

Московский физико-технический институт
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 3.3.4

(Общая физика: электричество и магнетизм)

Эффект Холла в полупроводниках

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2017 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).

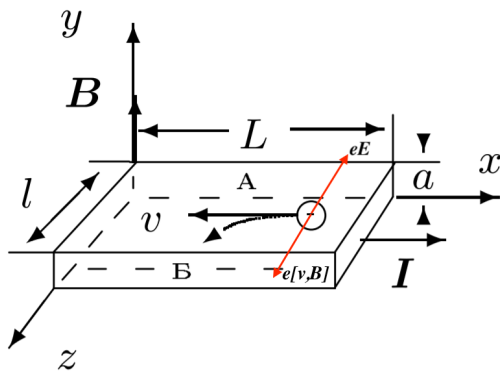


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

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:

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

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:

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

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.

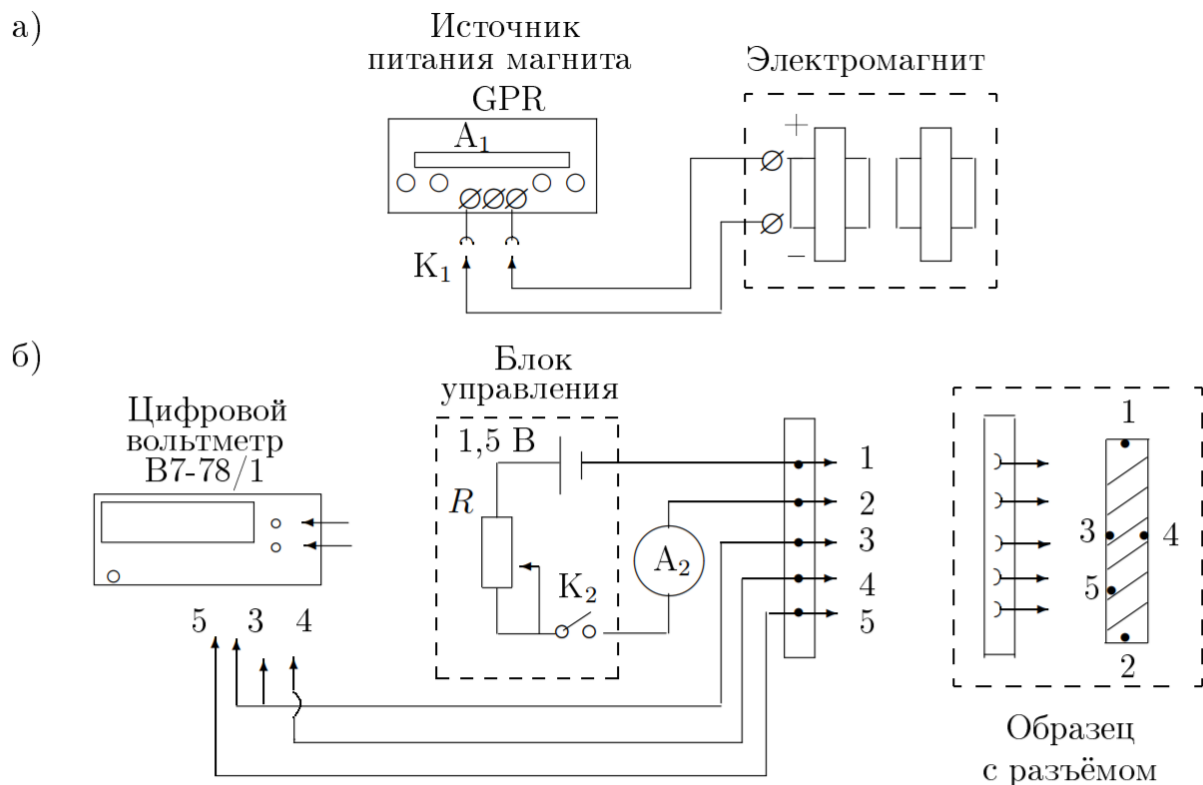


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

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 \mathcal{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:

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

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

По знаку \mathcal{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:

$$I_{max} = 2,13 \text{ A.}$$

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

$$B = \frac{\Delta\Phi}{SN},$$

где $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0$ - разность между начальным и конечным значением потока вектора индукции, который пронизывал пробную катушку, находившуюся в зазоре электромагнита.

