



**«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

---

Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

Факультет «Фундаментальные науки»

Кафедра ФН-4 «Физика»

С.П. Бабенко, Б.Е. Винтайкин, О.Ю. Дементьева.

## ***Эффект Холла в полупроводниках $p$ - и $n$ - типа.***

*Методические указания к выполнению лабораторной работы*

Под редакцией О.С. Литвинова

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

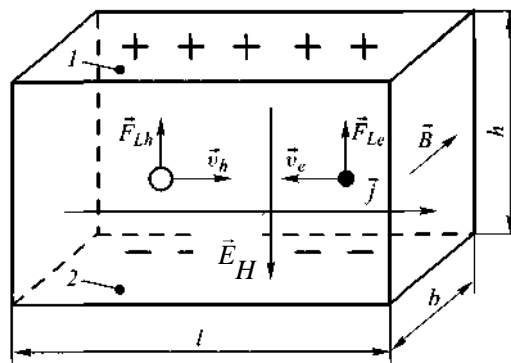
Москва, 2014

## Эффект Холла в германии.

Цель работы: изучение эффекта Холла на полупроводниках  $p$ -типа и  $n$ -типа и определение параметров носителей тока в них.

### Теоретическая часть .

Эффект Холла относится к гальваномагнитным явлениям. Гальваномагнитными называется группа явлений, обусловленных комплексным воздействием на твердые тела электрического и магнитного полей. Самое известное из этих явлений — эффект Холла. Рассмотрим его.



**Рис. 1** Схема появления холловской напряженности электрического поля и поверхностных зарядов в полупроводнике с сопоставимыми концентрациями электронов и дырок.

Имеется проводящая пластина,  $b$  — толщина пластины,  $h$  — ее высота,  $E$  — напряженность электрического поля,  $B$  — индукция магнитного поля.

Под действием электрического поля  $\vec{E}$  электроны движутся против поля, а дырки по полю. На движущиеся заряды действует сила Лоренца  $\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}]$ . Она отклоняет носители обоих знаков в одном и том же направлении вверх. Если электронов в этом образце больше, чем дырок, то на верхней грани происходит скопление отрицательного заряда, а на нижней — положительного заряда. В результате этого эффекта грани полупроводника заряжаются. Между гранями возникает электрическое поле, направленное сверху вниз. Это поле действует на отрицательные заряды с силой, направленной с низу вверх. Возникающая

сила препятствует отклонению дырок силой Лоренца. В положении равновесия сила Лоренца равна электрической силе. Они друг друга компенсируют:

$$F_L = qE_H; \quad q[\vec{v}\vec{B}] = qE_H.$$

Т.к. по условию  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , то  $qvB = qE_H \rightarrow E_H = vB$  и разность потенциалов между заряженными гранями (холловская разность потенциалов, или эдс Холла)

$$U_H = E_H h = vBh$$

Если концентрация зарядов  $n$ , то плотность тока выражается через скорость направленного

движения зарядов таким образом:  $\vec{j} = qn\vec{v} \rightarrow v = \frac{j}{qn}$ .

Подставляя это в формулу для  $U_H$ , получим:

$$U_H = \frac{1}{qn} jBh = RjBh \quad (1)$$

$$R = \frac{U_H}{jBh} \quad (2)$$

Здесь  $R$  – коэффициент (постоянная) Холла. Согласно (2) коэффициент Холла - это коэффициент пропорциональности между холловской разностью потенциалов  $U_H$  и произведением величин  $jBh$ .

В рассмотренном случае полупроводника р-типа:

$$R = \frac{1}{qp},$$

полупроводника n-типа:

$$R = \frac{1}{qn}.$$

(3)

Где  $p$  и  $n$  концентрации носителей заряда. (Считаем концентрацию носителей противоположного знака в полупроводниках  $p$  – и  $n$  – типа близкой к нулю; т.е. считаем  $n \approx 0$  в полупроводниках  $p$  – типа,  $p \approx 0$  в полупроводниках  $n$  – типа.)

Выражение для  $U_H$  удобно выразить через, легко определяемую экспериментально, силу тока  $I$ , протекающего через образец.

$$U_H = R \frac{IB}{b} \quad (4)$$

Знак  $U_H$  зависит от знака основных носителей в полупроводнике. Измеряя  $U_H$  и  $I, B, b$ , можно найти концентрацию основных носителей тока в образце. Добавляя эти измерения измерением удельной проводимости образца:

$$j = \sigma E = qnv = qn\mu E \Rightarrow ,$$

$$\sigma = qn\mu \quad (5)$$

можно определить подвижность носителей.

**Вывод:** одновременное измерение электропроводности  $\sigma$  и Холловской разности потенциалов  $U_H$  позволяют получить все основные сведения о примесном полупроводнике: *знак носителей тока (по знаку эдс Холла), их концентрацию и подвижность*. В этом и заключается значение измерения эффекта Холла, как одного из основных методов исследования электрических свойств проводников и полупроводников.

Рассмотренный эффект Холла, причиной которого является действие на движущиеся в магнитном поле заряды силы Лоренца, называется классическим эффектом Холла. Как следует из формулы (1), для классического эффекта Холла характерна линейная зависимость эдс Холла от индукции магнитного поля  $B$ . Опыт между тем показывает, что существуют вещества, для которых эта зависимость нелинейная. Это свидетельствует о существовании другой причины эффекта Холла, которая, однако, может быть понята только с позиций квантовой теории твердого тела. Мы будем изучать эффект Холла в полупроводниках, поскольку в них эффект Холла имеет в основном классическую природу и, следовательно, для его описания справедливо выражение (4).

Нужно отметить, что приведенный математический вывод для эдс Холла и постоянной Холла не совсем строг. Действительно в выражение для магнитной силы входит полная скорость электрона, состоящая в полупроводниках из двух частей:  $v = v_T + v_d$  – скорости беспорядочного теплового  $v_T$  движения и направленной добавки за счет электрического поля  $v_d$ . В выражение же плотности тока входит только скорость дрейфа в электрическом поле. Отождествив в нашем выводе  $v_d$  и  $v$ , мы тем самым пренебрегли хаотическим тепловым движением электронов и их распределением по скоростям. Поэтому значение постоянной Холла  $R = \frac{1}{qn}$ , полученное нами, не точно. Более строгий вывод (с учетом теплового движения) дает несколько иное значение для постоянной Холла

$$R = \frac{A}{qn} , \quad (6)$$

4

причем постоянная  $A$  зависит от механизма рассеяния электронов, т. е. показателя степени в выражении для зависимости длины свободного пробега электрона от его энергии. Можно показать, что величина  $A$  меняется в пределах  $1.11 \div 1.93$ .

В металлах и сильно вырожденных полупроводниках (к вырожденным полупроводникам относятся примесные полупроводники с высокой концентрацией атомов легирующих примесей, достигающей  $(10^{24} \dots 10^{26}) \text{ м}^{-3}$  в электропроводности могут принимать участие только электроны, находящиеся на самых верхних уровнях распределения Ферми. Энергия и скорость у этих электронов вполне определенные, и в данном случае никакого распределения по скоростям учитывать не надо. В соответствии с этим вывод приведенный нами, оказывается строгим для металлов и вырожденных полупроводников, и постоянная Холла в этом случае равна

$$R = \frac{1}{qn}.$$

#### *Эффект Холла в полупроводниках смешанного типа.*

Теперь рассмотрим эффект Холла в случае сопоставимых значений концентраций электронов и дырок в полупроводнике. Пусть в образце полупроводника в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 1) концентрации электронов и дырок равны  $n_e$  и  $n_h$ , а подвижности электронов и дырок равны  $\mu_e$  и  $\mu_h$ .

Вектор плотности тока, создаваемого электронами и дырками под воздействием электрического поля, направлен вдоль стороны  $l$  и задан выражением

$$\vec{j} = (n_e \mu_e + n_h \mu_h) e \vec{E}_l \quad (7)$$

Вдоль стороны  $b$  направлен вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , со стороны которого как на электрон, так и на дырку будут действовать силы Лоренца, направленные вверх. Под их воздействием электроны и дырки начнут двигаться вверх, накапливаться на верхней грани и рекомбинировать (Рекомбинацией называется процесс перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону. При этом из процесса проводимости выводятся один электрон и одна дырка). Допустим, что дырок будет приходить к верхней грани больше, чем электронов. Тогда на верхней грани будет постепенно накапливаться избыток дырок, а на нижней — избыток электронов. Появится холловская напряженность электрического поля, направленная вниз. Это поле будет препятствовать дыркам и помогать электронам двигаться вверх. Через некоторое время установится такое значение  $E_H$ , при котором плотности потока

электронов  $\vec{j}_{e\uparrow}$  и дырок  $\vec{j}_{h\uparrow}$ , направленных вверх, прекратится накопление заряда на верхней грани и увеличение значения  $\vec{E}_H$

Условие равновесия можно записать следующим образом:

$$n_h \mu_h F_L - n_h \mu_h e E_H = n_e \mu_e F_L + n_e \mu_e e E_H \quad (8)$$

В этих соотношениях левая часть - это плотность тока дырок за счет силы Лоренца в направлении силы Лоренца (первое слагаемое) и за счет холловского поля  $E_H$ , возникающего из-за отклонения носителей силой Лоренца на верхнюю грань (второе слагаемое). Знак минус у второго слагаемого означает, что Холловское поле препятствует отклонению дырок под действием силы Лоренца.

