

**Министерство образования Российской Федерации
Томский политехнический университет
Кафедра теоретической и экспериментальной физики**

«УТВЕРЖДАЮ»
Декан ЕНМФ
_____ Ю.И. Тюрин
_____ 2007 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С
ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА**

**Методические указания к выполнению лабораторной работы Э-16а
по разделу «Электричество и магнетизм» курса «Общей физики» для
студентов всех специальностей**

Томск 2007

УДК 53.01

Исследование магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла.
Методические указания к выполнению лабораторной работы Э-16а по курсу
«Общая физика» для студентов всех специальностей.

Томск, изд. ТПУ С.М. 2007. – 12 с.

Составитель С.Н. Гриняев

Рецензент: Н.С. Кравченко

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Зав. кафедрой

В.Ф. Пичугин

«___»_____2007 г.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследовать распределение магнитного поля внутри соленоида, ознакомиться с принципом работы датчика Холла.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: соленоид, датчик Холла, блок питания для соленоида, источник питания для датчика Холла, милливольтметр для измерения электродвижущей силы (э.д.с.) Холла.

1. Магнитное поле соленоида

Соленоидом называется система витков, образованных при намотке провода на цилиндрический каркас. При пропускании тока через провод каждый виток создает вокруг себя неоднородное магнитное поле. Суперпозиция полей отдельных круговых токов образует поле всего соленоида. Если витки расположены вплотную друг к другу, то у бесконечно длинного соленоида поле внутри однородно и направлено вдоль оси, образуя с направлением тока в витках правовинтовую систему. Вне бесконечного соленоида магнитное поле равно нулю. Если соленоид конечный, но его длина L много больше диаметра витков d , то магнитное поле внутри соленоида в его центральной части тоже будет однородным. Однако по мере приближения к концам соленоида однородность магнитного поля нарушается, поле убывает и на некотором расстоянии от его концов стремится к нулю.

Основной характеристикой магнитного поля является магнитная индукция \vec{B}

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (1)$$

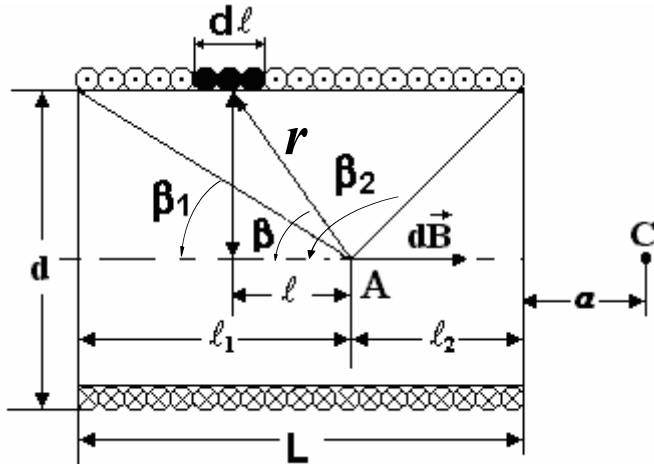
где \vec{H} - напряженность магнитного поля, \vec{J} - намагниченность среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ - магнитная постоянная, μ - безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства среды и называемая относительной магнитной проницаемостью среды.

Напряженность магнитного поля \vec{H} определяет тот вклад в магнитную индукцию \vec{B} , который дают внешние источники поля. Для соленоида внешним источником поля является ток, протекающий по виткам.

Вектор намагниченности \vec{J} характеризует степень намагниченности вещества в магнитном поле, он представляет собой магнитный момент единицы объема вещества и определяет индукцию магнитного поля, создаваемого намагниченным веществом. Так как намагниченность воздуха ничтожно мала, то для соленоида без сердечника $\vec{J} \approx 0$, $\mu \approx 1$ и

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2)$$

Рассмотрим соленоид, имеющий длину L и состоящий из N витков с радиусом r (рис.1). Его магнитную индукцию получим путем суммирования индукций отдельных круговых токов. Выделим малый участок соленоида длиной $d\ell$ (рис. 1), на него приходится $n \cdot d\ell$ витков, где $n = N/L$ - число витков на единицу длины соленоида. Если через соленоид пропускать ток силой I , то участок $d\ell$ соленоида можно рассматривать как круговой ток силой $I \cdot n \cdot d\ell$.



Согласно закону Био-Савара-Лапласа такой ток создает в некоторой точке A на оси соленоида индукцию магнитного поля \vec{B} , направленную вдоль оси и равную по величине

$$dB = \frac{\mu_0 I r^2 n dl}{2(r^2 + \ell^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

где ℓ – расстояние по оси от участка $d\ell$ до точки A , которое

можно записать

Рис. 1

$$\ell = r \cdot \operatorname{ctg} \beta \quad (4)$$

где β – угол между осью соленоида и радиусом – вектором, проведенным из рассматриваемой точки к участку $d\ell$.

