

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 3.3.4
«Эффект Холла в полупроводниках»

Овсянников Михаил Александрович
студент группы Б01-001
2 курс ФРКТ

г. Долгопрудный
2021 г.

Цель работы: изучить эффект Холла, определить концентрацию и подвижность заряженных частиц в образце германия.

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

Экспериментальная установка.

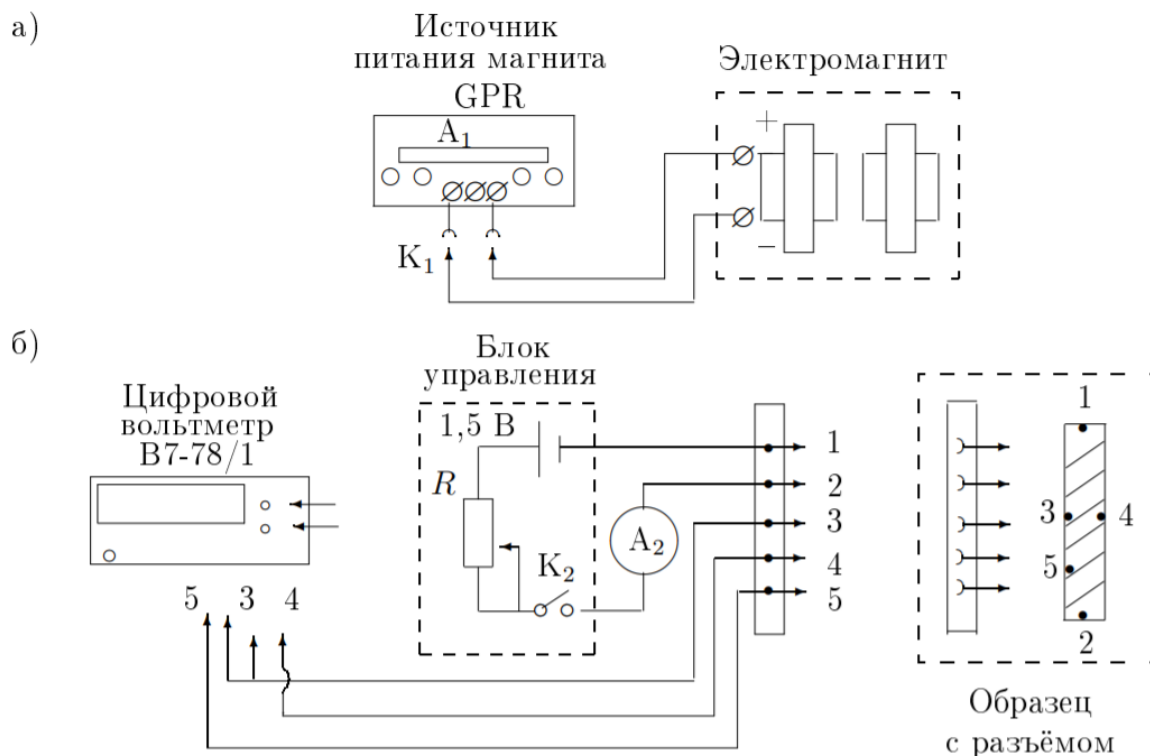


Рис. 1. Схема установки для исследования эффекта Холла

В зазоре электромагнита (Рис. 1а) создается постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания.

Образец легированного германия, смонтированный в специальном держателе (Рис. 1б), подключается к батарее ($\approx 1,5$ В).

В образце с током, помещенном 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, поэтому напряжение связано не только с эффектом Холла, но и омическим падением напряжения. Тогда измеряемая разность потенциалов в одном направлении магнитного поля равна сум-

ме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а в другом - их разности.

Можно исключить омическое падение напряжения по-другому - при фиксированном значении тока I оно является постоянным U_0 . Тогда $\mathcal{E} = U_{34} \pm U_0$.

Ход работы



Рис. 2. Образец

Зафиксируем параметры образца:

$a = 2,2$ мм - это ширина образца;

$L_{35} = 3,0$ мм - это расстояние между контактами;

$h = 2,5$ мм - это толщина образца.