Правая часть - это плотность тока электронов за счет силы Лоренца (первое слагаемое) и за счет эффективного холловского поля  $E_H$ , возникающего из-за отклонения носителей силой Лоренца на верхнюю грань (второе слагаемое). Знак плюс у второго слагаемого означает, что холловское поле способствует отклонению дырок под действием силы Лоренца.

Т.к.  $\vec{F}_L = e[\mu \vec{E}_L \vec{B}]$ , то соотношение (8) преобразуется таким образом

$$n_h \mu_h (\mu_h E_L) e B - n_h \mu_h e E_H = n_e \mu_e (\mu_e E_L) e B + n_e \mu_e e E_H \quad (9)$$

Из соотношения (9) легко получить

$$\frac{E_H}{E_L} = \frac{B(n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2)}{n_h \mu_h + n_e \mu_e} \quad (10)$$

Согласно определению постоянной Холла  $R = \frac{U_H}{j B h}$ , из соотношения (10) следует

$$\begin{aligned} E_H d = U_x &= \frac{B(n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) h}{n_h \mu_h + n_e \mu_e} E_L \rightarrow \\ \rightarrow R = \frac{U_H}{j B h} &= \frac{B(n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2) h}{(n_h \mu_h + n_e \mu_e) j B h} E_L = \frac{(n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2)}{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)(n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_L} E_L = \frac{(n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2)}{(n_h \mu_h + n_e \mu_e)^2 e} \end{aligned} \quad (11)$$

Это уравнение имеет четыре неизвестные величины

$$n_e, \mu_e, n_p, \mu_p$$

поэтому добавление к нему уравнения для удельной проводимости полупроводника

$$\sigma = e n_e \mu_e + e n_h \mu_h$$

все равно не позволяет (как это было для полупроводника с практически одним типом носителей)

определить все неизвестные величины. В этом случае нужно добавить еще независимые уравнения, т.е. одновременно произвести еще измерения термоэдс или еще какого-либо гальваномагнитного эффекта.

Соотношение (10) упрощаются, если полупроводник собственный, т.е.  $n_h = n_e$  :

$$\frac{E_H}{E_I} = \frac{B(n_h\mu_h^2 - n_e\mu_e^2)}{n_h\mu_h + n_e\mu_e} = \frac{Bn_h(\mu_h^2 - \mu_e^2)}{n_h(\mu_h + \mu_e)} = \frac{B(\mu_h + \mu_e)(\mu_h - \mu_e)}{(\mu_h + \mu_e)} = B(\mu_h - \mu_e) \quad (12)$$

Такое соотношение для собственного полупроводника позволяет определить разность подвижностей электронов и дырок  $(\mu_h - \mu_e)$ .

### **Трудности, встречающиеся на пути экспериментального наблюдения эффекта Холла.**

1. При экспериментальном определении  $U_x$  следует обратить внимание на то, что наряду с эффектом Холла имеют место некоторые другие эффекты: гальваномагнитный эффект, термомагнитный эффект, не точное расположение контактов, с которых снимается эдс Холла, на одной вертикали к широкой стороне образца и др. Для исключения влияния этих побочных эффектов используют свойство их четности, т.е. их независимости от направления магнитного поля. Между тем эффект Холла, являясь нечетным эффектом, меняет свой знак при изменении направления магнитного поля. Для того, чтобы исключить побочные эффекты и определить истинное значение эдс Холла  $U_H$ , напряжение между холловскими контактами измеряют при двух противоположных направлениях магнитного поля. Действительно, пусть при выбранной ориентации магнитного поля напряжение между холловскими контактами  $U_1 = U_H + U_{\text{побочн.}}$ , а при изменении ориентации поля на противоположное напряжение:  $U_2 = -U_H + U_{\text{побочн.}}$ . Отсюда:  $U_H = \frac{|U_1| - |U_2|}{2}$ , т.е.  $U_{\text{побочн.}}$ , обусловленное побочными эффектами, исключено.