Дифференциал выражения (4) равен

$$d\ell = -r \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}$$

Так как $r^2 + \ell^2 = \frac{r^2}{\sin^2 \beta}$, то после подстановки в (3) получаем

$$dB = -\frac{\mu_0 I r^2 n \sin^3 \beta d\beta r}{2r^3 \sin^2 \beta} = -\frac{\mu_0 I n}{2} \sin \beta d\beta$$

Магнитная индукция в точке A от всех элементов соленоида направлена параллельно его оси, поэтому для нахождения результирующего значения B в точке A надо проинтегрировать полученное выражение по всем значениям угла β . Обозначая через β_1 и β_2 значения углов для концов соленоида, в результате интегрирования получаем:

$$B = -\frac{\mu_0 I n}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta = \frac{\mu_0 I n}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (5)$$

где $\cos \beta_1 = -\frac{\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + r^2}}$ и $\cos \beta_2 = \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + r^2}}$

ℓ_1 и ℓ_2 – расстояния от точки A до концов соленоида.

Записывая длину соленоида как $L = l_1 + l_2$, после подстановки в (5) находим:

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \left(\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + r^2}} + \frac{L - l_1}{\sqrt{(L - l_1)^2 + r^2}} \right) \quad (6)$$

Выражая l_1 через расстояние x , отсчитанное от центра соленоида $l_1 = L/2 + x$, получаем более симметричное выражение для индукции B

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \left(\frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + r^2}} + \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + r^2}} \right) \quad (7)$$

При $x = 0$ находим значение магнитной индукции B в центре соленоида

$$B_c = \frac{\mu_0 InL}{2\sqrt{\frac{L^2}{4} + r^2}} \quad (8)$$

При $L \rightarrow \infty$ из (8) получаем значение магнитной индукции B в центре бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu_0 In \quad (9)$$

Полагая один из углов β_1 или β_2 равным $\frac{\pi}{2}$, найдем индукцию магнитного поля у края соленоида. При $\beta_1 = \frac{\pi}{2}$ получаем значение магнитной индукции у левого края соленоида

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \cos \beta_2 = \frac{\mu_0 InL}{2\sqrt{L^2 + r^2}} \quad (10)$$

Аналогично можно определить выражение для индукции магнитного поля в некоторой точке C , расположенной на оси соленоида, но за его пределами

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \left(\frac{L + a}{\sqrt{(L + a)^2 + r^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \right) \quad (11)$$

где a – расстояние от края соленоида до точки C (рис.1).

2. Измерение индукции магнитного поля с помощью датчика Холла

Магнитное поле измеряется с помощью датчика, принцип работы которого основан на эффекте Холла. Эффект Холла заключается в следующем. Пусть образец имеет форму прямоугольной пластинки длиной l , шириной d , толщиной b (рис.2). Если вдоль длины образца (направление оси y) пропустить электрический ток \vec{i} , а перпендикулярно плоскости пластинки (направление оси x) приложить магнитное поле \vec{B} , то в направлении, перпендикулярном направлению тока \vec{i} и \vec{B} (направление оси z), возникнет электрическое поле, называемое полем Холла, с напряженностью $E_{\text{Холла}}$. В этом и состоит эффект Холла. Поле Холла характеризуют разностью потенциалов между симметричными точками C и D на боковых поверхностях образца. Эта разность потенциалов называется холловской разностью потенциалов ($U_{\text{Холл}}$ или ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$).

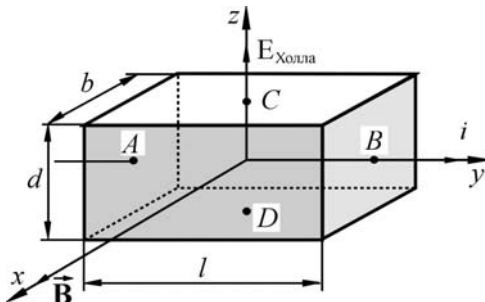


Рис. 2. Ориентация тока, индукции магнитного поля и напряженности холловского поля в полупроводниковой пластине

Эффект Холла объясняется тем, что в магнитном поле на движущийся со скоростью \vec{v} заряд e действует сила Лоренца

$$\vec{F}_{\text{Л}} = e[\vec{v} \times \vec{B}],$$

направленная перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} (рис.3а). Величина силы Лоренца равна

$$F_{\text{Л}} = evB$$

поскольку угол между векторами \vec{v} и \vec{B} прямой (рис.2).

