

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по электричеству

**Влияние магнитного поля на проводимость  
полупроводников [3.3.6]**

Талашкевич Даниил Александрович  
Группа Б01-009

Долгопрудный  
2021

# Содержание

<b>1</b>	<b>Теоретическое введение</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Экспериментальная установка</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Ход работы</b>	<b>2</b>
3.1	Подготовка приборов к работе . . . . .	2
3.2	Калибровка электромагнита . . . . .	3
3.3	Исследование магнетосопротивления образцов . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Обработка результатов</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Вывод</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Литература</b>	<b>12</b>

**Цель работы:** измерение зависимости сопротивления полупроводниковых образцов различной формы от индукции магнитного поля.

**Используемое оборудование:** электромагнит, милливеберметр или миллитесламетр (на основе датчика Холла), вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат, образцы монокристаллического антимонида индия (InSb)  $n$ -типа.

## 1 Теоретическое введение

В работе исследуется эффект зависимости электрического сопротивления от магнитного поля на примере диска Корбино (см. рис.).

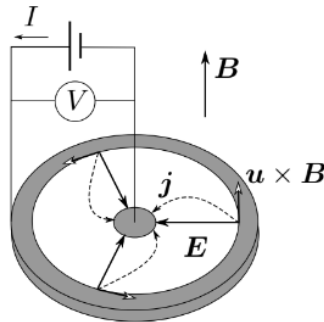


Рис. 1: Диск Корбино

При отсутствии магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости диска, по диску течёт ток, определяемый по закону

$$I = \frac{U}{R_0}, \quad R_0 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\sigma_0 2\pi r h} \quad (1)$$

Однако при включении магнитного поля индукции  $B$  на частицы-переносчики тока начинает действовать сила Лоренца, из-за чего траектория частиц увеличивается в расстоянии, проходимом между двумя точками с фиксированной разницей потенциалов  $U$ .

В этом случае проводимость равна

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} \quad (2)$$

Закон Ома преобразовывается в следующий вид:

$$I = \frac{U}{R}, R = R_0(1 + (\mu B)^2) \quad (3)$$

Таким образом, зависимость  $I(U)$  поменялась из-за геометрических особенностей диска Корбино. Такой эффект называют геометрическим магнетосопротивлением. В этой работе будут исследоваться зависимость сопротивления диска от магнитного поля, проверяться выше записанные формулы и исследоваться как влияет характер зависимости геометрических форм на зависимость  $R(B)$ .

## 2 Экспериментальная установка

Для исследование зависимости  $R(B)$  используется следующая методика:

1. Используется калибровка электромагнита (источника магнитного поля): находится зависимость индукции создаваемого магнитного поля от тока в контуре электродвигателя  $B(I_m)$  (или  $I_m(B)$ ), который регистрируется амперметром  $A_1$ , чтобы в дальнейшем считать величину магнитного поля с помощью тока в контуре  $I_m$ .
2. При постоянной силе тока  $I_0$ , которая настраивается с помощью сопротивления реостата в контуре с источником питания, меняется величина индукции магнитного поля, тем самым меняется напряжение  $U$ , подаваемое на диск Корбино. Исследуется зависимость  $R(B)$  через калибровочную кривую и зависимость  $U(I_m)$ .
3. Проводится тот же самый опыт с прямоугольной пластинкой с исследованием зависимости её сопротивления  $R(B)$ .

## 3 Ход работы

### 3.1 Подготовка приборов к работе

Включим вольтметр кнопкой "Сеть"

Присоединим диск Корбино через разъём к цепи питания. Убедившись, что реостат  $R_2$  выведен на минимум тока, включим в сеть блок управления и тумблером К подключим образец.

Теперь определим диапазон изменения силы тока через образец. Для этого снова уберем ток до нуля и временно отключим образец от цепи.

