

Лабораторная работа 3.3.4

Эффект Холла в полупроводниках

Дедков Денис
Крутиков Дмитрий

06.11.2022

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. Результирующая сила:

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

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, помещенном во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

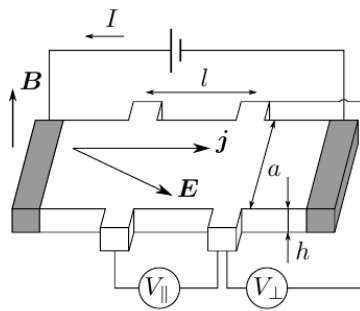


Рис. 1: Схема мостика Холла

В работе для проверки эффекта Холла используется мостик Холла (см. рис. 1).

В мостике Холла реализуется простой случай, когда направление тока ($\vec{j} \parallel \vec{x}$) перпендикулярно направлению внешнего магнитного поля ($\vec{B} \parallel \vec{z}$). На один носитель тока со стороны магнитного поля действует сила $F_y = -qu_x B_z$. После установления стационарного режима носители перераспределены так, что создают поле $E_y = -\frac{F_y}{q} = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B_z$. Напряжение,

появившееся вследствие перераспределения зарядов, называется холловским:

$$U_{\perp} = E_y a = \frac{j_x B_z}{nq} a.$$

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

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

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

Для продольной составляющей напряжения выполняется закон Ома. Из него получаем:

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

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;
- источник питания (1,5 В);
- образцы легированного германия;

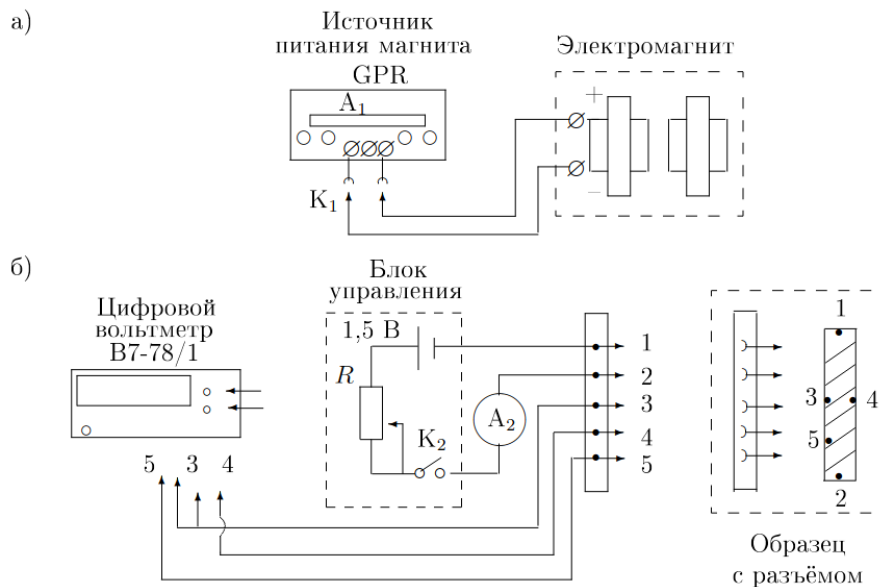


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

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.

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 поле в зазоре, I_M – ток, протекающий через обмотки магнита. Измерения проведем милливеберметром М119. Погрешности данных прибора:

$$\varsigma_{B6} = 0.15 \text{ мВб}$$

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

$$\varsigma_{A1} = 0.005 \text{ А}$$

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

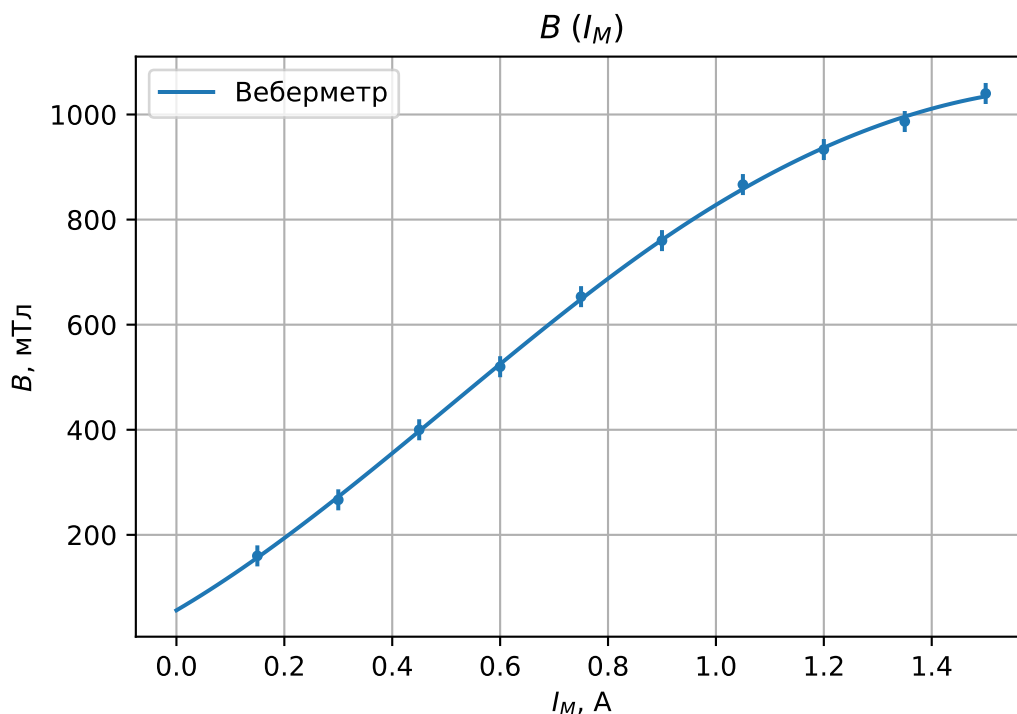


Рис. 3: $B(I_M)$

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 М2020: $\varsigma_{A2} = 5$ 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.

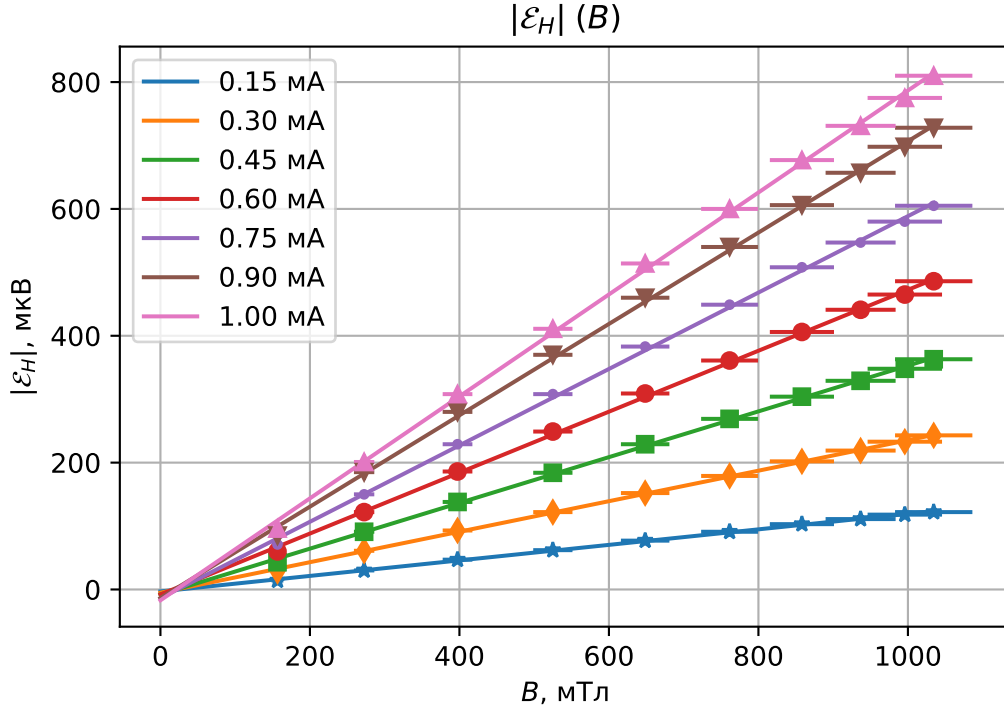


Рис. 4: Зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля

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.

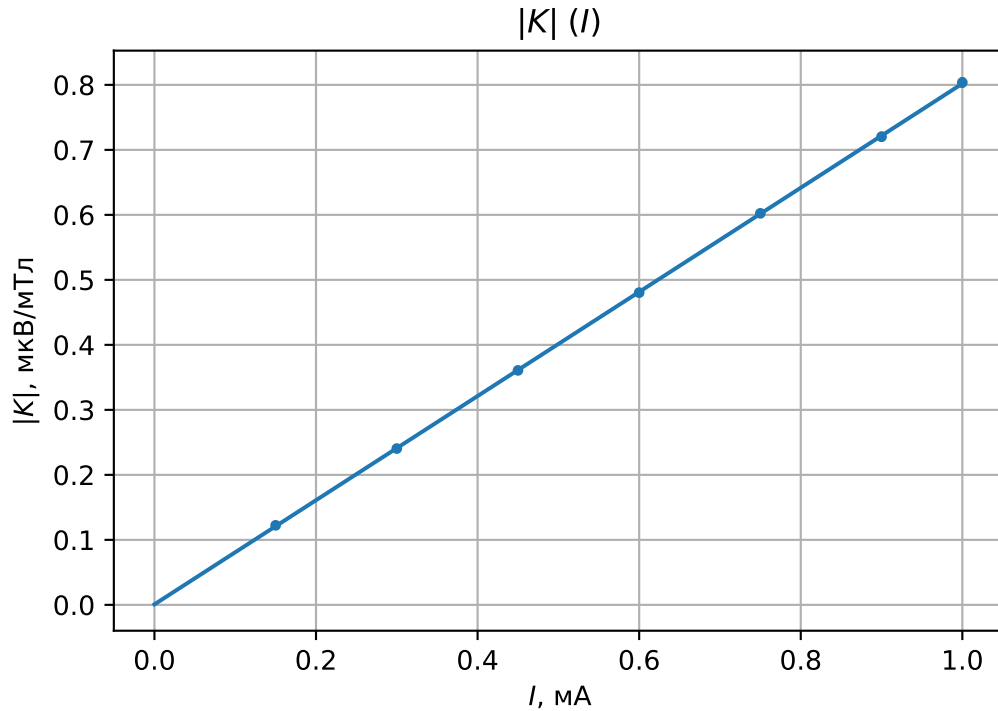


Рис. 5: Зависимость углового коэффициента от тока через образец

$I, \text{ мА}$	$ K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мТл}}$	$\Delta I, \text{ мА}$	$\Delta K , \frac{\text{мкВ}}{\text{мТл}}$
0.150	0.122	0.005	0.001
0.300	0.240	0.005	0.002
0.450	0.361	0.005	0.003
0.600	0.480	0.005	0.005
0.750	0.602	0.005	0.006
0.900	0.720	0.005	0.008
1.000	0.804	0.005	0.008

Таблица 1: $K(I)$

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
5.929e-01	8.388e-02	0.476	5.384e-02	6.720e-02	0.801	0.002	0.001	0.001

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, носители заряда в легированном германии имеют положительный заряд (дырочная проводимость).

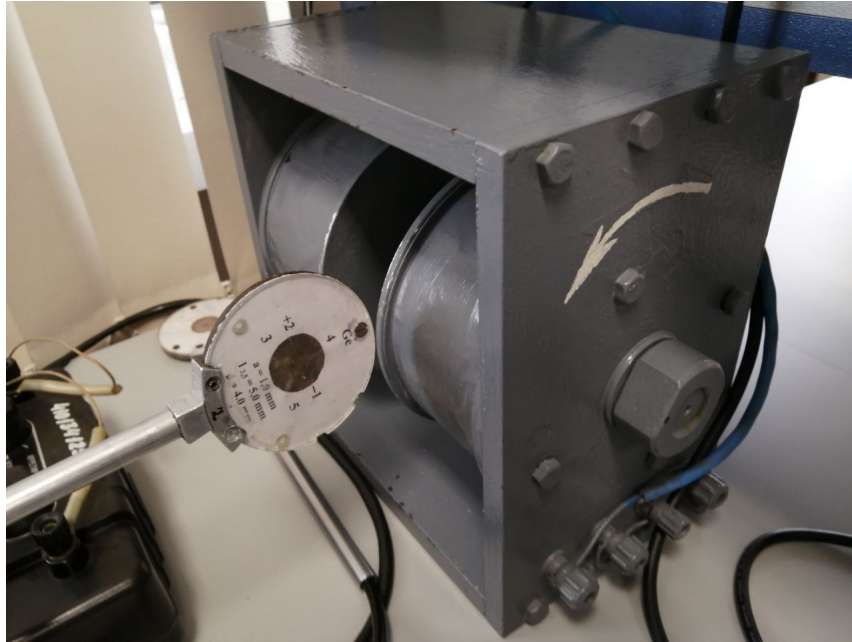


Рис. 6: Пробная катушка и ее положение относительно магнита

Определим коэффициент Холла R_H по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_{\perp}}{BI} = h \cdot a_K = 1.0 \text{ мм} \cdot 0.801 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (8.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию n :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (7.8 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

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.

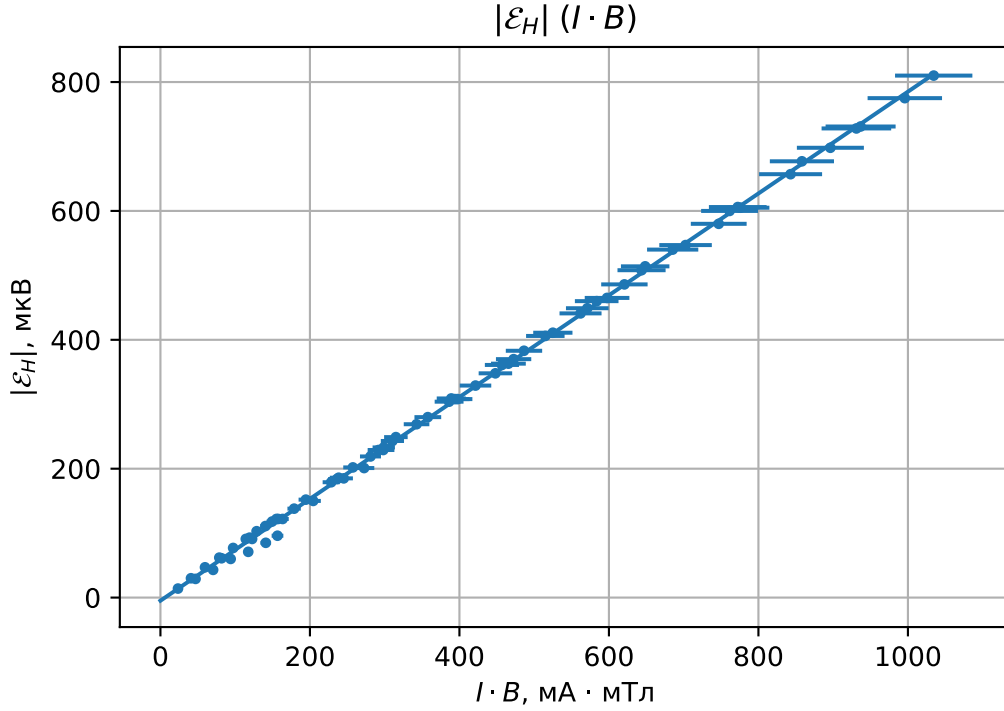


Рис. 7: Зависимость холловского напряжения от произведения индукции поля и тока в образце

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
3.905e+02	7.427e+04	303.614	4.637e+04	5.866e+04	0.790	0.003	-4.818	1.228

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

Определим коэффициент Холла R_H по формуле (1):

$$R_H = h \frac{U_{\perp}}{BI} = h \cdot a_{IB} = 1.0 \text{ мм} \cdot 0.790 \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} = (7.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Определим концентрацию n :

$$n = \frac{1}{R_H e} = (7.9 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Удельная проводимость

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

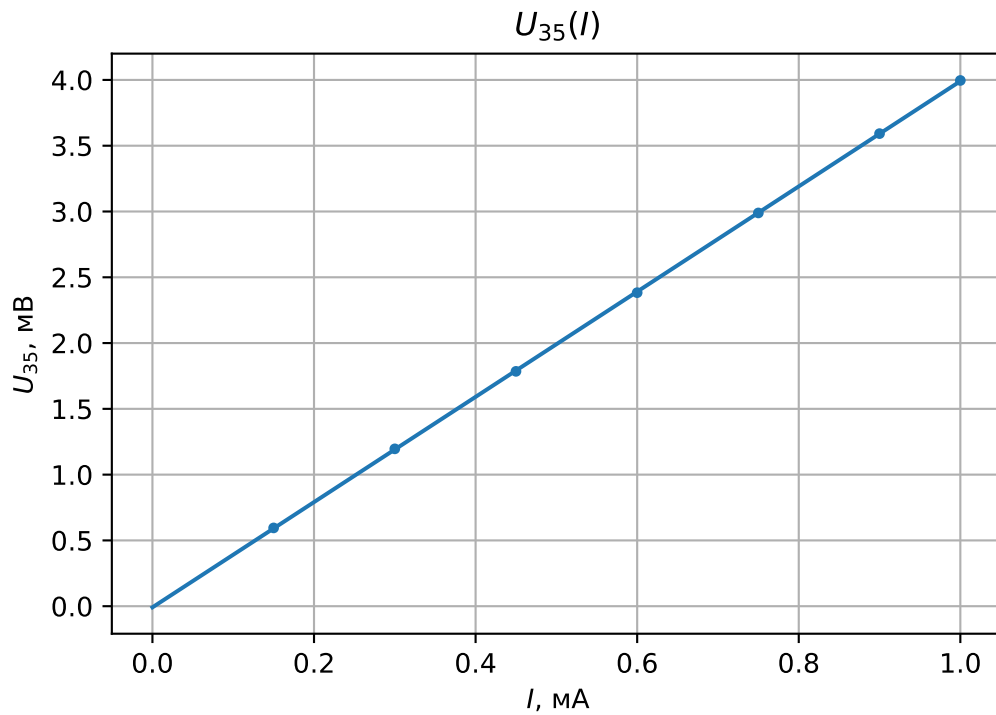


Рис. 8: Зависимость напряжения U_{35} от основного тока в образце

\bar{x}	σ_x^2	\bar{y}	σ_y^2	r_{xy}	a	Δa	b	Δb
5.93e-01	8.39e-02	2.36	1.34e+00	3.35e-01	4.00	0.01	-0.01	0.01

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

Рассчитаем удельную проводимость σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{I \cdot l}{U_{35} \cdot h \cdot a} = \frac{5.0 \text{ мм}}{4.00 \text{ Ом} \cdot 1.0 \text{ мм} \cdot 4.0 \text{ мм}} = (313 \pm 27) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

Рассчитаем подвижность зарядов b :

$$b = \frac{\sigma_0}{en} = (2470 \pm 250) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Заключение и выводы

Данная работа подтверждает существование эффекта Холла в полупроводниках.

Получено значение коэффициента Холла $R_H = (7.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$. Также в работе оценено значение концентрации носителей тока в образце $n = (7.9 \pm 0.4) \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{м}^3}$, удельная проводимость $\sigma_0 = (313 \pm 27) \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$, подвижность носителей $b = \frac{\sigma_0}{en} = (2470 \pm 250) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Справочные данные для данного образца германия отсутствуют, большинство параметров зависят от степени легирования. Значения подвижности носителей зависит от легирующего элемента и лежат в пределах¹ $(2000 \div 3000) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

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