

# Лабораторная работа 3.3.4

## Эффект Холла в полупроводниках

Симанкович Александр

Б01-104

07.09.2022

### Аннотация

В работе найдено экспериментальное подтверждение гипотезы о возникновении поперечной ЭДС в проводнике с током, помещенном в магнитное поле (эффект Холла). Измерен коэффициент пропорциональности между ЭДС Холла и магнитной индукцией, определены подвижность и концентрация основных носителей заряда в кристаллическом Ge.

### Теоретическое введение

В электрическом поле  $\vec{E}$  на заряды действует сила  $q\vec{E}$ . Во внешнем магнитном поле  $\vec{B}$  на движущиеся заряды также действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{u} \times \vec{B}.$$

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.

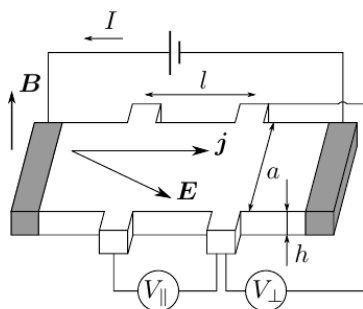


Рис. 1: Схема мостика Холла

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  $R_0 = \frac{l}{\sigma_0 a h}$ .

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

## Методика эксперимента

### Оборудование и приборы

- электромагнит с регулируемым источником питания GPR-11H30D ( $A_1$ );
- вольтметр В7-78/1;
- миллиамперметр М2020 ( $A_2$ );
- милливольтметр М119 и миллитесламетр АКТАКОМ АТЕ-8702;
- источник питания (1,5 В);
- образцы легированного германия;

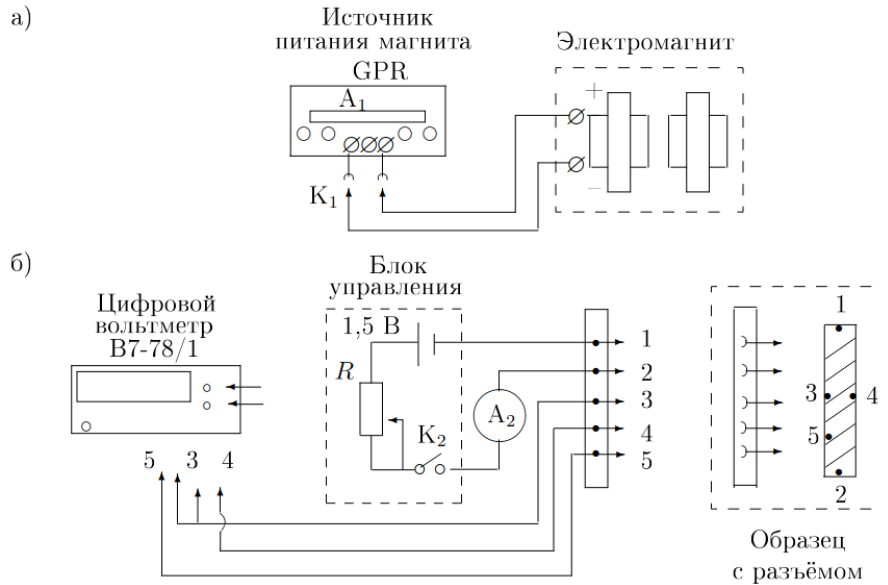


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

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 милливольтметра 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.

## Результаты

### Градуировка электромагнита

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

$$\zeta_{B6} = 0.15 \text{ мВб} \quad \varepsilon_{Тл} = 0.06$$

Точность измерения  $I_M$  определяется точностью амперметра  $A_1$ , встроенного в лабораторный блок питания GPR-11Н30D:

$$\zeta_{A1} = 0.005 \text{ А}$$

Построим графики  $B(I)$  по результатам измерения магнитного поля милливеберметром и миллитесламетром.

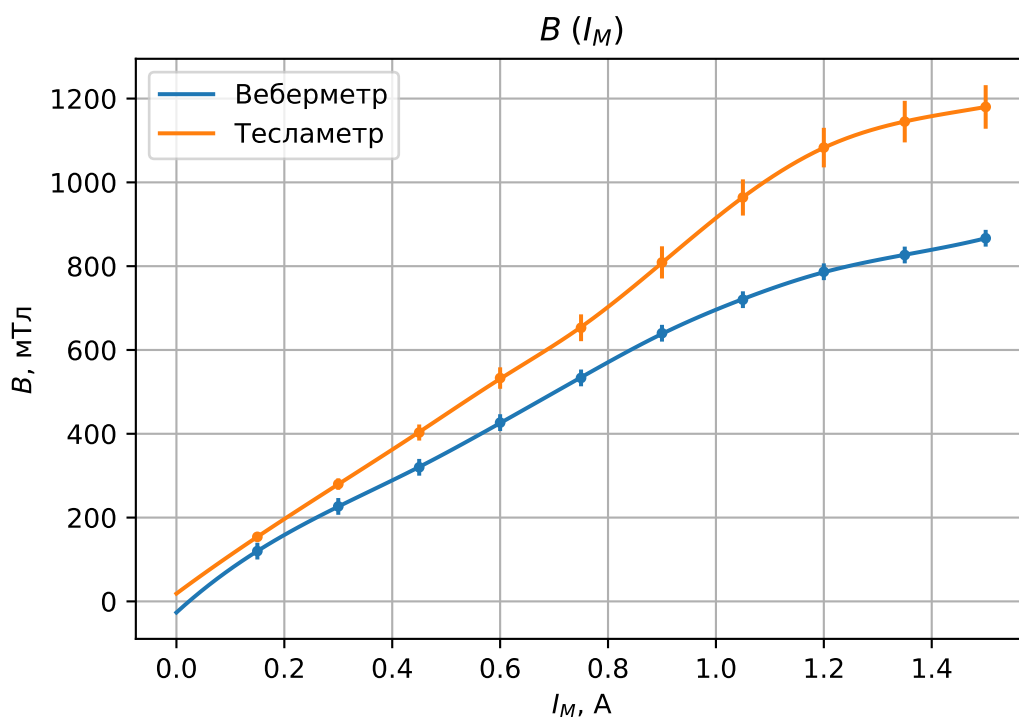


Рис. 3:  $B(I_M)$

Как видно из графика, данные веберметра и тесламетра расходятся. Можно заметить, что кривая веберметра загибается вниз в конце интервала измерений, что может объясняться упругостью пружины измерительной стрелки. По этой причине для измерений выбираем калибровку тесламетром.

### 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 М2020:  $\zeta_{A2} = 5 \text{ мкА}$ . Измерения  $U$  про-

водятся вольтметром  $V_1$ , модель В7-78/1:  $\varsigma_{V_1} = 3.5$  мкВ. В измерениях учитывается  $U_0$  – сдвиг напряжения при нулевом магнитном поле, возникающий из-за неточности подпайки.

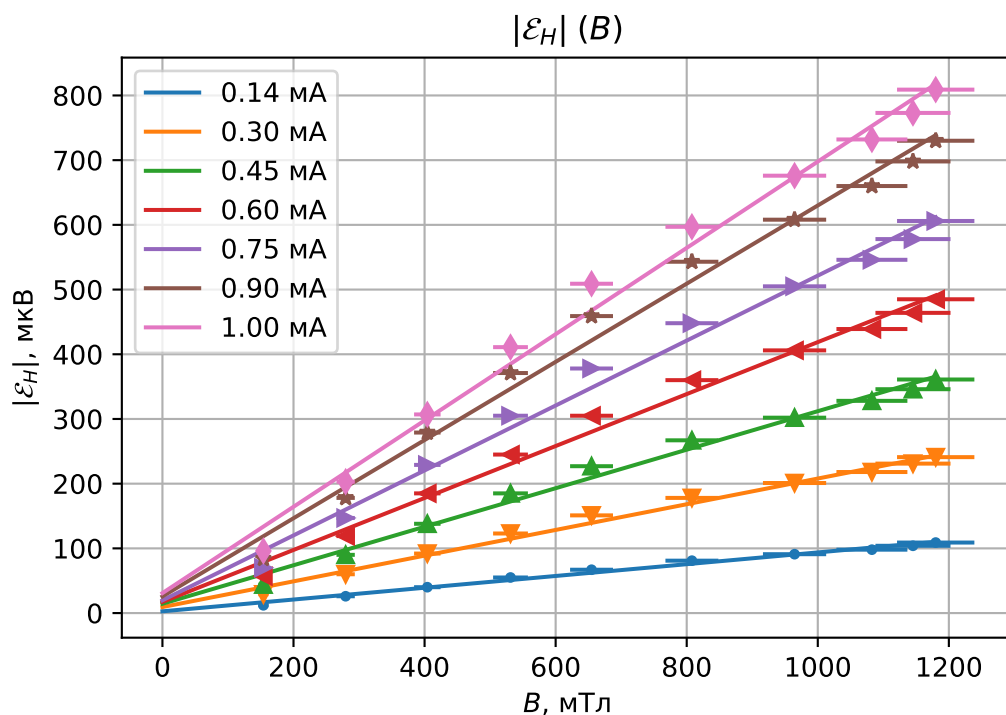


Рис. 4: Зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля

По методу наименьших квадратов рассчитаем параметры графиков, считая зависимость линейной. В результате получим значение углового коэффициента  $K = \frac{\Delta \varepsilon_H}{\Delta B}$  для каждого графика. Построим график  $K(I)$  и рассчитаем его параметры.

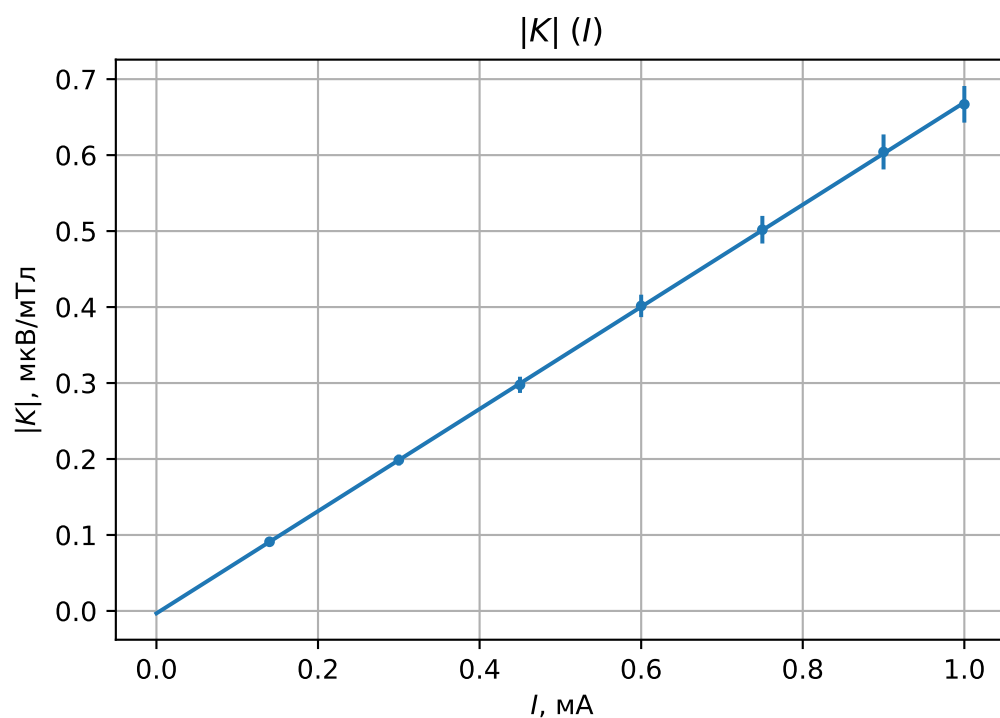


Рис. 5: Зависимость углового коэффициента от тока через образец

$I, \text{ мА}$	$ K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мТл}}$	$\Delta I, \text{ мА}$	$\Delta K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мТл}}$
0.140	0.091	0.005	0.003
0.300	0.199	0.005	0.007
0.450	0.298	0.005	0.011
0.600	0.402	0.005	0.015
0.750	0.502	0.005	0.018
0.900	0.604	0.005	0.023
1.000	0.667	0.005	0.024

Таблица 1:  $K(I)$

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
5.914e-01	8.516e-02	0.395	3.851e-02	5.726e-02	0.672	0.002	-0.003	0.002

Таблица 2: Параметры графика  $K(I)$

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 левой руки получим, что сила Лоренца направлена от 4 к 3, 5 для обоих знаков зарядов. Следовательно, носитель заряда в легированном германии имеет положительный заряд (дырочная проводимость).

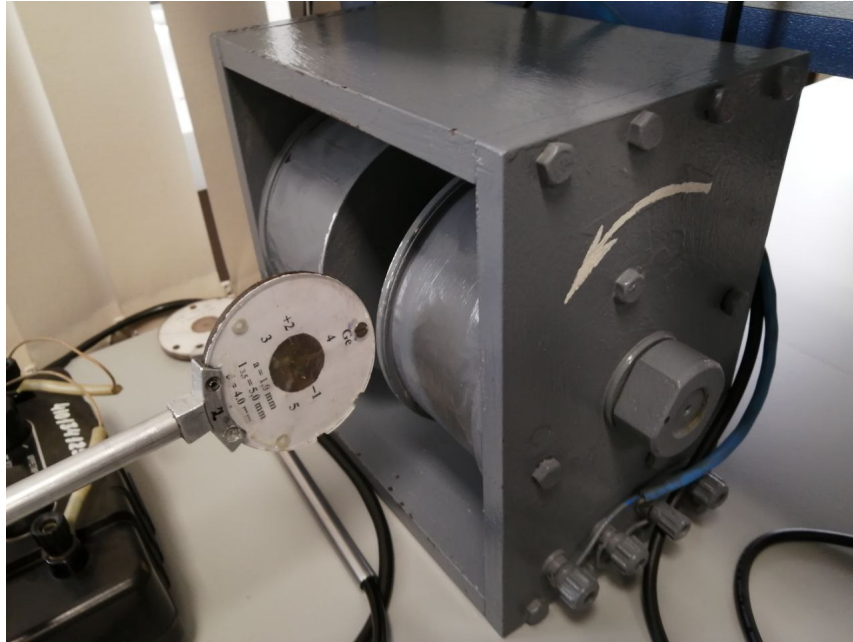


Рис. 6: Пробная катушка и ее положение относительно магнита

Определим коэффициент Холла  $R_H$  по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_{\perp}}{BI} = h \cdot a_K = 1.0 \text{ мм} \cdot 0.672 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (6.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию  $n$ :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (9.3 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

## Альтернативный метод обработки

Также для определения искомого параметра можно воспользоваться тем, что:

$$\mathcal{E}_H = \frac{R_H}{h} \cdot BI$$

Построим график  $\mathcal{E}_H(BI)$  и определим его параметры.

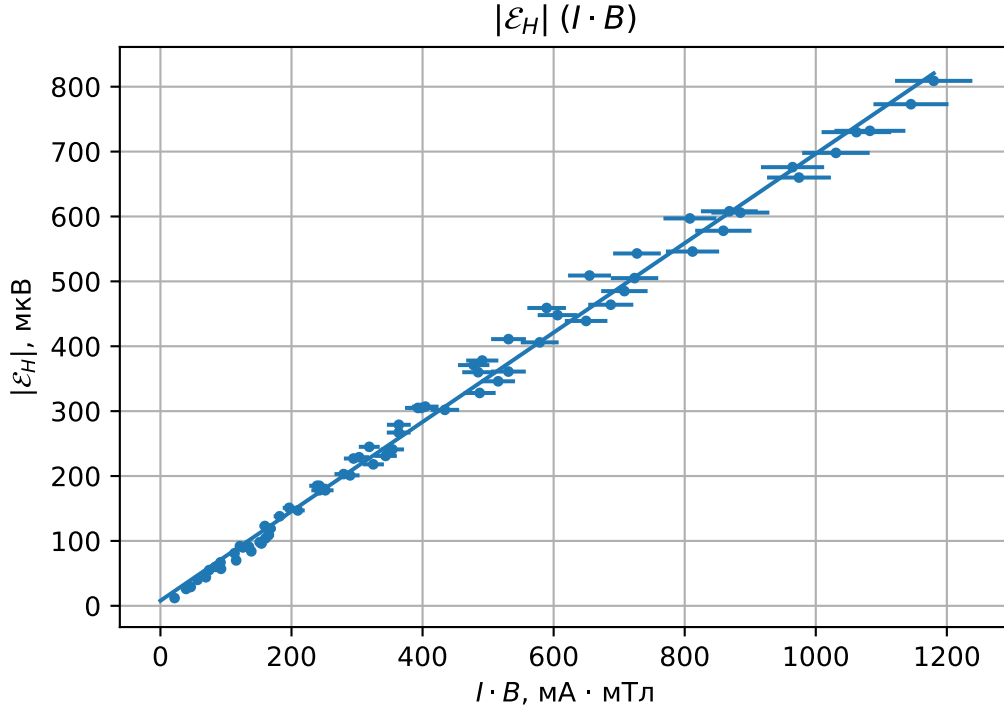


Рис. 7: Зависимость холловского напряжения от произведения индукции поля и тока в образце

$\bar{x}$	$\sigma_x^2$	$\bar{y}$	$\sigma_y^2$	$r_{xy}$	$a$	$\Delta a$	$b$	$\Delta b$
4.261e+02	9.836e+04	301.357	4.697e+04	6.775e+04	0.689	0.007	7.898	3.623

Таблица 3: Параметры графика  $\mathcal{E}_H(IB)$

Определим коэффициент Холла  $R_H$  по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_{\perp}}{BI} = h \cdot a_{IB} = 1.0 \text{ мм} \cdot 0.689 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (6.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию  $n$ :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (9.1 \pm 0.5) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

## Удельная проводимость

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

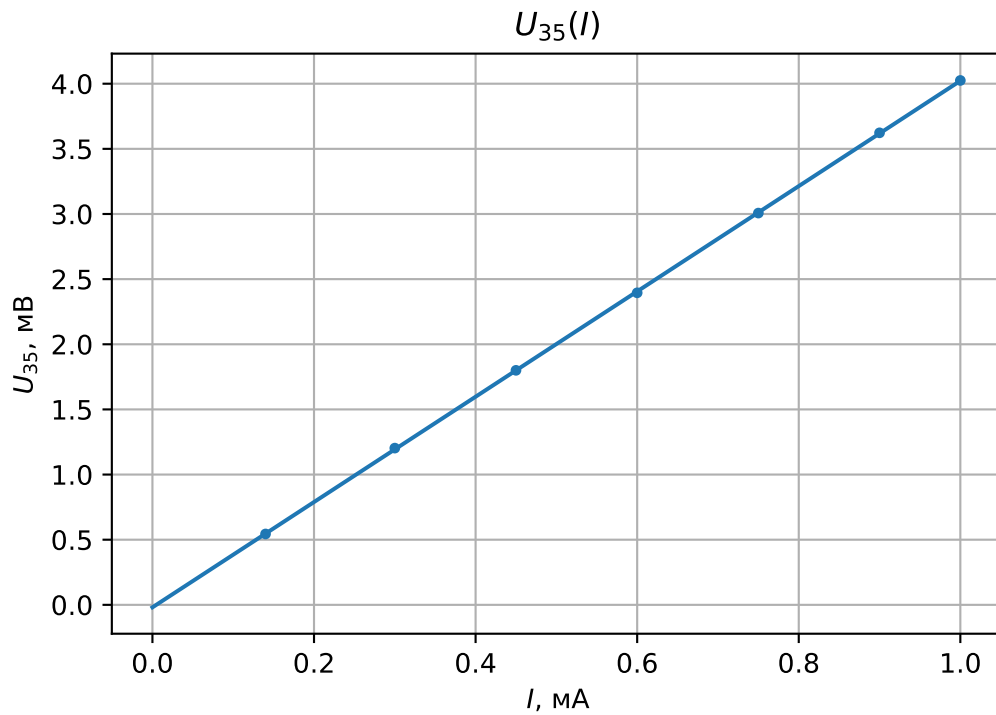


Рис. 8: Зависимость напряжения  $U_{35}$  от основного тока в образце

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

Таблица 4: Параметры графика  $U_{35}(I)$

Рассчитаем удельную проводимость  $\sigma_0$ :

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

Рассчитаем подвижность зарядов  $b$ :

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

## Заключение и выводы

Данная работа подтверждает существование эффекта Холла в полупроводниках.

Получено значение коэффициента Холла  $R_H = (6.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$ . Также 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  $b = \frac{\sigma_0}{en} = (2230 \pm 220) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ .

Справочные данные для данного образца германия отсутствуют, большинство параметров зависят от степени легирования. Значения подвижности носителей зависит от легирующего элемента и лежат в пределах<sup>1</sup>  $(2000 \div 3000) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ .

<sup>1</sup>Эффект Холла в германии, легированном разными примесями, Г. П. Гайдар, Е. Ю. Гайворонская, 2017