48,5	89,7	124,4	165,9	209,6	249,4	291,1	331,1	373,5	413,1
$\sigma_k, \text{мкВ/Тл}$	0,6	4,6	0,8	2,4	3,4	3,2	4,4	4,4	5,1	8,4

По этим данным построим график и аппроксимируем его линейно:

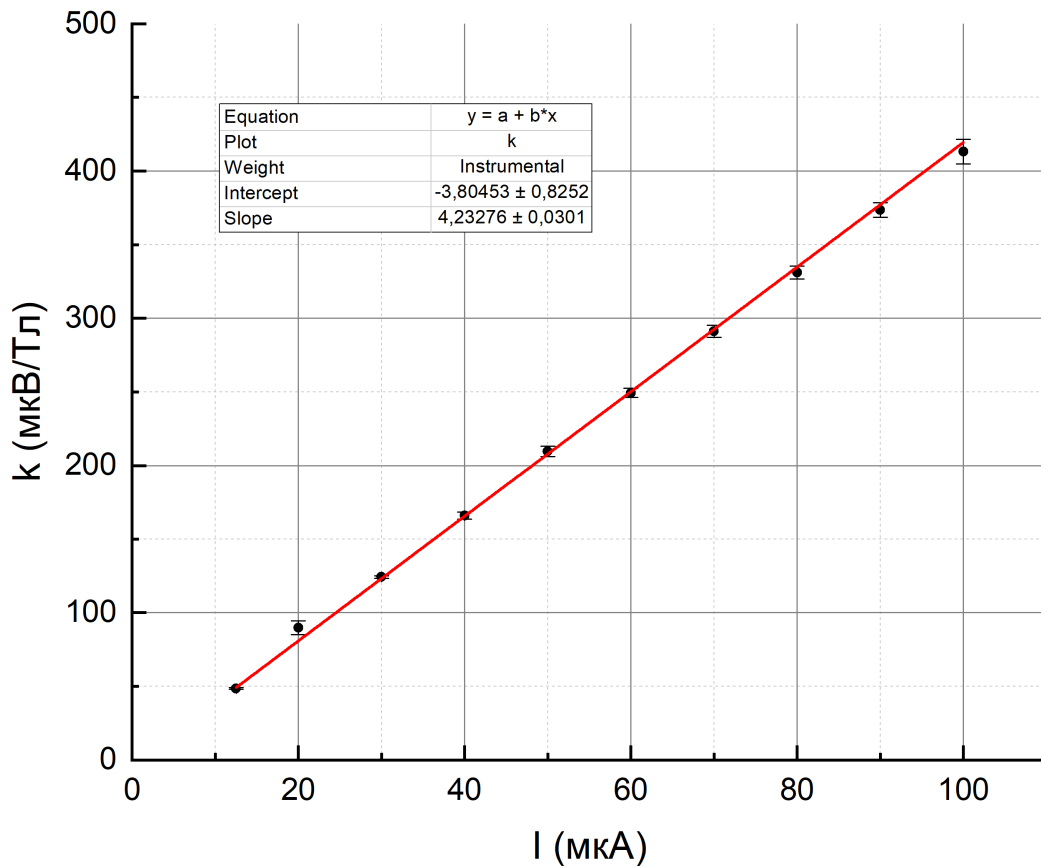


Рис. 7: График $k(I)$ и его линейная аппроксимация

Видно, что точки с высокой точностью ложатся на прямую, причём коэффициент наклона аппроксимирующей прямой равен $b = 4,23 \pm 0,03 \text{ В}/(\text{Тл} \cdot \text{А})$.

Посчитаем величину постоянной Холла:

$$R_X = b \cdot a = -(6,35 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

где $a = 1,5 \text{ мм}$ – толщина образца, знак минус говорит об электронной проводимости образца.

3.4 Расчёт параметров полупроводника

Занесём в таблицу параметры проводника, силу тока I_{35} и напряжение U_{35} в отсутствие магнитного поля.

Рассчитаем концентрацию носителей тока в образце n , проводимость материала σ_0 , удельное сопротивление ρ_0 , подвижность носителей тока (электронов) μ :

$$n = \frac{1}{R_X q_e} = (9,83 \pm 0,07) \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{м}^3}$$

$$\sigma_0 = \frac{I L_{35}}{U_{35} a l} = 71,3 \pm 0,2 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\rho_0 = \frac{1}{\sigma_0} = 1,403 \pm 0,004 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\mu = \frac{\sigma_0}{n q_e} = 4528 \pm 35 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

I , мА	0,1
U_{35} , мВ	1,649
L_{35} , мм	3
a , мм	1,5
l , мм	1,7

Рис. 8: Параметры образца

4 Вывод

В работе было посчитано ЭДС Холла у германия, получена близкая к линейной зависимость этой величины от индукции магнитного поля, понижающая образец. Была определена постоянная Холла для германия:

$$R_X = -(6,35 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

а также и другие параметры диэлектрика:

$$n_e = (9,83 \pm 0,07) \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{м}^3} \quad ; \quad \sigma_0 = 71,3 \pm 0,2 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

$$\rho_0 = 1,403 \pm 0,004 \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad ; \quad \mu = 4528 \pm 35 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Сравнивая μ с табличным значением подвижности электронов $\mu_e = 3,8 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$, получаем отклонение в $\varepsilon = 18\%$, что может быть связано с наличием примесей в образце или вкладом неосновных носителей тока. Также сравним полученную концентрацию носителей тока и концентрацию всех частиц в германие:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \cdot \nu}{V} = \frac{N_A \cdot \rho V}{V \cdot M} = \frac{N_A \cdot \rho}{M} \approx 4,5 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Видно, что концентрация частиц вещества на несколько порядков превосходит концентрацию носителей тока в полупроводнике.