На рис.3 показано движение электрона под действием силы Лоренца внутри пластины. Видно, что электроны создают на верхней пластине избыток отрицательных зарядов. На нижней пластине появляется избыток положительного заряда. В результате между этими обкладками возникает электрическое поле Холла с напряженностью

$$E_{\text{Холл}} = vB,$$

которой отвечает холловская разность потенциалов $U_{\text{Холл}}$ (ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$)

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}} = U_{\text{Холл}} = E_{\text{Холл}}d = vBd \tag{12}$$

Так как плотность тока равна

$$\vec{j} = en\vec{v}$$

где n — концентрация носителей тока, то силу тока можно записать в виде

$$\vec{i} = jbd = envbd$$

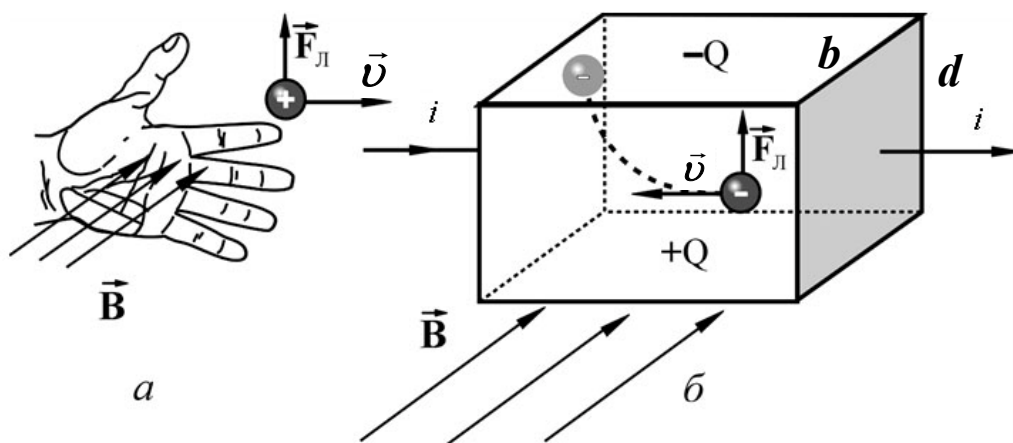


Рис. 3 Определение направления силы Лоренца при помощи правила левой руки на движущийся положительный заряд в магнитном поле (а) и иллюстрация действия силы Лоренца на движущиеся в магнитном поле электроны в металлической пластине

Отсюда выражаем скорость

$$x = \frac{i}{enbd}$$

и подставляя ее в (12), получаем формулу для ЭДС Холла

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}} = \frac{iR}{b} B = kB \quad (13)$$

где $R = \frac{1}{en}$ - характеристика изучаемого вещества, называемая постоянной Холла, $k = \frac{iR}{b}$ - постоянная датчика.

Таким образом, ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$ пропорциональна силе тока через образец i и обратно пропорциональна толщине образца b .

3. Описание экспериментальной установки

На рис. 4 показана экспериментальная установка для выполнения работы. Установка включает длинный соленоид 1, блок питания для соленоида 2, датчик Холла, источник питания для датчика Холла 3, милливольтметр для измерения ЭДС Холла 4.

Соленоид изготовлен из виниловой трубы с радиусом $r = 55$ мм и медного провода диаметром 0,6 мм. Длина катушки (соленоида) составляет $L = 0.4$ м. Плотность витков соленоида $n = 925$ витков/м. При данном соотношении длины катушки к диаметру магнитное поле внутри на оси соленоида меньше магнитного поля бесконечно длинного соленоида на 3,5%. Углы β_1 и β_2 равны 165,32 и 14,68° соответственно.

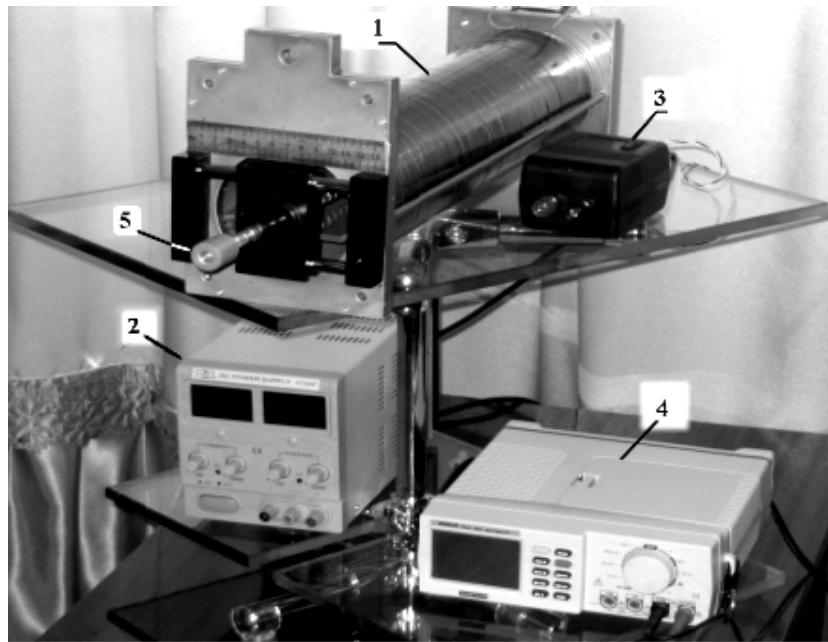
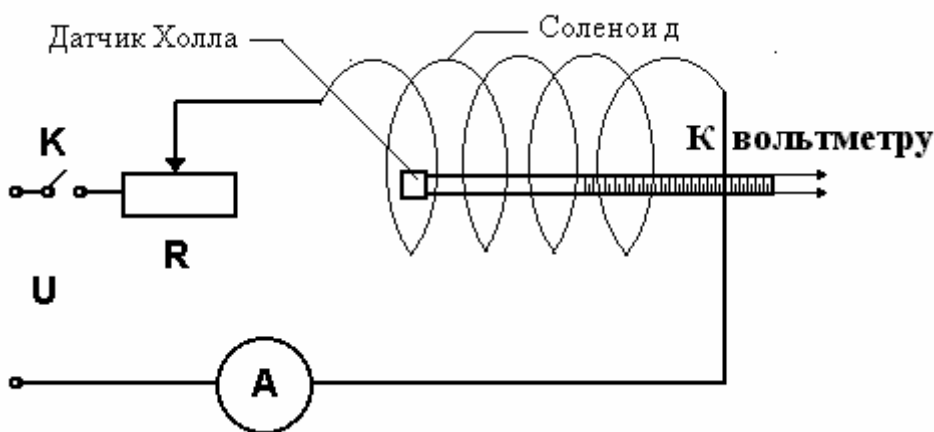


Рис. 4 Внешний вид экспериментальной установки

Обмотка соленоида питается от стабилизированного источника постоянного тока НУ 3002 с плавной регулировкой тока. Датчик Холла AD 22151 является линейным преобразователем магнитного поля. Выходной сигнал датчика – это напряжение, пропорциональное магнитному полю, приложенному перпендикулярно верхней плоскости корпуса датчика. Датчик питается от источника с выходным напряжением 5 вольт. Датчик крепится на кронштейне 5, с помощью которого он может перемещаться вдоль и поперек оси соленоида.

Принципиальная электрическая схема для измерения индукции магнитного поля соленоида показана на рис.5. В блок питания входят



переключатель K , переменное сопротивление R , регулирующее величину тока в соленоиде, и амперметр A для измерения силы тока I , текущего по виткам соленоида.

Рис. 5 Принципиальная электрическая схема установки

К датчику Холла подведены контакты, соединяющие его с вольтметром, с помощью которого измеряют ЭДС Холла $\mathcal{E}_{Холл}$.

Методика и техника проведения измерений

А. Тарирование датчика Холла

Тарирование (градуировка) датчика Холла заключается в получении зависимости ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{холл}}$ от модуля вектора магнитной индукции $|\vec{B}|$ в некоторой области магнитного поля, где величина этого поля известна. В работе для тарирования используют тот же соленоид магнитное поле которого необходимо изучить. Для тарирования датчика Холла его помещают в центр соленоида (рис.6, точка А). Индукцию магнитного поля в этой точке определяют по формуле (8), которую удобно переписать в виде

$$B_c = \frac{\mu_0 I n}{\sqrt{1 + \frac{4r^2}{L^2}}} \quad (14)$$

При тарировании измеряют ЭДС Холла как функцию тока I , питающего соленоид. Полученные результаты записывают в табл.1. Затем по формуле (14) рассчитывают значения B_c – индукции магнитного поля, соответствующие значениям тока I и строят тарировочный график зависимости $\mathcal{E}_{\text{холл}} = f(B_c)$. Согласно (13) этот график должен представлять собой прямую линию, выходящую из начала координат.

Коэффициент наклона прямой к оси абсцисс (угловой коэффициент) равен постоянной датчика K :

$$K = \frac{e_{\text{холл}}}{B_c} \quad (15)$$

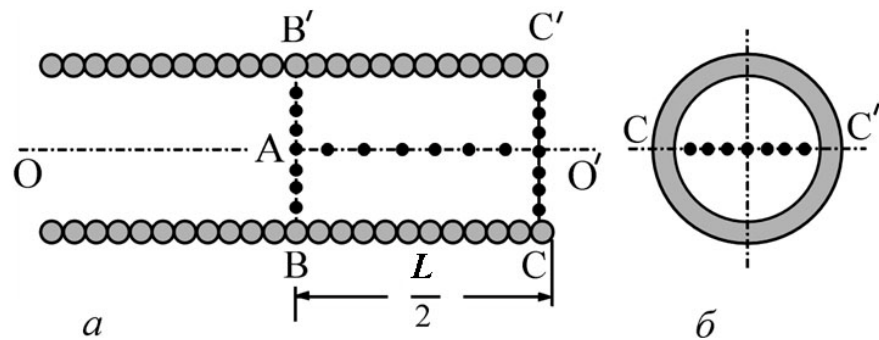


Рис. 6. Сечения соленоида сверху (а) и сбоку (б) по направлениям вдоль осей соленоида OO' и перпендикулярно к ней BB' и CC' . Черными точками (•) на осях указаны места, где необходимо произвести измерение индукции магнитного поля с помощью датчика Холла

Таблица.1

$I(A)$	0,5	1	1,5	2	3	3,5	4
$\mathcal{E}(B)$							
$B(Tл)$							

Зная постоянную датчика K , из измерения ЭДС $\mathcal{E}_{холл}$ датчиком Холла, можно определить значение магнитного поля B в любых местах соленоида. Для этого найденную с помощью милливольтметра величину ЭДС $\mathcal{E}_{холл}$ в исследуемой области магнитного поля делят на постоянную датчика K

$$B = \frac{\mathcal{E}_{холл}}{K} \quad (16)$$

В. Исследование магнитного поля внутри соленоида

Исследование магнитного поля внутри соленоида и обработка результатов измерений проводятся в следующей последовательности.

1. Установите ток, питающий соленоид, равным 1 А.
2. Перемещайте датчик вдоль оси от центра соленоида к его к началу через 1 сантиметр вдоль оси OO' , измеряя при этом ЭДС Холла (рис.6а).
3. Запишите значения ЭДС Холла и соответствующие значения расстояния датчика Холла от центра соленоида x в таблицу 1.
4. Установите датчик в центре соленоида и, перемещая датчик поперек оси вдоль направления $ВВ'$ соленоида через 1 сантиметр, измерьте соответствующие значения ЭДС Холла (рис.6а). Результаты измерений запишите в таблицу 2.
5. Установите датчик на краю соленоида и, перемещая датчик поперек оси вдоль направления $СС'$ соленоида через 1 сантиметр, измерьте соответствующие значения ЭДС Холла (рис.6а и б). Результаты измерений запишите в таблицу 3.
6. По формуле (16) рассчитайте индукцию магнитного поля B во всех исследуемых точках соленоида и запишите в таблицу.
7. Постройте графики зависимости индукции магнитного поля как функцию расстояния исследуемой точки от центра соленоида x вдоль его оси.
8. По формуле (7) рассчитайте теоретическую зависимость $B(x)$ для направления OO' и нанесите ее на график с экспериментальной кривой.
9. Проведите анализ полученных результатов, сделайте выводы.

Данные измерений вдоль оси OO'

Таблица 1

№	1	2	3	...	n_1
x , см					
ε , В					

Данные измерений вдоль оси BB'

Таблица 2

№	1	2	3	...	n_2
x , см					
ε , В					

Данные измерений вдоль оси CC'

Таблица 3

№	1	2	3	...	n_3
x , см					
ε , В					

n_1, n_2, n_3 – число измерений вдоль осей OO' , BB' , CC'

Контрольные вопросы

1. Как ведут себя силовые линии магнитного поля внутри и вне соленоида?
2. Как изменится значение индукции магнитного поля в центре соленоида при уменьшении длины соленоида ?
3. Какое физическое явление положено в основу работы датчика Холла ?
4. От каких параметров датчика Холла зависит величина его ЭДС ?
5. Для чего нужно тарировать датчик Холла ? В чем заключается тарирование датчика? Каким образом проводят тарирование ?
6. Какая формула используется для нахождения индукции магнитного поля на оси внутри длинного соленоида ?

Список рекомендуемой литературы

1. Трофимова Т.В. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985. – 380 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2. – 496 с.
3. Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989. – 608 с.