B, Тл

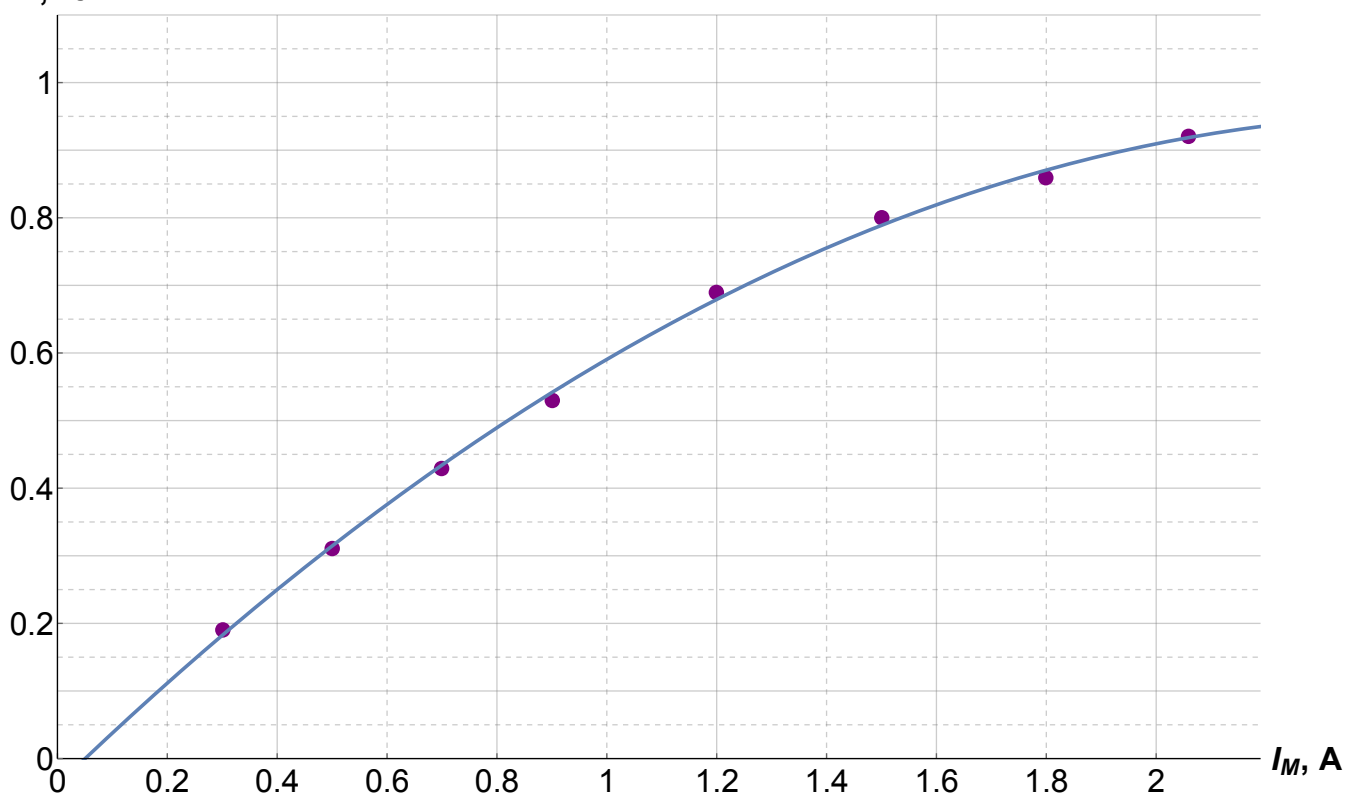


Рис. 3: График зависимости $B(I_M)$

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

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.

Рассчитаем ЭДС Холла \mathcal{E}_X по формуле и занесем результаты в таблицу 3:

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

Теперь вычислим R_X из формулы (1):

Таблица 1: Зависимость $B(I_M)$

№	I_M , А	Φ_0 , мВб	Φ , мВб	$\Delta\Phi$, мВб	B , Тл
1	0,30	2	3,4	1,4	0,19
2	0,50	2	4,3	2,3	0,31
3	0,70	2	5,2	3,2	0,43
4	0,90	2	6,0	4,0	0,53
5	1,20	2	7,2	5,2	0,69
6	1,50	2	8,0	6,0	0,80
7	1,80	2	8,5	6,5	0,86
8	2,06	2	8,9	6,9	0,92

