

# Лабораторная работа 3.3.4

## Эффект Холла в полупроводниках

Симанкович Александр  
Б01-104

07.09.2022

### Цель работы

Проверка эффекта Холла в полупроводниках. Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

### Оборудование и приборы

Электромагнит с регулируемым источником питания GPR-11H30D; вольтметр В7-78/1; миллиамперметр М2020; милливольтметр М119 и миллитесламетр АКТАКОМ АТЕ-8702; источник питания (1,5 В); образцы легированного германия.

### Теоретическое введение

Во внешнем магнитном поле  $B$  на заряды действует сила Лоренца:

$$F = qE + qu \times B.$$

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

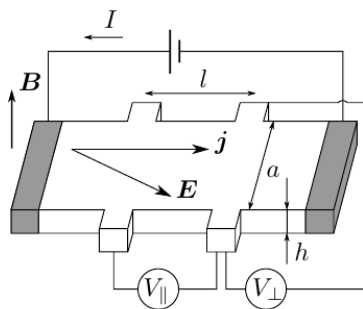


Рис. 1: Схема мостика Холла

- В данной работе для проверки эффекта Холла будем использовать мостик Холла (см. рис. 1).
- Для поперечного (холловского) напряжения получаем:

$$U_{\perp} = E_y a = \rho_{yx} \cdot j_x a = \frac{j_x B}{nq}.$$

Учитывая, что  $j_x = \frac{I}{ah}$ , получаем:

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} \cdot I = R_H \cdot \frac{B}{h} \cdot I, \quad (1)$$

где  $R_H = \frac{1}{nq}$  – постоянная Холла.

Для продольной составляющей напряжения:

$$U_{\parallel} = E_x l = j_x / \sigma_0 l = I R_0,$$

где  $R_0 = \frac{l}{\sigma_0 ah}$ .

$$\sigma_0 = \frac{I \cdot l}{U_{35} \cdot h \cdot a}. \quad (2)$$

## Экспериментальная установка

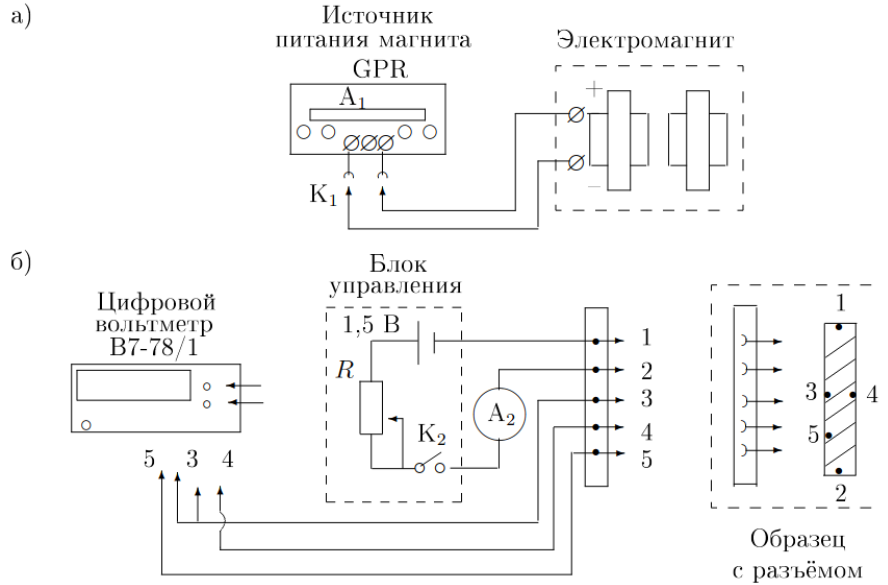


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита (см. рис. 2) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром  $A_1$ .

Градуировка электромагнита проводится при помощи милливещерметра и миллитесламетра.

