

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.3.4 Эффект Холла в полупроводниках

Автор:
Тихонов Дмитрий Романович,
студент группы Б01-206

Долгопрудный, 2023

1 Введение

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

В работе используются: электромагнит с источником питания GPR, батарейка 1,5 В, амперметр, реостат, цифровой вольтметр В7-78/1, милливексметр, образцы легированного германия.

2 Теоретические сведения

Движение электронов в некоторой кристаллической решётке под действием внешнего электрического поля можно описать следующей формулой:

$$\langle \mathbf{v} \rangle = -b\mathbf{E}, \quad (1)$$

где $\langle \mathbf{v} \rangle$ – некоторая средняя скорость электронов, а b – величина, называемая *подвижностью электронов*.

Плотность тока равна

$$\mathbf{j} = en\langle \mathbf{v} \rangle = enb\mathbf{E}. \quad (2)$$

Отсюда, находим выражение для проводимости:

$$\sigma = enb. \quad (3)$$

Если в проводнике присутствует внешнее магнитное поле \mathbf{B} , то на электроны действует сила Лоренца, равная

$$\mathbf{F}_L = -e(\mathbf{E} + \langle \mathbf{v} \rangle \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

Рассмотрим проводник с током в форме прямоугольного параллелепипеда со сторонами L , a и l , параллельными осям x , y и z соответственно, в котором течет ток I вдоль оси x (рис. 1).

Пусть поле \mathbf{E} направлено против оси x , поле \mathbf{B} – вдоль оси y . Тогда дрейфовая скорость электронов будет направлена против оси x и часть силы Лоренца, зависящая от магнитного поля, направлена вдоль оси z и равна

$$F_B = ebEB \quad (5)$$

Эта сила заставляет электроны смещаться в направлении оси z . Из-за этого в установившемся режиме возникает противоположно направленное поле E_z , компенсирующее силу F_B :

$$E_z = bEB = \frac{bjB}{\sigma} = \frac{IB}{enS} = \frac{IB}{e \cdot n \cdot al} \quad (6)$$

Поле E_z создаёт ЭДС Холла, равную

$$\mathcal{E}_x = \frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a}, \quad (7)$$

Константа R_x называется *постоянной Холла* и равна

$$R_x = \frac{1}{ne}. \quad (8)$$

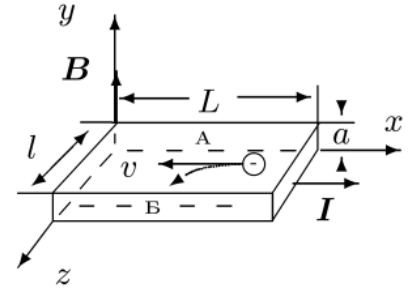


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

3 Методика измерений и используемое оборудование

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 2.

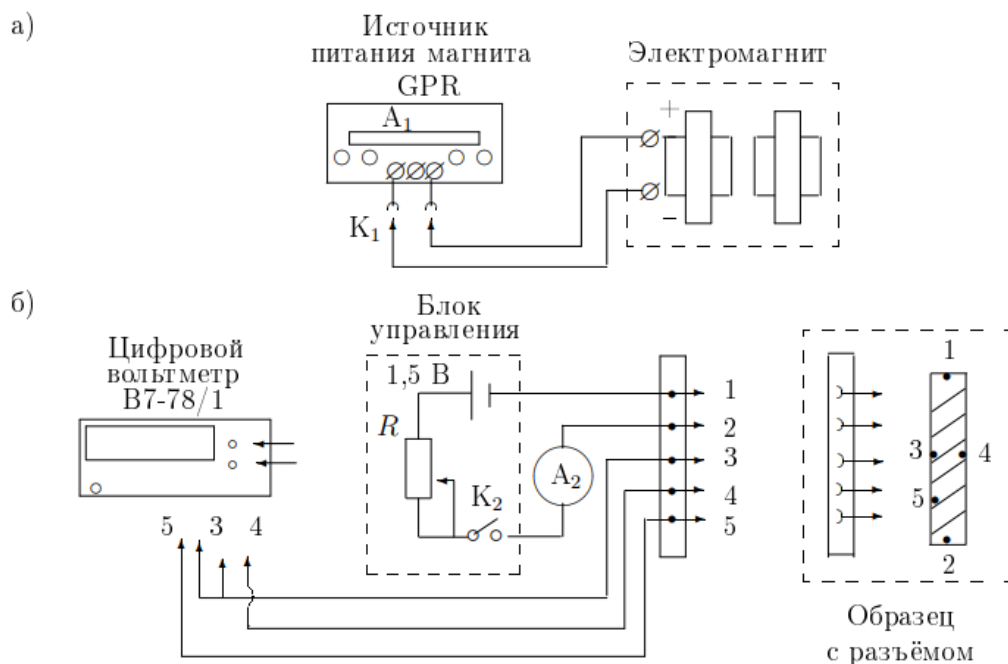


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита (рис. 2а) создается постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания. Ток измеряется амперметром источника питания A_1 . Разъём K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита. Градуировка магнита проводится при помощи милливеберметра.

Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 2б), подключается к батарее. При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца течёт 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. Исключить влияние омического падения напряжения можно, 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 остаётся неизменным. От него следует отсчитывать величину ЭДС Холла с учётом знака: $= U_{34} \pm U_0$. При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

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

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

$$\sigma = I \cdot L_{35} / (U_{35} \cdot a \cdot l), \quad (9)$$

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

4 Результаты измерений и обработка данных

4.1 Градуировка электромагнита

Была исследована зависимость индукции $\Delta\Phi$ магнитного поля в зазоре электромагнита от тока через обмотки магнита. Для вычисления индукции B была применена формула

$$B = \frac{\Delta\Phi}{SN}, \quad (10)$$

где $\Delta\Phi$ - разность между начальным и конечным значением потока вектора индукции, который пронизывал пробную катушку, находившуюся в зазоре электромагнита, а $SN = 75 \text{ см}^2 \cdot \text{вит}$.

Результаты измерений представлены в таблице 1. По этим данным построим график зависимости $B = f(I_M)$ (рис. 3).

$I_M, \text{ A}$	$\Delta\Phi, \text{ мВб}$	$B, \text{ Тл}$
0,19	1,0	0,13
0,39	1,9	0,25
0,60	2,8	0,37
0,80	3,7	0,49
1,00	4,5	0,60
1,20	5,1	0,68
1,60	6,1	0,81
1,80	6,5	0,87
2,00	6,8	0,91
2,12	6,9	0,92