2. Известно, что контакт металла и полупроводника имеет нелинейную зависимость тока через него от напряжения на нем. Этот эффект имеет очень широкое практическое применение, однако он может исказить другое наблюдаемое на нем явление, например эффект Холла. Поэтому сопротивление исследуемого образца нельзя измерить, обычным для металла, методом амперметра и вольтметра, т.к. в этом случае в результат измерений войдут сопротивления контактов, которые в случае полупроводниковых материалов могут во много раз превосходить сопротивление самого образца. Поэтому измерение электропроводности

полупроводников обычно производится зондовым методом с помощью двух дополнительных контактов, подключенных к кристаллу полупроводника между контактами, подводящими к нему ток, по компенсационной схеме, обеспечивающей равенство нулю тока через «зондовые» контакты. Именно такая методика измерения проводимости исследуемой пластины реализуется в данной лабораторной работе.

Согласно выражению (4) эдс Холла линейно зависит от силы тока через образец и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Поэтому зависимости  $U_H = f(I)$  и  $U_H = f(B)$  должны представлять собой прямые линии, проходящие в осях  $U_H, I$  и  $U_H, B$  через начала координат.

### **Экспериментальная часть работы.**

#### Цель эксперимента 1.

при комнатной температуре в постоянном магнитном поле измеряется Холловская разность потенциалов при разных значениях силы тока. Строится графическая зависимость.

#### Цель эксперимента 2.

При комнатной температуре измеряется Холловская разность потенциалов  $U_H$  при разных значениях индукции магнитного поля  $B$ . Строится графическая зависимость.

#### Цель эксперимента 3.

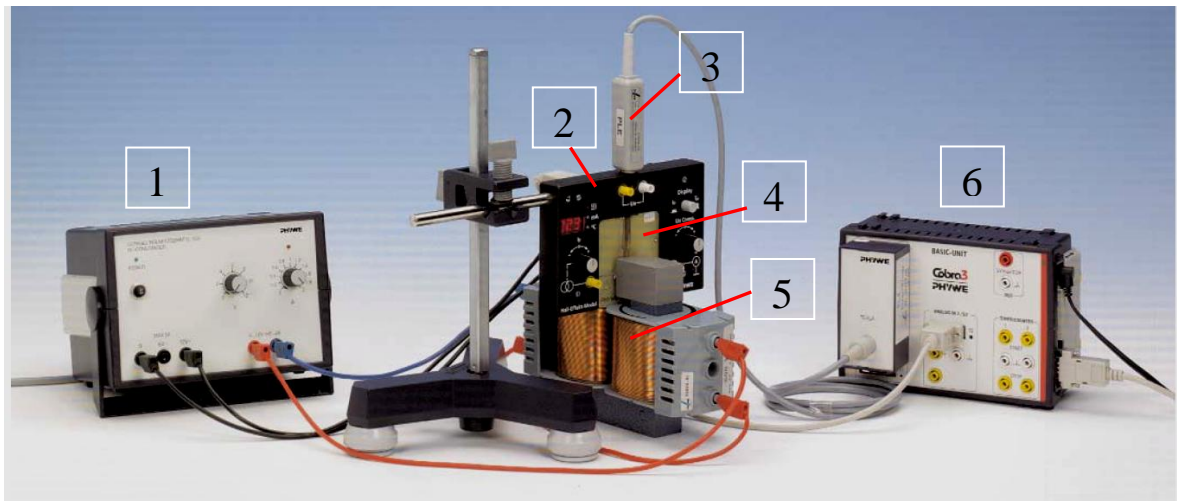
При комнатной температуре, при отсутствии магнитного поля измеряется Напряжение на образце при разных значениях тока через образец. Строится графическая зависимость.

По полученным в экспериментах 1-3 данным определяется:

- постоянная Холла  $R_H$ ;
- удельная проводимость образца  $\sigma$ ;
- знак носителей заряда;
- подвижность дырок  $\mu_p$  (в полупроводнике  $p$  – типа); электронов  $\mu_n$  (в полупроводнике  $n$  – типа);
- концентрация дырок  $p$  (в полупроводнике  $p$  – типа); электронов  $n$  (в полупроводнике  $n$  – типа).