Проведем градуировку электромагнита и запишем результаты в таблицу 1:

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| B , мТл | 1057 | 1032 | 978 | 935 | 845 | 730 | 611 | 491 | 338 |
| I , А | 2,0 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |

Таблица 1

Снимем вольт-амперную характеристику образца. Запишем все измерения в таблицу 2:

| | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| I , мА | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| U , мкВ | 361 | 530 | 703 | 875 | 1043 | 1220 | 1392 | 1565 | 1743 |

Таблица 2

Построим график $U(I)$:

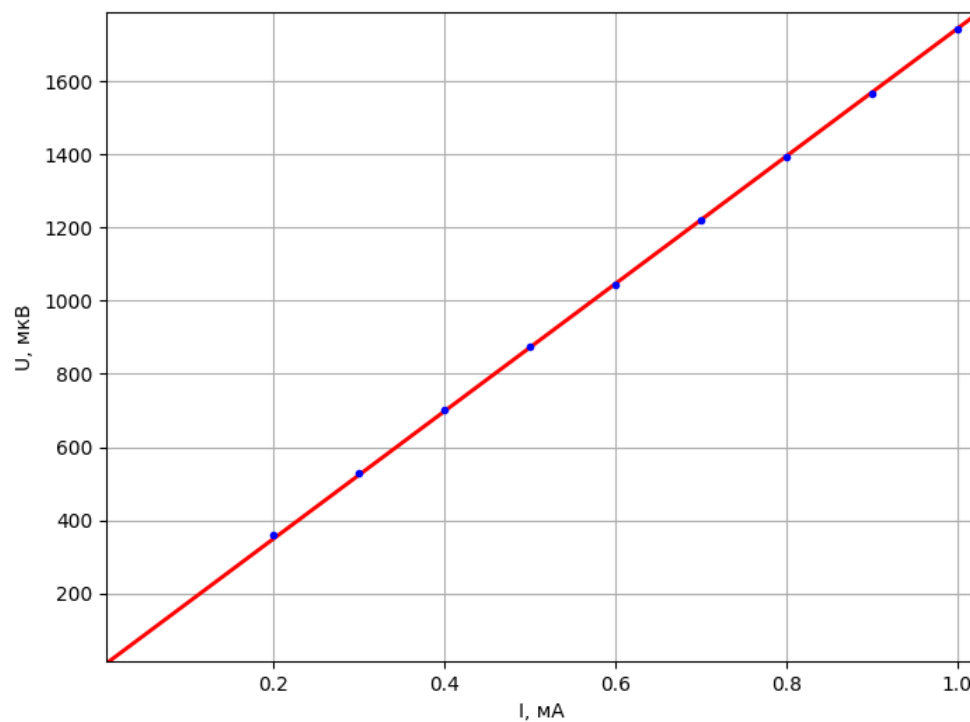


Рис. 3.

Используя МНК:

$$U(I) = R \cdot I;$$

$$R = 1,742 \text{ Ом};$$

$$\sigma_R = 0,002 \text{ Ом}.$$

Найдем удельное сопротивление ρ_0 образца германия:

$$\rho_0 = R \frac{ah}{L_{35}} = 0,312 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\sigma_{\rho_0} = \rho_0 \cdot \frac{\sigma_R}{R} = 0,0004 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\text{Итого: } \boxed{\rho_0 = (3120 \pm 4) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}}$$

Теперь найдем удельную проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho_0} = 3,2 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$.

$$\text{Ее погрешность } \sigma_\sigma = \sigma \cdot \frac{\sigma_{\rho_0}}{\rho_0} = 0,004 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}.$$

$$\text{Итого: } \boxed{\sigma = (3,200 \pm 0,004) \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}}$$

Исследуем зависимость ЭДС Холла от магнитного поля магнита при различных значениях продольного тока. Примем во внимание тот факт, что напряжение на контактах также связано с омическим падением напряжения, поэтому можно найти само ЭДС Холла двумя путями:

$$1) U_{\text{ср}} = \frac{(+U_X) - (-U_X)}{2}$$

$$2) U_{\text{ср}} = U_{34} - U_0$$

1. $I_0 = 1 \text{ мА}$, $U_0 = -38 \text{ мкВ}$.

