

### **3.3.4 Эффект Холла в полупроводниках.**

**Ивакин Кирилл Б01-907**

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

**Оборудование:** электромагнит с регулируемым источником питания; вольтметр; амперметр; миллиамперметр; милливеберметр или миллитесламетр; источник питания (1,5 В), образцы легированного германия.

## 1 Теория

### 1.1 Движение носителей заряда в металлах и полупроводниках

Проводимость большинства твёрдых тел связана с движением электронов. Электроны входят в состав атомов всех тел, однако одни тела не проводят электрический ток (диэлектрики), а другие являются хорошими его проводниками. Причина различия заключается в особенностях энергетического состояния внешних электронов в атомах этих веществ.

При объединении атомов в твёрдое тело — кристалл — внешние (валентные) электроны теряют связь со «своими» атомами и становятся принадлежностью всего кристалла. Каждый уровень энергии электрона. В промежутках между зонами допустимых состояний электрона нет — эти области называют *запрещёнными зонами*.

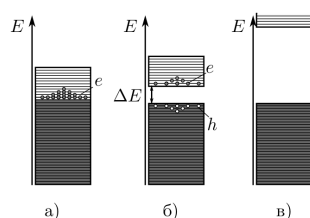


Рис. 1: Структура состояний а) металла, б) полупроводника, в) диэлектрика

Если одна из зон полностью заполнена электронами, а следующая — пуста, то под действием слабого внешнего электрического поля электроны не могут изменить своё состояние, а значит, и не могут прийти в упорядоченное движение. Тогда вещество является *диэлектриком*. Верхняя из заполненных зон называется *валентной зоной*.

Положение меняется, если в кристалле имеется зона, частично заполненная электронами. В этом случае внешнее электрическое поле может изменить распределение электронов по уровням энергии и вызвать их упорядоченное движение. Частично заполненная зона называется *зоной проводимости*.

Если ширина запрещённой зоны  $E$  не слишком велика по сравнению с тепловой энергией ( $E = k_B T$ ), тепловое движение перебрасывает часть электронов из валентной зоны в свободную зону проводимости над ней. При этом в зоне проводимости появляются электроны, а в валентной зоне — вакантные места — дырки. Как электроны в зоне проводимости, так и дырки в валентной зоне участвуют в переносе заряда. Такие вещества называются полупроводниками. Проводимость полупроводников экспоненциально растёт с повышением температуры, поскольку вероятность для электрона преодолеть запрещённую зону определяется распределением Больцмана.

### 1.2 Эффект Холла

Во внешнем магнитном поле  $\mathbf{B}$  на заряды действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{u} \times \mathbf{B}. \quad (1)$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с  $\mathbf{E}$ . 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, помещённом во внешнее магнитное поле, называют *эффектом Холла*.

Выразим общую связь между  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{j}$  для случая носителей одного типа. Магнитное поле направим вдоль оси  $z$ , а о направлении  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{j}$  никаких предположений делать не будем. При движении носителей с постоянной средней скоростью сила Лоренца будет уравновешена трением со стороны среды

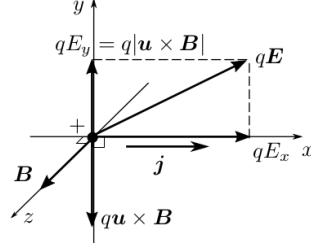


Рис. 2: Силы, действующие на положительный носитель заряда в проводящей среде при наличии магнитного поля

$$q(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) - q \frac{\mathbf{u}}{\mu} = 0 \quad (2)$$

Этот баланс сил можно переписать как

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{j}}{\sigma_0} - \frac{1}{nq} \mathbf{j} \mathbf{B} \quad (3)$$

где  $\sigma_0 = qn\mu$

Введя тензор удельного сопротивления  $\hat{\rho}$  получим

$$\mathbf{E} = \hat{\rho} \mathbf{j} = \begin{pmatrix} 1 & -\mu B & 0 \\ \mu B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\mathbf{j}}{\sigma_0} \quad (4)$$

### 1.3 Мостик Холла

Для исследования зависимости проводимости среды от магнитного поля в нашем опыте используют *мостик Холла*.

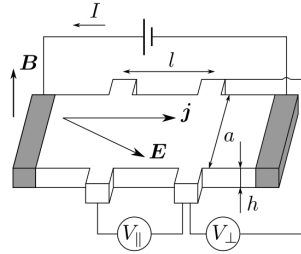


Рис. 3: мостик Холла

В данной схеме ток вынуждают течь по оси  $x$  вдоль плоской пластинки (ширина пластинки  $a$ , толщина  $h$ , длина  $l$ ). Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, «прибивает» носители заряда к краям образца, что создаёт холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу. Поперечное напряжение между краями пластинки (*холловское напряжение*  $U_{\perp} = E_y * a$ , где согласно (4)

$$E_y = \rho_{yx} j_x = \frac{j_x B}{nq} \quad (5)$$

Плотность тока, текущего через образец, равна  $j_x = I/ah$ , где  $I$  — полный ток, а  $h$  — поперечное сечение. Таким образом, для холловского напряжения имеем

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} I = R_H \frac{B}{h} I \quad (6)$$

Где константу

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (7)$$

называют *константой Холла*. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей.

Продольная напряжённость электрического поля равна

$$E_x = \rho_{xx} j_x = j_x / \sigma_0 \quad (8)$$

и падение напряжения  $U_{\parallel} = E_x l$  вдоль пластинки определяется омическим сопротивлением образца  $R_0 = l / (\sigma_0 a h)$

$$U_{\parallel} = I R_0 \quad (9)$$

## 2 Экспериментальная установка

В работе изучаются особенности проводимости полупроводников в геометрии мостика Холла. Ток пропускается по плоской полупроводниковой пластинке, помещённой в перпендикулярное пластинке магнитное поле. Измеряется разность потенциалов между краями пластинки в поперечном к току направлении. По измерениям определяется *константа Холла*, тип проводимости (*электронный* или *дырочный*) и на основе соотношения (3.28) вычисляется концентрация основных носителей заряда.

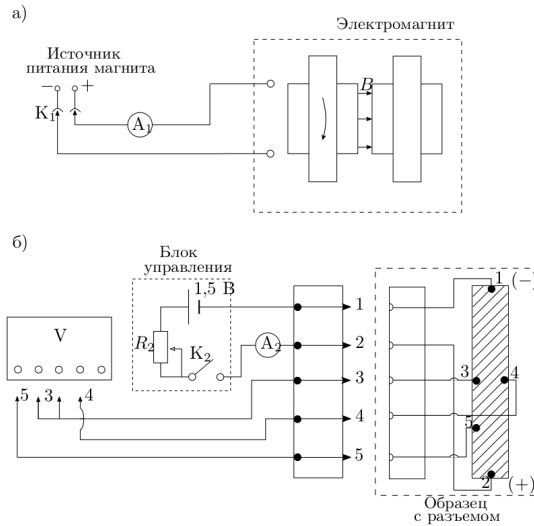


Рис. 4: Экспериментальная установка

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром А 1 (внешним или встроенным в источник).

Направление тока в обмотках электромагнита меняется переключением разъёма К 1. Градуировка электромагнита (связь тока с индукцией поля) проводится при помощи милливольтметра или миллитесламетра на основе датчика Холла.

Прямоугольный образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе, подключается к источнику питания ( $\approx 1.5$  В). При замыкании ключа К 2 вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется реостатом  $R$  2 и измеряется миллиамперметром А 2. В образце, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов  $U_{34}$ , которая измеряется с помощью вольтметра  $V$ .

Контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки могут лежать не на одной эквипотенциали. Тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения вдоль пластинки. Исключить этот эффект можно, изменяя направление магнитного поля, пронизывающего образец. При обращении поля ЭДС Холла меняет знак, а омическое падение напряжения остаётся неизменным. Поэтому ЭДС Холла  $U_{\perp}$  может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре:  $U = \frac{1}{2} (U_{34}^+ + U_{34}^-)$ .

Альтернативно можно исключить влияние омического падения напряжения, если при каждом значении тока через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного

поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение  $U_0$  остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$U_{\perp} = U_{34} - U_0 \quad (10)$$

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

По знаку  $U_{\perp}$  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

$$\sigma = \frac{U_{35} a h}{I l} \quad (11)$$

где  $l$  - расстояние между контактами 3 и 5,  $a$  - ширина образца,  $h$  - его толщина.

## 3 Ход работы

### 3.1 Градуировка электромагнита

Расчитаем индукцию магнитного поля  $B$  для каждого значения тока и построим график зависимости  $B = f(I_M)$ . Для этого воспользуемся милливеберметром, класс точности которого составляет 0.5, а также формулой  $\Phi = BSN$ , где  $BS = 75 \text{ см}^2/\text{вит}$  для нашей установки. Ток будем менять с помощью источника питания GPR-11Н30, погрешность которого равна 0.02 А.

$I, \text{ А}$	0.0	0.23	0.53	0.71	0.90	1.11	1.38
$\Phi, \text{ мВб}$	0.1	2.3	4.4	6.0	7.4	8.9	10.9
$B, \text{ мТл}$	13.3	306.5	586.6	800.0	986.6	1186.6	1453.3

Таблица 1: Градуировка электромагнита

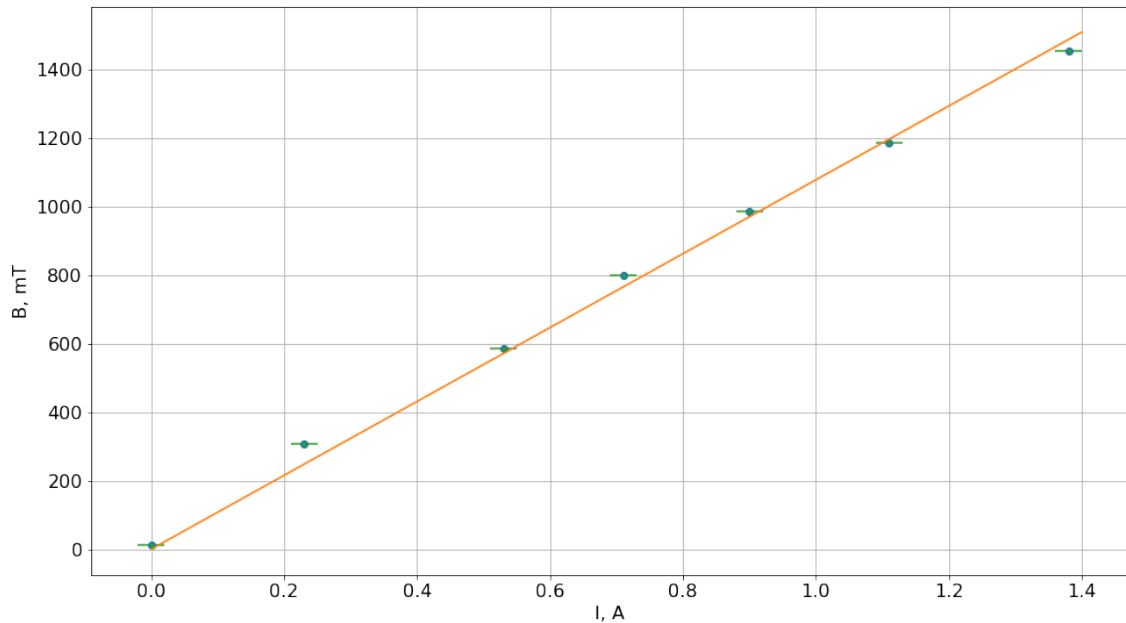


Рис. 5: график зависимости  $B = f(I_M)$

С помощью метода наименьших квадратов определим коэффициент наклона графика

$$k_1 = 1078.5 \pm 14.1 \text{ мТл/А}$$

### 3.2 ЭДС Холла

Расчитаем ЭДС Холла и построим на 1 графике семейство характеристик  $\xi_x = f(I_m)$  (рис. 6):

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.050	0.038	0.010	-0.015	-0.038	-0.057	-0.065

Таблица 2:  $I_0 = 0.34 \text{ мА}$

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.065	0.050	0.013	-0.019	-0.047	-0.072	-0.082

Таблица 3:  $I_0 = 0.43 \text{ мА}$

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.082	0.062	0.018	-0.022	-0.057	-0.088	-0.100

Таблица 4:  $I_0 = 0.53 \text{ мА}$

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.107	0.082	0.026	-0.034	-0.074	-0.115	-0.131

Таблица 5:  $I_0 = 0.69 \text{ мА}$

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.127	0.098	0.032	-0.034	-0.088	-0.133	-0.153

Таблица 6:  $I_0 = 0.82 \text{ мА}$

$I, \text{ A}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
$U_{34}, \text{ мВ}$	0.150	0.114	0.035	-0.037	-0.103	-0.158	-0.182

Таблица 7:  $I_0 = 0.96 \text{ мА}$

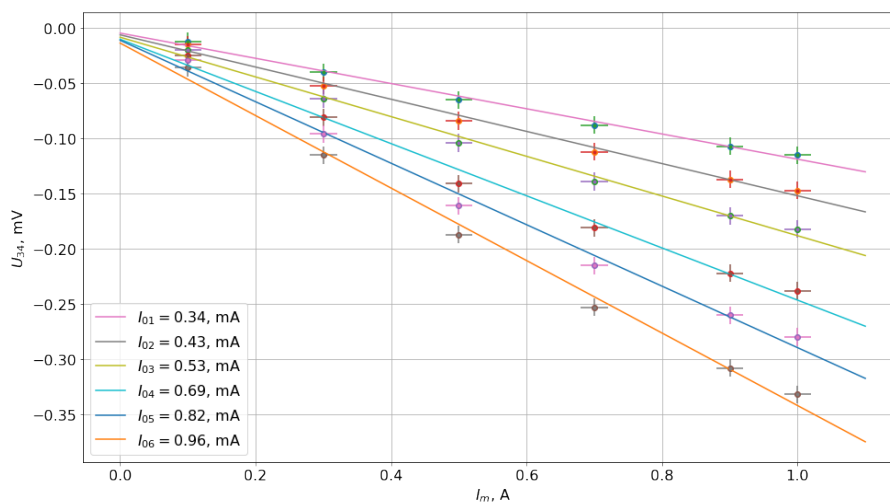


Рис. 6: график семейства характеристик  $\xi_x = f(I_m)$

Запишем коэффициенты получившихся прямых. Коэффициенты и их погрешности были посчитаны методом наименьших квадратов.

$I_0$ , мА	0.34	0.43	0.53	0.69	0.82	0.96
$k$ , мВ/Тл	-0.114	-0.145	-0.179	-0.236	-0.278	-0.328
$\sigma_k$ , мВ/Тл	0.004	0.005	0.006	0.009	0.010	0.010

Таблица 8: Коэффициенты наклона  $\xi_x = f(I_0)$

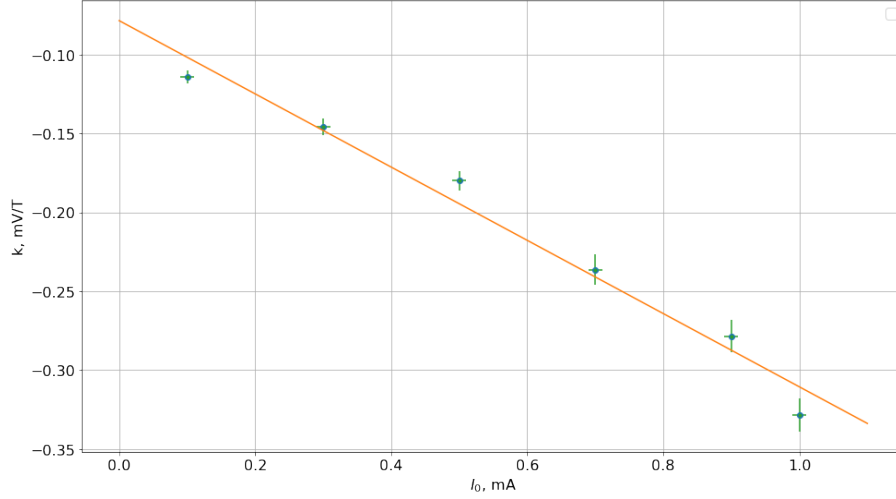


Рис. 7: график коэффициентов наклона  $k = f(I_0)$

По полученным данным построим график зависимости  $k = f(I_0)$  (рис. 7).  
С помощью метода наименьших квадратов найдём угловой коэффициент этой прямой.

$$K = -0.23 \pm 0.02 \text{ В/ТлА}$$

### 3.3 Расчёты

Расчитаем постоянную Холла  $R_x$

$$R_x = -Ka = (0.506 \pm 0.044) \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{Тл}}$$

Расчитаем концентрацию носителей в образце

$$n = \frac{1}{R_x e} = (6.84 \pm 0.03) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

Подвижность носителей заряда равна

$$b = \frac{\sigma}{en} = (0.24 \pm 0.03) \frac{\text{м}}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

, где

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35al}} = 154 \pm 16 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

## 4 Вывод

Таблица 9: Результаты

$R_x \pm \Delta R_x, \frac{\text{мВ} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{Тл}} \cdot 10^{-4}$	Знак носителей	$n \pm \Delta n, \text{м}^{-3} \cdot 10^{21}$	$\sigma \pm \Delta \sigma, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$	$b, \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$
$5.06 \pm 0.44$	Минус	$6.84 \pm 0.19$	$154 \pm 16$	$0.24 \pm 0.03$