## Экспериментальная установка.



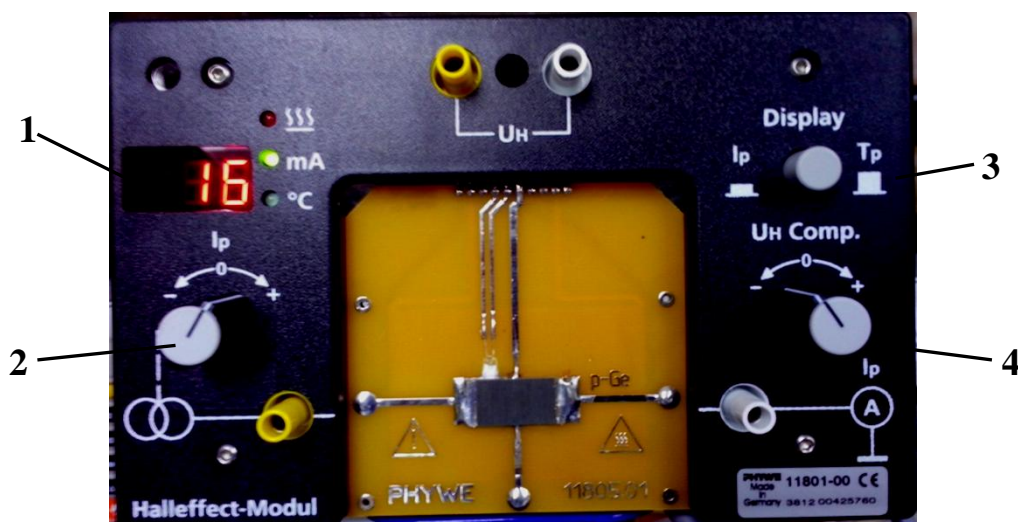
**Рис. 2** Общий вид экспериментальной установки:

- |   |   |
|---|---|
| 1 источник питания;                                 | 4 плата с образцом;   |
| 2 измерительный модуль;                             | 5 катушки электромагнита;                                   |
| 3 датчик Холла (для измерения поля $B$ на образце); | 6 аналоговый датчик Кобра-3 с системами оцифровки сигналов. |

Экспериментальная установка показана на рис.2. Постоянное напряжение от источника питания подается на катушки электромагнита (5). Ток (напряжение) через катушки можно изменять, вращая ручки «А», «V» источника питания. При этом изменяется значение индукции магнитного поля  $B$  на образце.

Плата с исследуемым образцом 4 (рис.2) вставляется в направляющий паз измерительного модуля аналогового датчика 2. На обратной стороне модуля находятся контакты, на которые подается переменное напряжение  $\sim 12V$  от источника питания. Это напряжение подводится к нагревателю (для получения температурных зависимостей).

На обратной стороне модуля находится также кнопка ВКЛ./ВЫКЛ. для нагревателя.  
***Осторожно!!! – При случайном нажатии этой кнопки образец начнет нагреваться без контроля и может выйти из строя.***



**Рис.3** Измерительный модуль аналогового датчика.

- |   |                          |   |
|---|--------------------------|---|
| 1 | цифровое табло:          | значения тока через образец, мА/температуры образца °C  |
| 2 | регулятор тока:          | позволяет изменять $I_p$ - ток через образец;   |
| 3 | кнопочный переключатель: | позволяет менять показания цифрового табло:<br><i>ток через образец</i> (при нажатой кнопке) / <i>температура образца</i> (при отжатой кнопке). |
| 4 | регулятор:               | позволяет при нулевом $B$ выставить «ноль» $U_H$ .  |

Подключение измерительного модуля к аналоговому датчику Кобра 3 осуществляется с помощью специального кабеля.

Прибор Кобра-3 оснащен кроме того аналоговым тесла датчиком, на который подаются данные с датчика Холла. Датчик Холла измеряет магнитную индукцию в зазоре электромагнита.

### **Выполнение эксперимента.**

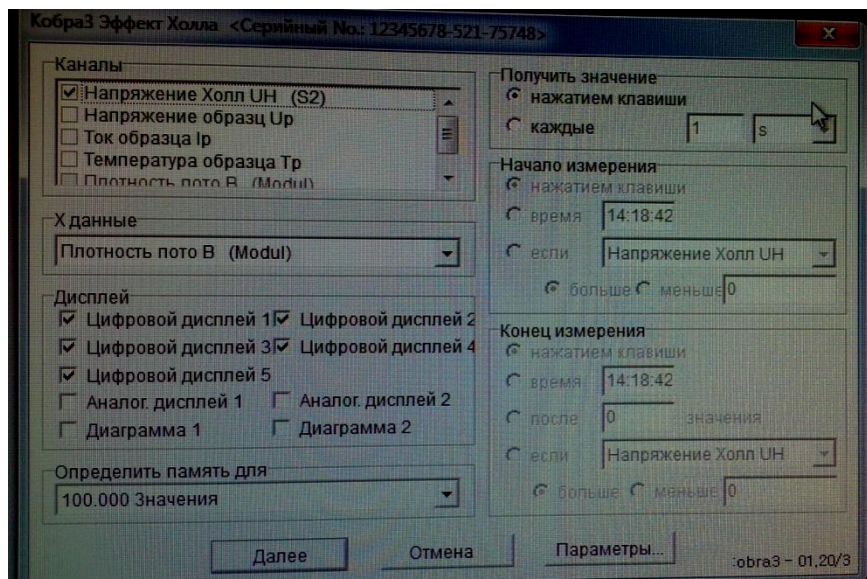
Плата с образцом должна быть аккуратно вставлена в центр зазора электромагнита так, чтобы избежать изгиба пластины и не повредить образец. Также аккуратно в соответствующий паз (рис.3) помещается датчик Холла.

