

Лабораторная работа 3.3.4. Эффект Холла в полупроводниках.

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках посредством изучения зависимости ЭДС Холла от внешнего магнитного поля и тока, протекающего по образцу. Также изучается тип проводимости данного образца.

2 Теоретические сведения

Проводимость определяется формулой

$$\sigma = enb,$$

где n – концентрация, а b – подвижность носителей заряда (электронов и дырок). Изучая эффект Холла, можно определить концентрацию; отсюда и подвижность.

Суть эффекта Холла состоит в появлении разности потенциалов между гранями проводника с током, помещённого в магнитное поле. На рисунке 1 ЭДС между гранями А и Б. В магнитном поле на электрон действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F}_Л = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_B = e\mathbf{E} - e[\langle \mathbf{v} \rangle, \mathbf{B}].$$

Здесь \mathbf{v} – дрейфовая скорость электрона в электрическом поле. Под действием \mathbf{F}_B на торцах возникает ЭДС Холла. Бесконечному накоплению заряда на торцах препятствует $F_{Ez} = eE_z$. Из равенства её силе F_B ,

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

Тогда

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

и окончательно для ЭДС Холла:

$$\mathcal{E} = U_{AB} = -R_x \frac{IB}{a}, \quad (1)$$

$$R_x = \frac{1}{ne}. \quad (2)$$

R_x – постоянная Холла в металлах. В полупроводниках считаем, что превалирует один тип проводимости. Тогда это равенство верно.

2.1 Расчётные формулы

При расчёте калибровки магнита будет применяться формула

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

В основной части эксперимента будем использовать формулу (1).

Удельную проводимость материала можно найти по формуле

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al}, \quad (4)$$

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

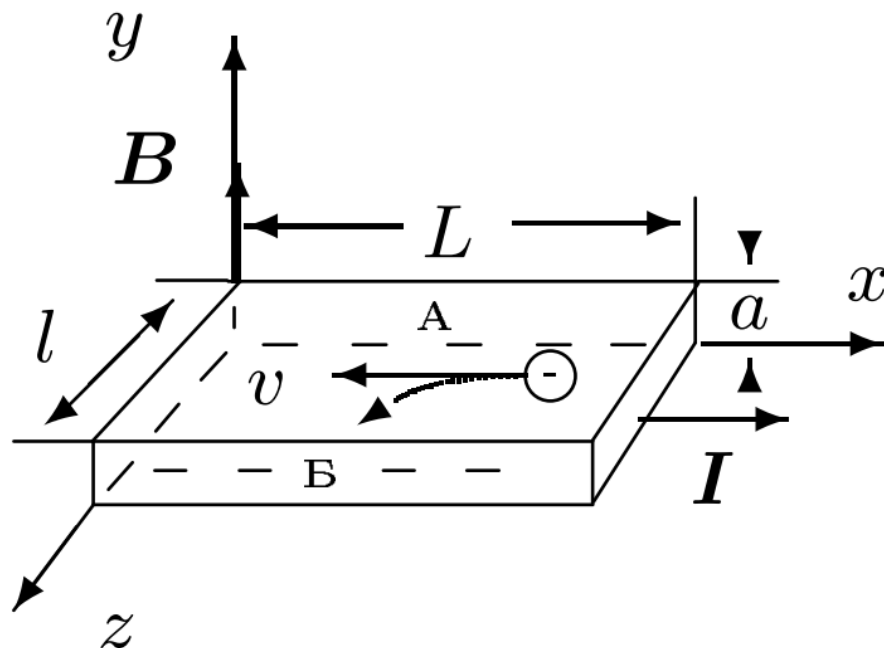


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

3 Оборудование и инструментальные погрешности

В эксперименте используется установка, изображённая на рис. 2. В зазоре электромагнита создается постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром источника питания. Градуировка магнита проводится при помощи измерителя магнитной индукции АТЕ-8702. Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 16), подключается к батарее. При замыкании ключа вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется реостатом и измеряется миллиамперметром.