Таблица 2: Результаты измерений U_{34}

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
		0,22, 46	0,35, 72	0,50, 102	0,60, 123	0,70, 145	0,85, 175	1,07, 220	1,07, 220
		$U_{34}, \text{ мкВ}$							
1	0.1	38	62	88	107	125	150	191	268
2	0.3	27	41	57	69	83	100	124	334
3	0.6	8	10	13	17	18	23	32	432
4	0.9	-9	-15	-20	-28	-28	-34	-42	517
5	1.2	-22	-34	-49	-60	-68	-81	-104	582
6	1.5	-30	-48	-67	-82	-94	-114	-144	629
7	1.8	-36	-56	-89	-96	-112	-135	-169	658
8	2.1	-40	-62	-88	-106	-123	-146	-184	674

$$R_X = \frac{a\mathcal{E}_X}{BI}$$

Результаты сведём в таблицу 4:

6. Теперь посчитаем для наших R_X , начиная со вторых значений, истинное среднее, вычисляя погрешность через коэффициент Стьюдента, равный $A = 2$.

$$R_X = R_{\text{ср}} \pm A \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

$R_{\text{ср}} \approx 9,9 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$ — среднее арифметическое, $\sigma \approx 0,5$ — среднеквадратичное отклонение, $N = 56$. Отсюда

$$R_X = (9,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}, \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Таблица 3: Результаты измерений \mathcal{E}_X

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
		0,22, 46	0,35, 72	0,50, 102	0,60, 123	0,70, 145	0,85, 175	1,07, 220	1,07, 220
$\mathcal{E}_X, \text{ мкВ}$									
1	0.1	-8	-10	-14	-16	-20	-25	-29	-28
2	0.3	-19	-31	-45	-54	-62	-75	-96	-94
3	0.6	-38	-62	-89	-106	-127	-152	-188	-192
4	0.9	-55	-87	-122	-151	-173	-209	-262	-277
5	1.2	-68	-106	-151	-183	-213	-256	-324	-342
6	1.5	-76	-120	-169	-205	-239	-289	-364	-389
7	1.8	-82	-128	-191	-219	-257	-310	-389	-418
8	2.1	-86	-134	-190	-229	-268	-321	-404	-434

Таблица 4: Результаты измерений R_X

N	B, Тл	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0	I, U_0
		0,22, 46	0,35, 72	0,50, 102	0,60, 123	0,70, 145	0,85, 175	1,07, 220	1,07, 220
		$R_X \cdot 10^{-4}, \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$							
1	0.17	4.7	3.7	3.6	3.5	3.7	3.8	3.5	3.4
2	0.19	10.0	10.3	10.4	10.4	10.3	10.2	10.4	10.2
3	0.37	10.3	10.5	10.6	10.5	10.8	10.6	10.4	10.7
4	0.53	10.4	10.3	10.1	10.4	10.3	10.2	10.2	10.7
5	0.69	9.9	9.7	9.6	9.7	9.7	9.6	9.7	10.2
6	0.8	9.5	9.4	9.3	9.4	9.4	9.4	9.4	10.0
7	0.86	9.5	9.4	9.8	9.3	9.4	9.3	9.3	10.0
8	0.92	9.3	9.2	9.1	9.1	9.2	9.0	9.0	9.7

7. 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.

8. Теперь определим концентрацию электронов:

$$n = \frac{1}{R_X e} \pm \frac{1}{R_X e} \frac{\sigma_{R_X}}{R_X} \approx (6,3 \pm 0,1) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

9. При токе через образец $I = 1 \text{ мА}$ по формуле (2) посчитаем удельную проводимость:

$$\sigma \approx (80,8 \pm 0,6) \cdot \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

10. По формуле посчитаем подвижность электронов:

$$b = \frac{\sigma}{en} \approx (797 \pm 11) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

11. Построим итоговую таблицу:

$R_X,$ $10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Знак носителей	$n,$ $10^{21}, \text{ м}^{-3}$	$\sigma,$ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$b,$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
$9,9 \pm 0,2$	—	$6,3 \pm 0,1$	$80,8 \pm 0,6$	797 ± 11

4. Вывод

Мы изучили явление эффекта Холла в полупроводниках, измерили для нашего образца (Германий) такие величины как постоянная Холла, концентрацию электронов, удельную проводимость и подвижность электронов.

Допуская существование добавок в материале образца, результаты вполне соответствуют табличным.