Включите источник питания, установите регулятор напряжение «V» в нулевое положение, а регулятор тока «A» повернуть по часовой стрелке до упора (режим стабилизации тока).

Включите прибор Кобра 3 в сеть. На измерительном модуле тумблером (2) установите ток через образец, равный нулю.

Включите компьютер. Измерения осуществляются с помощью программного обеспечения *measure «m»*, которое запускается «как обычно».

1. Для выполнения измерений, в диалоговом окне выбрать кнопку меню: <Прибор> \ <Измерения Cobra3 для эффекта Холла>. Вы получите следующее окно (рис.4), которое появляется перед каждым измерением.



**Рис.4** Начальное меню программного обеспечения кобра 3 для эффект Холла.

Выбор измеряемой зависимости:

- В поле «Каналы» указывают величину, откладываемую по оси  $Y$ , например Холловское напряжение  $U_H$  (Рис.4).
- В поле «X данные» указывают величину, откладываемую по оси  $X$ , например, индукцию магнитного поля  $B$  (в меню: «плотность потока  $B$ »).

## Экспериментальная часть А.

Получение экспериментальной зависимости - Холловского напряжения от индукции магнитного поля  $U_H(B)$ .

1. Выберите в качестве измеряемой величины (по оси  $Y$ ) напряжение Холла  $U_H$ , а по оси  $X$  - индукцию магнитного поля  $B$  («плотность потока»).

Выберите режим измерения: <нажатием клавиши> \ <Далее>.

2. Вращая регулятор тока (2 рис.3)  $I_p$  измерительного модуля, установите значение силы тока через образец, около **20-30 мА**.

3. На экране дисплея отображаются 5 окон с данными, считываемыми с аналогового датчика:

- Холловское напряжение;
- ток через образец;
- напряжение на образце;
- температура образца;
- индукция магнитного поля  $B$  («плотность потока  $B$ »).

Также на экране появляется небольшое диалоговое окно «Кобра 3 – измерения» (рис.6).

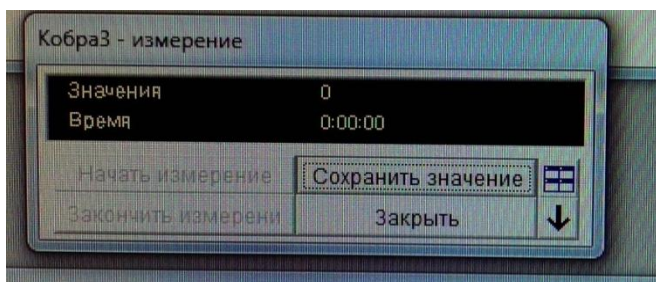


Рис.6 Диалоговое окно, управляющее сбором данных.

### 4. Компенсация неточности установки Холловских контактов.

При измерениях крайне важно обеспечить расположение холловских контактов (с них снимают показания  $U_H$  - точки 1 и 2 на рис.1) строго один под другим, чтобы разность потенциалов между ними, появляющаяся в образце при протекании тока, оказалась равной нулю. На практике это очень трудно осуществить. Если это не удалось, то можно скомпенсировать отличное от нуля напряжение  $U_H$  добавочным сопротивлением.

Для этого:

- Установите значение индукции магнитного поля  $B$  близкое нулю (1-50 мТл), вращая регулятор «V» на источнике питания против часовой стрелки.
- Если регулятор «V» в крайнем левом положении (на нуле), а магнитное поле существенно больше нуля (больше 10 мТл), значит, имеется остаточная намагниченность сердечника. В этом случае нужно поменять полярность подключения магнитных катушек **на источнике питания** (изменить направление вектора магнитной индукции, при этом знак  $B$  поменяется на противоположный). В начальный момент ничего не изменится, т.к. ток на катушках равен нулю. Но при вращении регулятора «V» по часовой стрелке, магнитная индукция  $B$  будет уменьшаться, и поменяет знак. Это значит, сердечник катушек размагничен и продолжает намагничиваться в обратном направлении.
- Установите напряжение Холла  $U_H$  как можно точнее равное нулю регулятором " $U_H \text{ Comp.}$ " (4 рис.3) на измерительном модуле.