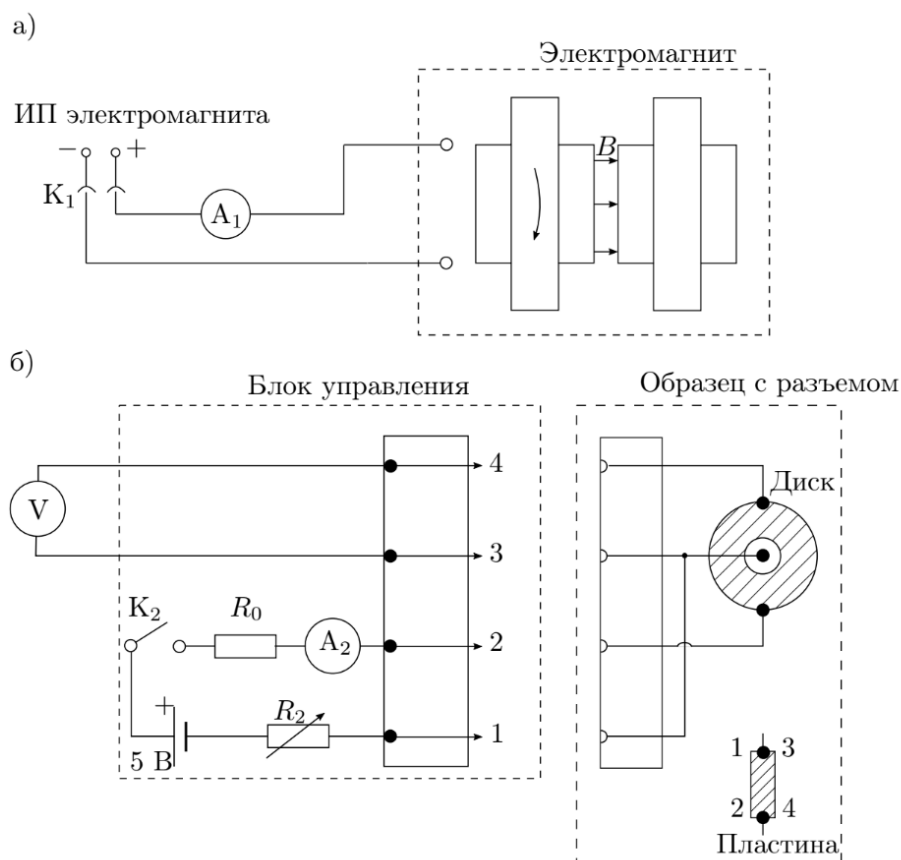


Рис. 2: Схемы экспериментальных установок

Установим все ручки регулировки источника питания магнита (GPR-11H30D) на минимум сигнала и включим источник в сеть. Установим обе ручки регулировки тока на максимум.

Используя ручки регулировки напряжения  $R_1$  (сначала *fine*, затем *coarse*), определим диапазон изменения силы тока через электромагнит, чтобы выбрать, каким шагом следует увеличивать ток при калибровке магнита.

Получили следующий диапазон изменения силы тока через электромагнит 0,05 – 0,40 А.

### 3.2 Калибровка электромагнита

Сперва ознакомимся с устройством и принципом работы измерителя магнитной индукции Ш1-10.

Теперь при помощи прибора Ш1-10 исследуем зависимость индукции  $B$  магнитного поля в зазоре от тока  $I_M$  через обмотки магнита.

Проведем измерения магнитной индукции для 8 значений тока  $I_M$  через электромагнит. Так же убедились, что в отсутствие тока через магнит индукция  $B$  практически равна нулю.

$I, A$	$B, мТс$
0,05	71,4
0,10	125,7
0,15	188,1
0,20	247
0,25	301
0,30	338
0,35	356
0,39	371

Таблица 1: градуировка  $B(I)$

График полученной зависимости (и её аппроксимация):