Нужно заметить, что источник в ходе эксперимента выдавал достаточно низкий ток при максимальном напряжении. Причём со временем ток незначительно убывал ($\Delta I_{max} \simeq 0.01$) А/ч. Это может быть связано, например, с нагревом катушки магнита.

Электромагнит

Лабораторный источник питания

Амперметр на источнике: $\Delta = \pm 0.01$ А

Вольтметр на источнике: $\Delta = \pm 0.1$ В

Вольтметр: $\Delta = \pm 1$ μ V

Миллиамперметр: $\Delta = \pm 0.01$ mA

Милливеберметр: $\Delta = \pm 0.1$ mWb; $SN = 75$ [см²виток]

Реостат

Батарейка

Образец из легированного германия: $a = 2.2$ мм, $L_{35} = 6,0$ мм, $l = 7$ мм.

4 Результаты измерений и обработка данных

Все измерения и расчёты в СИ.

4.1 Градуировка электромагнита

По данным табл. 1 построим калибровочный график.

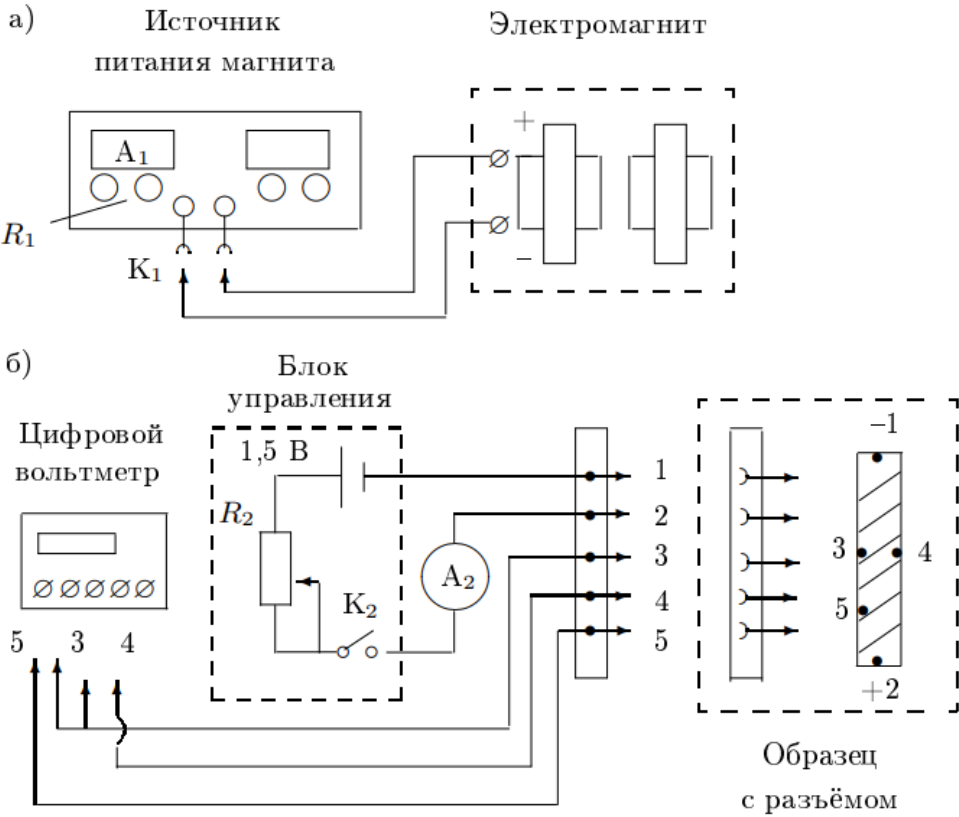


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

I_{mag}, A	$\Phi_1, мВб,$	$\Phi_2, мВб$	$B, Тл$
0	1.85	1.85	0.00
0.19	2.9	1.85	0.140
0.38	4	1.85	0.287
0.59	5.17	1.85	0.443
0.79	4.9	0.6	0.573
0.97	5.8	0.7	0.680
1.19	6.6	0.75	0.780
1.38	7.1	0.85	0.833
1.6	7.6	0.95	0.887

