

### 3.3.4. Эффект Холла в полупроводниках.

Рябых Владислав и Исыпов Илья, Б05-905

6 ноября 2020 г.

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

**В работе используются:** электромагнит с источником питания, амперметр, миллиамперметр, милливольтметр, реостат, цифровой вольтметр, источник питания (1,5 В), образцы легированного германия.

#### Теория

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

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, движущийся с скоростью  $\langle \vec{v} \rangle$  в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B}, \quad (1)$$

где,  $e$  - абсолютная величина заряда электрона,  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля,  $\vec{B}$  - индукция магнитного поля. В нашем случае сила, обусловленная слагаемым, направлена вдоль оси  $z$ :

$$F_B = e|\langle \vec{v}_x \rangle|B.$$

Где  $|\langle \vec{v} \rangle|$  — средняя скорость дрейфа электрона по оси  $x$ , возникающая под действием внешнего электрического поля.

Под действием силы Электроны отклоняются к грани Б, заряжая ее отрицательно (для простоты рассматриваем только один тип носителей). 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  $F_E = eE_z$ , направленной против силы  $F_B$ . В установившемся режиме сила  $F_E$  уравнивает силу  $F_B$ , и накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Из условия равновесия  $F_B = F_E$  найдём

$$E_z = |\langle v_x \rangle| B. \quad (2)$$

Поле  $E_z$  дает вклад в общее поле  $\vec{E}$ , в котором движутся электроны. С полем  $E_z$  связана разность потенциалов  $U_{AB}$  между гранями А и Б:

$$U_{AB} = -E_z l = -|\langle v_x \rangle| B l. \quad (3)$$

В этом и состоит эффект Холла. Второе слагаемое в силе Лоренца (1), с которым связан эффект, часто называют "холловским".

Замечая, что сила тока

$$I = ne|\langle v_x \rangle| l \cdot a, \quad (4)$$

и объединяя (2) и (4), найдём ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a}. \quad (5)$$

Константа  $R_x$  называется постоянной Холла. Как видно из (5),

$$R_x = \frac{1}{ne} \quad (6)$$

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

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

Если основной вклад в эффект вносит один из носителей, то для постоянной Холла можно пользоваться выражением (6). Измеряя величину  $R_x$ , можно с помощью (6) найти концентрацию носителей тока  $n$ , а по знаку возникающей между гранями

А и Б разности потенциалов установить характер проводимости - электронный или дырочный

## Экспериментальная установка

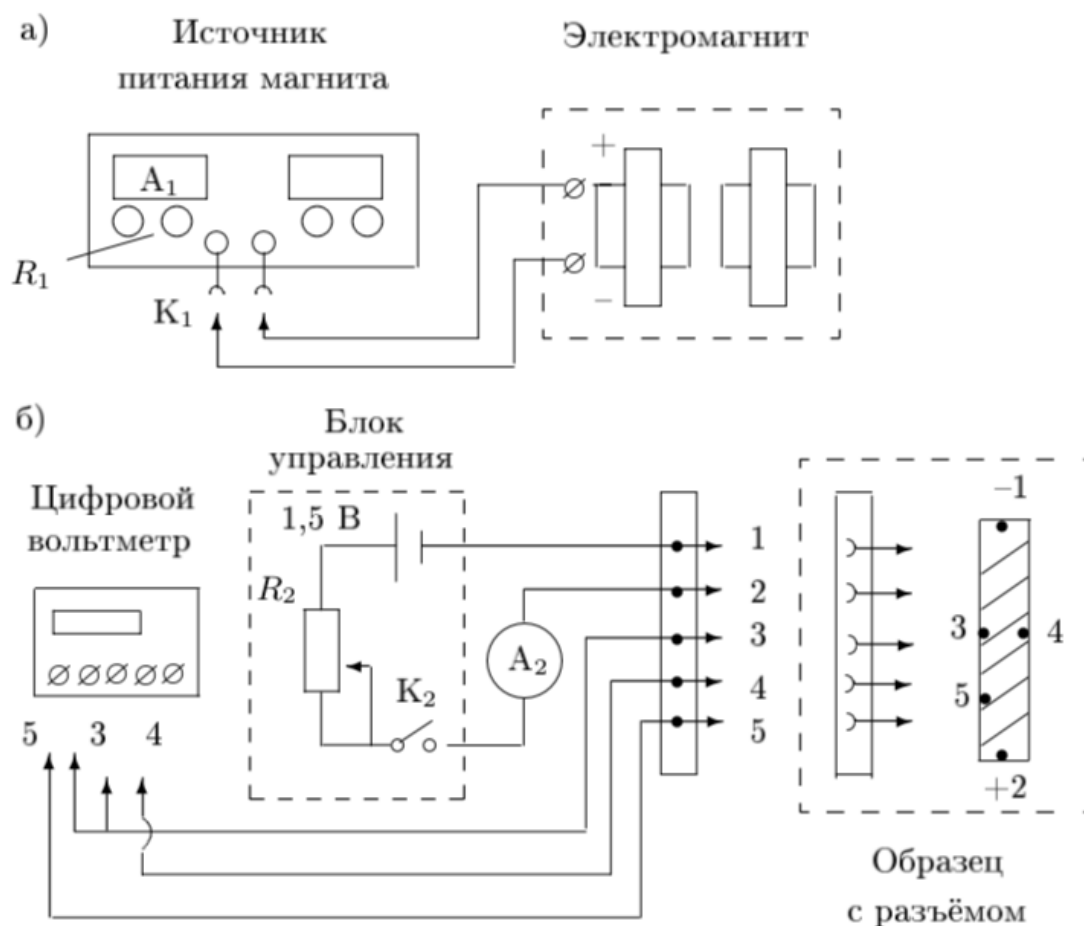


Рис. 1: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

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:

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

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:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} \quad (7)$$

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

# Ход работы

Запишем параметры нашей установки:  $a = 2.2$  мм,  $L_{35} = 3.0$  мм,  $l = 2.5$  мм.

## Калибровка электромагнита

Определим связь между индукцией  $B$  магнитного поля в зазоре электромагнита и током  $I_M$  через обмотки магнита.

$B$ , мТл	20	230	395	580	748	860	940	985	1028
$I$ , А	0	0.22	0.40	0.60	0.80	1.00	1.21	1.40	1.52

Таблица 1: результаты измерений

Построим график зависимости  $B(I)$ , см. рис 2

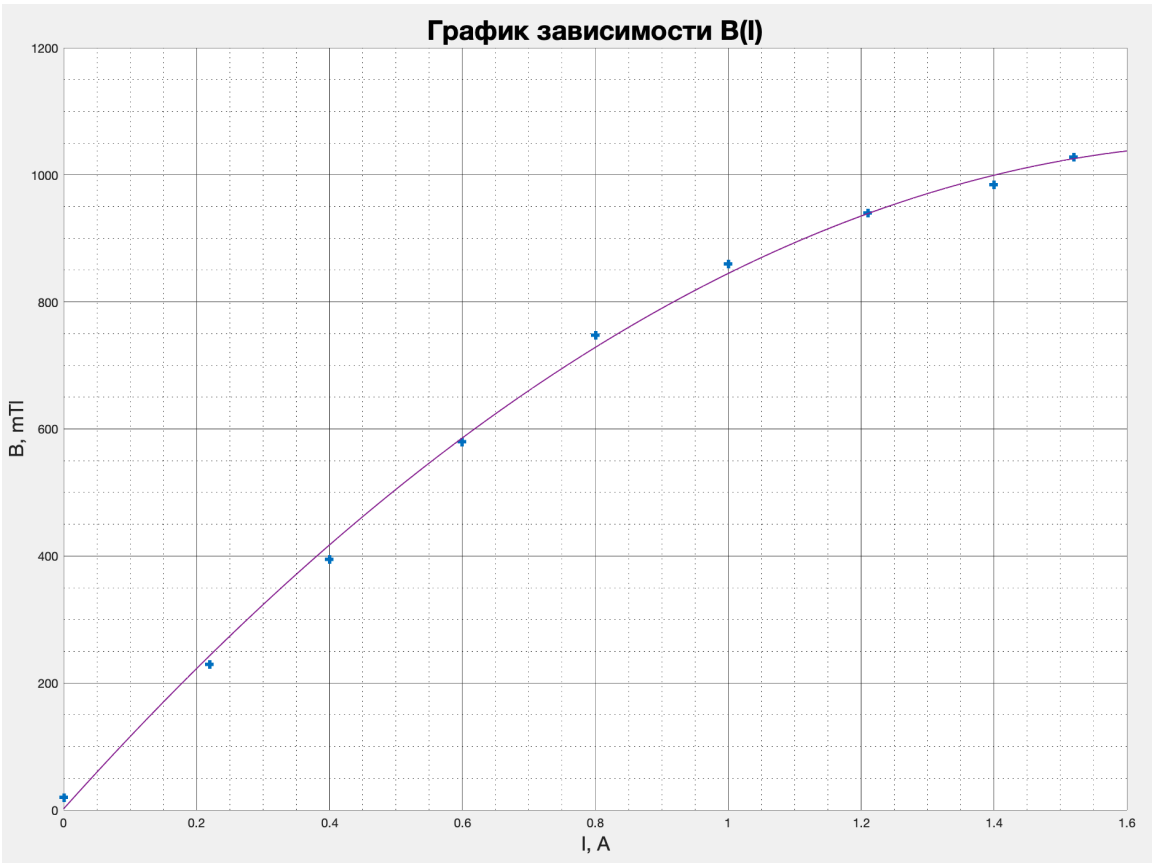


Рис. 2: график зависимости  $B(I)$

Проведем измерение ЭДС Холла

Для измерения ЭДС Холла вставим образец в зазор выключенного электромагнита и определим напряжение  $U_0$  между холловскими контактами 3 и 4 при минимальном токе через образец( $\simeq 0,2$  мА), включим электромагнит и снимем зависимость напряжения  $U_{34}$  от тока  $I$ .

$I, \text{ А}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4
$B, \text{ мТл}$	20	230	395	580	748	860	940	985
$U_{I_0=0.26\text{мА}}, \text{ мкВ}$	15	23	32	41	50	56	61	64
$U_{I_0=0.38\text{мА}}, \text{ мкВ}$	18	31	45	59	72	79	86	91
$U_{I_0=0.50\text{мА}}, \text{ мкВ}$	23	40	58	75	92	104	113	120
$U_{I_0=0.62\text{мА}}, \text{ мкВ}$	28	49	71	94	114	131	140	148
$U_{I_0=0.74\text{мА}}, \text{ мкВ}$	32	57	85	111	135	152	168	175
$U_{I_0=0.86\text{мА}}, \text{ мкВ}$	38	67	98	128	154	177	193	204
$U_{I_0=0.99\text{мА}}, \text{ мкВ}$	43	80	112	147	180	203	222	233

Таблица 2: результаты измерений

Построим семейство характеристик  $U(B)$ , см. рис 3. Заметим, что чем выше сила тока, тем больше  $k$  – коэффициент наклона прямой

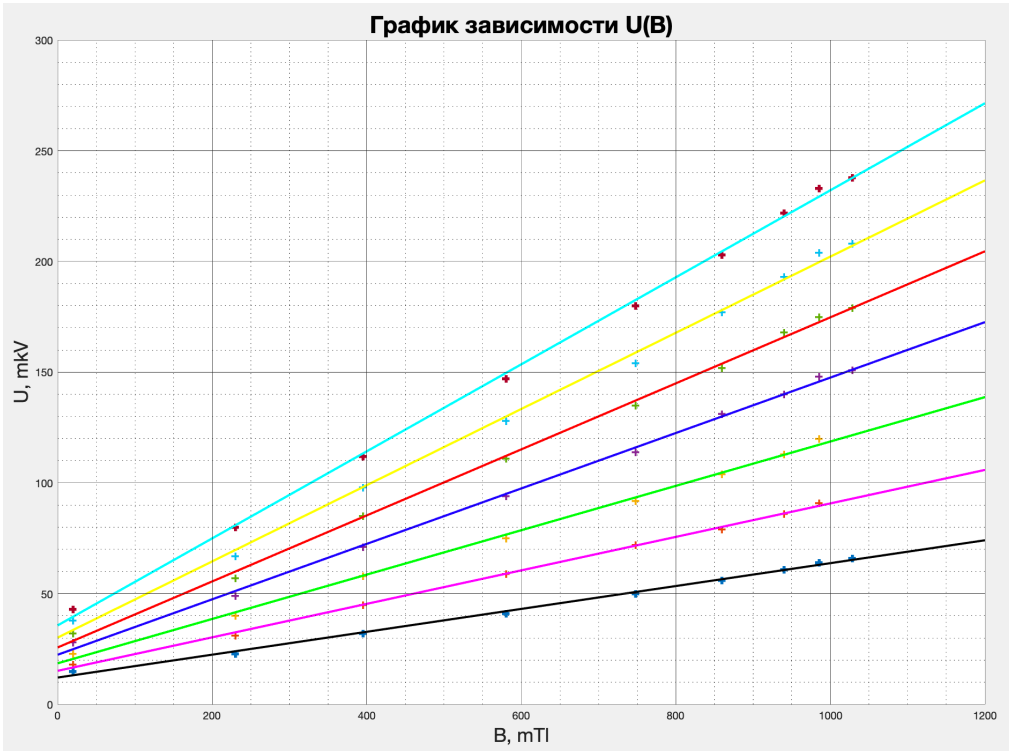


Рис. 3: семейство характеристик  $U(B)$

Из графика 3 получаем угловые коэффициенты  $k(I) = \Delta U / \Delta B$ : запишем их в таблицу 3

$I_0, \text{ мА}$	$k, 10^{-6} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$	$\sigma_k, 10^{-6} \frac{\text{В}}{\text{Тл}}$
0.26	51.7	1.7
0.38	75.6	2.0
0.5	100.2	3.4
0.62	125.2	4.2
0.74	149.1	3.7
0.86	172	5.8
0.99	196.5	6.4

Таблица 3: угловые коэффициенты  $k(I) = \Delta U / \Delta B$

Построим график  $k(I)$ , см. рис. 4

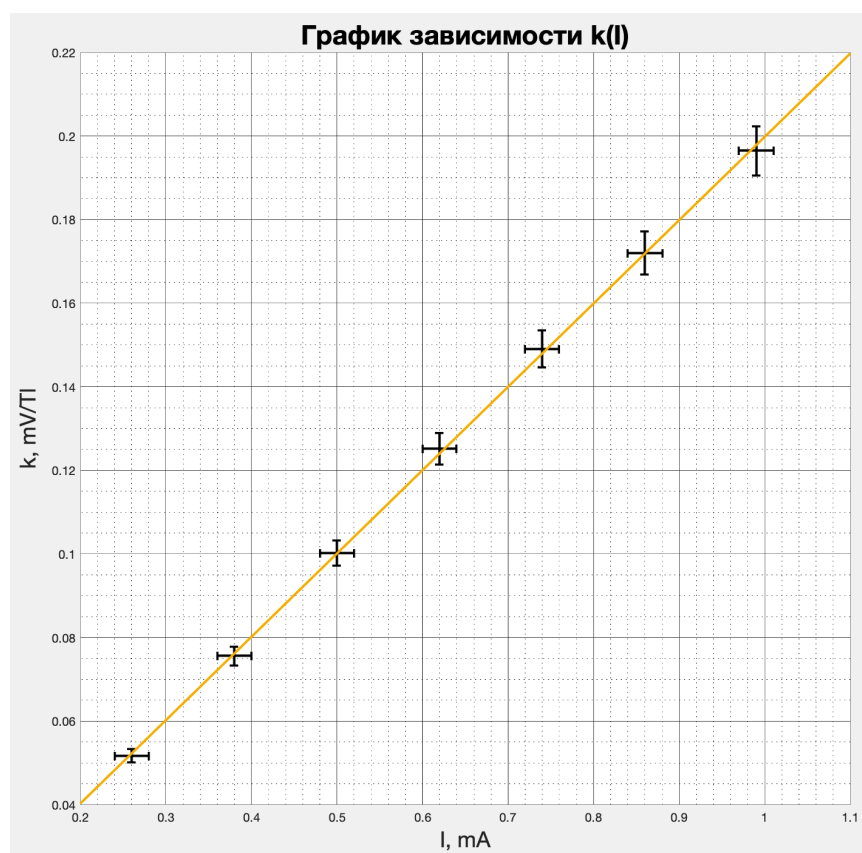


Рис. 4: семейство характеристик  $U(B)$

По графику определим угловой коэффициент, определим величину постоянной холла  $R_x$

$$R_x = -k \cdot a \approx -(7.98 \pm 0.69) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Рассчитаем концентрацию  $n$  носителей в образце:

$$n = \frac{1}{R_x e} = (0.78 \pm 0.21) \cdot 10^{22} \frac{\text{ед}}{\text{м}^3}$$

Рассчитаем удельную проводимость  $\sigma$  материала образца:

$$\sigma = \frac{TL_{35}}{U_{35}al} = 148.9 \frac{\text{А}}{\text{В} \cdot \text{м}}$$

Вычислим подвижность носителей тока

$$b = \frac{\sigma}{en} = (1548 \pm 350) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

для сравнения: табличное значение для дырок германия  $b = 1820 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$

## Выводы

В ходе работы был исследован эффект Холла в полупроводнике-германии. Были определены такие характеристики, как постоянная Холла, концентрация холловских частиц, удельная электрическая проводимость германия и подвижность электронов-носителей заряда в нём. Результаты совпали с табличными в пределах погрешности.