Таблица 1: Результаты измерения зависимости $B = f(I_M)$

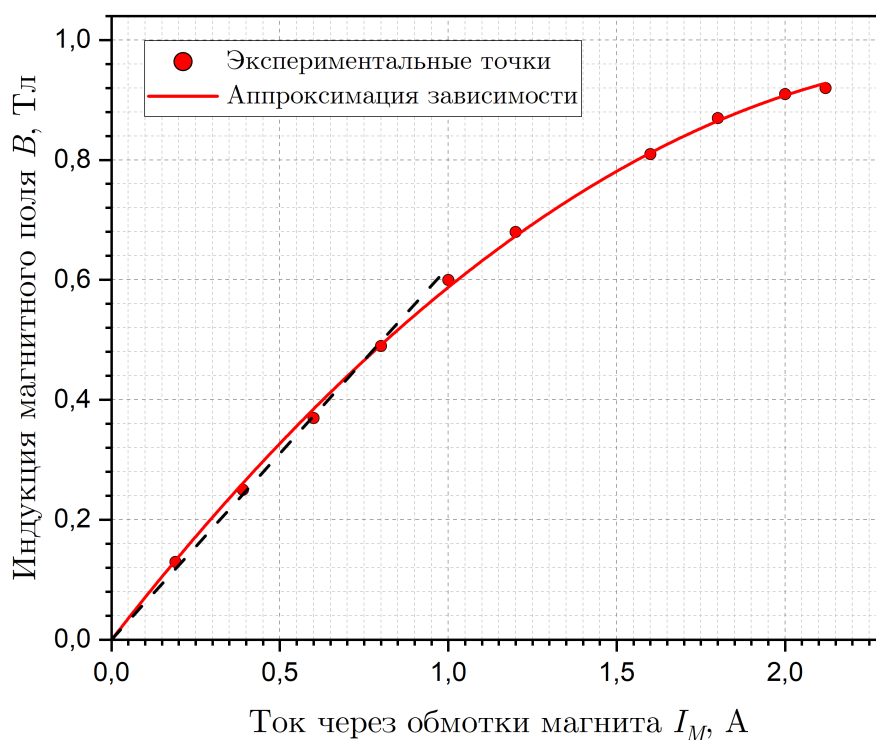


Рис. 3: График зависимости $B = f(I_M)$

4.2 Измерение ЭДС Холла

Была исследована зависимость напряжения U_{34} от тока I_M через обмотки магнита при фиксированном токе через образец. При этом в отсутствие магнитного поля вольтметр показывал напряжение U_0 , которое также зависело от тока I_M . При расчёте ЭДС Холла использовалась формула

$$\mathcal{E}_x = U_{34} - U_0. \quad (11)$$

При максимально возможном токе через образец измерение было проведено при изменённой ориентации образца. Результаты полученных значений представлены в таблице 2.

$I = 0,3 \text{ мА}$			$I = 0,4 \text{ мА}$			$I = 0,5 \text{ мА}$		
$U_0 = -17 \text{ мкВ}$			$U_0 = -23 \text{ мкВ}$			$U_0 = -29 \text{ мкВ}$		
$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,20	-36	-19	0,20	-47	-24	0,19	-59	-30
0,57	-70	-53	0,56	-91	-68	0,58	-117	-88
0,98	-105	-88	1,05	-146	-123	1,05	-187	-158
1,39	-133	-116	1,38	-175	-152	1,42	-224	-195
1,80	-149	-132	1,78	-197	-174	1,80	-248	-219
2,12	-158	-141	2,10	-208	-185	2,09	-261	-232

$I = 0,6 \text{ мА}$			$I = 0,7 \text{ мА}$			$I = 0,8 \text{ мА}$		
$U_0 = -35 \text{ мкВ}$			$U_0 = -43 \text{ мкВ}$			$U_0 = -50 \text{ мкВ}$		
$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,22	-75	-40	0,18	-80	-37	0,19	-93	-43
0,57	-140	-105	0,57	-165	-122	0,59	-193	-143
0,98	-211	-176	1,03	-256	-213	1,02	-300	-250
1,37	-265	-230	1,35	-308	-265	1,39	-357	-307
1,77	-297	-262	1,78	-350	-307	1,76	-396	-346
2,08	-314	-279	2,07	-367	-324	2,06	-418	-368

$I = 0,9 \text{ мА}$			$I = 1,0 \text{ мА}$			$I_{flip} = 1,0 \text{ мА}$		
$U_0 = -56 \text{ мкВ}$			$U_0 = -63 \text{ мкВ}$			$U_0 = -48 \text{ мкВ}$		
$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$I_M, \text{ А}$	$U_{34}, \text{ мкВ}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,19	-105	-49	0,18	-117	-54	0,20	7	55
0,59	-218	-162	0,56	-236	-173	0,57	113	161
0,98	-315	-259	1,02	-365	-302	1,04	240	288
1,37	-400	-344	1,35	-446	-383	1,44	318	366
1,81	-449	-393	1,78	-500	-437	1,83	362	410
2,06	-470	-414	2,05	-524	-461	2,04	380	428

Таблица 2: Результаты измерения зависимости напряжения U_{34} от тока I_M через обмотки магнита

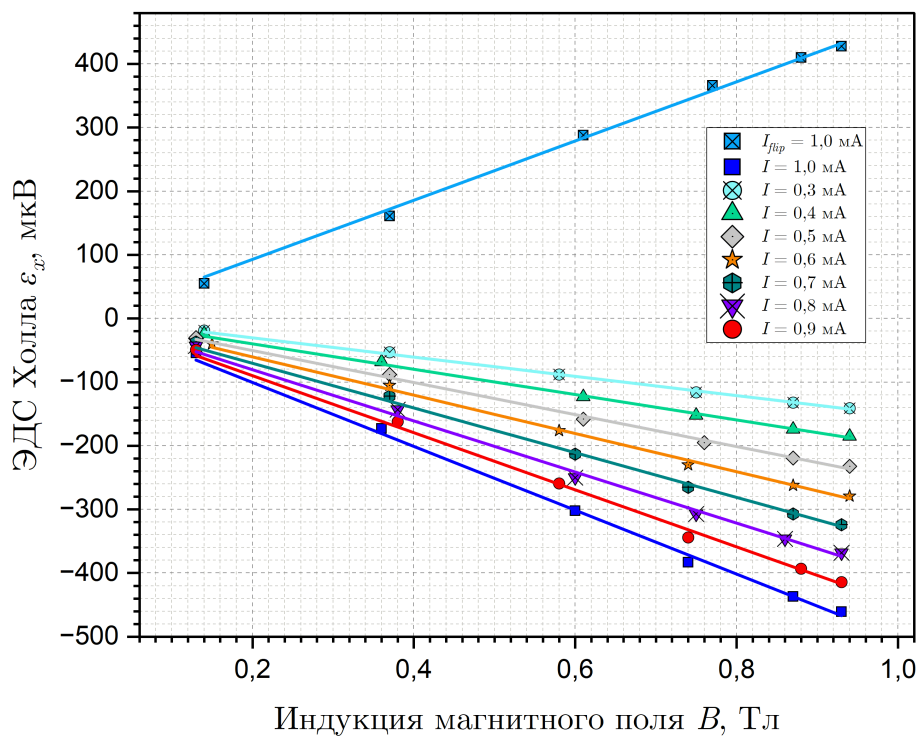
Теперь сопоставим токи в электромагните I_M с соответствующими значениями индукции магнитного поля B , воспользовавшись графиком, представленным на рис. 3. Полученные результаты занесём в таблицу 3 и построим графики зависимости $\mathcal{E}_x = f(B)$ при разных значениях тока через образец (рис. 4).

$I = 0,3 \text{ мА}$		$I = 0,4 \text{ мА}$		$I = 0,5 \text{ мА}$	
$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,14	-19	0,14	-24	0,13	-30
0,37	-53	0,36	-68	0,37	-88
0,58	-88	0,61	-123	0,61	-158
0,75	-116	0,75	-152	0,76	-195
0,87	-132	0,87	-174	0,87	-219
0,94	-141	0,94	-185	0,94	-232

$I = 0,6, \text{ мА}$		$I = 0,7 \text{ мА}$		$I = 0,8 \text{ мА}$	
$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,15	-40	0,13	-37	0,13	-43
0,37	-105	0,37	-122	0,38	-143
0,58	-176	0,60	-213	0,60	-250
0,74	-230	0,74	-265	0,75	-307
0,87	-262	0,87	-307	0,86	-346
0,94	-279	0,93	-324	0,93	-368

$I = 0,9 \text{ мА}$		$I = 1,0 \text{ мА}$		$I_{flip} = 1,0 \text{ мА}$	
$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$	$B, \text{ Тл}$	$\mathcal{E}_x, \text{ мкВ}$
0,13	-49	0,13	-54	0,14	55
0,38	-162	0,36	-173	0,37	161
0,58	-259	0,60	-302	0,61	288
0,74	-344	0,74	-383	0,77	366
0,88	-393	0,87	-437	0,88	410
0,93	-414	0,93	-461	0,93	428

Таблица 3: Результаты вычислений зависимости ЭДС Холла \mathcal{E}_x от индукции магнитного поля B

