

Лабораторная работа № 3.3.4  
Эффект Холла в полупроводниках

Илья Прамский

Декабрь 2023

**Цель работы:** измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

**Оборудование:** электромагнит с источником питания, батарейка, амперметр, реостат, цифровой вольтметр, милливеберметр, образцы легированного германия.

## 1 Теоретическая справка

Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси  $x$  течет ток  $I$  (рис. 1).

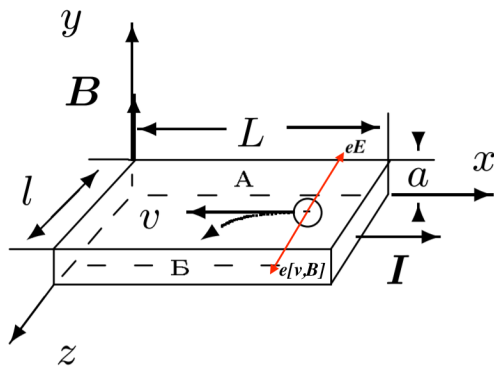


Рис. 1 — Образец с током в магнитном поле

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.

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:

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

Замечая, что сила тока

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

найдем ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_X = U_{AB} = \frac{IB}{nea} = R_X \frac{IB}{a} \quad (1)$$

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.

## 2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

В зазоре электромагнита (рис. 1а) 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. 1б), подключается к батарее. При замыкании ключа  $K_2$  вдоль длинной стороны образца течет ток, величина которого регулируется реостатом  $R$  и измеряется миллиамперметром  $2$ .

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  $\mathcal{E}_X$  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:

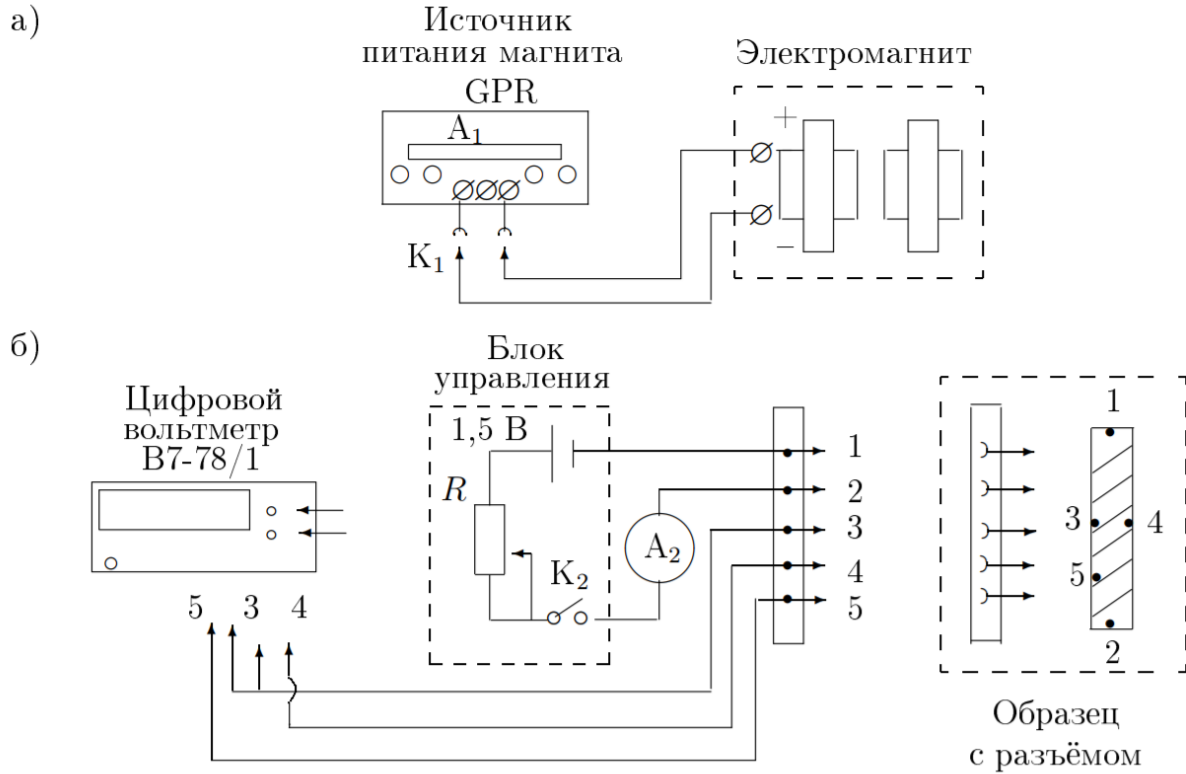


Рис. 2 — Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

$$\mathcal{E}_X = U_{34} \pm U_0$$

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

По знаку  $\mathcal{E}_X$  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:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} \quad (2)$$

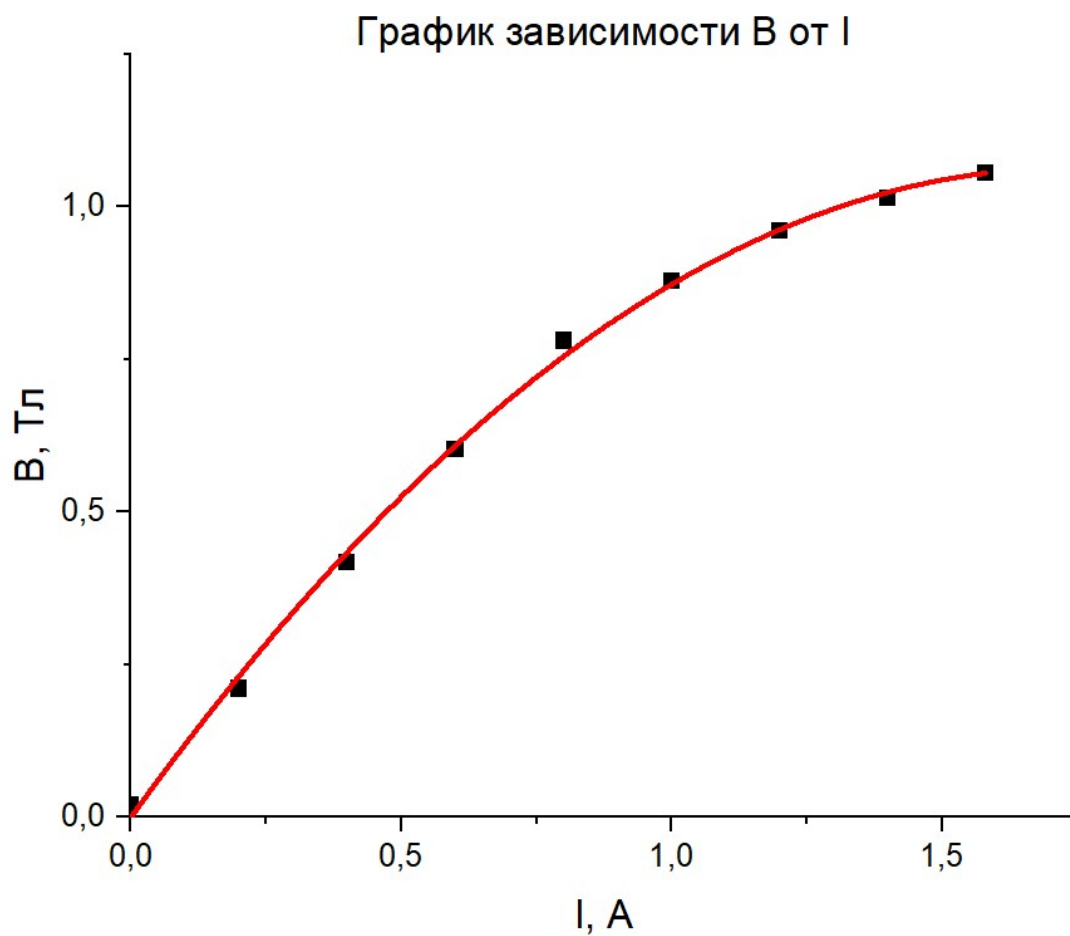
где  $L_{35}$  - расстояние между контактами 3 и 5,  $a$  - толщина образца,  $l$  - его ширина.

### 3 Ход работы

Параметры образца:  $a = 2,2$  мм,  $L_{35} = 3$  мм,  $l = 2,5$  мм.

При помощи милливеберметра измерим магнитное поле, создаваемое электромагнитом при разных значениях подаваемого в него тока  $I_M$ . В дальнейшем при помощи этого графика будем находить значение  $B$  из  $I_M$ .

$I, A$	$B, Tл$
0	0,02
0,2	0,2104
0,4	0,4175
0,6	0,603
0,8	0,7807
1	0,8785
1,2	0,9618
1,4	1,015
1,58	1,056



Теперь построим графики зависимости ЭДС Холла  $\mathcal{E}_X$  от  $B$  при различных токах  $I$ , текущих через образец.

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,14	0,20	11	0,21	4
	0,40	16	0,42	9
	0,60	22	0,60	15
	0,80	26	0,78	19
	1,00	29	0,88	22
	1,20	31	0,96	24
	1,40	33	1,02	26
	1,60	35	1,06	28

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,6	0,20	46	0,21	21
	0,40	68	0,42	43
	0,60	91	0,60	66
	0,80	109	0,78	84
	1,00	124	0,88	99
	1,20	133	0,96	108
	1,40	141	1,02	116
	1,56	146	1,05	121

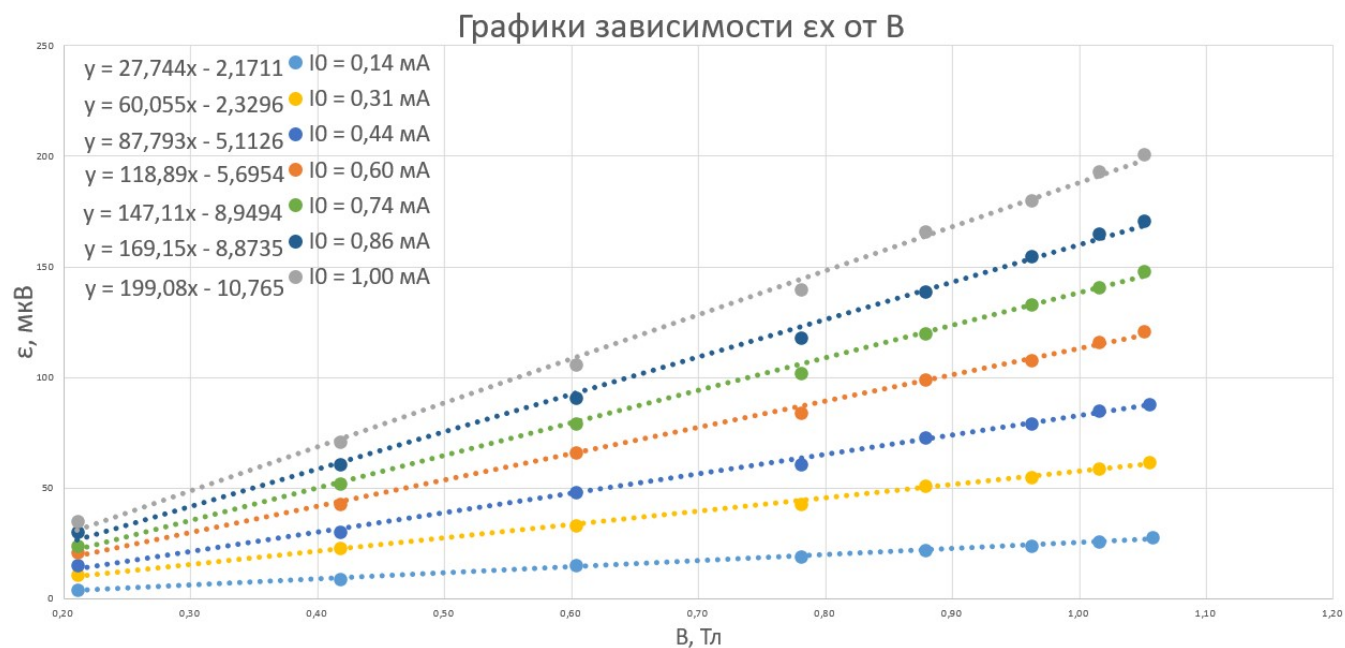
IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
1	0,20	77	0,21	35
	0,40	113	0,42	71
	0,60	148	0,60	106
	0,80	182	0,78	140
	1,00	208	0,88	166
	1,20	222	0,96	180
	1,40	235	1,02	193
	1,55	243	1,05	201

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,31	0,20	24	0,21	11
	0,40	36	0,42	23
	0,60	46	0,60	33
	0,80	56	0,78	43
	1,00	64	0,88	51
	1,20	68	0,96	55
	1,40	72	1,02	59
	1,57	75	1,06	62

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,74	0,20	56	0,21	24
	0,40	84	0,42	52
	0,60	111	0,60	79
	0,80	134	0,78	102
	1,00	152	0,88	120
	1,20	165	0,96	133
	1,40	173	1,02	141
	1,56	180	1,05	148

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,44	0,20	34	0,21	15
	0,40	49	0,42	30
	0,60	67	0,60	48
	0,80	80	0,78	61
	1,00	92	0,88	73
	1,20	98	0,96	79
	1,40	104	1,02	85
	1,57	107	1,06	88

IO мА	Im, А	U34, мкВ	B, Тл	EXолла, мкВ
0,86	0,20	67	0,21	30
	0,40	98	0,42	61
	0,60	128	0,60	91
	0,80	155	0,78	118
	1,00	176	0,88	139
	1,20	192	0,96	155
	1,40	202	1,02	165
	1,56	208	1,05	171



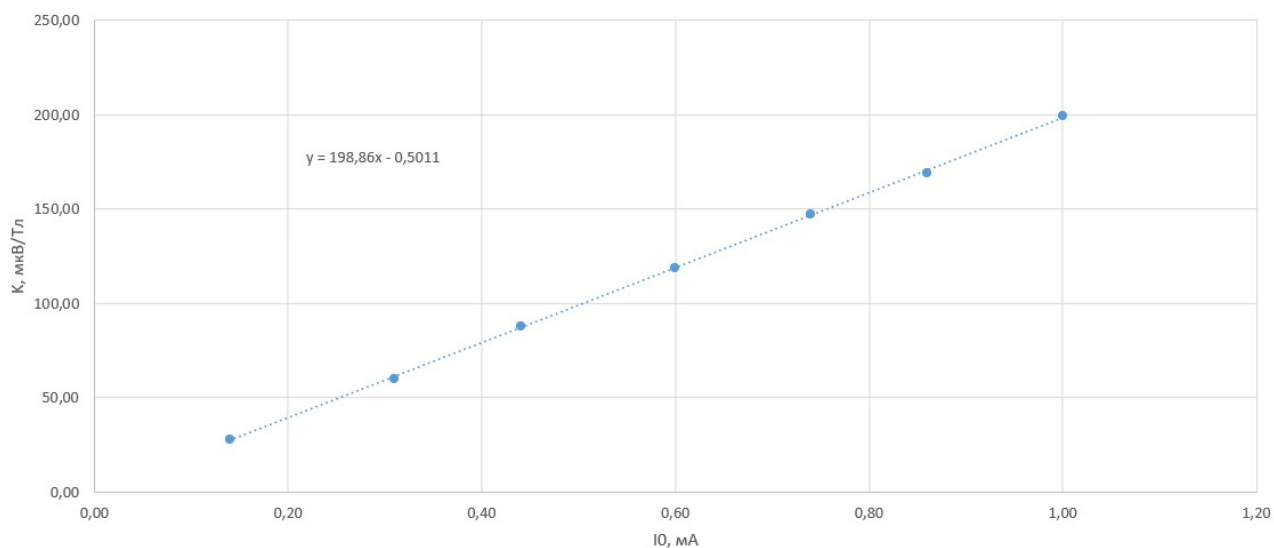
Теперь рассмотрим формулу (1):

$$\mathcal{E}_X = R_x \cdot \frac{I \cdot B}{a} \Rightarrow \frac{\mathcal{E}_X}{B} = \frac{R_x}{a} \cdot I$$

Построим график зависимости  $K = \frac{\varepsilon_X}{B}$  от  $I$ , при помощи коэффициента пропорциональности этой линейной зависимости найдем значение постоянной Холла.

K, мкВ/Тл	IO, мА
27,74	0,14
60,06	0,31
87,79	0,44
118,89	0,60
147,11	0,74
169,15	0,86
199,08	1,00

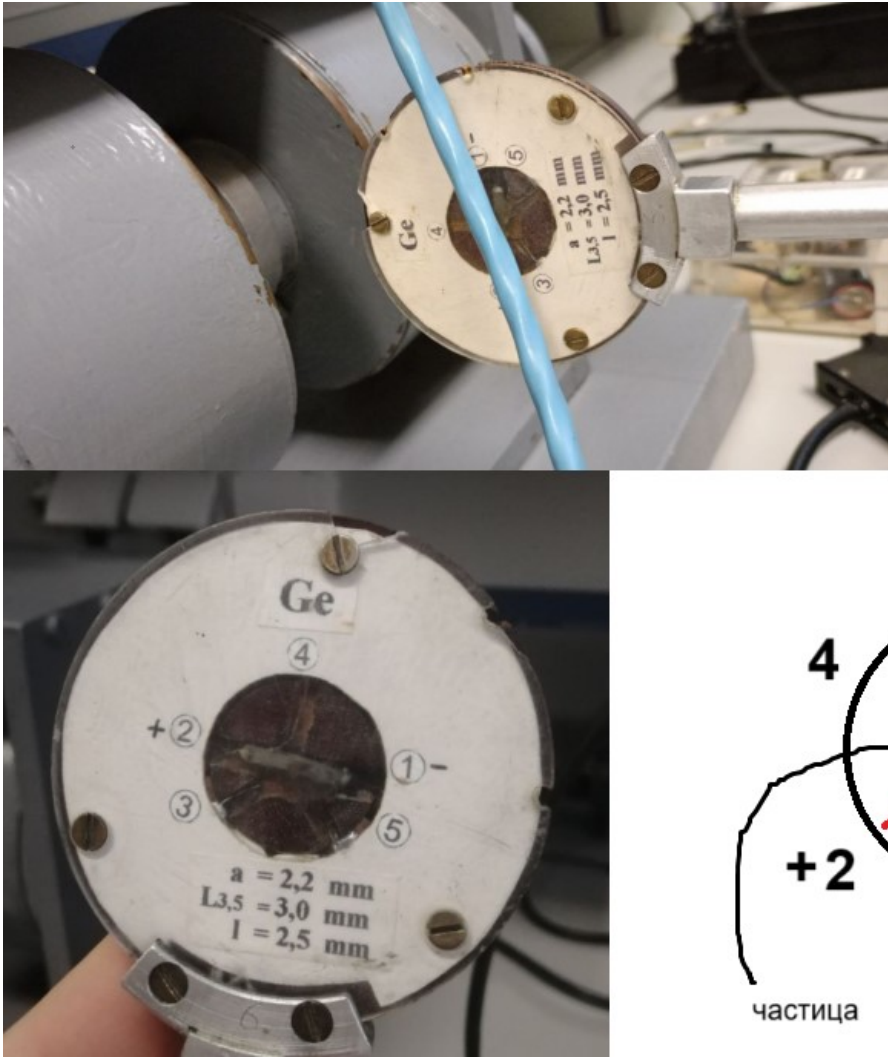
График зависимости K от IO



Получается коэффициент пропорциональности равен  $k = 198,86 \frac{\text{мкВ}}{\text{мА} \cdot \text{Тл}}$ .

Значит,  $R_X = a \cdot k = 437,49 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{Тл}}$ .

Теперь разберёмся с характером проводимости



Из вышеприведённого рисунка видно, что Холловские частицы движутся к клемме 4. Теперь посмотрим показания вольтметра без магнитного поля и с магнитным полем.  $U_{\text{без}} = 20 \text{ мкВ}$   
 $U_c = 125 \text{ мкВ}$ . Знак у напряжения положительны, а это значит, что разность потенциалов  $\varphi_3 - \varphi_4 > 0$ , из чего следует, что Холловское поле направлено от клеммы 3 к клемме 4. Такое возможно только если Холловскими частицами являются электроны.

Найдем теперь концентрацию электронов в образце  $n = \frac{1}{R_x \cdot e} = 1428,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Теперь, подключив потенциальные концы 3 и 5 к вольтметру, измерим падение напряжения  $U_{3,5}$  при токе через образец равном  $I_0 = 1 \text{ мА}$ . Получилось  $U_{3,5} = 1,74 \text{ мВ}$ . Тогда по формуле (2) найдем значение проводимости материала образца.  $\sigma = 313,5 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ .

И наконец, зная значения проводимости и концентрации, найдем подвижность электронов в образце по формуле

$$b = \frac{\sigma}{e \cdot n} = 1372 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Итоговая таблица



$R_H, 10^{-6}, \text{м}^3/\text{Кл}$	Знак носителя	$n, \cdot 10^{19} \text{м}^{-3}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$b, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
437,49	-	1428,6	313,5	1372

## 4 Вывод

В ходе работы был исследован эффект Холла в полупроводнике, сделанном из Германия, измерены его основные параметры, такие как: постоянная Холла, подвижность, концентрация носителей тока, а также проводимость, также был исследован характер проводимости, выяснено какие частицы в нашем случае являются Холловскими. Значения по порядку совпадают со справочными, однако некоторые из них достаточно сильно отличаются от табличных. Это различие вызвано тем, что данный полупроводник имеет в себе примеси, которые, как и было получено, могут сильно изменить характеристики материала.