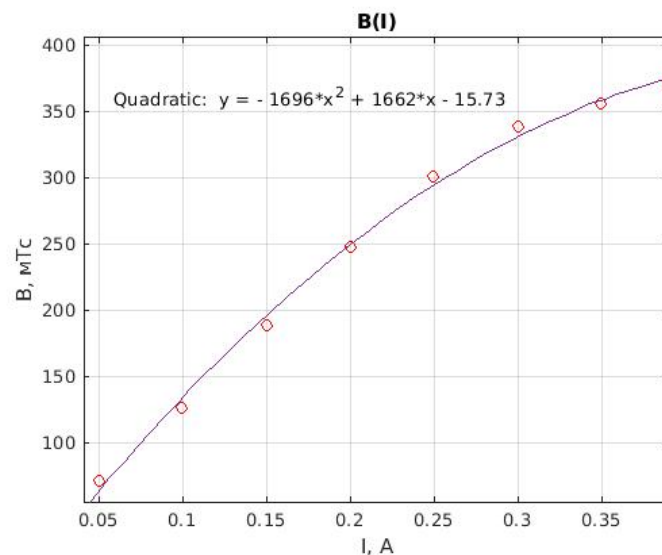


Рис. 3: Измерение магнитных моментов шариков

Видно, что при небольших значениях тока зависимость почти линейная, однако при больших видны значительные отклонения от прямой (парабола).

### 3.3 Исследование магнетосопротивления образцов

Подключим диск Корбино к электрической цепи. При помощи реостата  $R_2$  установим ток через образец  $I_0 \simeq 25$  мА. Падение напряжения в случае расположения шириной вдоль поля –  $U_0 = (2,710 \pm 0,002)$  В, шириной поперёк поля –  $U_0 = (2,853 \pm 0,002)$  В.

Вставим держатель с диском в зазор электромагнита. Снимим зависимость напряжения  $U$  на образце от тока  $I_M$  через обмотки магнита при фиксированном токе через образец ( $I_0 \simeq 25$  мА ).

$U$ , мВ	$I$ , А
0,899	0,05
1,213	0,10
1,694	0,15
2,175	0,20
2,687	0,25
3,143	0,30
3,415	0,35
3,552	0,39

Таблица 2: зависимость напряжения на образце от тока (диск)

$U$ , мВ	$I$ , А
0,898	0,05
1,212	0,10
1,696	0,15
2,174	0,20
2,687	0,25
3,143	0,30
3,414	0,35
3,551	0,39

Таблица 3: зависимость напряжения на образце от тока (перевернутый диск)

По полученным данным видно, что результат измерения не зависит от направления магнитного поля.

Теперь вместо диска Корбино подключим к измерительной цепи образец, имеющий форму пластинки. Реостатом  $R_2$  установим в образце ток 10 мА. Измерим падение напряжения на образце в отсутствие магнитного поля.

Снимим зависимость напряжения  $U$  на образце от тока через магнит при постоянном токе  $I = 10$  мА через образец. При измерениях длинная сторона образца должна быть направлена поперёк поля, а средняя (ширина) в одной серии опытов располагается вдоль, а в другой - поперёк поля.

полученный данные:

$U$ , мВ	$I$ , А
2,890	0,05
3,008	0,10
3,142	0,15
3,253	0,20
3,384	0,25
3,449	0,30
3,488	0,35
3,512	0,40

Таблица 4: зависимость напряжения на образце от тока (пластинка, поперек)

$U$ , мВ	$I$ , А
2,782	0,05
2,857	0,10
2,959	0,15
3,052	0,20
3,142	0,25
3,206	0,30
3,242	0,35
3,270	0,40

Таблица 5: зависимость напряжения на образце от тока (пластинка, вдоль)



Для обработки результатов понадобятся данные с размерами диска и характеристиками приборов:

$InSb$ ;  $D = 18$  мм;  $d = 3$  мм;  $h = 1,8$  мм .

## 4 Обработка результатов

Построим калибровочный график  $B(I_M)$ , чтобы в дальнейшем использовать эти данные для интерполяции.

