

# Работа 3.3.4

## Эффект Холла в полупроводниках

Подлесный Артём  
группа 827

12 декабря 2019 г.

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

**Оборудование:** электромагнит с источником питания GPR, батарейка 1.5 В, амперметр, реостат, цифровой вольтметр, милливольтметр, образцы легированного германия.

### Общая теория

#### Зонная модель

Соударения электронов с решеткой можно рассматривать как вязкое трение, поэтому для средней скорости упорядоченного движения получаем:

$$\langle \vec{v} \rangle = -b\vec{E},$$

где  $b$  - подвижность. Получаем силу действия кристаллической решетки на электроны:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -\frac{e}{b}\langle \vec{v} \rangle.$$

Если концентрация электронов равна  $n$ , то плотность тока будет определяться простым соотношением:

$$j = en\langle v \rangle = enbE.$$

Таким образом получаем закон Ома:

$$j = \sigma E, \text{ где } \sigma = enb. \quad (1)$$

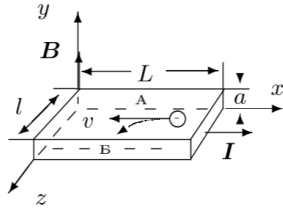
Здесь  $\sigma$  – это электрическая проводимость. Для полупроводников в общем случае, когда в процессе проводимости участвуют и электроны, и дырки, проводимость определяется таким соотношением:

$$\sigma = e(nb_e + pb_p),$$

где  $n$ , и  $p$  – концентрации электронов и дырок,  $b$  – их проводимости.

## Эффект Холла в металлах и полупроводниках

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



Если этот образец поместить в магнитное поле, направленное по оси  $y$ , то между пластинами А и Б возникнет разность потенциалов, и на электрон будет действовать сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = -e\vec{E} - e\langle\vec{v}\rangle \times \vec{B}. \quad (2)$$

В нашем случае сила, обусловленная вторым слагаемым направлена вдоль оси  $z$  и равна

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

Рис. 1: Образец с током в магнитном поле.

Здесь  $\langle v_x \rangle$  – это абсолютная величина дрейфовой скорости электронов. Из условие равновесия  $F_B = F_E$  находим:

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

С полем  $E_z$  связана разность потенциалов между пластинами А и Б:

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

В этом и состоит эффект Холла. Тк сила тока

$$I = ne|\langle v_x \rangle|l \cdot a,$$

то находим ЭДС Холла:

$$\xi_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a}. \quad (3)$$

Константа  $R_x$  называется постоянной Холла. Она равна, как видно,

$$R_x = \frac{1}{ne}. \quad (4)$$

В полупроводниках выражение для постоянной Холла более сложное:

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

# Экспериментальная установка

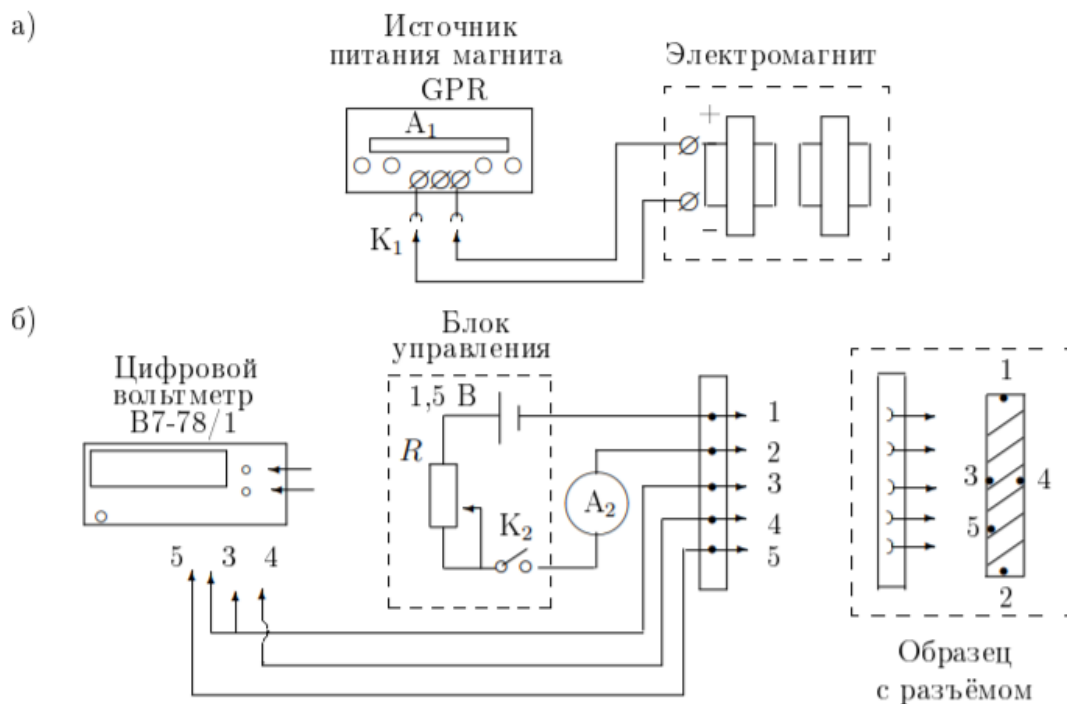


Рис. 2: Экспериментальная установка

Рассчитать проводимость образца можно, зная параметры установки, по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} \quad (5)$$

## Экспериментальные данные

### Градуировка электромагнита

Была исследована зависимость потока электромагнитной индукции в зазоре электромагнита  $\Phi$  от тока  $I_M$  через его обмотки. Она представлена на таблице.

### Измерение ЭДС Холла

Измерения проводились в соответствии с методичкой, начальное напряжение на вольтметре -  $U_0$ . В зависимости от тока на обмотке магнита  $I_M$ , и, в более общем случае, от тока через образец  $I$ , измерялось напряжение на выходах 3-4 образца, которое и было ЭДС Холла. Все измерения представлены на

$I, \text{ A}$	$\Phi, \text{ мВб}$	$B, \text{ мТл}$
0.2	1.4	194.44
0.4	2.7	375.00
0.6	4	555.56
0.8	5.2	722.22
1	6.3	875.00
1.2	7.1	986.11
1.4	7.7	1069.44
1.58	8	1111.11

Таблица 1: Градуировка электромагнита

$I, \text{ мА} :$	$U_0, \text{ мкВ} :$	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	30	56	75	96	115	127	135	142
0.3	9	$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.59
0.4	23	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	54	85	114	140	165	182	195	202
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.59
0.5	28	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	65	102	141	175	206	229	241	252
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.59
0.6	33	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	78	125	170	212	248	273	291	304
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.59
0.7	37	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	90	141	196	245	288	318	337	352
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.59
0.8	40	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	95	162	220	275	327	361	383	400
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.57
0.9	38	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	101	171	239	301	354	393	419	436
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.57
1	33	$U_0 + U_{34}, \text{ мкВ}$	106	185	260	332	390	433	462	482
		$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.56

Таблица 2: Очень большая таблица

$-U_{34}, \text{ мкВ}$	72	149	231	300	361	406	436	455
$I_M, \text{ мА}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.56

Таблица 3: Обратное направление магнитного поля

"очень большой таблице". Так же, при максимально возможном токе через образец (1 А), мы провели измерения при другом направлении магнитного поля через образец. Они представлены на таблице 3.

## Определение характера проводимости

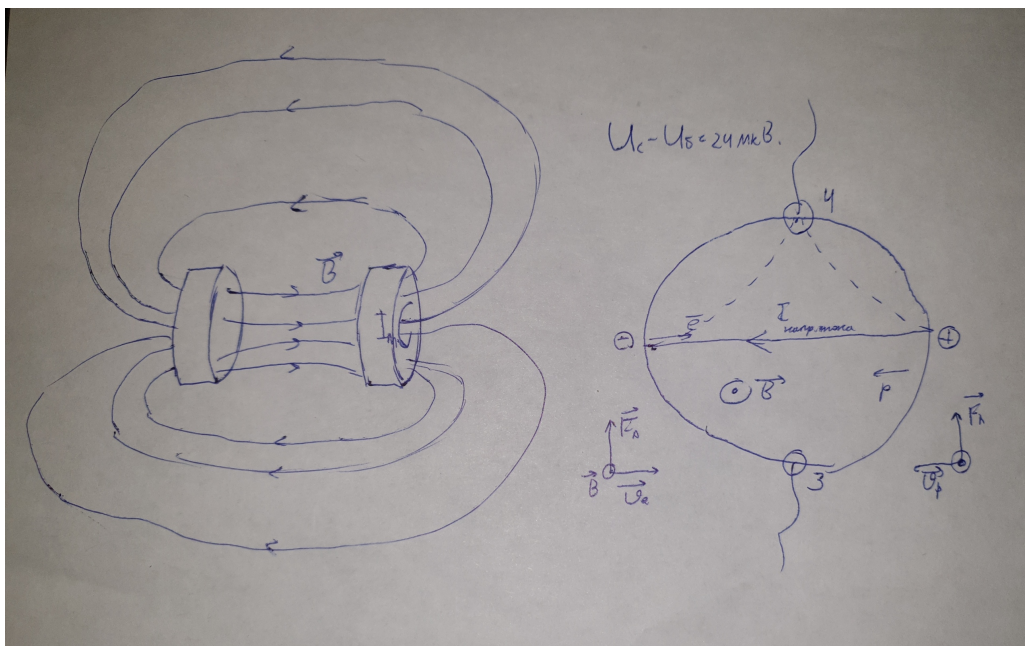


Рис. 3: Определение характера проводимости

Как видно из рисунка, если найти вектор силы Лоренца, направление тока, а так же знак ЭДС Холла, которое в этом случае положительное, то можно заключить, что в легированном германии преобладает проводимость электронного типа.

## Определение удельной проводимости

При токе через образец в 1 мА было измерено падение напряжения между контактами 3-5,

$$U_{35} = -1.66 \pm 0.01 \text{ мВ}, \quad (6)$$

Таким образом, зная, что  $L_{35} = 3.0 \text{ мм}$ ,  $a = 1.5 \text{ мм}$ ,  $l = 1.7 \text{ мм}$ , используя формулу (5), вычисляем удельную проводимость:

$$\sigma = -708 \pm 11 (\text{Ом}^* \text{м})^{-1}. \quad (7)$$

## Обработка данных

### Градуировка электромагнита

Используя формулу  $\Phi = BSN$ , и зная, что  $SN = 72 \text{ вит}^* \text{см}^2$ , Можем построить график  $B = f(I_M)$ , он показан на рис 4.

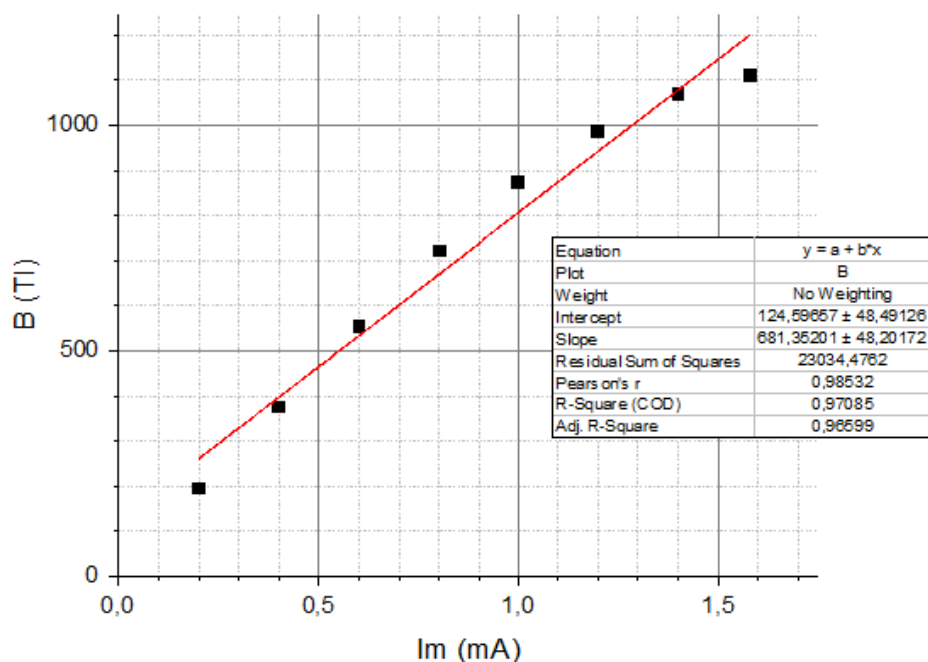


Рис. 4:  $B = f(I_M)$

## Определение постоянной Холла

Построим графики зависимостей  $\xi_x = f(B)$ , для каждого из токов через образец (0.3 – 1.0) мА, и линеаризуем каждый график. Для каждого тока получим величину коэффициента наклона графика. Все это представлено на рис.5. Отсюда получаем таблицу значений  $K(I)$ :

$K$ , В/Тл	0.12	0.16	0.203	0.244	0.285	0.33	0.363	0.407
$\Delta K$ , В/Тл	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005
$I$ , мА	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица 4:  $K(I)$

Теперь построим график  $K = f(I)$ , он показан на рис.6. Из графика видно, что коэффициент наклона этого графика:

$$\alpha = (413 \pm 3) \text{ В}/(\text{Тл} \cdot \text{мА}). \quad (8)$$

Используя формулу (3) получаем, что

$$R_x = -\xi_x \frac{a}{IB} = -a\alpha, \quad (9)$$

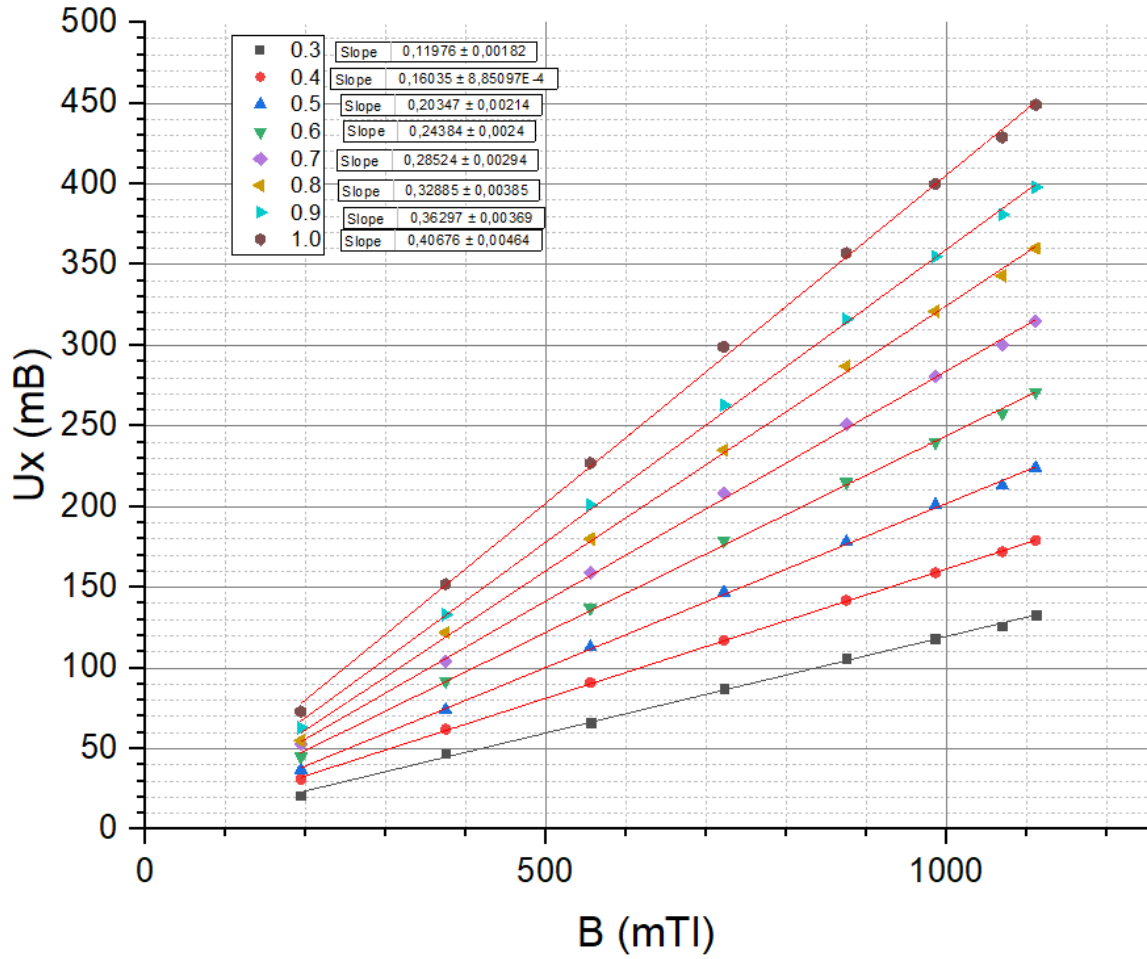


Рис. 5: Очень красивый график

где  $a = 1.5$  мм. Окончательные результаты будут представлены в форме таблицы в разделе "Результаты".

## Расчет концентрации и подвижности носителей заряда

С помощью формулы (4) находим концентрацию зарядов:

$$n = \frac{1}{eR_x}. \quad (10)$$

Далее, зная выражение (1) и проводимость образца, получаем формулу для подвижности:

$$b = \frac{\sigma}{en} = \sigma \cdot R_x. \quad (11)$$

Погрешности этих значений рассчитываются по известным формулам.

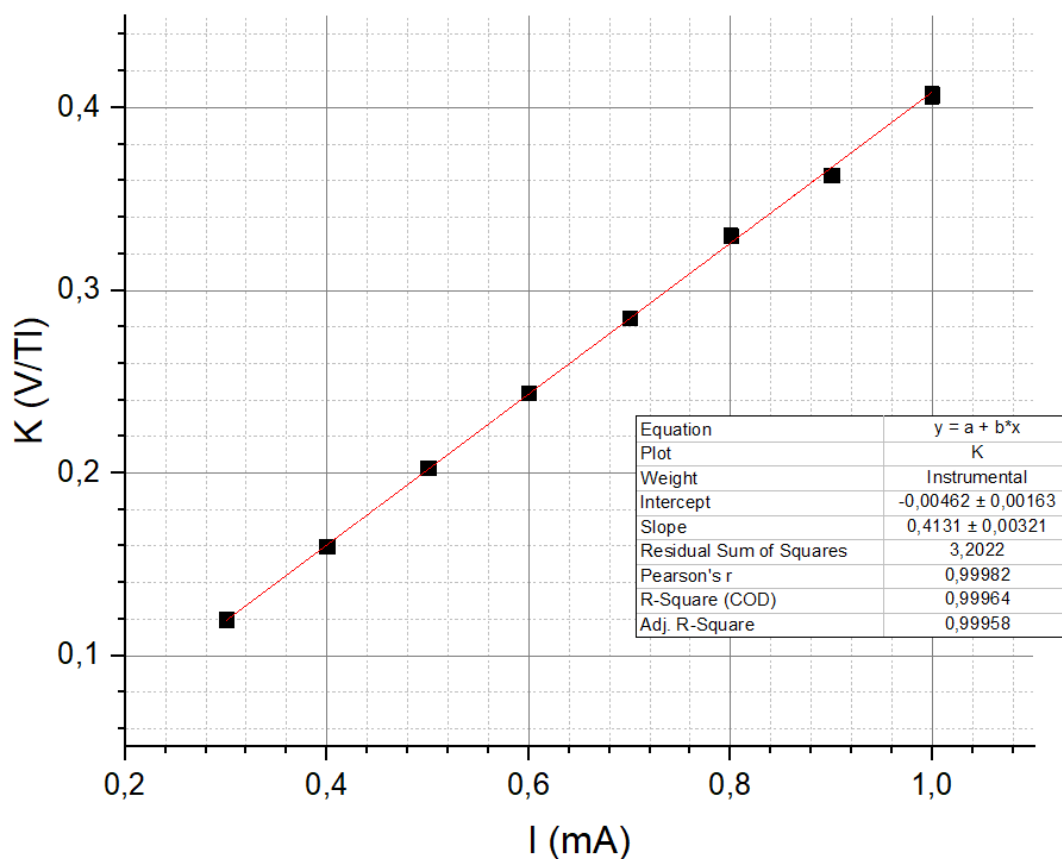


Рис. 6:  $K = f(I)$

## Результаты

Результаты представлены в виде таблицы. Они отлично согласуются со спра-

$R_x \pm \Delta R_x, \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$	$n \pm \Delta n, \text{м}^{-3}$	$\sigma \pm \Delta \sigma, (\text{Ом}^* \text{м})^{-1}$	$b \pm \Delta b, \frac{\text{см}^2}{\text{В}^* \text{с}}$
$-(6.2 \pm 0.05) \times 10^{-4}$	$(1.01 \pm 0.01) \times 10^{22}$	$-(708 \pm 11)$	$(4.4 \pm 0.1) \times 10^2$

Таблица 5: Результаты

вочными данными и обладают малой ошибкой измерений.

## Вывод

В соответствии с целью работы измерены подвижность и концентрация носителей заряда с хорошей точностью и степенью согласованности, так же был определен тип этих носителей - это электроны, что соответствует легированному германию. Изучен эффект Холла на лабораторном оборудовании.