

Отчет о выполненной лабораторной работе 3.3.4

Воронин Денис, Б04-407

October 19, 2025

Эффект Холла в полупроводниках

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

В работе используются: электромагнит с источником питания GPR; цифровой вольтметр В7-65/5; батарейка 1,5 В; реостат; миллиамперметр; образцы легированного германия; измеритель магнитной индукции АТЕ-8702.

1 Теоретические сведения

Во внешнем магнитном поле \vec{B} на заряды действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{u} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с \vec{E} . Действительно, траектории частиц будут либо искривляться, либо, если геометрия проводника этого не позволяет, возникнет дополнительное электрическое поле, компенсирующее магнитную составляющую силы Лоренца. Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют **эффектом Холла**.

Связь между электрическим полем \vec{E} и плотностью тока \vec{j} в условиях эффекта Холла уже не может быть описана скалярным коэффициентом проводимости σ . Тем не менее закон Ома можно по-прежнему записать в форме

$$\vec{j} = \hat{\sigma}\vec{E}, \quad (2)$$

если под $\hat{\sigma}$ понимать **тензор проводимости**. В заданном базисе он представляется матрицей 3×3 :

$$\vec{j} = \hat{\sigma}\vec{E} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \vec{E}. \quad (3)$$

или

$$j_i = \sum_k \sigma_{ik} E_k, \quad \text{где } i, k = \{x, y, z\}. \quad (4)$$

По оси x носители будут двигаться так, как если бы магнитного поля не было: $j_x = \sigma_0 E_x$ ($j_y = j_z = 0$), где $\sigma_0 = qn\mu$ — удельная проводимость среды в отсутствие \vec{B} .

Выразим общую связь между \vec{E} и \vec{j} для случая носителей одного типа. Магнитное поле по-прежнему направим вдоль оси z , а о направлении \vec{E} и \vec{j} никаких предположений делать не будем. При движении носителей с постоянной средней скоростью сила Лоренца будет уравновешена трением со стороны среды:

$$q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - \frac{q\vec{u}}{\mu} = 0. \quad (5)$$

С учётом введённых выше обозначений этот баланс сил можно переписать как

$$\vec{E} = \frac{\vec{j}}{\sigma_0} - \frac{1}{nq} \vec{j} \times \vec{B}. \quad (6)$$

Полученное соотношение можно назвать **обобщённым законом Ома** при наличии внешнего магнитного поля. Второе слагаемое в правой части как раз отвечает эффекту Холла — возникновению поперечного направлению тока электрического поля.

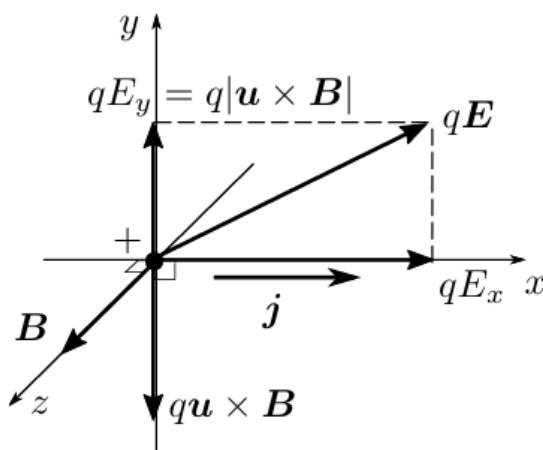


Рисунок 1: Силы, действующие на положительный носитель заряда в проводящей среде при наличии магнитного поля. Второе слагаемое в правой части как раз отвечает эффекту Холла — возникновению поперечного направлению тока электрического поля.

1.1 Мостик Холла

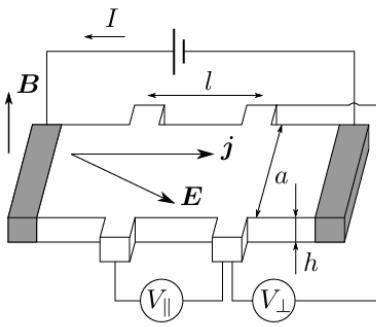


Рисунок 2: Схема для исследования влияния магнитного поля на проводящие свойства: мостик Холла

где константу

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (9)$$

называют **постоянной Холла**. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей.
Продольная напряжённость электрического поля равна

$$E_x = \rho_{xx} \cdot j_x = j_x / \sigma_0, \quad (10)$$

и падение напряжения $U_{\parallel} = E_x l$ вдоль пластинки определяется омическим сопротивлением образца $R_0 = l / (\sigma_0 ah)$:

$$U_{\parallel} = I R_0. \quad (11)$$

Интересно отметить, что несмотря на то, что тензор проводимости явно зависит от B , продольное сопротивление образца в данной геометрии от магнитного поля **не зависит**.

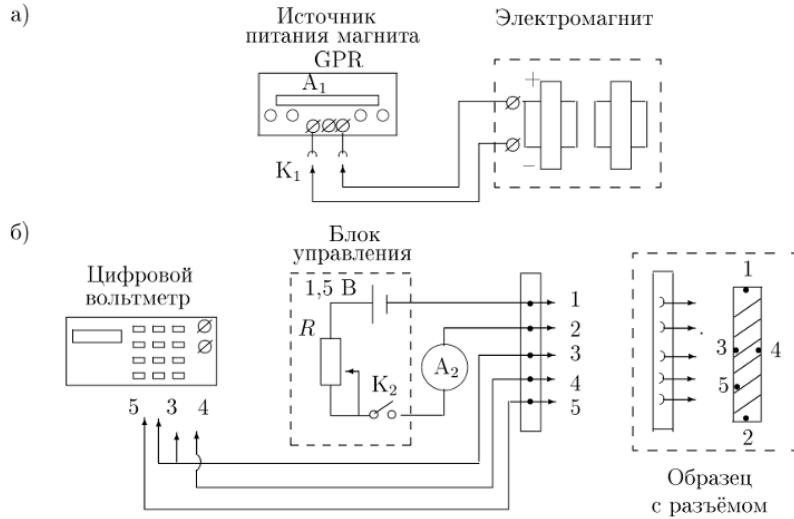


Рисунок 3: Схема установки

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром источника питания A₁. Разъём K₁ позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

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

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 остаётся неизменным. От него следует (с учётом 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.

2 Ход работы

2.1 Градуировка электромагнита

Сила тока I, А	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Магнитная индукция В, мТл	21,1	110,7	189,6	294,4	402,1	503,9	598,3

Таблица 1: Градуировка

2.2 Измерение ЭДС Холла

Проведем измерения $U_{34} = f(I_M)$ при постоянном токе через образец (всего 6–8 серий для токов в интервале 0,2–1 мА). При каждом новом значении тока через образец величина U_0 будет иметь своё значение.

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-1,98	-1,33	-0,71	-0,27	-0,091	-0,71	-0,69

Таблица 2: I = 200 мА, U = -2,09 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-2,09	-1,99	-1,12	-0,42	0,13	0,67	1,02

Таблица 3: I = 300 мА, U = -3,15 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-4	-2,67	-1,46	-0,56	0,18	0,9	1,35

Таблица 4: I = 400 мА, U = -4,12 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-5,01	-3,35	-1,85	-0,69	0,23	1,05	1,77

Таблица 5: I = 500 мА, U = -5,29 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-6,02	-3,96	-2,19	-0,82	0,27	1,25	2,07

Таблица 6: I = 600 мА, U = -6,95 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-7,09	-4,67	-2,59	-1,02	0,29	1,43	2,51

Таблица 7: I = 700 мА, U = -7,4 мВ

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-8,02	-5,34	-2,96	-1,04	0,35	1,64	2,77

Таблица 8: I = 800 мА, U = -8,44 мВ

При максимальном токе через образец (≈ 1 мА) проведем измерения $U_{34} = f(I_M)$ при другом направлении магнитного поля через образец (используем значения из последнего измерения).

Сила тока I_M , А	0	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
Напряжение, U_{34} , мВ	-8,85	-11,68	-14,36	-16,46	-18,32	-19,96	21,34

2.3 Определение характера проводимости

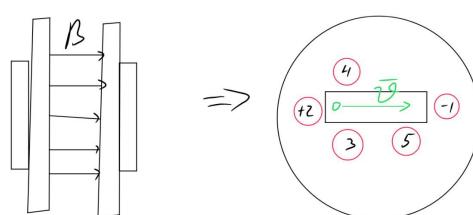


Рисунок 4: Схема установки

По правилу векторного произведения определили направление, в котором летят частицы. Из направления выяснили, что они положительные.

2.4 Определение удельной проводимости

При токе 1mA измерили падение напряжения на клеммах 3,4 установки: $U_{3,4} = 0,153$ В.
Характеристики образца: $L_{3,5} = 15\text{mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $a = 2 \text{ mm}$.

3 Обработка результатов

Построим график зависимости B от I .

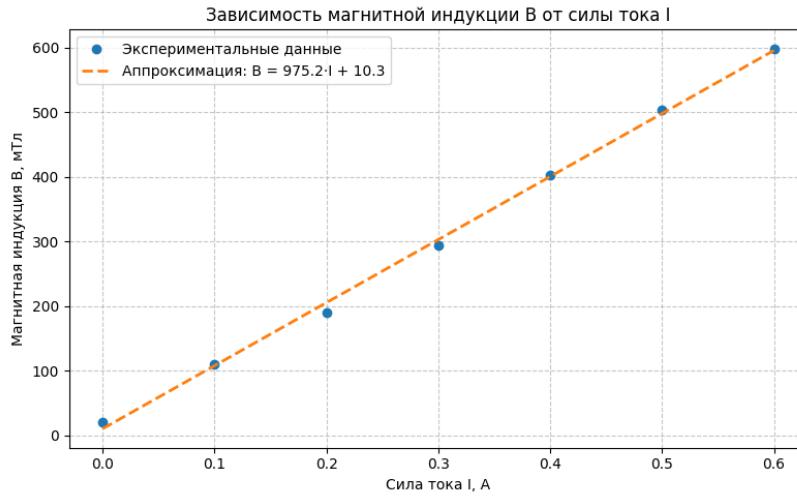


Рисунок 5: Зависимость магнитной индукции B от силы тока I

Рассчитаем ЭДС Холла и построим на одном листе семейство прямых $\varepsilon_x = f(B)$

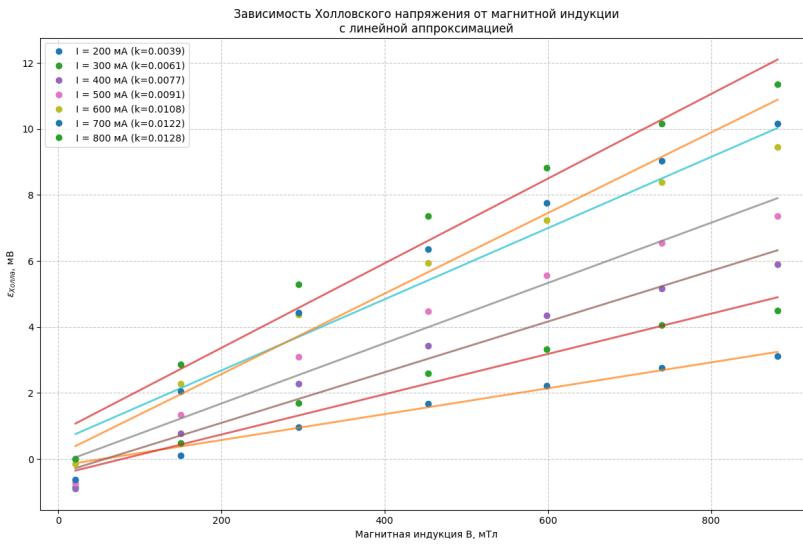


Рисунок 6: Зависимость Холловского напряжения от магнитной индукции

Ток, мА	Угловой коэффициент, мВ/мТл	R^2
200	0.003919	0.9853
300	0.006181	0.9785
400	0.007671	0.9729
500	0.009127	0.9761
600	0.01078	0.9726
700	0.012197	0.9766
800	0.012817	0.9766

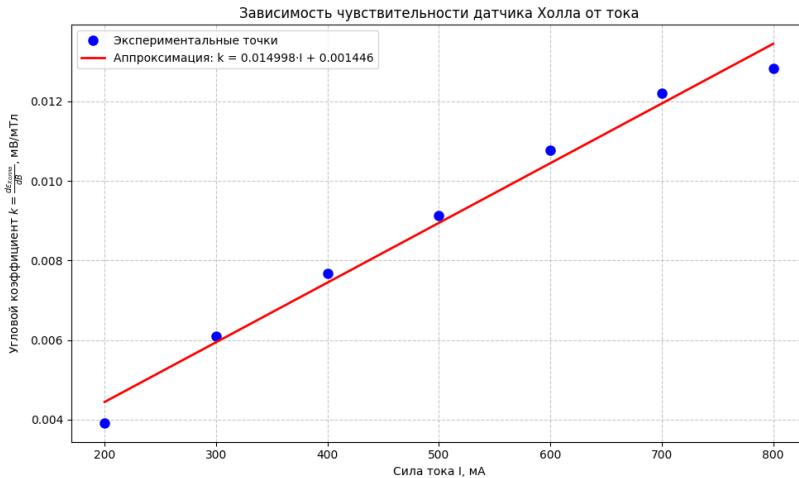


Рисунок 7: Угловой коэффициент $k = \frac{d\varepsilon}{dB}$, мВ/мТл

Рассчитаем постоянную Холла:

$$R_x = a * k = 0,015 * 0,002 = (30 \pm 2) * 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию зарядов:

$$n = \frac{1}{R_x * q} = (2,01 \pm 0,3) * 10^{23}$$

Определим удельную проводимость.

Формула:

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

Подставим значения:

$$\sigma = \frac{10^{-3} \cdot 0.015}{0.153 \cdot 0.002 \cdot 0.008} = 6.127 \pm 0,048$$

По формуле

$$b = \frac{\sigma}{en} = \sigma R_x \quad (12)$$

вычислим подвижность носителей тока в образце:

$$b = 0.021 \pm 0.001 \frac{2}{B}. \quad (13)$$

$R_x \pm \Delta R_x$ $10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$	v Знак носит.	$n \pm \Delta n$ $(\text{м}^3)^{-1}$	$\sigma \pm \Delta \sigma$ $(\Omega \cdot \text{м})^{-1}$	$b \pm \Delta b$ $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
30 ± 2	положительный	$(2,01 \pm 0,3) * 10^{23}$	$6.127 \pm 0,048$	0.021 ± 0.001

Вывод: измерил подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках. Результаты работы хорошо совпали с табличными значениями, особенно концентрация. Постоянная Холла получилась меньше, чем табличные данные. Это связано с тем, что мы не очень качественно провели градуировку, что видно также на графике.