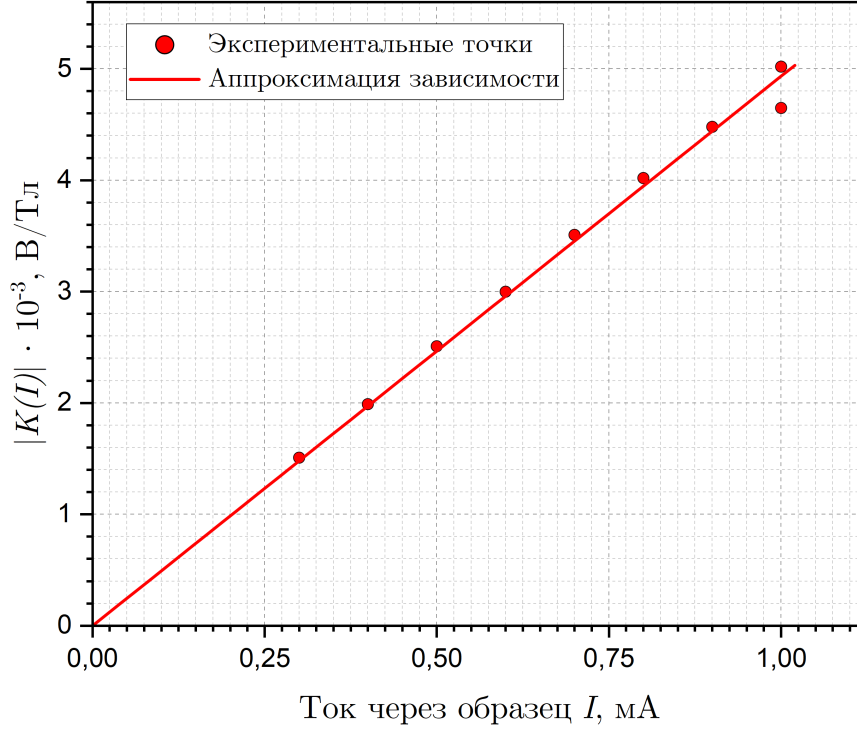
Рис. 4: Графики зависимости $\mathcal{E}_x = f(B)$

Аппроксимируем полученные данные зависимостями вида $\mathcal{E}_x = K(I) \cdot B + const$ при помощи программы *OriginPro 2023b*. Результаты аппроксимации представлены в таблице 4.

I , мА	$ K(I) \cdot 10^{-3}$, В/Тл	$\sigma_{K(I)} \cdot 10^{-3}$, В/Тл
0,3	1,51	0,01
0,4	1,99	0,02
0,5	2,51	0,03
0,6	3,00	0,03
0,7	3,51	0,04
0,8	4,02	0,05
0,9	4,48	0,05
1,0	5,02	0,05
1,0	4,65	0,05

Таблица 4: Результаты аппроксимации зависимостей $\mathcal{E}_x = f(B)$

По данным таблицы 4 был построен график зависимости $K = f(I)$ (рис. 5).

Рис. 5: График зависимости $K(I)$

Аппроксимируя полученную зависимость при помощи программы *OriginPro 2023b*, получим

$$\frac{\Delta K}{\Delta I} = (4,93 \pm 0,05) \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}. \quad (12)$$

Тогда, согласно соотношению (8), $R_x = \frac{\Delta K}{\Delta I} a$, где $a = 1,5$ мм – толщина исследуемого образца. Окончательно получим

$$R_x = (7,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}. \quad (13)$$

Отсюда, пользуясь соотношением (8), получим концентрацию носителей заряда

$$n = (0,85 \pm 0,01) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \quad (14)$$

4.3 Расчёт удельной проводимости и подвижности

По формуле (9) была рассчитана удельная проводимость нашего образца. По результатам измерений $U_{35} = 1,784$ мВ, $I = 1$ мА, $L_{35} = 3$ мм и $l = 1,7$ мм. В итоге получаем

$$\sigma = (660 \pm 10) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \quad (15)$$

Теперь, зная эти характеристики, можно рассчитать подвижность носителей заряда по следующей формуле

$$b = \frac{\sigma}{en} = (4850 \pm 100) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad (16)$$

5 Заключение

Результаты работы представлены в таблице 5.

$R_X \pm \Delta R_X,$ $10^{-3} \cdot \text{М}^3/\text{Кл}$	Знак носителя	$n \pm \Delta n,$ $10^{21} \cdot \text{М}^{-3}$	$\sigma \pm \Delta \sigma,$ $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{М}^{-1}$	$b \pm \Delta b,$ $\text{см}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$
$(7,4 \pm 0,1)$	—	$(0,85 \pm 0,01)$	(660 ± 10)	(4850 ± 100)

Таблица 5: Результаты лабораторной работы

Полученные результаты совпали с табличными по порядку. Например, полученная подвижность электронов в германии отличается от табличной ($b_{\text{табл}} = 3900 \text{ см}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$). Это может свидетельствовать о наличии примесей в исследуемом образце. Также ощутимый вклад в погрешность полученных данных могла внести зависимость характеристик исследуемого образца от температуры, которая могла значительно изменяться вследствие прохождения через образец электрического тока.