

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, миллиамперметр, образцы легированного германия.

Экспериментальная установка.

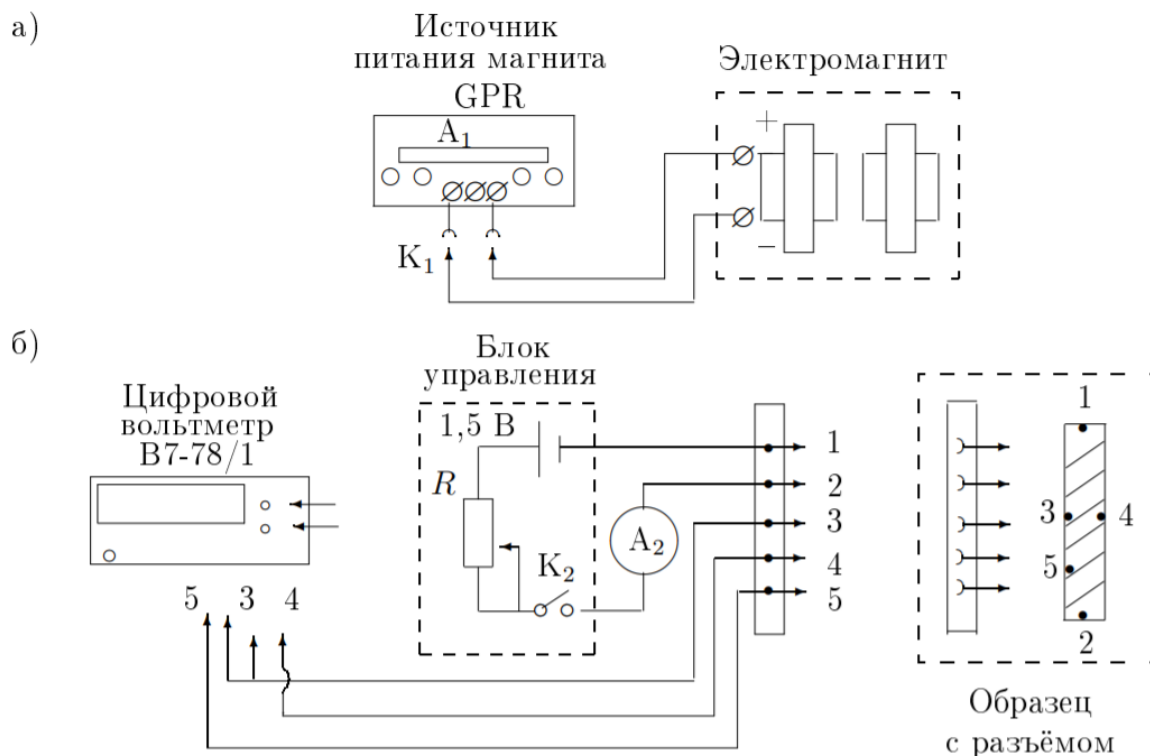


Рис. 1. Схема установки для исследования эффекта Холла

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 $U(I)$:

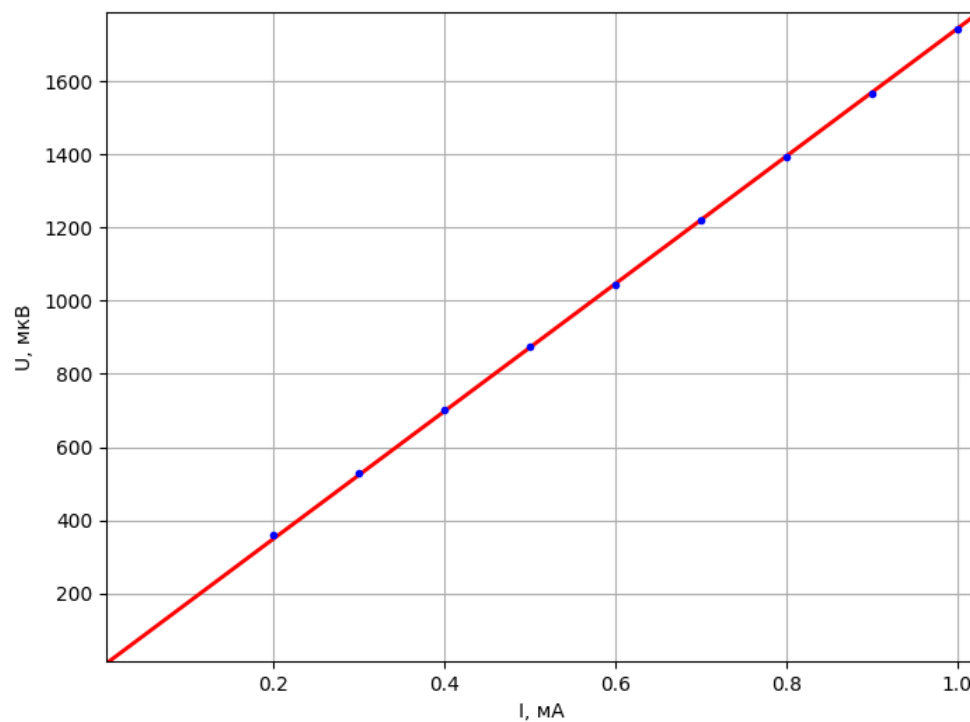


Рис. 3.

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

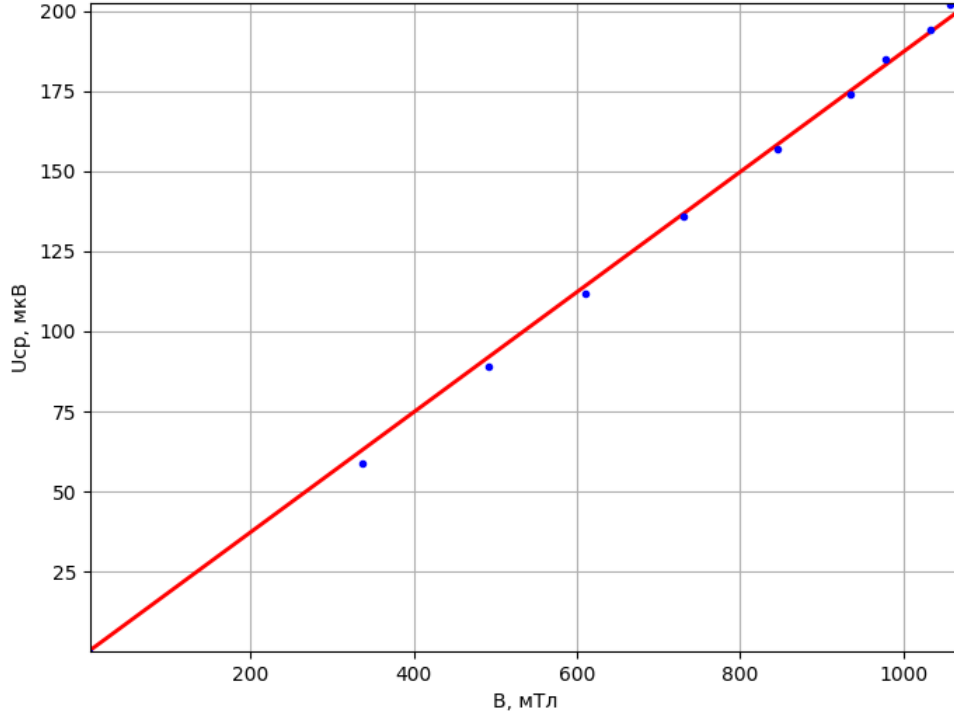


Рис. 4.

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

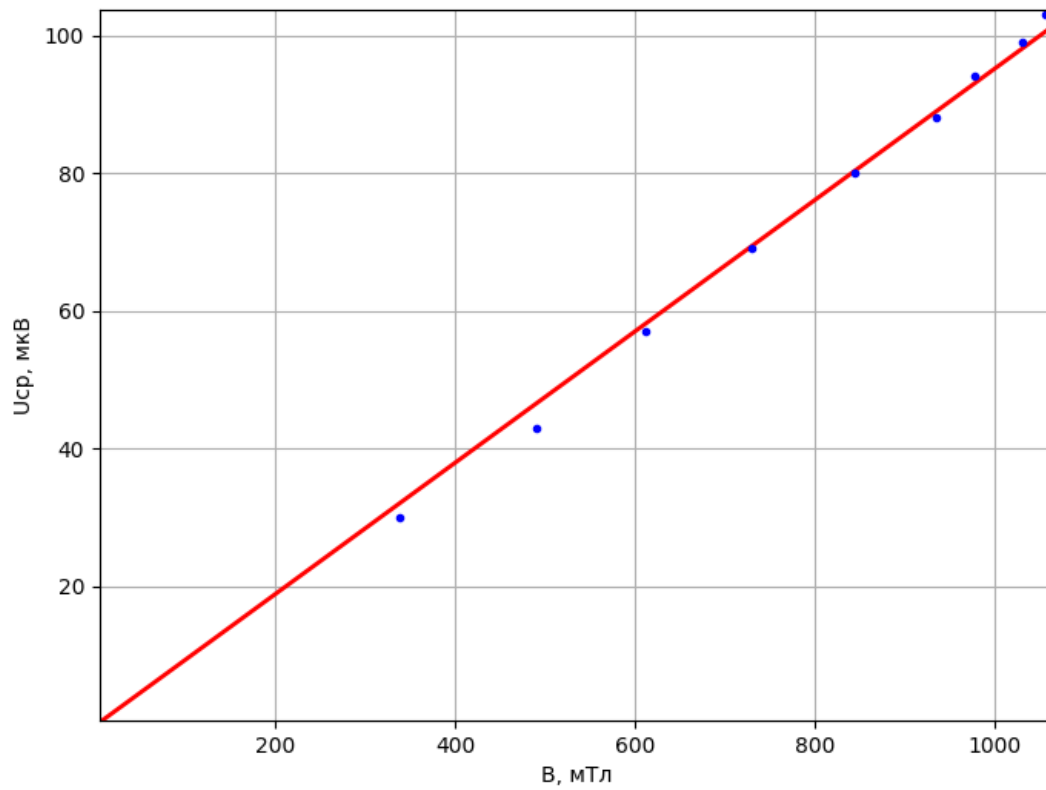


Рис. 5.

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

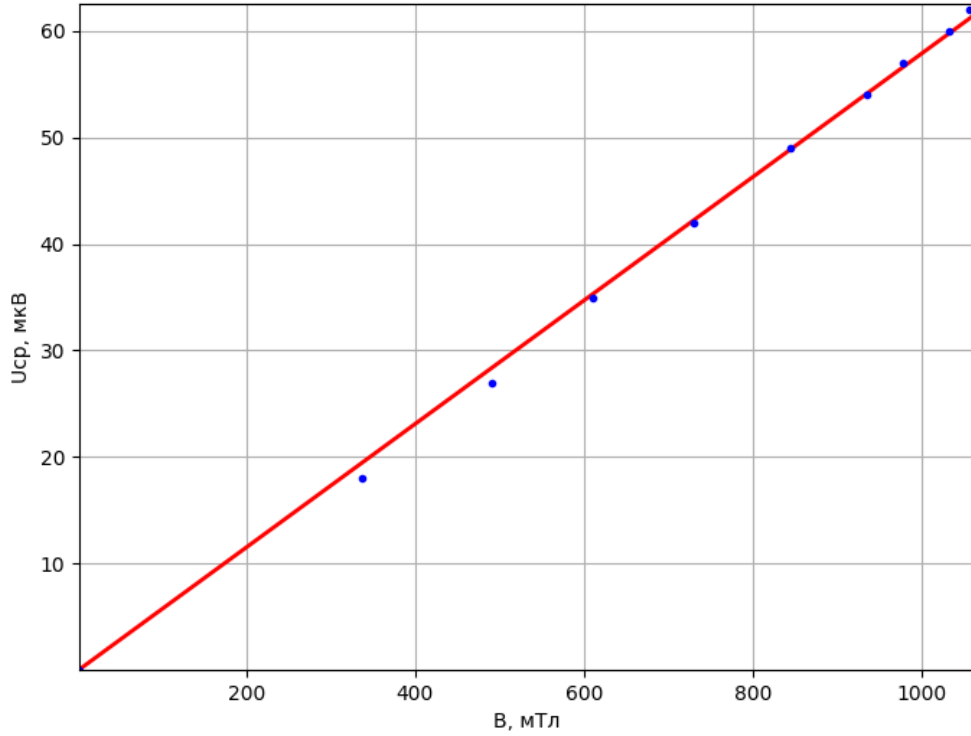


Рис. 6.

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.

$$\begin{aligned} \bar{n} &= 1,49 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} & \sigma_{\bar{n}} &= \sqrt{\sigma_{n_1}^2 + \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{n_3}^2} = 0,02 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}; \\ R_X &= \overline{R_X} = 419 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}} & \sigma_{R_X} &= \sqrt{\sigma_{R_X^1}^2 + \sigma_{R_X^2}^2 + \sigma_{R_X^3}^2} = 4 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}; \\ \bar{\mu} &= 1,34 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}} & \sigma_{\bar{\mu}} &= \sqrt{\sigma_{\mu_1}^2 + \sigma_{\mu_2}^2 + \sigma_{\mu_3}^2} = 0,02 \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}. \end{aligned}$$

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) постоянна Холла $R_X = (419 \pm 4) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$;
- 5) подвижность заряженных частиц $\mu = (1,34 \pm 0,02) \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$.

Все ошибки связаны с неточностью измерений и несовершенством техники измерения.