

Лабораторная работа 3.6.6
ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА
ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Гарина Ольга

17 ноября 2020 г.

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

В работе используются: электромагнит, миллитесламетр (на основе датчика Холла), вольтметр, амперметр, миллиамперметр, реостат, образцы монокристаллического антимонида индия (InSb) n-типа.

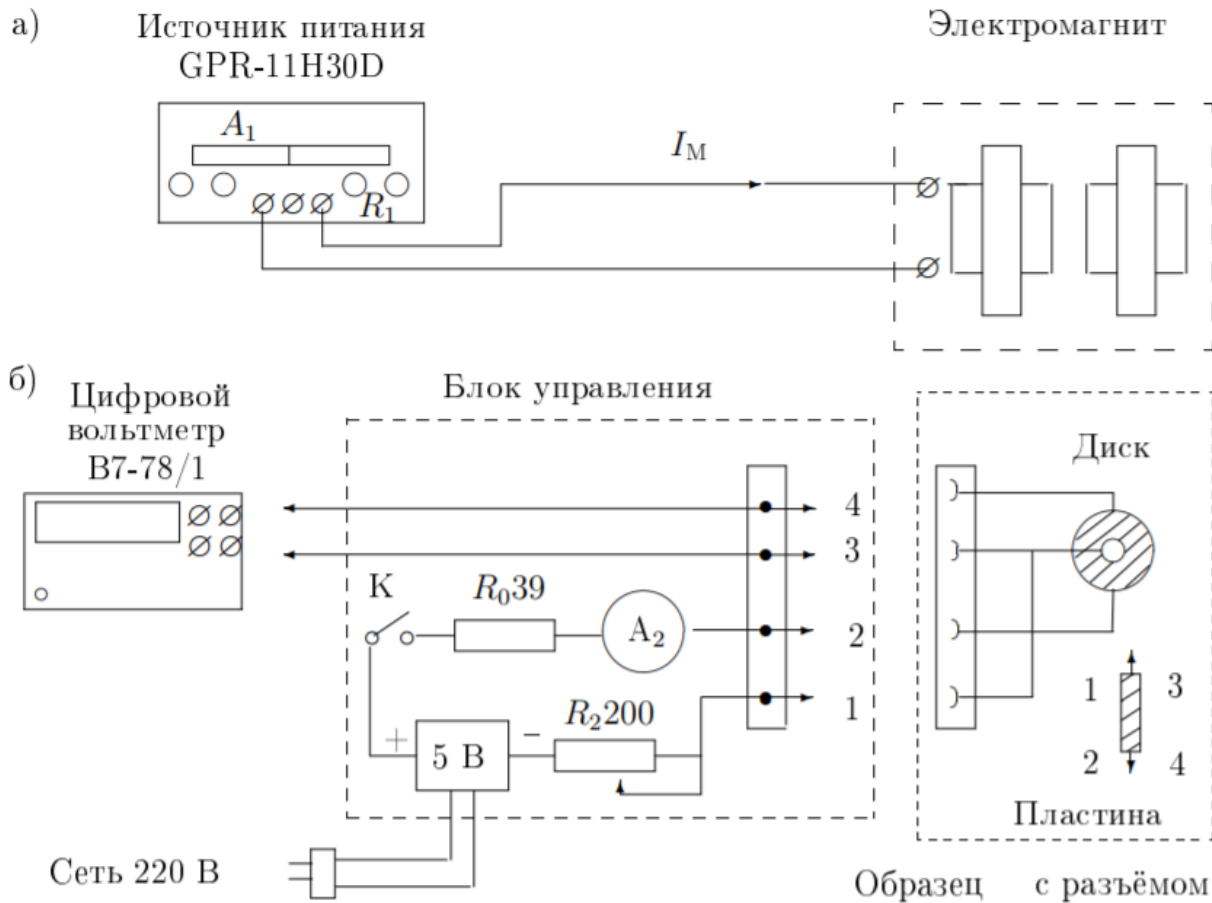


Рисунок 1 – Схема установки для исследования влияния магнитного поля на проводимость полупроводников

Проводимость большинства твердых 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 электронов в атомах этих веществ. Большинство чистых металлов обладает электронным типом проводимости. Это означает, что электроны, частично заполняющие зону проводимости являются единственными носителями электрического тока. Однако в ряде металлов (цинк, кадмий, бериллий и некоторые сплавы) зонная структура такова, что в зоне проводимости слишком мало вакантных мест, поэтому в них основными носителями электрического тока являются дырки (дырочный тип проводимости).

Для чистых проводников характерно одновременное наличие двух типов носителей. В легированных проводниках (содержащих примеси) может доминировать один из типов носителей - "электроны" (полупроводники n-типа) или "дырки" (полупроводники p-типа).

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, помещенном во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

Для исследования зависимости проводимости среды от магнитного поля используют две основные и принципиально различные по геометрии схемы: мостик Холла и диск Корбино.

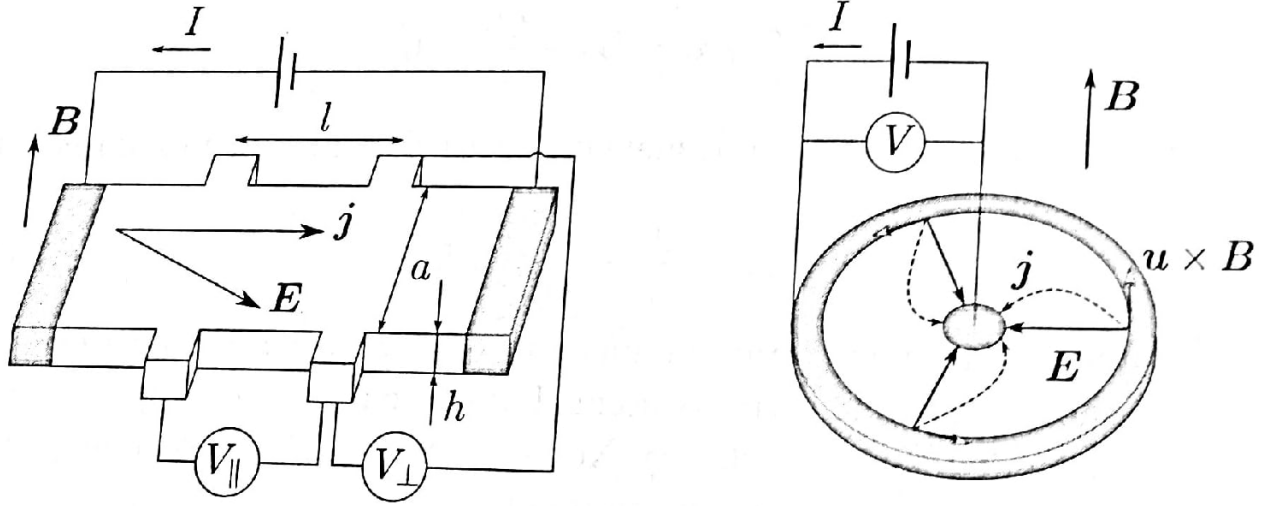


Рисунок 2 – Две схемы для исследования влияния магнитного поля на проводящие свойства: мостик Холла (слева) и диск Корбино (справа)

Мостик Холла. В данной схеме ток вынуждают течь по оси x вдоль плоской пластинки. Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, "прибивает" носителя заряда к краям образца, что создает холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу.

Диск Корбино. В схеме Корбино электрическое поле направлено по радиусу системы. В перпендикулярном диску магнитном поле ток вынужден протекать под углом к электрическому полю, то есть линии тока представляют собой спирали. Дополнительное (холловское) электрическое поле при этом не возникает.

Ввиду симметрии системы вклад в полный ток дает только радиальная компонента плотности тока $j_r = \sigma_r E r$. Полный ток равен $I = j_r \cdot 2\pi r h$. Если в системе присутствует один тип носителей, то проводимость в радиальном направлении σ_r соответствует компоненте σ_{xx} тензора проводимости.

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

где μ – подвижность носителей.

Напряжение между центром и краем диска равно

$$U = \frac{\sigma_r}{\sigma_0} R_0 I, \quad (3)$$

где $R_0 = \frac{1}{2\pi r h \sigma_0} \ln \frac{D}{d}$ – сопротивление диска в отсутствии магнитного поля. Поэтому закон Ома в схеме Корбино можно записать как

$$U = I R_0 (1 + (\mu B)^2). \quad (4)$$

Таким образом, в данной схеме появляется зависимость сопротивления образца от магнитного поля. Причина – в геометрии системы: магнитное поле искривляет линии тока, делая их длиннее. Такой эффект называют геометрическим сопротивлением.

Магнетосопротивлением называют зависимость сопротивления образца от величины приложенного магнитного поля.

На примере мостика Холла видно, что для изотропных веществ с одним типом носителя эффект магнетосопротивления как таковой отсутствует. Зависимость $R(B)$ может проявляться только в силу геометрических эффектов, как в примере с диском Корбино.

1 Обработка результатов

В ходе эксперимента удалось исследовать при постоянном токе через образец зависимость напряжения на образце от величины магнитного поля и от ориентации образца в магнитном поле; по результатам измерений рассчитать подвижность электронов, удельное сопротивление материала образца и концентрацию электронов.

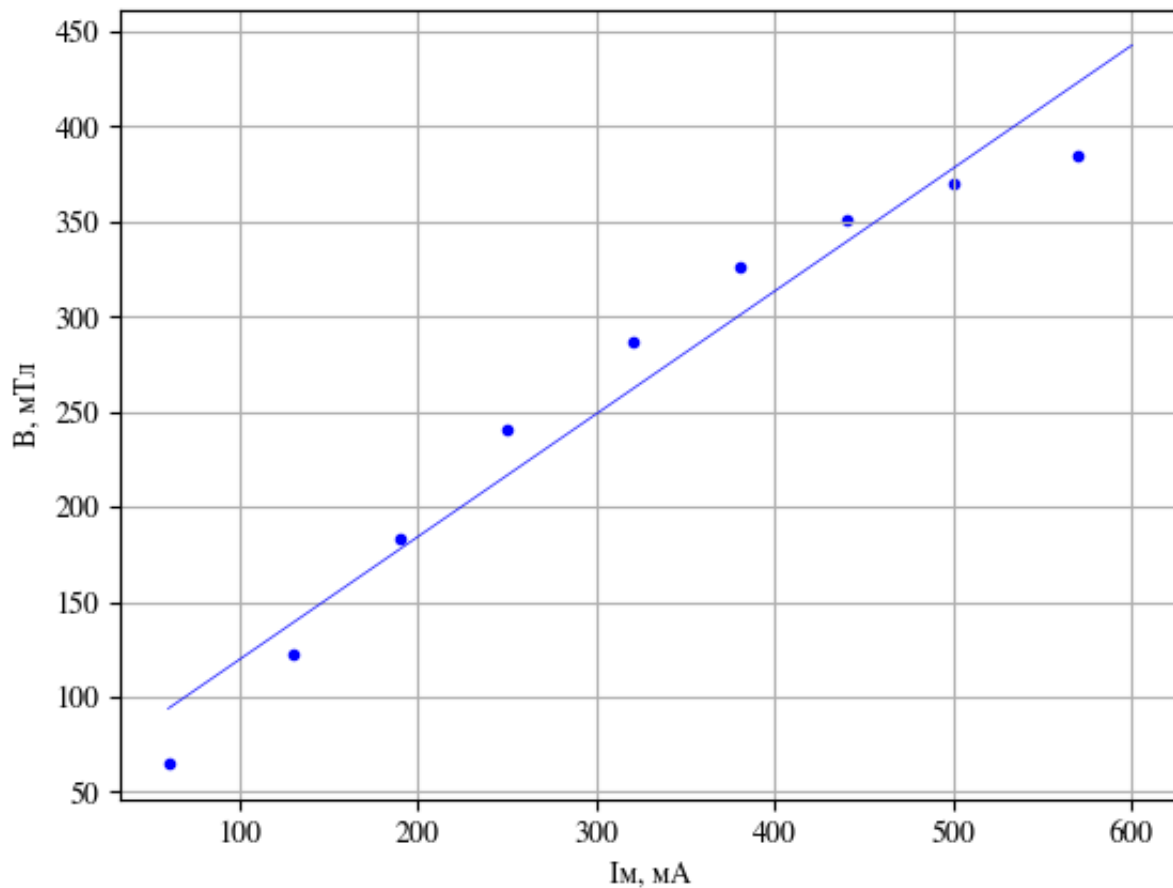


Рисунок 3 – Калибровочный график зависимости $B(I_m)$

С помощью МНК были подсчитаны следующие коэффициенты наклонов графиков:
Диск Корбино

$$k = 63 \pm 5 \text{ 1/Тл}^2$$

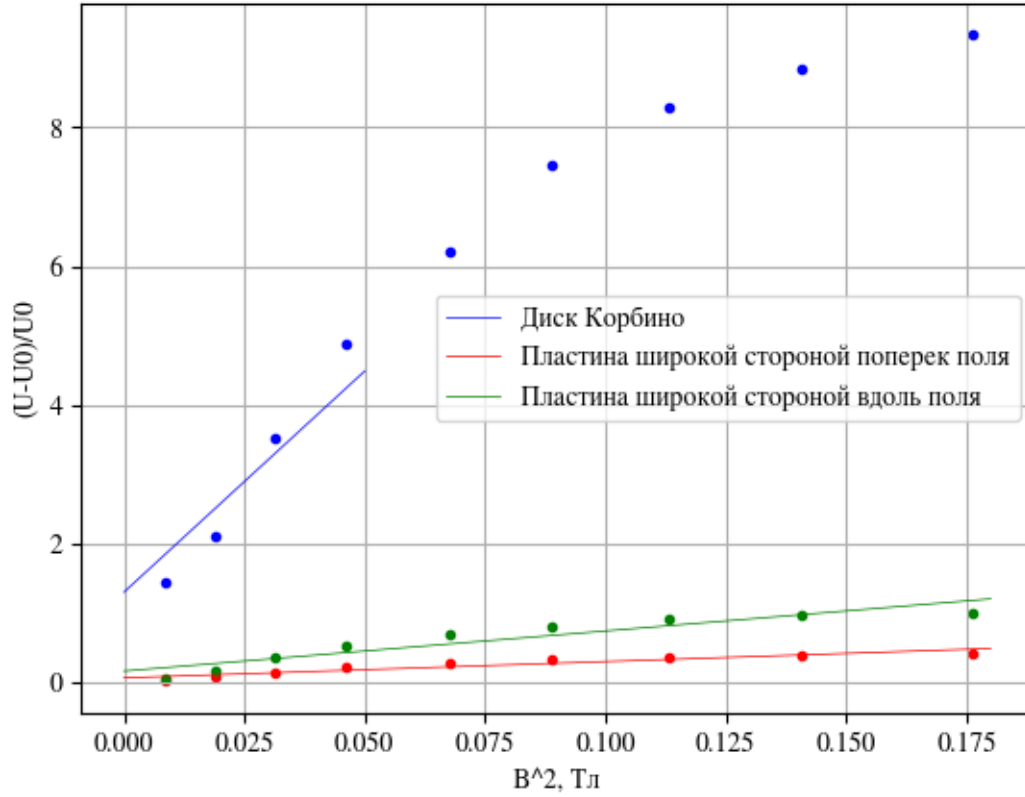


Рисунок 4 – Графики зависимостей $(U - U_0)/U_0$ от B^2 для разных образцов

Пластина широкой стороной поперек поля

$$k = 2.67 \pm 0.11 \text{ 1/Тл}^2$$

Пластина широкой стороной вдоль поля

$$k = 6.6 \pm 0.3 \text{ 1/Тл}^2$$

По формуле

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\Delta U}{U_0} = (\mu B)^2 \quad (5)$$

можно подсчитать подвижность носителей по графику для диска Корбино

$$\mu = \sqrt{k} = 7.9 \pm 0.3 \text{ 1/Тл}$$

Сопротивление диска в отсутствие поля находится по формуле

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{0.29}{22} = 0.0116 \pm 0.0006 \text{ Ом}$$

По формуле

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi r h} \ln \frac{D}{d}, \quad (6)$$

зная размеры диска, находится удельное сопротивление диска ρ_0 в отсутствие поля и удельная проводимость диска $\sigma_0 = 1/\rho_0$

$$\begin{aligned}\rho_0 &= 0.076 \pm 0.006 \text{ Ом} \cdot \text{мм} \\ \sigma_0 &= 13.1 \pm 1.1 \text{ 1/(\text{Ом} \cdot \text{мм})}\end{aligned}$$

По формуле

$$n = \frac{\sigma_0}{e\mu} \quad (7)$$

находится концентрация носителей в диске

$$n = (100 \pm 9) \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$$

Табличные значения найденных величин для InSb

$$\mu = 7.7 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В с})$$

$$\sigma_0 = 2.2 \cdot 10^2 \text{ (Ом см)}^{-1}$$

Таким образом ошибки составляют

$$\varepsilon_\mu = 3\%$$

$$\varepsilon_\sigma = 4.1\%$$

2 Вывод

В ходе лабораторной работы удалось измерить зависимость сопротивления полупроводниковых образцов различной формы от индукции магнитного поля, а также с высокой точностью получить некоторые характеристики материала образца.

3 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие в трех томах. Т. 2. Электричество и магнетизм. 2-е изд., перераб и дополн. / Никулин М.Г., Попов П.В, Нозик А.А. и др.; Под ред. А.В. Максимычева, М.Г. Никулина. – М.: МФТИ, 2019. – 370 с