Прямоугольный образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (см. рис. 2), подключается к источнику питания ( $\approx 1,5$  В). При замыкании ключа  $K_2$  вдоль длинной стороны образца (контакты 3, 5) течёт ток, величина которого регулируется реостатом  $R_2$  и измеряется миллиамперметром  $A_2$ .

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 могут не лежать на эквипотенциали, для устранения этого эффекта будем измерять начальное значение напряжения  $U_0$  (при выключенном магните) в каждой серии измерений.

# Ход работы

## Градуировка электромагнита

Проведем градуировку электромагнита. Для этого измерим зависимость  $B(I)$ , где  $B$  – модуль вектора индукции магнита,  $I_M$  – ток, протекающий через обмотки магнита. Измерения проведем милливеберметром М119 и миллитесламетром АКТАКОМ АТЕ-8702. Погрешности данных приборов:

$$\varsigma_{\text{Вб}} = 0.15 \text{ мВб} \quad \varepsilon_{\text{Тл}} = 0.06$$

Точность измерения  $I_M$  определяется точностью  $A_1$ , встроенного в лабораторный блок питания GPR-11H30D:

$$\varsigma_{A_1} = 0.005 \text{ А}$$

Веберметр			Тесламетр	
$I_M, \text{ А}$	$\Phi, \text{ мВб}$	$B, \text{ мТл}$	$I_M, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$
0.15	0.9	120	0.15	154
0.30	1.7	227	0.30	280
0.45	2.4	320	0.45	403
0.60	3.2	427	0.60	533
0.75	4.0	533	0.75	653
0.90	4.8	640	0.90	809
1.05	5.4	720	1.05	964
1.20	5.9	787	1.20	1083
1.35	6.2	827	1.35	1145
1.50	6.5	867	1.50	1180

Таблица 1: Результаты измерений индукции магнита

Построим графики  $B(I)$  по результатам милливеберметра и миллитесламетра.

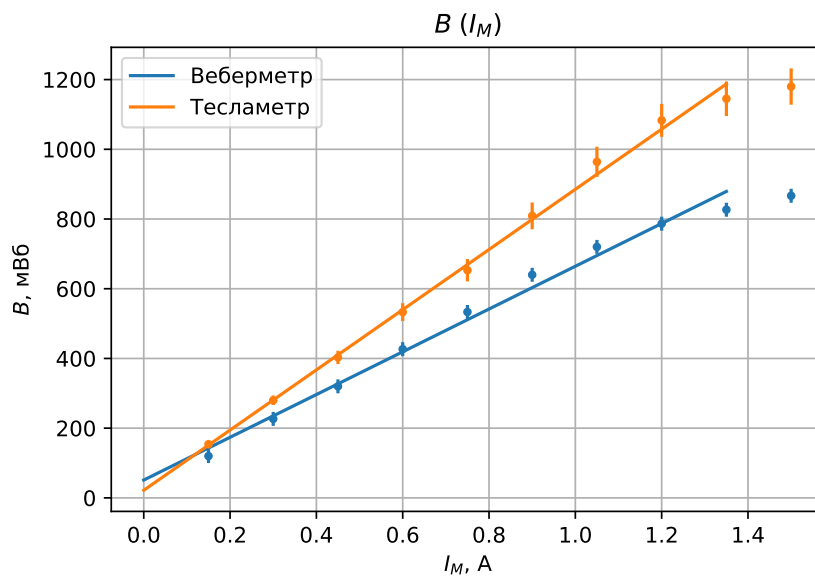


Рис. 3:  $B(I_M)$

По методу наименьших квадратов рассчитаем параметры графиков, считая зависимость линейной ( $y = ax + b$ ).

### Веберметр

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
8.25e-01	1.86e-01	546.67	6.28e+04	1.07e+02	575.35	29.68	72.00	27.62

### Тесламетр

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
8.25e-01	1.86e-01	720.40	1.25e+05	1.51e+02	813.66	33.28	49.13	30.97

Таблица 2: Параметры графиков  $B(I_M)$

## ЭДС Холла

Проведем измерения  $U_{34}(I_M)$  для различных  $I$ . Рассчитаем значения  $B$  и занесем в таблицу.

Измерения  $I$  делаются миллиамперметром  $A_2$ , модель M2020:  $\varsigma_{A_2} = 5$

Измерения  $U$  проводятся вольтметром  $V_1$ , модель B7-78/1:  $\varsigma_{V_1} = 3.5$  мкВ

$I$ , мА													
0.14		0.30		0.45		0.60		0.75		0.90		1.00	
$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ	$I_M$ , А	$U$ , мкВ
0.15	-13	0.15	-31	0.15	-50	0.15	-65	0.15	-82	0.15	-99	0.15	-113
0.30	-27	0.30	-62	0.30	-96	0.30	-127	0.30	-159	0.30	-193	0.30	-220
0.45	-41	0.45	-94	0.45	-144	0.45	-193	0.45	-241	0.45	-294	0.45	-324
0.60	-56	0.60	-125	0.60	-191	0.60	-253	0.60	-317	0.60	-386	0.60	-428
0.75	-68	0.75	-153	0.75	-233	0.75	-313	0.75	-390	0.75	-474	0.75	-526
0.90	-82	0.90	-180	0.90	-273	0.90	-368	0.90	-460	0.90	-558	0.90	-614
1.05	-92	1.05	-203	1.05	-308	1.05	-414	1.05	-517	1.05	-623	1.05	-693
1.20	-99	1.20	-220	1.20	-334	1.20	-447	1.20	-558	1.20	-675	1.20	-749
1.35	-105	1.35	-233	1.35	-352	1.35	-472	1.35	-590	1.35	-713	1.35	-790
1.50	-110	1.50	-243	1.50	-367	1.50	-493	1.50	-618	1.50	-745	1.50	-826

Таблица 3: Результаты измерений  $U_{34}(I_M)$

Пересчитаем  $I_M$  в  $B$  с помощью результатов калибровки.

Погрешность перевода будем считать  $\varepsilon_B \approx \Delta a/a \approx 0.05$ .

$I$ , мА													
0.14		0.30		0.45		0.60		0.75		0.90		1.00	
$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ	$B$ , мТл	$U$ , мкВ
151	-13	151	-31	151	-50	151	-65	151	-82	151	-99	151	-113
281	-27	281	-62	281	-96	281	-127	281	-159	281	-193	281	-220
410	-41	410	-94	410	-144	410	-193	410	-241	410	-294	410	-324
540	-56	540	-125	540	-191	540	-253	540	-317	540	-386	540	-428
669	-68	669	-153	669	-233	669	-313	669	-390	669	-474	669	-526
799	-82	799	-180	799	-273	799	-368	799	-460	799	-558	799	-614
928	-92	928	-203	928	-308	928	-414	928	-517	928	-623	928	-693
1058	-99	1058	-220	1058	-334	1058	-447	1058	-558	1058	-675	1058	-749
1187	-105	1187	-233	1187	-352	1187	-472	1187	-590	1187	-713	1187	-790
1317	-110	1317	-243	1317	-367	1317	-493	1317	-618	1317	-745	1317	-826

Таблица 4:  $U_{34}(B)$

Построим графики  $\mathcal{E}_H(B)$ .

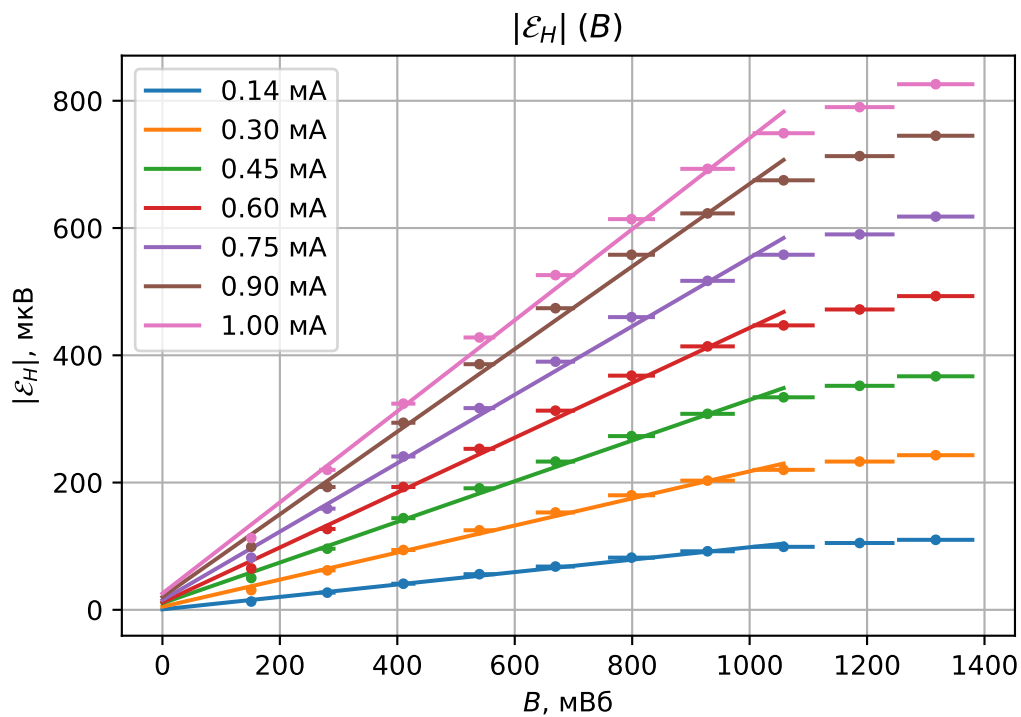


Рис. 4: Зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля

По методу наименьших квадратов рассчитаем параметры графиков, считая зависимость линейной ( $y = ax + b$ ). Воспользуемся угловым коэффициентом  $K = \frac{\Delta \varepsilon_H}{\Delta B}$  для каждого графика. Построим график  $K(I)$  и рассчитаем его параметры.

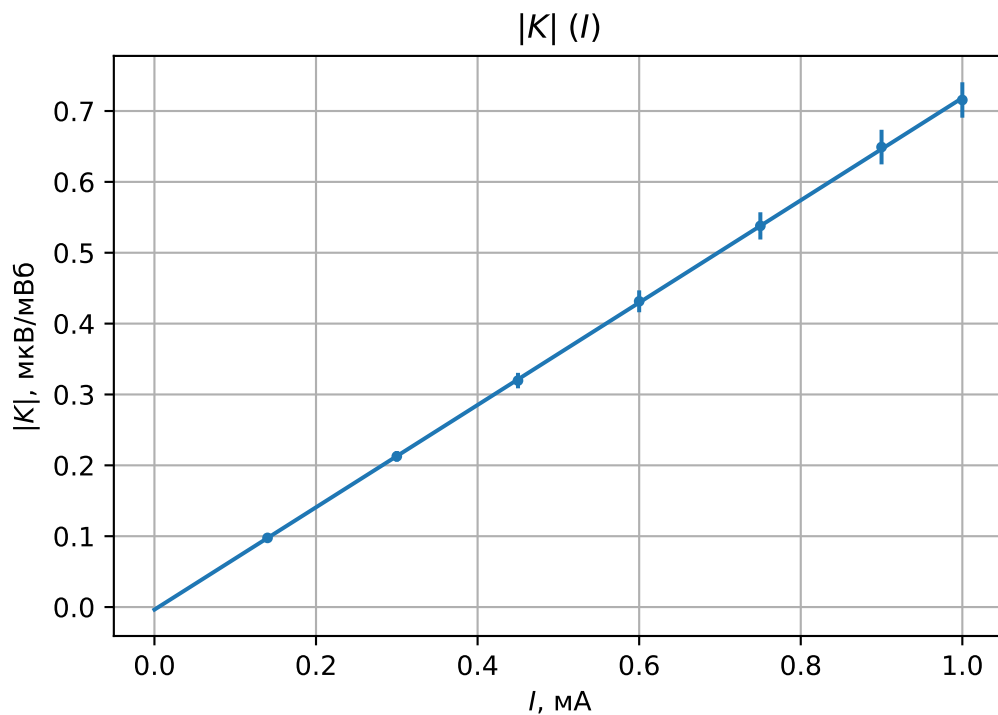


Рис. 5: Зависимость углового коэффициента от тока через образец

Выясним знак носителей заряда в легированном германии. Мы знаем, что электрическое поле направлено от 4 к 3, 5 из знака напряжения на вольтметре  $V1$ . Воспользовавшись правилом буравчика и правилом правой руки выясняем, что сила Лоренца направлена от 4 к 3, 5

$I, \text{ мА}$	$ K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мВб}}$	$\Delta I, \text{ мА}$	$\Delta K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мВб}}$
0.140	0.098	0.005	0.004
0.300	0.213	0.005	0.007
0.450	0.320	0.005	0.011
0.600	0.431	0.005	0.015
0.750	0.538	0.005	0.019
0.900	0.649	0.005	0.024
1.000	0.716	0.005	0.025

Таблица 5:  $K(I)$

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
5.914e-01	8.516e-02	0.423	4.440e-02	6.149e-02	0.722	0.003	-0.004	0.002

Таблица 6: Параметры графика  $K(I)$

для обоих знаков зарядов. Следовательно, носитель заряда в легированном германии имеет положительный заряд (дырочная проводимость).

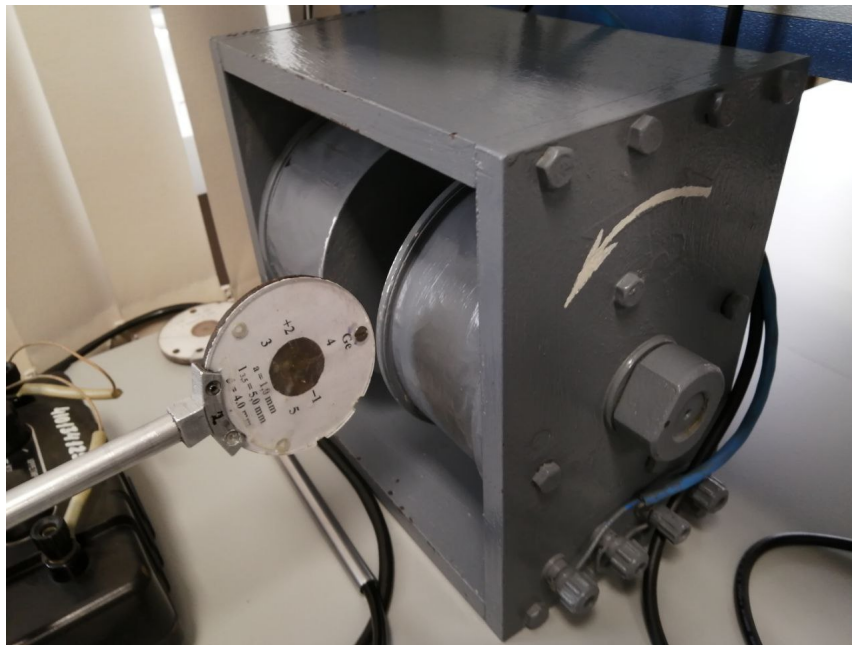


Рис. 6: Пробная катушка и ее положение относительно магнита

Определим  $R_H$  по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_{\perp}}{BI} = h \cdot a_K = 1.0 \text{ мм} \cdot 0.72 \frac{\text{В}}{\text{Вб} \cdot \text{А}} = (7.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию  $n$ :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (8.7 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

## Удельная проводимость

Измерим  $U_{35}(I)$  в образце.

Построим график  $U_{35}(I)$  и рассчитаем его параметры.

$I, \text{ мА}$	$U_{35}, \text{ мВ}$
0.14	0.544
0.30	1.203
0.45	1.800
0.60	2.395
0.75	3.007
0.90	3.623
1.00	4.025

Таблица 7: Результаты измерений  $I(U_{35})$

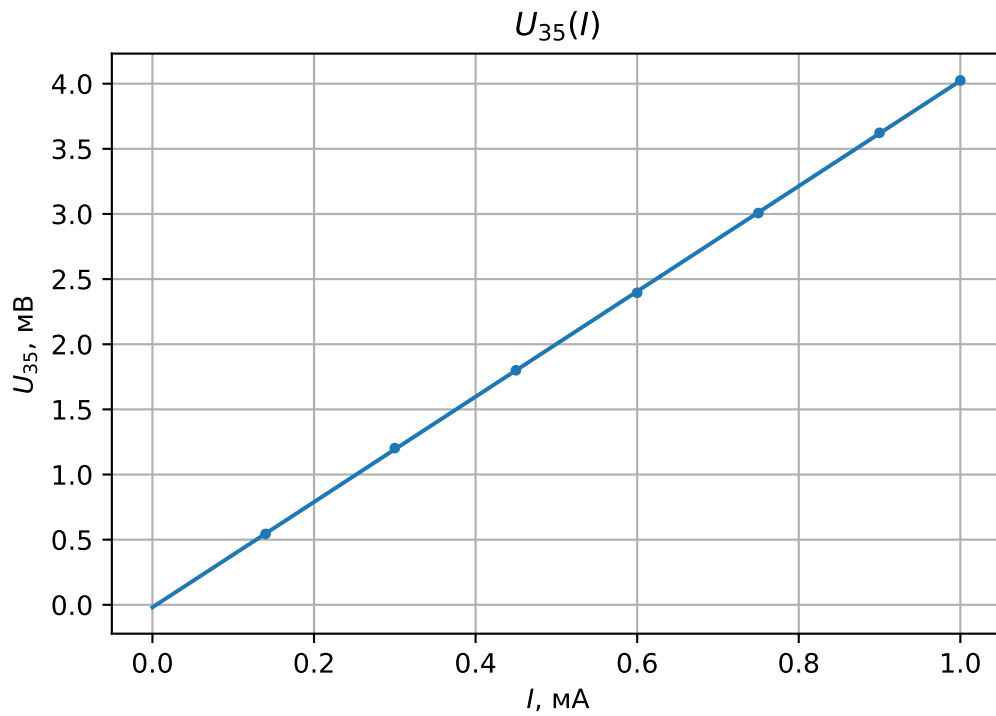


Рис. 7: Зависимость вынуждающего напряжения от основного тока

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
5.91e-01	8.52e-02	2.37	1.39e+00	3.44e-01	4.04	0.01	-0.02	0.01

Таблица 8: Параметры графика  $U_{35}(I)$

Рассчитаем  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{I \cdot l}{U_{35} \cdot h \cdot a} = \frac{5.0 \text{ мм}}{4.04 \text{ Ом} \cdot 1.0 \text{ мм} \cdot 4.0 \text{ мм}} = (309 \pm 27) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Рассчитаем  $b$ :

$$b = \frac{\sigma_0}{en} = (2230 \pm 220) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

## Вывод

Данная работа подтверждает существование эффекта Холла в полупроводниках.

В работе оценено значение концентрации носителей тока в образце  $n = (8.7 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$ , удельная проводимость  $\sigma_0 = (309 \pm 27) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ , подвижность носителей  $b = \frac{\sigma_0}{en} = (2230 \pm 220) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$  (зависит от легирования, для германия  $\approx 4000 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ ).