

Работа 3.3.6

Влияние магнитного поля на проводимость полупроводников

Цель работы: измерение магнетосопротивления полупроводниковых образцов различной формы.

Оборудование: стабилизированный источник постоянного тока и напряжения, электромагнит, цифровой вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат, измеритель магнитной индукции Ш1-10, образцы (InSb) монокристаллического антимонида индия n-типа.

1. Теоретическая справка

Выражение для магнетосопротивления. Рассмотрим проводник с током, помещенный в магнитное поле. Пусть его вектор индукции \vec{B} направлен перпендикулярно вектору напряженности электрического поля \vec{E} (эффектом Холла пренебрегаем). Тогда усредненное по времени уравнение движения в стационарном состоянии имеет вид (здесь и далее все скорости считаются усредненными по времени)

$$\vec{E} + \frac{\vec{v}}{b} + \vec{v} \times \vec{B} = 0, \quad (1)$$

здесь b — подвижность электронов, \vec{v} — скорость. Если электрическое поле направлено вдоль оси x , то отсюда получим выражение для проекции скорости электрона на эту ось:

$$v_x = -\frac{bE}{1 + (bB)^2} \quad (2)$$

Из этого выражения получаем эффективный коэффициент подвижности b^* :

$$b^* = -\frac{v_x}{E} = \frac{b}{1 + (bB)^2}. \quad (3)$$

Подставим это в формулу для удельного сопротивления ρ :

$$\rho = \frac{1}{enb^*} = \frac{1}{enb} (1 + (bB)^2) = \rho_0 (1 + (bB)^2), \quad (4)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление в отсутствии магнитного поля. Таким образом, искомая зависимость квадратична, и линейна в координатах $\rho(B^2)$. Зависимость сопротивления R от B имеет такой же вид, т.к. $R = A\rho$, где A зависит только от геометрических параметров.

Диск Корбино. На самом деле, пренебрежение эффектом Холла при выводе формулы (4) неправильно, т.к. эффект Холла должен в точности компенсировать магнетосопротивление. Его наличие у проводников обуславливается тем, что Холловское напряжение компенсирует влияние только на электроны, движущиеся со скоростью, близкой к средней. Тем не менее, магнетосопротивление будет зависеть от ориентации. Поэтому в экспериментах обычно используют *диск Корбино*. В нем напряженность внешнего электрического поля направлена радиально (контакты подсоединены к внешней и внутренней сторонам), а индукция магнитного поля —

перпендикулярно плоскости диска. Магнитное поле вызывает дополнительное трансверсальное движение зарядов, которое не приводит к их накоплению. Отсюда $E_x = 0$ и формула (4) полностью применима. Если толщина диска h , а внешний и внутренний диаметры D и d соответственно, то сопротивление диска R выражается по формуле

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi h} \ln \frac{D}{d} \quad (5)$$

2. Калибровка

Экспериментальная установка. Установка в этой части практически полностью аналогично установке в соответствующей части работы 3.4.1 (вместо милливеберметра на данной установке используется датчик Холла, сразу измеряющий магнитное поле), поэтому не будем повторно приводить описание.

Обработка результатов Результаты измерений $B(I)$ занесены в таблицу 1 (см. часть 3, ток обозначен I_m), график представлен на рисунке 1. Из него видно, что сердечник магнита почти достигает насыщения, поэтому придумать аппроксимирующую функцию довольно сложно (была проведена гладкая кривая).

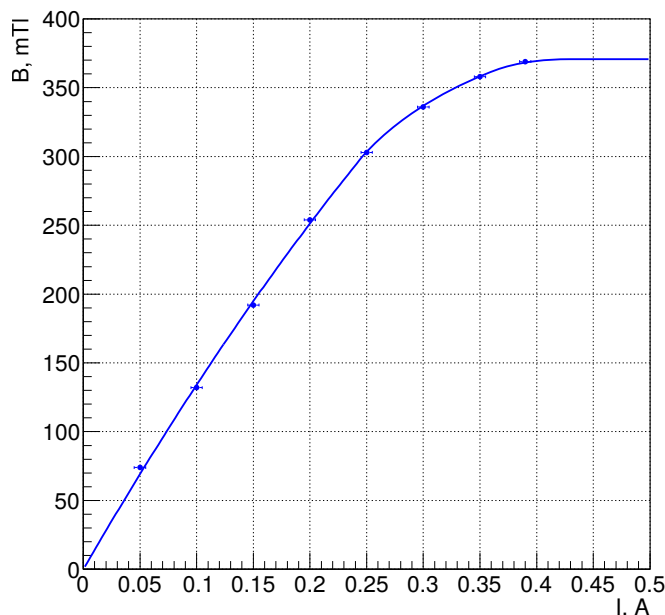


Рис. 1: График зависимости $B(I)$

3. Исследование магнетосопротивления

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Ток I через образец, измеряемый амперметром, регулируется реостатом R_2 , т.к. его сопротивление достаточно большое, значение силы тока практически не меняется в ходе эксперимента. Вольтметр измеряет напряжение U на образце. Таким образом, сопротивление измеряется формулой

$$R = \frac{U}{I}, \quad (6)$$

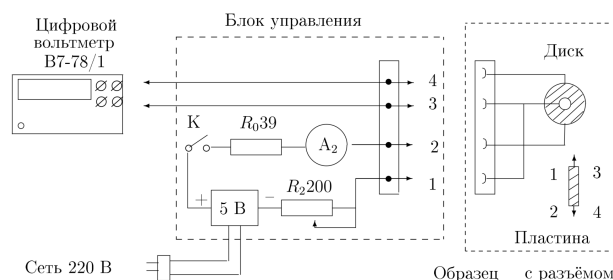


Рис. 2: Схема установки

называемой *законом Ома*. Согласно (4), зависимость $R(B^2)$ должна быть линейной. Для ее получения будем проводить измерения на тех же токах через электромагнит, при которых производилась калибровка.

Обработка результатов. Экспериментальные данные вместе с пересчитанными результатами занесены в таблицу 1. Связь индексов с образцами следующая: 1 — диск Корбино, 2 — пластина с шириной вдоль магнитного поля, 3 — пластина с шириной, перпендикулярной магнитному полю. Для диска $I = 25,0$ мА, для пластины — $10,0$ мА. Погрешности (обозначены

знаком Δ) были вычислены по следующим формулам:

$$\Delta B = 2 \text{ мТл}; \quad (7)$$

$$\Delta U = 0,02 \text{ мВ}; \quad (8)$$

$$\Delta I = 0,02 \text{ мА}; \quad (9)$$

$$\Delta B^2 = 2B^2 \frac{\Delta B}{B}; \quad (10)$$

$$\Delta R = R \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2}. \quad (11)$$

$I_m, \text{мА}$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,39
$B, \text{мТл}$	0	74	132	192	254	303	336	358	369
$B^2, \text{мТл}^2/10^3$	0	5,5	17,4	36,9	64,5	91,8	112,9	128,2	136,2
$\Delta B^2, \text{мТл}^2/10^3$	0	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5
$U_1, \text{мВ}$	0,67	0,79	1,09	1,5	2,01	2,5	2,87	3,12	3,28
$U_2, \text{мВ}$	2,69	2,73	2,79	2,87	2,95	3,02	3,08	3,11	3,13
$U_3, \text{мВ}$	2,69	2,76	2,88	2,97	3,08	3,19	3,26	3,32	3,38
$R_1, \text{МОм}$	27	32	44	60	80	100	115	125	131
$\Delta R_1, \text{МОм}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R_2, \text{МОм}$	269	273	279	287	295	302	308	311	313
$\Delta R_2, \text{МОм}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$R_3, \text{МОм}$	269	276	288	297	308	319	326	332	338
$\Delta R_3, \text{МОм}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Таблица 1: Все необходимые данные

Графики зависимостей $R(B)^2$ представлены на рис. 2. Это действительно прямые, причем для пластины нелинейные эффекты не проявляются. Из них находим подвижности, пользуясь (4):

$$b = \sqrt{\frac{k}{R_0}}, \quad (12)$$

где k — коэффициент наклона. Погрешности определяются выражением

$$\Delta b = \frac{b}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2}. \quad (13)$$

В итоге получим:

$$k = (7,5 \pm 0,1) \text{ ОмТл}^2; \quad (14)$$

$$b = (5,3 \pm 0,3) \text{ 1/Тл}. \quad (15)$$

Это значение близко к табличному (7,8 1/Тл).

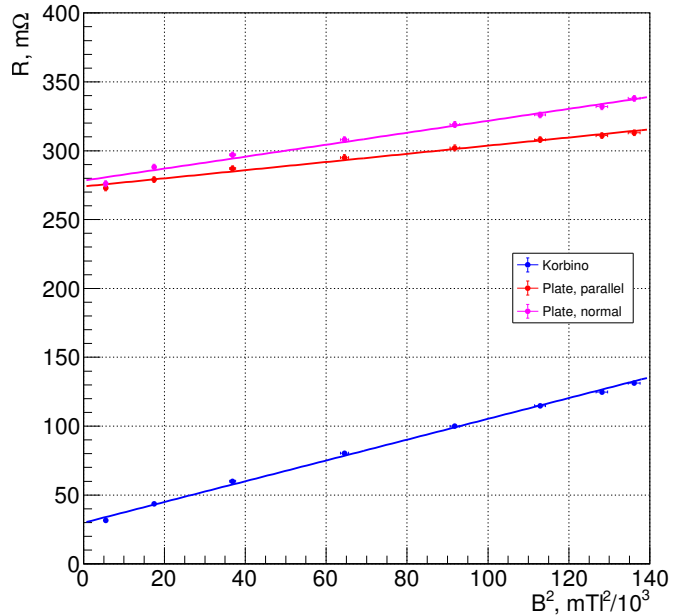


Рис. 3: График зависимости $R(B^2)$

Теперь из (5) определим удельное сопротивление, предварительно записав параметры диска:

$$h = 1,8 \text{ мм}; \quad (16)$$

$$d = 3,0 \text{ мм}; \quad (17)$$

$$D = 18,0 \text{ мм}; \quad (18)$$

$$\rho = \frac{2\pi h R_0}{\ln \frac{D}{d}} = (1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (19)$$

$$\Delta\rho = \frac{\Delta R_0}{R_0} \rho. \quad (20)$$

4. Вывод

Цели работы были достигнуты, все величины были определены, хотя они и не очень хорошо сходятся с табличными.