График полученной зависимости (и её аппроксимация):

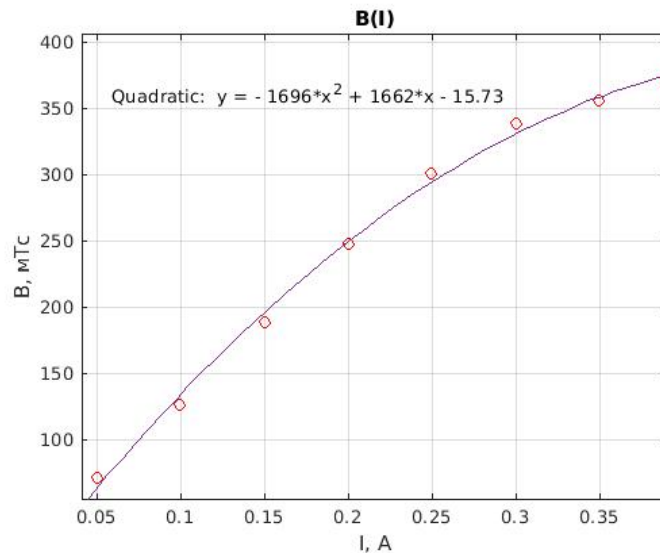


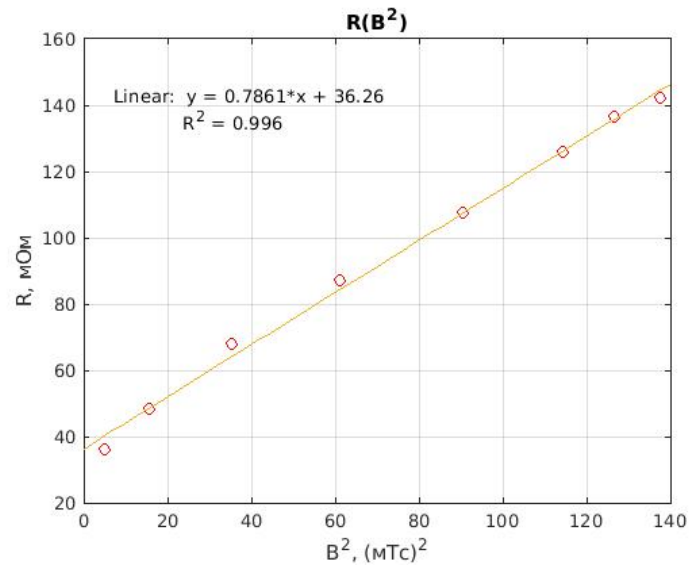
Рис. 4: Измерение магнитных моментов шариков

Видно, что при небольших значениях тока зависимость почти линейная, однако при больших видны значительные отклонения от прямой (парабола).

Чтобы найти подвижность носителей необходимо посмотреть количественно на зависимость  $R(B^2)$

Графики для 3-х серий  $R(B^2)$ , где 1-ая серия – диск, 2-ая – пластинка (поперек), 3-ая – пластинка (вдоль):

$B^2, 10^{-3} \text{ Тс}^2$	$R_1, \text{ мОм}$	$R_2, \text{ мОм}$	$R_3, \text{ мОм}$
5,1	35,96	289,0	278,2
15,8	48,52	300,8	285,7
35,4	67,76	314,2	295,9
61,0	87,00	325,3	305,2
90,6	107,48	338,4	314,2
114,2	125,72	344,9	320,6
126,7	136,60	348,8	324,2
137,6	142,08	351,2	327,0

Рис. 5: график зависимости  $R(B^2)$  для диска

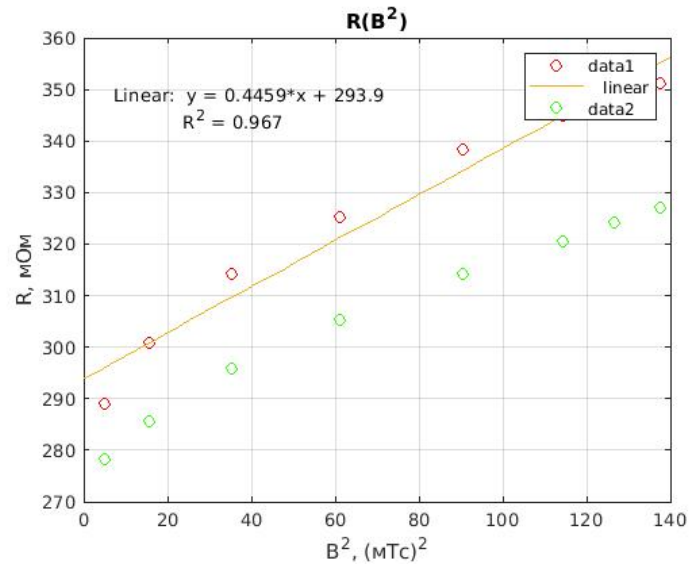
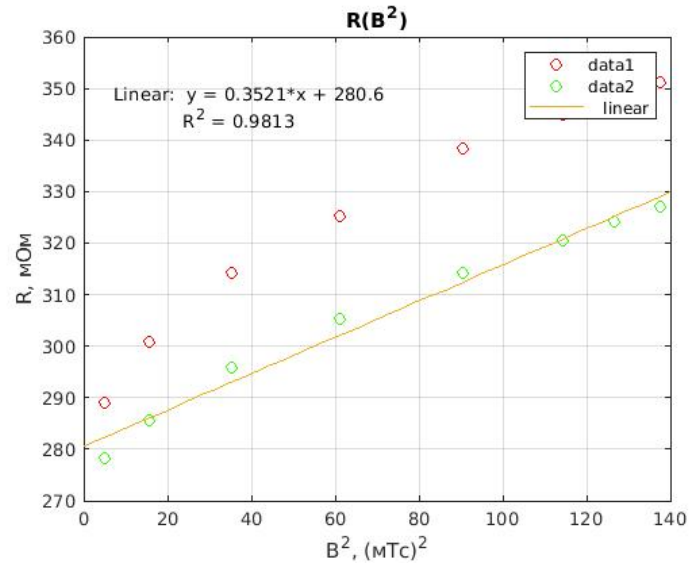
Тогда для каждой серии, по имеющимся  $k, b$ , где  $y = kx + b$ , можем рассчитать подвижность носителей:

$$R = R_0 \cdot [1 + (\mu B)^2]$$

$$k \cdot A = b\mu^2 \Rightarrow \mu = \sqrt{\frac{k}{b}} \cdot A$$

где  $A$  это коэффициент, зависящий от размерности осей  $X, Y$ , в данном случае он равен  $10^3$ .

Серия 1:  $b_1 = 36,26 \pm 4,18$ ,  $k_1 = 0,78 \pm 0,05 \Rightarrow \mu_1 = 4,64 \text{ Тл}^{-1}$ .

Рис. 6: график зависимости  $R(B^2)$  для пластинка (поперек)Рис. 7: график зависимости  $R(B^2)$  для пластинка (вдоль)

$$\varepsilon_{\mu_1} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial k}\right)^2 \cdot \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial b}\right)^2 \cdot \sigma_b^2}}{\mu_1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{4kb} \sigma_k^2 + \frac{1}{4kb^3} \sigma_b^2}}{\sqrt{\frac{k}{b}}} = 0,08$$

Тогда  $\mu_1 = 4,64 \pm 0,37 \text{ Тл}^{-1}$ .

Хоть для пластинок полученные данные и можно аппроксимировать как линейная зависимость  $R(B^2)$ , однако аппроксимация как квадратичной зависимости дает коэффициент корреляции на порядок ближе лежащий к 1, что говорит о том, что зависимость всё же не линейная (да и это наблюдается исходя из характерного вида графика при больших  $B^2$ ):

При этом теоретическая  $\mu_{\text{теор}} = 7,7 \text{ Тл}^{-1}$ . Значения не совпадают в пределах  $2\sigma$ , однако в порядок величины попали, но видимо не были учтены какие-то эффекты.

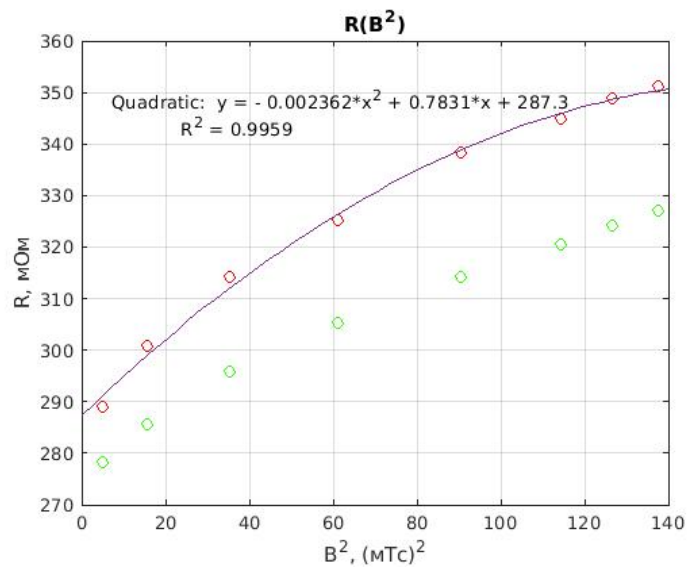


Рис. 8: график зависимости  $R(B^2)$  для пластинка (поперек) (квадратичная аппроксимация)

Зная сопротивление диска в отсутствии магнитного поля и геометрические размеры образца, рассчитаем удельное сопротивление материала образца  $\sigma_0$  по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{1}{2\pi h R_0} \ln \frac{r_2}{r_1} = 437,92 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$$

Рассчитаем концентрацию носителей тока:

$$n = \frac{\sigma}{q\mu} = (5,89 \pm 0,24) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$$

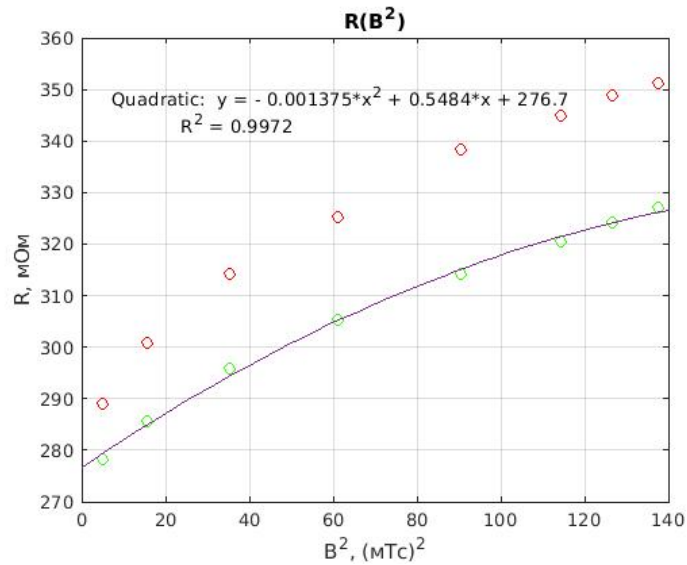


Рис. 9: график зависимости  $R(B^2)$  для пластинка (вдоль) (квадратичная аппроксимация)

Сравним полученные результаты со справочными:

$$\sigma_{\text{теор}} = 220 (\text{Om} \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$n_{\text{теор}} = 178 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$$

## 5 Вывод

Теоретическая зависимость выполняется для диска Корбина. А вот для пластинки тоже самое сказать нельзя, наблюдается нелинейное поведение кривой, для любого расположения, но при этом отличаются только наклоны кривых, сам характер кривых не изменяется. Полученные значения попадают в порядок с теоретическими, но при этом есть отклонения (более  $3\sigma$ ), возможно связанные, как с неучтенными эффектами, так и с тем, что может быть другой материал (отличный от  $InSb$ ).

## 6 Литература

1. **Лабораторный практикум по общей физике:** Учебное пособие. В трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм /Гладун А.Д.,

Александров Д.А., Берулёва Н.С. и др.; Под ред. А.Д. Гладуна -  
М.: МФТИ, 2007. - 280 с.