| $I, \text{ А}$ | $B, \text{ мТл}$ | $+U_X, \text{ мкВ}$ | $-U_X, \text{ мкВ}$ | $U_{\text{ср}}$ | |
|----------------|------------------|---------------------|---------------------|--|-----------------------------|
| | | | | $\frac{(+U_X) - (-U_X)}{2}, \text{ мкВ}$ | $U_{34} - U_0, \text{ мкВ}$ |
| 2,0 | 1057 | 166 | -237 | 202 | 204 |
| 1,8 | 1032 | 157 | -230 | 194 | 195 |
| 1,6 | 978 | 149 | -221 | 185 | 187 |
| 1,4 | 935 | 137 | -210 | 174 | 175 |
| 1,2 | 845 | 121 | -193 | 157 | 159 |
| 1,0 | 730 | 99 | -172 | 136 | 137 |
| 0,8 | 611 | 75 | -148 | 112 | 113 |
| 0,6 | 491 | 49 | -122 | 86 | 87 |
| 0,4 | 338 | 23 | -95 | 59 | 61 |

Таблица 3

Как видим, значения, полученные этими двумя способами, достаточно близки друг к другу.

Строим график $\mathcal{E}_X(B) = U_{\text{ср}}(B)$.

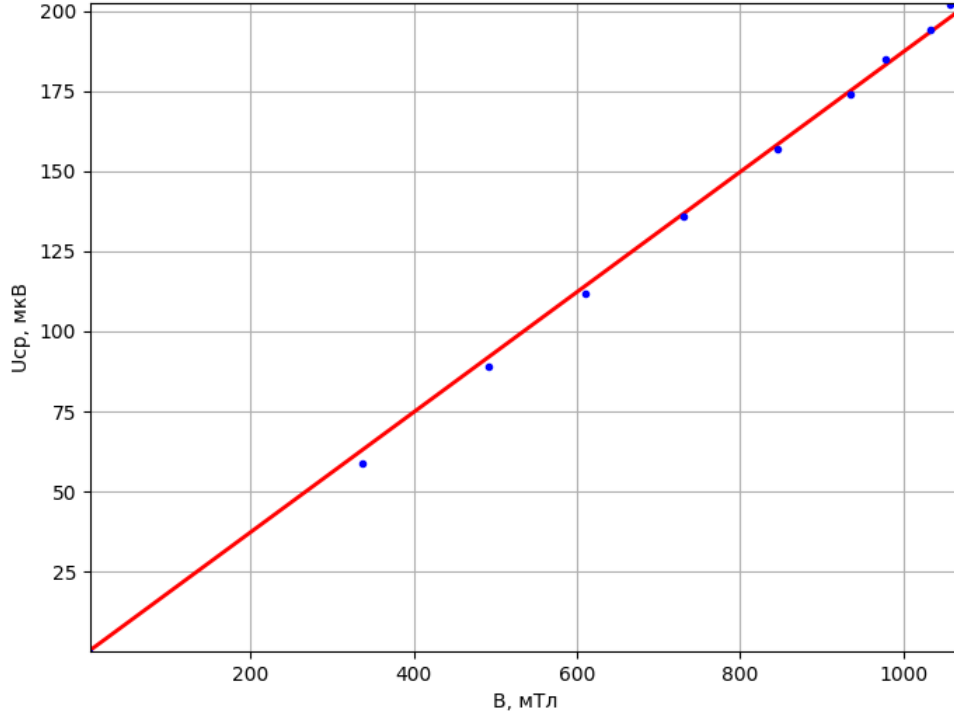


Рис. 4.

Используя МНК, получаем:

$$\mathcal{E}_X = \frac{I_0 B}{nea} = R_X \cdot \frac{I_0 B}{a} = k_1 B.$$

$$k_1 = 18,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{В}}{\text{Тл}} = 18,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}$$

$$\sigma_{k_1} = 0,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}.$$

Откуда получаем:

$$n = \frac{I_0}{k_1 ea} = 1,51 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$\sigma_n = n \cdot \frac{\sigma_{k_1}}{k_1} = 0,01 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$n = (1,51 \pm 0,01) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$R_X = \frac{ak_1}{I_0} = 414 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$\sigma_{R_X} = R_X \cdot \frac{\sigma_{k_1}}{k_1} = 2 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$R_X = (414 \pm 2) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

Найдем подвижность частиц μ из уравнения $\sigma = ne\mu$:

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} = 1,32 \cdot 10^2 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\sigma_\mu = \mu \sqrt{\left(\frac{\sigma_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = 0,01 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\mu = (1,32 \pm 0,01) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

2. $I_0 = 0,5 \text{ мА}$, $U_0 = -17 \text{ мкВ}$.

| $I, \text{ А}$ | $B, \text{ мТл}$ | $+U_X, \text{ мкВ}$ | $-U_X, \text{ мкВ}$ | $U_{\text{ср}}$ | |
|----------------|------------------|---------------------|---------------------|--|-----------------------------|
| | | | | $\frac{(+U_X) - (-U_X)}{2}, \text{ мкВ}$ | $U_{34} - U_0, \text{ мкВ}$ |
| 2,0 | 1057 | 85 | -120 | 103 | 102 |
| 1,8 | 1032 | 82 | -115 | 99 | 99 |
| 1,6 | 978 | 77 | -110 | 94 | 94 |
| 1,4 | 935 | 71 | -105 | 88 | 88 |
| 1,2 | 845 | 63 | -96 | 80 | 80 |
| 1,0 | 730 | 52 | -85 | 69 | 69 |
| 0,8 | 611 | 40 | -73 | 57 | 57 |
| 0,6 | 491 | 26 | -60 | 43 | 43 |
| 0,4 | 338 | 13 | -47 | 30 | 30 |

Таблица 4

Опять же, значения, полученные двумя способами, почти совпадают.

Строим график $\mathcal{E}_X(B) = U_{\text{ср}}(B)$.

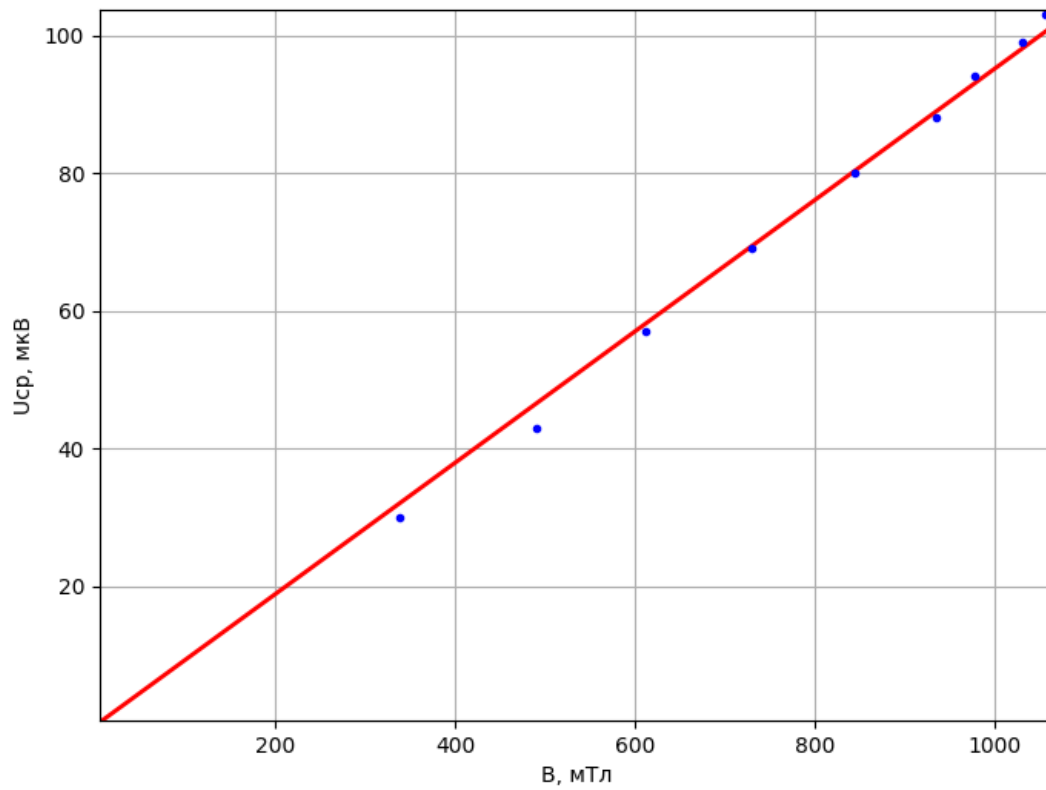


Рис. 5.

Из МНК:

$$\mathcal{E}_X = k_2 B.$$

$$k_2 = 9,53 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\sigma_{k_2} = 0,05 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Значит:

$$n = \frac{I_0}{k_2 e a} = 1,49 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$\sigma_n = n \cdot \frac{\sigma_{k_2}}{k_2} = 0,01 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$R_X = \frac{a k_2}{I_0} = 419 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$\sigma_{R_X} = R_X \cdot \frac{\sigma_{k_2}}{k_2} = 2 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$n = (1,49 \pm 0,01) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$R_X = (419 \pm 2) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

Найдем подвижность частиц μ из уравнения $\sigma = n e \mu$:

$$\mu = \frac{\sigma}{n e} = 1,34 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\sigma_\mu = \mu \sqrt{\left(\frac{\sigma_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = 0,01 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\mu = (1,34 \pm 0,01) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

3. $I_0 = 0,3 \text{ мА}$, $U_0 = -10 \text{ мкВ}$.

| $I, \text{ А}$ | $B, \text{ мТл}$ | $+U_X, \text{ мкВ}$ | $-U_X, \text{ мкВ}$ | $U_{\text{ср}}$ | |
|----------------|------------------|---------------------|---------------------|--|-----------------------------|
| | | | | $\frac{(+U_X) - (-U_X)}{2}, \text{ мкВ}$ | $U_{34} - U_0, \text{ мкВ}$ |
| 2,0 | 1057 | 52 | -72 | 62 | 62 |
| 1,8 | 1032 | 50 | -69 | 60 | 60 |
| 1,6 | 978 | 47 | -66 | 57 | 57 |
| 1,4 | 935 | 44 | -63 | 54 | 54 |
| 1,2 | 845 | 39 | -58 | 49 | 49 |
| 1,0 | 730 | 32 | -52 | 42 | 42 |
| 0,8 | 611 | 24 | -44 | 35 | 34 |
| 0,6 | 491 | 17 | -36 | 27 | 27 |
| 0,4 | 338 | 8 | -28 | 18 | 18 |

Таблица 5

И снова значения, полученные двумя способами, почти совпадают.

Строим график $\mathcal{E}_X(B) = U_{\text{ср}}(B)$.

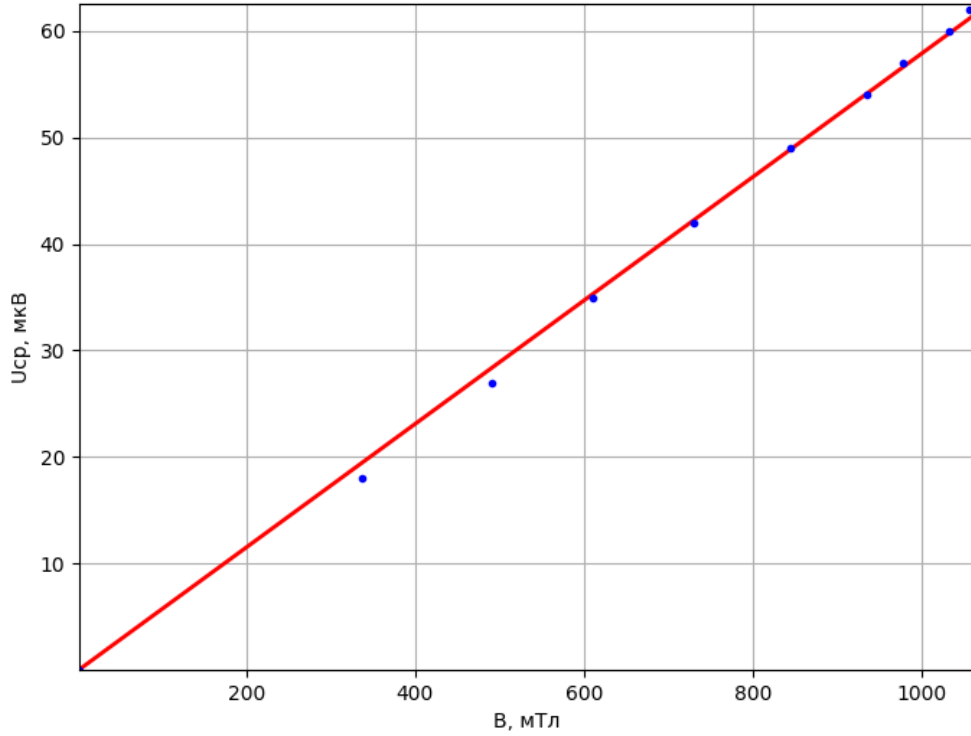


Рис. 6.

С помощью МНК получаем следующее:

$$\mathcal{E}_X = k_3 B.$$

$$k_3 = 5,80 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\sigma_{k_3} = 0,02 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Следовательно:

$$n = \frac{I_0}{k_3 e a} = 1,47 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$\sigma_n = n \cdot \frac{\sigma_{k_3}}{k_3} = 0,01 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$n = (1,47 \pm 0,01) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$R_X = \frac{a k_3}{I_0} = 425 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$\sigma_{R_X} = R_X \cdot \frac{\sigma_{k_3}}{k_3} = 2 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$R_X = (425 \pm 2) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

Найдем подвижность частиц μ из уравнения $\sigma = n e \mu$:

$$\mu = \frac{\sigma}{n e} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\sigma_\mu = \mu \sqrt{\left(\frac{\sigma_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = 0,01 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\mu = (1,36 \pm 0,01) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$I_0 = 0,3 \text{ MA}$$

$$U_0 = -0,010 \text{ MB}$$

| I, A | R, MOM | $+U_x, \text{MB}$ | $-U_x, \text{MB}$ | U_0, MB |
|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 2,0 | 1057 | 0,052 | -0,072 | 0,062 |
| 1,8 | 1032 | 0,050 | -0,069 | 0,060 |
| 1,6 | 978 | 0,047 | -0,066 | 0,057 |
| 1,4 | 935 | 0,044 | -0,063 | 0,054 |
| 1,2 | 845 | 0,039 | -0,058 | 0,049 |
| 1,0 | 730 | 0,032 | -0,052 | 0,042 |
| 0,8 | 611 | 0,024 | -0,044 | 0,035 |
| 0,6 | 491 | 0,017 | -0,036 | 0,027 |
| 0,4 | 338 | 0,008 | -0,028 | 0,018 |

13.10.02

$$E_x = R_x \frac{dB}{a} = k B$$

$$k = 19 \cdot 10^{-4} \frac{\text{M}^2}{\text{C}} = 19 \cdot 10^{-5} \frac{\text{M}^2}{\text{C}}$$

$$k = \frac{R_x I}{a}; \quad R_x = \frac{a k}{I} = 0,418 \frac{\text{M}^2}{\text{MA}}$$

Рис. 7

Подытожим результат.

| $I_0, \text{ мА}$ | $n, 10^{16} \text{ см}^{-3}$ | $R_X, \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$ | $\mu, 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$ |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 1,51 | 414 | 1,32 |
| 0,5 | 1,49 | 419 | 1,34 |
| 0,3 | 1,47 | 425 | 1,36 |

Таблица 6

Как видим, величины, соответствующие разным экспериментам, достаточно близки друг к другу.

$$\bar{n} = 1,49 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \quad \sigma_{\bar{n}} = \sqrt{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{n_3}^2} = 0,02 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$R_X = \overline{R_X} = 419 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}} \quad \sigma_{R_X} = \sqrt{\sigma_{R_X^1}^2 + \sigma_{R_X^2}^2 + \sigma_{R_X^3}^2} = 4 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}};$$

$$\bar{\mu} = 1,34 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}} \quad \sigma_{\bar{\mu}} = \sqrt{\sigma_{\mu_1}^2 + \sigma_{\mu_2}^2 + \sigma_{\mu_3}^2} = 0,02 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}.$$

Вывод: в работе был исследован эффект Холла в полупроводнике, а именно в образце германия. Для него были найдены следующие параметры:

- 1) удельное сопротивление $\rho_0 = (3120 \pm 4) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$;
- 2) удельная проводимость $\sigma = (3,200 \pm 0,004) (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$;
- 3) концентрация носителей заряда $n = (1,49 \pm 0,02) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- 4) постоянная Холла $R_X = (419 \pm 4) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$;
- 5) подвижность заряженных частиц $\mu = (1,34 \pm 0,02) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$.

Все ошибки связаны с неточностью измерений и несовершенством техники измерения.