Таблица 1: Данные для калибровки электромагнита

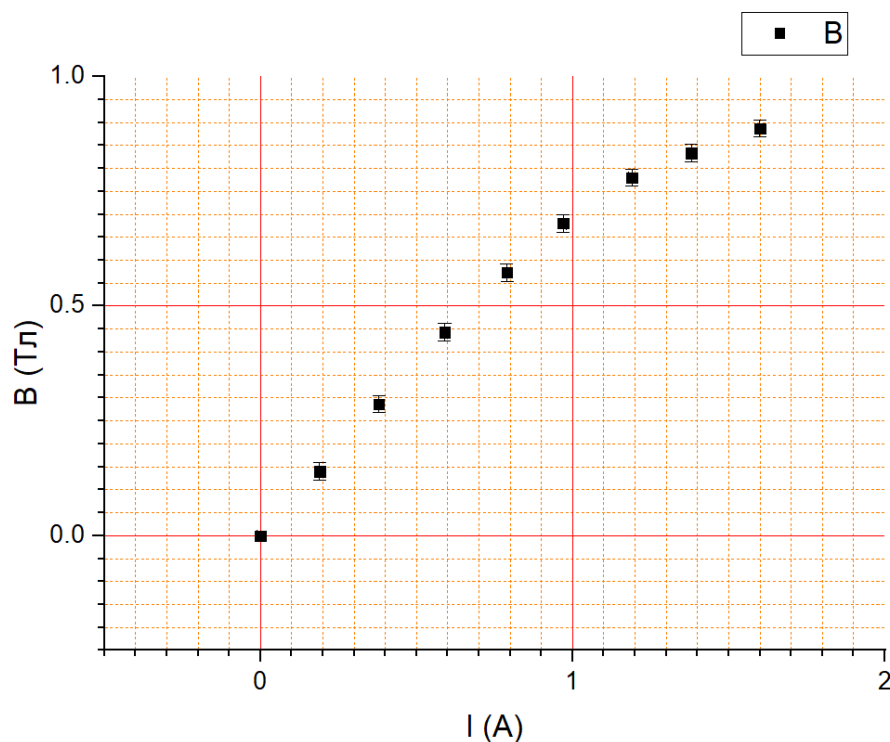


Рис. 3: Калибровочный график электромагнита

4.2 Расчёт концентрации

Снимем зависимость $U_{34}(B)$ для разных токов через образец и покажем на графике 4. Найдём угловые коэффициенты и внесём в таблицу 2.

По этим данным в свою очередь будем строить график зависимости $K(I)$, где $K = \frac{d\mathcal{E}}{dB}$ – коэффициент наклона графиков 4. Результат на рис. 5.

Т. к. $K = -R_x I/a$, то $dK/dI = -R_x/a$.

$$R_x = -a \frac{dK}{dI} = 0.00099 \pm 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Кл}. \quad (5)$$

Отсюда концентрация носителей заряда:

$$n = \frac{1}{eR_x} = 6.30 \cdot 10^{21} \pm 2 \cdot 10^{19} \text{ шт}/\text{м}^3. \quad (6)$$

Частицы – электроны, т. к. при увеличении поля знак U_{34} становится «-». Схема на рис. 6.

I , мА				R^2
0.26	Intercept	3.46E-5	6E-7	0.99673
	Slope	-1.15E-4	1E-6	
0.30	Intercept	4.14E-5	6E-7	0.99612
	Slope	-1.35E-4	1E-6	
0.40	Intercept	5.46E-5	6E-7	0.99613
	Slope	-1.79E-4	1E-6	
0.60	Intercept	8.25E-5	6E-7	0.99634
	Slope	-2.64E-4	1E-6	
0.70	Intercept	9.75E-5	6E-7	0.99565
	Slope	-3.15E-4	1E-6	
0.80	Intercept	1.12E-4	6E-7	0.99552
	Slope	-3.60E-4	1E-6	
0.90	Intercept	1.25E-4	6E-7	0.99508
	Slope	-4.04E-4	1E-6	

Таблица 2: Коэффициенты прямых графика 4

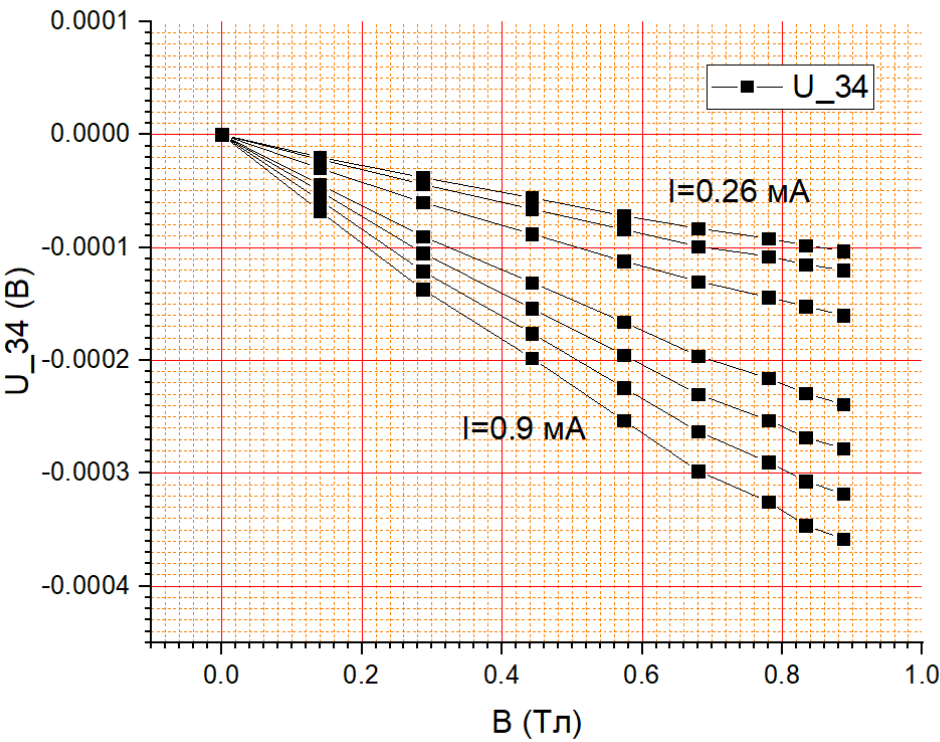


Рис. 4: Семейство графиков $U_{34}(B)$ для разных токов в образце

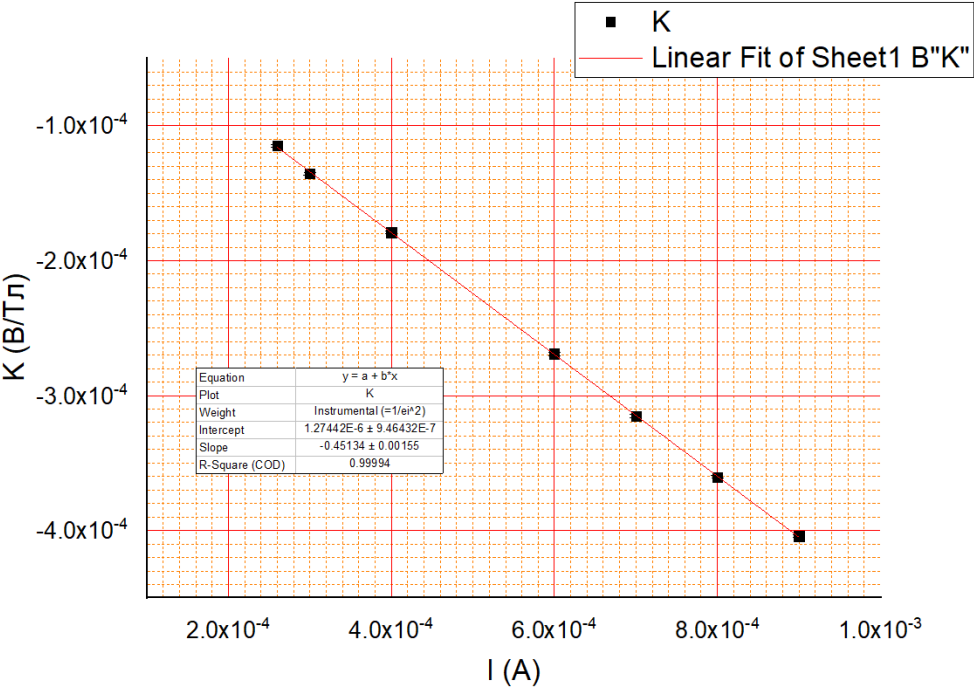


Рис. 5: Зависимость K от тока в образце

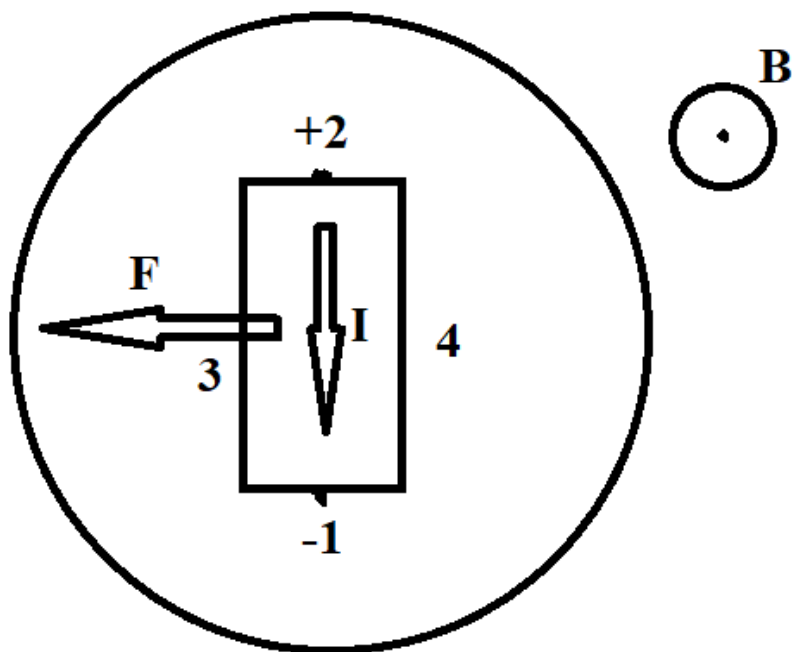


Рис. 6: Схема движения носителей заряда

4.3 Расчёт удельной проводимости

Для расчёта удельной проводимости материала сделали несколько замеров U_{35} и построили график 7, где

$$k = \lambda = \frac{\sigma al}{L_{35}} = 0.406 \pm 0.001 \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\lambda L_{35}}{al} = 184.5 \pm 0.5 \text{ Ом}^{-1}. \quad (8)$$

4.4 Расчёт подвижности

$$b = \frac{\sigma}{ne} = 0.183 \pm 0.001 \text{ м}^2/(\text{В с}) = 1830 \pm 10 \text{ см}^2/(\text{В с}) \quad (9)$$

4.5 Оценка погрешностей

Погрешность формулы (3) найдём следующим образом:

$$\sigma_B = B \frac{\sqrt{2}\sigma_\Phi}{(\Phi_1 - \Phi_2)}.$$

Угловые коэффициенты и их погрешности во всех графиках находили в Origin.

В формулах (5), (6) пренебрегаем погрешностями a и e соответственно и находим погрешность:

$$\sigma_{R_x} = R_x * \frac{\sigma_{dK/dI}}{dk/dI}.$$

Аналогично в формулах (7) и (8).

В (9) погрешность:

$$\sigma_b = b \sqrt{\frac{\sigma_\sigma^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma_n^2}{n^2}}$$

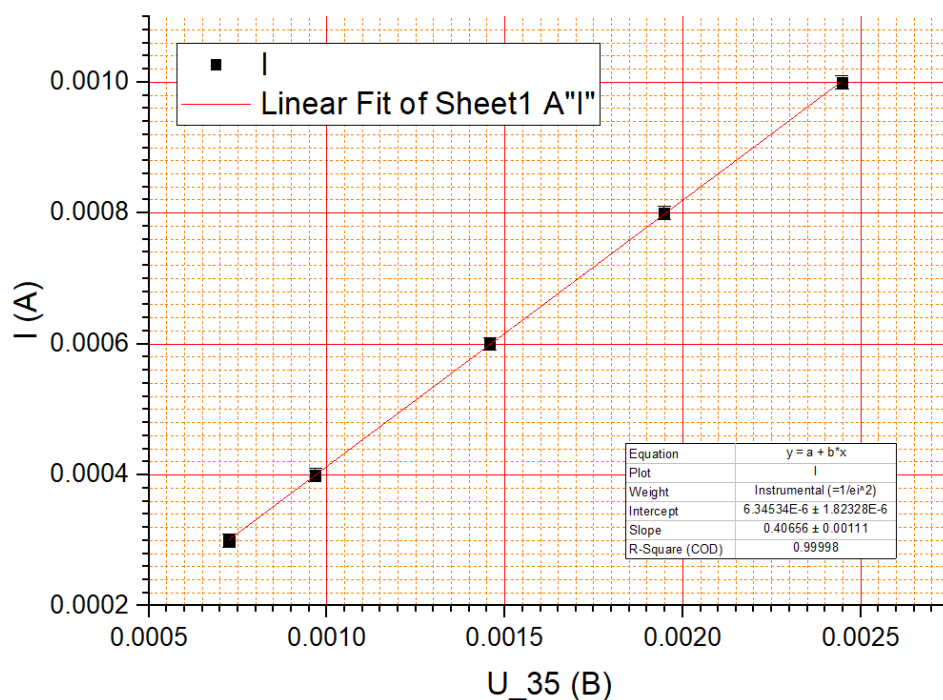


Рис. 7: График для определения удельного сопротивления

$R_x, \text{м}^3/\text{Кл}$	Знак носит.	$n, \text{шт}/\text{м}^3$	$\sigma, (\text{Ом}/\text{м})^{-1}$	$b, \text{см}^2/(\text{Вс})$
$(990 \pm 10) \cdot 10^{-6}$	« — »	$(630 \pm 2) \cdot 10^{19}$	184.5 ± 0.5	1830 ± 10

Таблица 3: Таблица результатов

5 Вывод

Исследовав эффект Холла в полупроводниках, получили значения концентрации и подвижности свободных носителей. Выяснили, что это электроны. Нашли также удельную проводимость образца.

Выполненные подсчёты очень приблизительны, т. к. реальная подвижность электронов в чистом германии $\simeq 3700 \text{ см}^2/(\text{Вс})$. Существенная неточность может быть связана с несовершенством эксперимента или с тем, что образец легирован, и поэтому подвижность отличается от табличной.

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 3 Электричество и магнетизм*, 2004
- [2] Кириченко Н.А. *Электричество и магнетизм.*, 2011
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина