

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 3.3.4
Эффект Холла в полупроводниках

Выполнил:
Гисич Арсений
Б03-102

Долгопрудный
2022

1 Аннотация

В данной работе исследовалась зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при различных значениях тока через образец для определения константы Холла. Также был определён знак носителей заряда и проводимость материала образца.

2 Теоретические сведения

Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси x течет ток I (рис. 2).

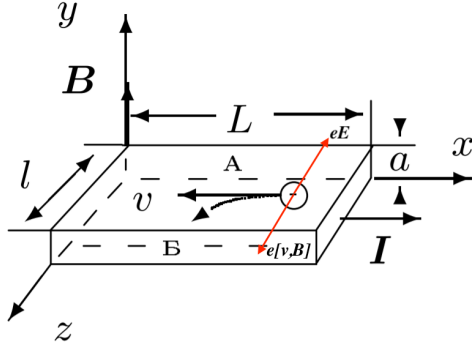


Рис. 1: Образец с током в магнитном поле

Если эту пластину поместить в магнитное поле, направленное по оси y , то между гранями А и Б появляется разность потенциалов.

В самом деле, на электрон (для простоты рассматриваем один тип носителей), движущийся со средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_a = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B},$$

где e — абсолютный заряд электрона, \vec{E} — напряженность электрического поля, \vec{B} — индукция магнитного поля.

В проекции на ось z получаем

$$F_B = e|\langle v_x \rangle|B.$$

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, заряжая ее отрицательно. На грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля E_z , направленного от А к Б, которое действует на электроны с силой $F_E = eE_z$. В установившемся режиме $F_E = F_B$, поэтому накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Отсюда

$$E_z = |\langle v_x \rangle|B.$$

С этим полем связана разность потенциалов

$$U_{AB} = E_z l = |\langle v_x \rangle|Bl.$$

В этом и состоит эффект Холла.

Замечая, что сила тока

$$I = ne|\langle v_x \rangle|la,$$

найдем ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_X = U_{AB} = \frac{IB}{nea} = R_X \frac{IB}{a}.$$

Константа $R_X = \frac{1}{ne}$ называется постоянной Холла.

В полупроводниках, когда вклад в проводимость обусловлен и электронами и дырками, выражение для постоянной Холла имеет более сложный вид:

$$R_X = \frac{nb_e^2 - pb_p^2}{e(nb_e + pb_p)^2},$$

где n и p — концентрации электронов и дырок; b_e , b_p — их подвижности.

3 Методика измерений

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

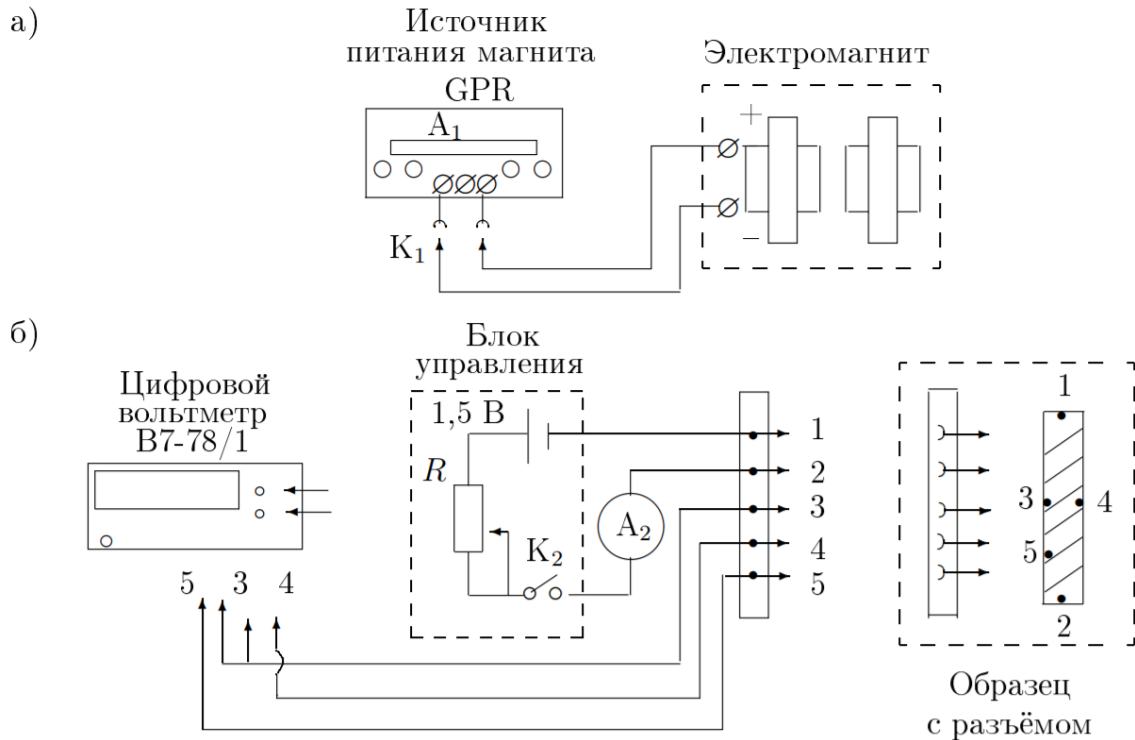


Рис. 2: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита (рис. 2а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов источника питания. Ток измеряется амперметром источника питания A_1 . Разъем K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 2б), подключается к батарее. При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца течет ток, величина которого регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром A_2 .

В образце с током, помещённом 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, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения, вызванным протеканием основного тока через образец.

Измеряемая разность потенциалов при одном направлении магнитного поля равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а при другом их разности. В этом случае ЭДС Холла \mathcal{E}_H может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остается неизменным. От него следует (с учетом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_H = U_{34} - U_0.$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку \mathcal{E}_H можно определить характер проводимости — электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{35} между контактами 3 и 5 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}ah}, \quad (1)$$

где L_{35} — расстояние между контактами 3 и 5, a — ширина образца, h — его толщина.

4 Используемое оборудование

1. электромагнит с регулируемым источником питания;
2. вольтметр;
3. амперметр;
4. миллиамперметр;
5. милливеберметр или миллитесламетр;
6. источник питания;
7. образцы легированного германия;

5 Результаты измерений и обработка данных

Параметры образца:

$$a = 2,2 \text{ мм}$$

$$L = 6,0 \text{ мм}$$

$$l = 7 \text{ мм}$$

Результаты измерения калибровочной зависимости поля B от тока в электромагните I_M представлены в таб. 1. Калибровочный график зависимости представлен на рис. 3.

I_M, A	δ_{I_M}, A	$B, мТл$	$\delta_B, мТл$
0,000	0,020	17,7	1,9
0,210	0,021	224,8	12,2
0,500	0,023	521,8	27,1
0,810	0,024	802,7	41,1
1,020	0,025	929,4	47,5
1,220	0,026	1016,2	51,8
1,420	0,027	1072,1	54,6

Таблица 1: Калибровочная зависимость $B(I_M)$

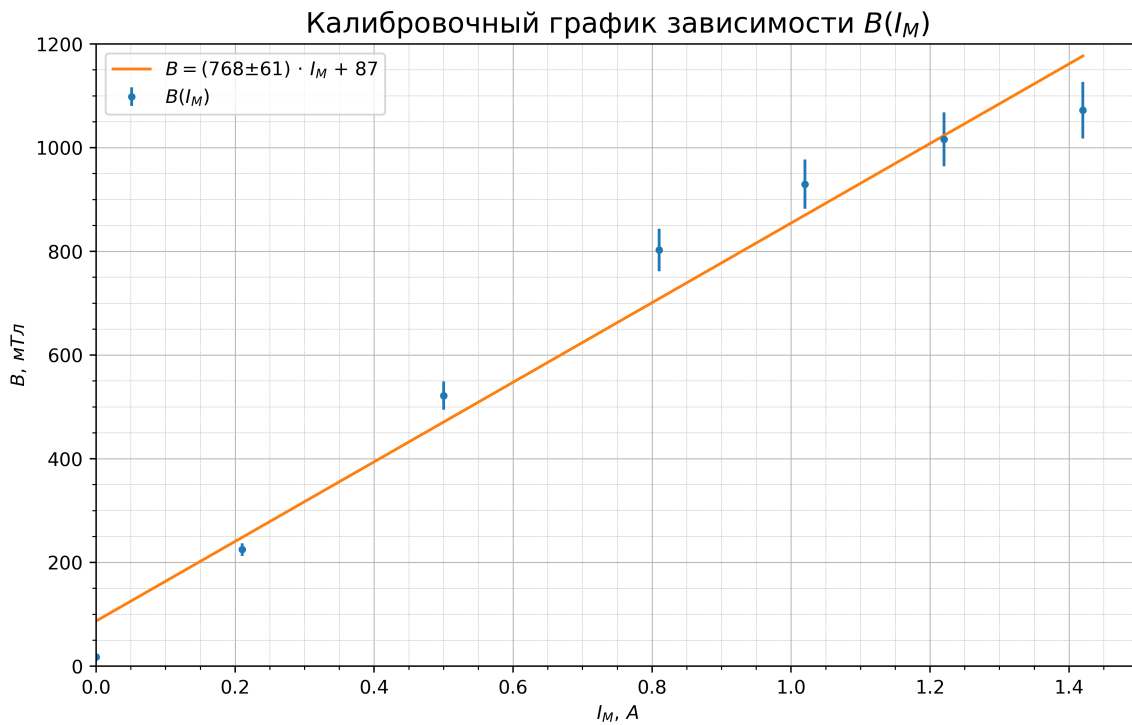


Рис. 3: Калибровочный график

Результаты измерений разности потенциалов U_{34} между точками 3 и 4 в зависимости от поля B при различных значениях тока через образец I и полученные значения ЭДС Холла U_{\perp} представлены в таб. 2–9.

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,240	0,021	-0,030	0,030	0,001	-0,06
0,500	0,023	0,001	0,061	0,001	
0,750	0,024	0,026	0,086	0,001	
1,030	0,025	0,045	0,105	0,001	
1,230	0,026	0,054	0,114	0,001	
1,400	0,027	0,059	0,119	0,001	

Таблица 2: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,3 мА$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,039	0,042	0,001	-0,081
0,510	0,023	0,003	0,084	0,001	
0,750	0,024	0,035	0,116	0,001	
1,030	0,025	0,059	0,140	0,001	
1,240	0,026	0,071	0,152	0,001	
1,390	0,027	0,077	0,158	0,001	

Таблица 3: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,4 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,050	0,052	0,001	-0,102
0,500	0,023	0,001	0,103	0,001	
0,750	0,024	0,045	0,147	0,001	
1,020	0,025	0,073	0,175	0,001	
1,250	0,026	0,088	0,190	0,001	
1,380	0,027	0,095	0,197	0,001	

Таблица 4: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,5 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,060	0,063	0,001	-0,123
0,510	0,023	0,004	0,127	0,001	
0,750	0,024	0,050	0,173	0,001	
1,010	0,025	0,085	0,208	0,001	
1,240	0,026	0,105	0,228	0,001	
1,370	0,027	0,113	0,236	0,001	

Таблица 5: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,6 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,070	0,075	0,001	-0,145
0,510	0,023	0,001	0,146	0,001	
0,760	0,024	0,061	0,206	0,001	
1,010	0,025	0,098	0,243	0,001	
1,250	0,026	0,122	0,267	0,001	
1,360	0,027	0,130	0,275	0,001	

Таблица 6: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,7 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,083	0,083	0,001	-0,166
0,500	0,023	-0,001	0,165	0,001	
0,750	0,024	0,068	0,234	0,001	
1,020	0,025	0,112	0,278	0,001	
1,250	0,026	0,138	0,304	0,001	
1,360	0,027	0,147	0,313	0,001	

Таблица 7: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 0,8 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,250	0,021	-0,103	0,106	0,001	-0,209
0,500	0,023	-0,003	0,206	0,001	
0,760	0,024	0,084	0,293	0,001	
1,030	0,025	0,141	0,350	0,001	
1,270	0,026	0,173	0,382	0,001	
1,360	0,027	0,182	0,391	0,001	

Таблица 8: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 1 \text{ мА}$

I_M, A	δ_{I_M}, A	$U_{34}, мВ$	$U_{\perp}, мВ$	$\delta_{U_{\perp}}, мВ$	$U_0, мВ$
0,260	0,021	-0,332	-0,110	0,001	-0,222
0,500	0,023	-0,434	-0,212	0,001	
0,750	0,024	-0,535	-0,313	0,001	
1,030	0,025	-0,596	-0,374	0,001	
1,260	0,026	-0,631	-0,409	0,001	
1,340	0,027	-0,639	-0,417	0,001	

Таблица 9: Результаты измерения ЭДС Холла при $I = 1 \text{ мА}$ и противоположном направлении поля

График семейства характеристик $U_{\perp}(B)$ при разных значениях тока I через образец представлен на рис. 4. Значение тока $I = -1 \text{ мА}$ на графике означает противоположное направление поля, ЭДС Холла в данном случае взята с обратным знаком.

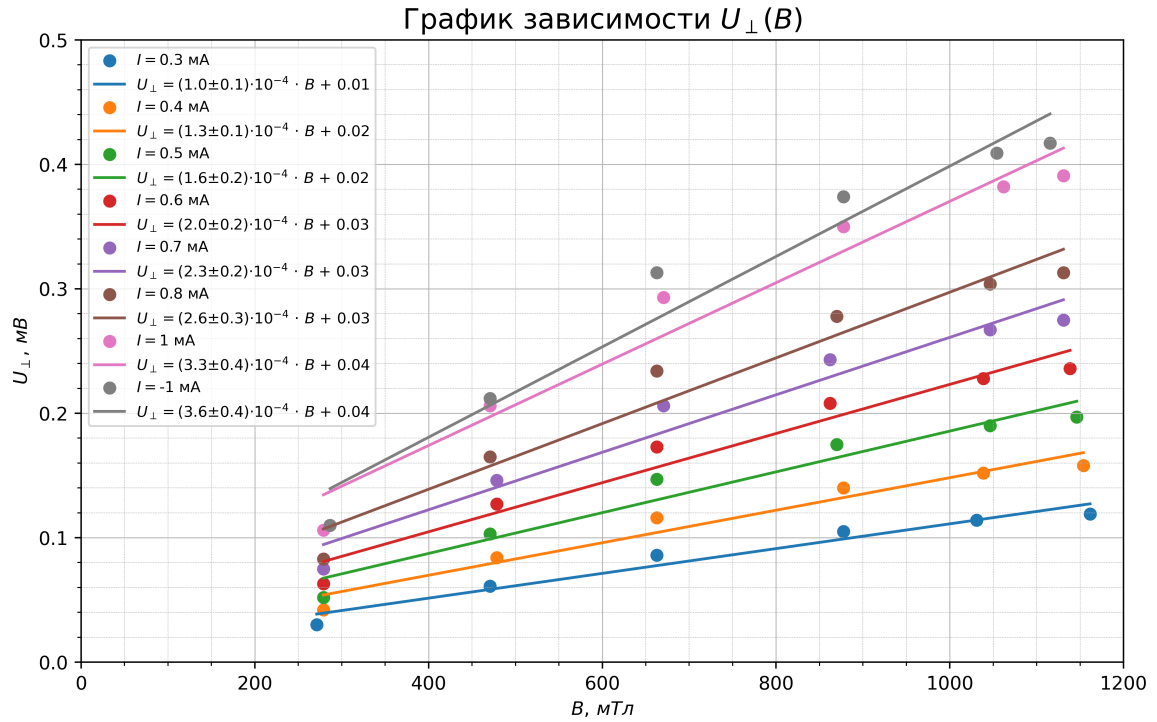


Рис. 4: График зависимостей $U_{\perp}(B)$

Знак потенциала соответствует заряду на 3 контакте, значит на нём будут скапливаться дырки. Исходя из геометрии образца, изображённой на рис. 5, получаем, что основными носителями заряда являются дырки, т. е. имеет место дырочная проводимость.

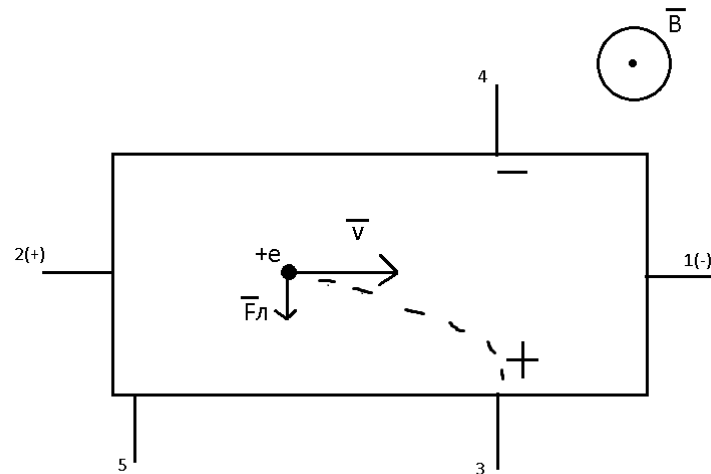


Рис. 5: Направление тока, вектора магнитного поля и отклонение носителей

График зависимости $k = \frac{dU_{\perp}}{dB}$ от тока I представлен на рис. 6.

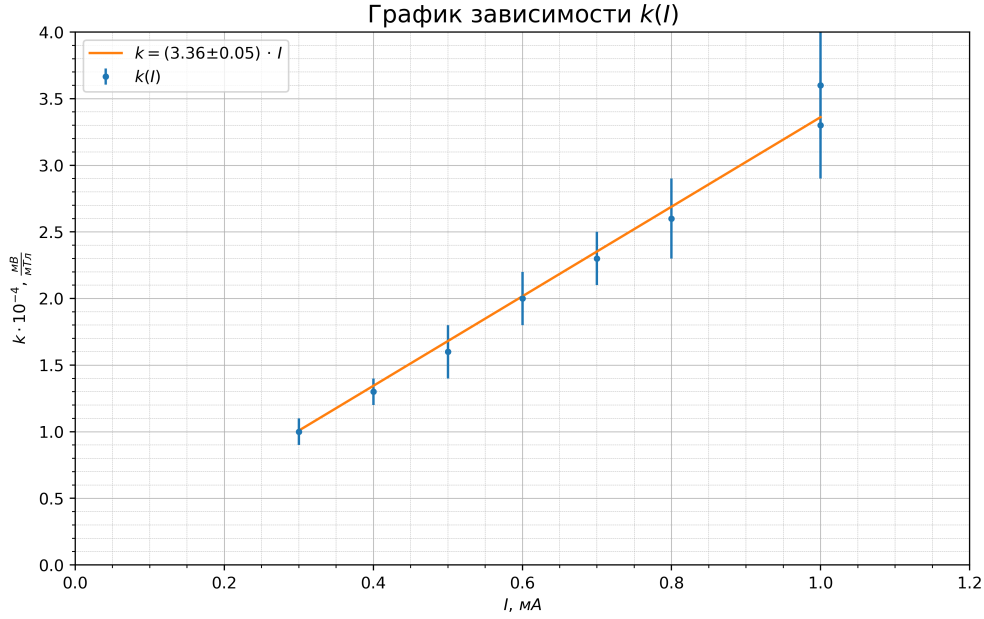


Рис. 6: График зависимости $k(I)$

Получаем угловой коэффициент $\alpha = 0,336 \pm 0,005 \frac{B}{A \cdot Tn}$. Тогда постоянная Холла $R_H = \alpha \cdot h = (739 \pm 35) \cdot 10^{-6} \frac{M^3}{K\Omega}$.

Рассчитаем концентрацию носителей заряда по формуле $n = \frac{1}{R_H q} = (8,5 \pm 0,2) \cdot 10^{21} \frac{1}{M^3}$.

При токе $I = 1 \text{ мА}$ разность потенциалов между контактами 3 и 5

$U_{35} = -1,980 \pm 0,001 \text{ В}$. Вычислим удельную проводимость по формуле (1):

$\sigma_0 = 196,7 \pm 16,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$. Тогда удельное сопротивление $\rho_0 = 1/\sigma_0 = 0,0050 \pm 0,0004 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Подвижность носителей заряда рассчитывается по формуле $\mu = \frac{\sigma}{en} = 1446 \pm 123 \frac{cm^2}{B \cdot c}$.

6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе была исследована зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при различных значениях тока через образец. Были определены постоянная Холла, подвижность и концентрация носителей заряда в образце легированного германия. Полученные значения:

$$R_H = (739 \pm 35) \cdot 10^{-6} \frac{M^3}{K\Omega}, \quad n = (8,5 \pm 0,2) \cdot 10^{21} \frac{1}{M^3}, \quad \mu = 1446 \pm 123 \frac{cm^2}{B \cdot c}$$

Табличное значение собственной концентрации носителей зарядов для германия $n_0 = 2,4 \cdot 10^{13} \frac{1}{M^3}$. Это меньше полученного значения, что говорит о том, что данный образец германия содержит примеси. Основной вклад в погрешность вносит погрешность определения коэффициентов зависимости. Также на ошибку измерений может влиять зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры, ярко выраженная в полупроводниках.