***Положение регулятора (4) « $U_H \text{ Comp.}$ » после этого не должно меняться на протяжении всех измерений.***

**5.** Получите зависимость  $U_H(B)$ .

- Проверьте, что значение силы тока через образец, около **20-30 мА**.
  - Начните измерения примерно от  $(-300) \div (-200) \text{ мТл}$ . Для этого измените полярность подключения катушек, переключив провода **на источнике питания** (если этого не было сделано при компенсации  $U_H$ ) (только при выведенных на ноль ручках А и V, во избежание больших искр из-за явления самоиндукции в катушках!!).
  - Увеличивайте магнитную индукцию с шагом, примерно, 50 мТл. Каждый раз для сохранения данных выбирайте пункт меню **<Сохранить значение>**.
  - При достижении нуля, измените полярность подключения магнитных катушек, переключив провода **на источнике питания**. (Только при выведенных на ноль ручках А и V, во избежание больших искр из-за явления самоиндукции в катушках!!).
  - Продолжайте измерения до  $200 \div 300 \text{ мТл}$  с тем же шагом.
- После проведения измерений выбрать пункт меню **<Заккрыть>**.

**5.** На экране появляется график зависимости  $U_H(B)$ .

Кликните правой кнопкой мыши на график и выберите пункт меню: **<параметры>|<символы>|<●>|<Да>**.

На зависимости отразились экспериментальные точки, зависимость должна быть линейной. Кликните правой кнопкой мыши на график и выберите пункт меню **<таблица>**. На экране появится таблица данных. Запишите таблицу данных в тетрадь:

**Табл.3**

**Зависимость Холловского напряжения от индукции магнитного поля.**

(примерно 10-12 значений)

$U_H, мВ,$				
$B, мТл$				

Закройте таблицу.

Выберите в меню диалогового окна кнопку «анализ»/ «показать кривую». Записать средний наклон получившейся зависимости:  $k_2 = \dots \frac{B}{Tл}$ .

Закройте график и вернуться к диалоговому окну рис.4

## Экспериментальная часть Б.

**Получение экспериментальной зависимости Холловского напряжения от тока через образец  $U_H(I_p)$ .**

1. Выберите в качестве измеряемой величины (по оси  $Y$ ) напряжение Холла  $U_H$ , а по оси  $X$  - ток через образец  $I_p$ .
  - Выберите режим измерения: **<нажатием клавиши>** \ **<Далее>**.
  - Установите значение индукции магнитного поля  $B$  около 200-300 мТл, вращая регулятор « $V$ » на источнике питания.
  - Силу тока через образец изменяйте регулятором (рис.3) примерно от -30 мА до 30 мА с шагом примерно 5мА.
  - Каждый раз для сохранения данных выбирайте пункт меню **<Сохранить значение>** в диалоговом окне.

После проведения измерений выбрать в диалоговом окне пункт меню «Закройте».

2. На экране появляется график зависимости  $U_H(I_p)$ .

Кликните правой кнопкой мыши на график и выберите пункт меню: **<параметры>**\ **<символы>**\ **<●>**\ **<Да>**.

На зависимости отобразятся экспериментальные точки. Проверьте «на глаз» является ли полученная зависимость линейной.

Кликните правой кнопкой мыши на график и выберите <таблица>. На экране появится таблица данных. Запишите таблицу данных в тетрадь:

**Табл.1 Зависимость Холловского напряжения от тока через образец.**

(примерно 10-12 значений).

$U_H$ , мВ				
$I_p$ , мА				

Закройте таблицу.

Выберите в меню диалогового окна пункт меню <Анализ> / <Показать кривую>.

Запишите средний наклон получившейся зависимости:  $k_1 = \dots \frac{B}{A}$ .

Закройте график и вернитесь к диалоговому окну рис.4

**Экспериментальная часть В. Получение экспериментальной зависимости  $V_p(I_p)$ .**

**Определение удельной проводимости образца.**

1. Установите значение индукции магнитного поля  $B$  близкое нулю, вращая регулятор « $V$  на источнике питания. (Возможно, придется изменить полярность подключения катушек электромагнита).

2. Выберите в качестве измеряемой величины (по оси  $Y$ ) напряжение на образце  $V_p$ , а по оси  $X$  - ток через образец  $I_p$ .

Выберите режим измерения: <нажатием клавиши> \ <Далее>.

3. Силу тока через образец изменяйте регулятором (2) примерно от -30 мА до 30 мА с шагом примерно 10 мА.

Каждый раз для сохранения данных нажимайте кнопку <Сохранить значение>.

После проведения измерений выбрать в диалоговом окне пункт меню «Закроить».

3. На экране появляется график зависимости  $V_p(I_p)$ .

Кликните правой кнопкой мыши на график и выберите пункт меню: <параметры>\<символы>\<●>\<Да>.

На зависимости отразились экспериментальные точки. Проверьте «на глаз» насколько зависимость будет линейной.

Кликните правой кнопкой мыши на график / <таблица>.

Занесите таблицу данных в тетрадь:



**Табл.3 Зависимость напряжения на образце от силы тока.**

(примерно 6 значений)

$V_p, мВ$				
$I_p, мА$				

Закройте таблицу.

Выберите в меню диалогового окна кнопку «анализ»/ «показать кривую». Записать средний

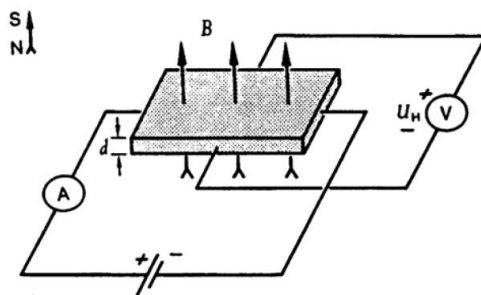
наклон получившейся зависимости:  $k_3 = \dots \frac{B}{A}$ .

### Обработка данных.

#### 1. Определение знака основных носителей заряда (Рис.2).

Электроны, двигаясь против тока, отклоняются к переднему краю образца.

Поэтому, если (в *n*-легированном образце) электроны являются преобладающими носителями заряда, передний край будет заряжен *отрицательно*. Контакты измерительного модуля подключены так, что значения  $U_H < 0$  в этом случае. А значения  $I_p > 0; B > 0$ .



**Рис.2** Направление вектора  $\vec{B}$ , знак ЭДС Холла, при данном направлении тока через образец, наблюдаются при отрицательных носителях заряда.

Дырки, двигаясь по току, тоже отклоняются к переднему краю образца. Поэтому в *p*-легированном образце с дырочной проводимостью передний край будет заряжен *положительно*. Контакты измерительного модуля подключены так, что значения  $U_H > 0$  в этом случае. А значения  $I_p > 0; B > 0$ .

Сделайте вывод о знаке основных носителей заряда.

**2.** По данным **таблицы 1** построить графическую зависимость  $U_H(I_p)$ . Используя полученное значение для тангенса угла наклона графика  $k_1$ , с учетом формулы (4), определить значение постоянной Холла  $R_H$ . Толщина образца  $b = 4,17 \cdot 10^{-3} м$ .



3. По данным **таблицы 2** построить графическую зависимость  $U_H(B)$ . Используя полученное значение для тангенса угла наклона графика  $k_2$ , с учетом формулы (4), определить значение постоянной Холла  $R_H$ .

Толщина образца  $b = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

4. По данным **таблицы 3** построить графическую зависимость  $V_p(I_p)$ . Используя тангенс угла наклона линейной зависимости  $k_3$ , воспользовавшись законом Ома - определить полное сопротивление образца  $R$ .

5. Вычислить удельную проводимость образца при комнатной температуре.

Длина образца  $l$  и его поперечное сечение  $S$  равны соответственно:

$$l = 0,02 \text{ м}, S = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Тогда  $\sigma = \frac{l}{R \cdot S}$ .

6. Подвижность дырок определить по формуле:

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma.$$

7. Вычислить концентрацию носителей заряда (дырок), считая, что величина элементарного заряда ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ) по формуле:  $p = \frac{1}{e \cdot R_H}$ . Сравните с концентрацией электронов проводимости в металлах и вырожденных полупроводниках ( $10^{24} \dots 10^{26} \text{ м}^{-3}$ ).

### Контрольные вопросы.

1. В чем заключается эффект Холла.
2. Что такое классический эффект Холла.
3. Записать выражение для силы Лоренца, действующей на носители заряда (в векторном виде). Определить направление силы Лоренца для двух разных направлений тока  $I$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .
4. Вывести основное уравнение для эдс Холла. Написать выражение для постоянной Холла и рассказать, как ее экспериментально определяют.
5. Как вычисляется концентрация носителей тока?
6. Определить понятие "подвижность носителей тока"?
7. Какие трудности возникнут, если в лабораторной работе для исследований взять не полупроводниковый образец, а металлический?

8. Какие типы проводимостей имеют место в полупроводниках?
9. Проинтерпретировать полученные экспериментальные зависимости  $U_H(I_p)$ ,  $U_H(B)$ ,  $V_p(I_p)$ .
10. Какие эффекты могут привести к ошибкам в измерении постоянной Холла?
11. Что такое собственный полупроводник?
12. Что такое полупроводник р-типа?
13. Что такое плотность тока?
14. Какие эффекты могут исказить линейность зависимости  $V_p(I_p)$