

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА МОЛЕКУЛЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы по физике  
для студентов, обучающихся по техническим (550000)  
и технологическим (650000) направлениям

Екатеринбург  
УрФУ  
2011

УДК 537.2:001.891.57(076)

Составители: А. В. Аминев, О. Е. Кириллов

Научный редактор – доц. канд. физ.-мат. наук А. Г. Волков

**Определение точки Кюри и магнитного момента молекулы ферромагнетика** : методические указания по выполнению лабораторной работы/ сост. А. В. Аминев, О. Е. Кириллов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 13 с.

Изложены теория и практическая часть проведения лабораторной работы по определению точки Кюри и магнитного момента молекулы ферромагнетика, а также методика обработки полученных результатов.

Библиогр.: 3 назв. Рис. 3. Прил. 1.

Подготовлено кафедрой физики

© УрФУ, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Точка Кюри – это температура  $T_c$ , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю вследствие разориентирующего теплового движения молекул и вещество переходит в парамагнитное состояние.

По мере уменьшения температуры ниже  $T_c$  намагниченность ферромагнетика  $J$  возрастает, так как магнитные моменты его молекул в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность вещества  $J_s$  максимальна. Ее величина (магнитный момент единицы объема образца) равна сумме магнитных моментов молекул:

$$J_s = n\mu_m, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация молекул ферромагнетика;  $\mu_m$  – магнитный момент одной молекулы.

Строго говоря, полное насыщение, для которого справедлива формула (1), возможно только при  $T = 0$  К. Соответствующую этой температуре величину  $J_s(0)$  можно найти из связи магнитной индукции  $\vec{B}$  с намагниченностью вещества  $\vec{J}$ :

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

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Согласно выражению (2) намагниченность насыщения при  $T=0$  К

$$J_s(0) = B_s(0)/\mu_0 - H_s(0) \cong B_s(0)/\mu_0, \quad (3)$$

где  $H_s(0) \ll B_s(0)/\mu_0$ , а индекс  $s$  означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика.

Поскольку напряженность  $H$  внешнего магнитного поля не зависит от температуры, то величина  $H_s(0) = H_s(T)$ . Индукцию насыщения  $B_s(0)$  можно найти экстраполяцией кривой  $B_s(T)$  в область абсолютного нуля температуры.

Напряженность поля  $H$  в вершине петли гистерезиса

$$H = \sqrt{2}IN_1/I, \quad (4)$$

где  $I$  – действующее значение тока, измеряемое амперметром;  $N_1$  – число витков первичной (намагничивающей) обмотки тороида;  $l$  – длина средней осевой линии тороида.

Величина магнитной индукции насыщения  $B_s$  пропорциональна координате  $y$  вершины петли гистерезиса:

$$B_s = my, \quad (5)$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от параметров установки:

$$m = \frac{\gamma R_2 K}{N_2 S l_{\text{дел}}}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – градуировочная постоянная интегратора;  $R_2$  – сопротивление цепи вторичной обмотки тороида;  $K$  – цена деления оси  $Y$  (зависит от положения ручки «Усиление» осциллографа);  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника;  $l_{\text{дел}}$  – длина большого деления оси  $Y$  осциллографа.

Для построения зависимости индукции насыщения  $B_s$  от температуры магнетика  $T$  измеряют координату  $B_s$  вершины петли гистерезиса при нагревании образца. По мере роста температуры ордината  $B_s$  петли уменьшается, а напряженность поля  $H$  остается постоянной. При этом петля гистерезиса уменьшается и по достижении температуры Кюри вырождается в прямую линию. В эксперименте получают зависимость  $B_s(T)$ , вид которой показан на рис. 1.

Участок кривой (1– $N$ ) проводят по опытным точкам. При этом ось температуры на графике начинается в  $T = 0$  К. Для определения  $B_s(0)$  из первой точки (1) продолжают зависимость  $B_s(T)$  до  $T = 0$  К двумя линиями: проводят нормаль к оси  $B$  и касательную к кривой на начальном участке. Точки пересечения этих линий с осью  $B_s$  дают интервал  $\Delta B_s$ , внутри которого лежит искомая величина:

$$B_s(0) = B_{s1} + \Delta B_s/2.$$

Используя найденные значения  $B_s(0)$  и  $H_s(0)$ , можно по формуле (3) найти намагниченность  $J$  при насыщении, а затем с помощью соотношения (1) – величину  $\mu_m$  магнитного момента одной молекулы ферромагнетика.

В данной работе ферромагнитный образец выполнен из сплава Mn–Zn, для которого концентрация атомов  $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

По графику зависимости  $B_s(T)$  определяют также температуру Кюри  $T_s$  данного ферромагнетика.

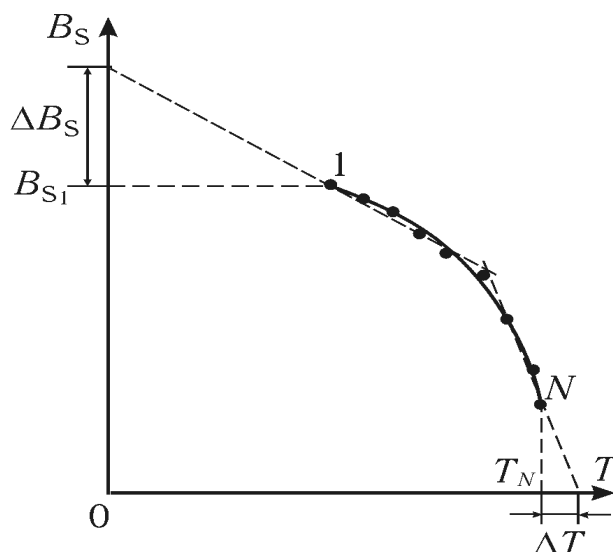


Рис. 1. Зависимость индукции насыщения  $B_s$  от температуры  $T$

Если последняя экспериментальная точка ( $N$ ) близка к оси температур, то при нагревании была достигнута температура Кюри; при этом точка пересечения опытной кривой с осью  $T$  (где  $B_s=0$ ) дает значение  $T_c$ . Иначе находят точку Кюри путем экстраполяции опытной зависимости до значения  $B_s=0$ . Для этого, аналогично описанному выше, продолжают кривую из конечной точки  $N$  до оси температур двумя линиями (касательной к кривой и нормалью к оси), и по найденному интервалу  $\Delta T$  оценивают в первом приближении значение температуры Кюри  $T_c$ :

$$T_c = T_N + \Delta T/2.$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема электрической цепи представлена на рис. 2, монтажная схема – на рис. 3.

Первичная  $N_1$  и вторичная  $N_2$  обмотки намотаны на кольцевой сердечник 3, который изготовлен из исследуемого ферромагнитного материала. Первичную обмотку, по которой протекает переменный

ток, используют для намагничивания магнетика и по ее параметрам определяют напряженность магнитного поля  $H$ .

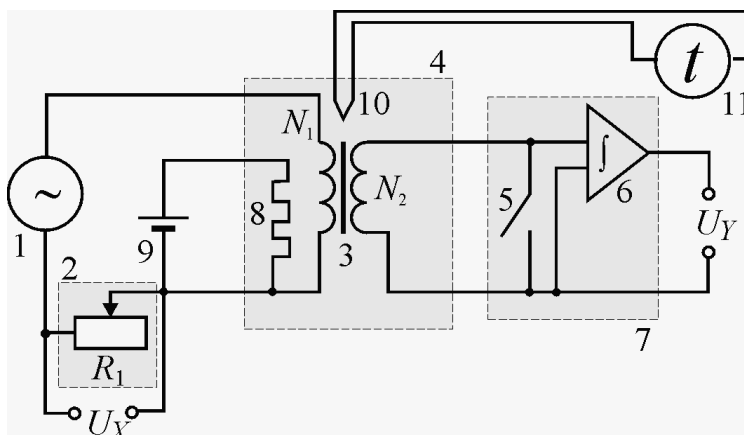


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема установки:

1 – генератор напряжений специальной формы; 2 – миниблок «Реостат» с сопротивлением  $R_1$ ; 3 – тороид с первичной  $N_1$  и вторичной  $N_2$  обмотками; 4 – миниблок «Точка Кюри»; 5 – демпферный ключ; 6 – интегратор; 7 – миниблок «Интегратор тока» (положение тумблера «Сброс»); 8 – электронагреватель; 9 – источник регулируемого постоянного напряжения  $0 \dots +15 \text{ В}$ ; 10 – термопара; 11 – мультиметр;  $U_X$  – напряжение на входе  $X$  осциллографа,  $U_X = U_R \sim I \sim H$ ;  $U_Y$  – напряжение на входе  $Y$  осциллографа,  $U_Y = U_{\text{инт}} \sim Q \sim B$

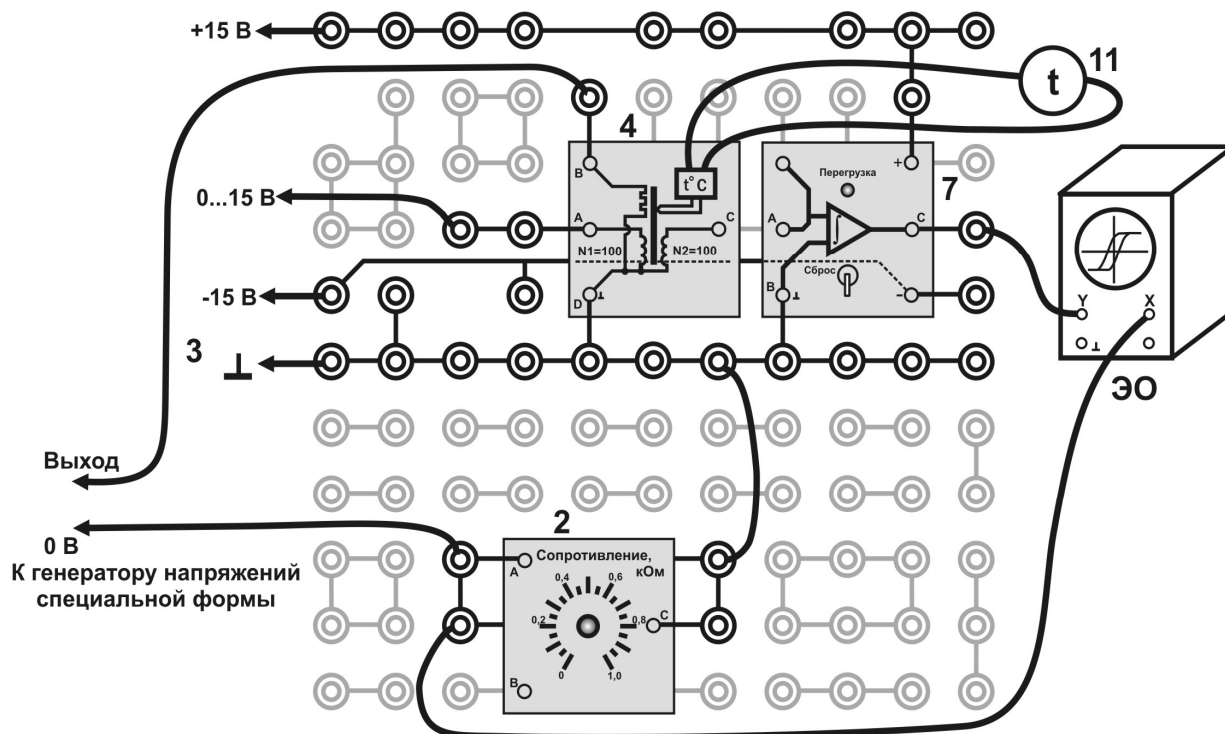


Рис. 3. Монтажная схема установки

Вторичная обмотка предназначена для измерения индукции  $B$  магнитного поля в сердечнике. С этой целью на вход  $Y$  осциллографа подают напряжение  $U_{\text{инт}}$  с интегратора тока 7.

Электронагреватель 8 нагревает исследуемый ферромагнетик. Рядом с ним расположена термopара 10, предназначенная для измерения температуры образца с помощью мультиметра 11.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Цель лабораторной работы** – наблюдение изменения петли гистерезиса в процессе перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние, построение зависимости  $B(T)$ , определение температуры Кюри и вычисление магнитного момента молекулы ферромагнетика.

1. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 3.
2. Включите блок генераторов напряжения. Включите блок мультиметров.
3. Включите осциллограф и выведите электронный луч в центр экрана.
4. Увеличивая ток  $I$  в первичной обмотке кнопками «Установка напряжения выхода 0 – 15 В» 10 (см. описание лабораторного комплекса) генератора напряжений специальной формы, получите изображение предельной петли гистерезиса, для которой рост тока не приводит к увеличению площади петли. При этом, поворачивая реостат в миниблоке «Реостат» и ручку осциллографа «Усиление  $Y$ », установите наибольшие размеры петли, которые вписываются в экран прибора.
5. Подберите значение тока  $I$  (уменьшая его) таким, чтобы точка насыщения ( $H_s, B_s$ ) оказалась в вершине петли гистерезиса.
6. Внесите в табл. 1 (смотри отчет) параметры установки и исследуемого образца:

$N_1$  и  $N_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток;

$l$  – длина средней осевой линии сердечника;

$S$  – площадь поперечного сечения сердечника;

$R_2$  – сопротивление цепи вторичной обмотки;

$\gamma$  – градуировочная постоянная;

$K$  – цена деления оси  $Y$  осциллографа (см. «Усилитель  $Y$ »: число  $K$  указано в единицах В/дел – вольт на большое деление оси  $Y$ );  
 $l_{\text{дел}}$  – длина большого деления оси  $Y$  осциллографа.

7. Перенесите на бумагу осциллограмму предельной петли гистерезиса.
8. Измерьте температуру и значения положительной ( $+y$ ) и отрицательной ( $-y$ ) ординаты вершин петли, которые соответствуют величине индукции насыщения  $B_s$ . Результаты этих измерений запишите в табл. 2.
9. Кнопками 14 (см. описание лабораторного комплекса) генератора постоянного напряжения установите максимальное напряжение. По мере нагревания образца через каждые  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , а с  $50\text{ }^\circ\text{C}$  – через  $5\text{ }^\circ\text{C}$  проводите измерения ординаты  $y$  петли гистерезиса и температуры. Измерения продолжайте до тех пор, пока петля гистерезиса не превратится в прямую линию.
10. По окончании измерений выключите лабораторный комплекс.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 (см. приложение) вычислите с помощью формулы (6) коэффициент  $m$ .
2. По данным табл. 2 (см. приложение) рассчитайте по формуле (5) значения индукции насыщения  $B_s$  для каждой температуры.
3. Используя результаты расчетов табл. 2, постройте график зависимости  $B_s(T)$ , начиная ось температур с  $0\text{ К}$ .
4. По графику  $B_s(T)$  определите температуру Кюри и значение  $B_s(0)$ , (см. рис. 1 и описание метода измерений).
5. С помощью формулы (3) найдите намагниченность насыщения  $J_s$ , а из выражения (1) – магнитный момент атома ферромагнетика  $\mu_m$ .
6. В выводе по работе сделайте анализ полученных данных.

**По всем вопросам обращайтесь к лаборанту или преподавателю.**



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Покажите вид основной кривой намагничивания  $B(H)$  и графика зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля  $\mu_r(H)$  для следующих магнетиков:

- а) диамагнетиков;                      б) парамагнетиков;  
в) ферромагнетиков при  $T < T_c$ ;      г) ферромагнетиков при  $T > T_c$ .

2. Какой вид имеет основная кривая намагничивания ферромагнетика?

3. Как изменяется петля гистерезиса  $B(H)$  при нагревании ферромагнетика? Какой вид принимает зависимость  $B(H)$  при температуре выше точки Кюри?

4. Назовите характерные свойства ферромагнетиков и особенности их намагничивания.

5. Опишите изменения доменной структуры ферромагнетика в процессе его намагничивания (по мере роста напряженности поля  $H$ ).

6. Опишите механизм намагничивания ферромагнетика при температурах:

- а) ниже точки Кюри; б) выше точки Кюри.

7. От каких величин зависит:

- а) напряженность  $H$  магнитного поля тороида;  
б) индукция  $B$  магнитного поля тороида с ферромагнитным сердечником;  
в) магнитная проницаемость  $\mu_r$  сердечника тороида?

8. Какие измеряемые величины и какие формулы используют для определения следующих величин:

- а) напряженности  $H$  магнитного поля в сердечнике;  
б) магнитной индукции насыщения  $B_s$ ?

1. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М.: Высшая школа, 1989. 467 с.

2. Калашников С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. М.: Наука, 1977. 327 с.

3. Савельев С. И. Курс общей физики / С. И. Савельев. М.: Наука, 1978. Т. 2. 345 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Рекомендуемая форма отчёта

*Титульный лист*

**УрФУ**  
**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

**ОТЧЕТ**

о лабораторной работе

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА МОЛЕКУЛЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

Студент(ка) \_\_\_\_\_.

Группа \_\_\_\_\_.

Дата \_\_\_\_\_.

### 1. Цель работы.

Наблюдение изменения петли гистерезиса в процессе перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние, построение зависимости  $B(T)$ , определение температуры Кюри и вычисление магнитного момента молекулы ферромагнетика.

### 2. Расчетные формулы.

$$J_s = n\mu_m,$$

где  $n$  – концентрация молекул ферромагнетика;  
 $\mu_m$  – магнитный момент одной молекулы.

$$J_s(0) = B_s(0)/\mu_0 - H_s(0) \cong B_s(0)/\mu_0,$$

где  $H_s(0) \ll B_s(0)/\mu_0$ .

$$B_s = m\gamma,$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от параметров установки:

$$m = \frac{\gamma R_2 K}{N_2 S l_{\text{дел}}},$$

где  $\gamma$  – градуировочная постоянная интегратора;  
 $R_2$  – сопротивление цепи вторичной обмотки тороида;  
 $K$  – цена деления оси  $Y$ ;  
 $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  
 $S$  – площадь поперечного сечения сердечника;  
 $l_{\text{дел}}$  – длина большого деления оси  $Y$  осциллографа.

### 3. Принципиальная схема установки.

### 4. Средства измерений и их характеристики.

Генератор напряжений специальной формы, генератор регулируемого постоянного напряжения, мультиметр, осциллограф, миниблоки «Реостат», «Интегратор тока», «Точка Кюри».

5. Параметры установки.

Таблица 1

$N_1$	$l$ , см	$N_2$	$S$ , см <sup>2</sup>	$R_2$ , кОм	$\gamma$ , Кл/В	$K$ , В/дел	$n$ , м <sup>-3</sup>	$l_{\text{дел}}$ , мм	$m$ , мТл/мм

6. Результаты измерений.

Таблица 2

$T$ , °С	+ $y$ , мм	- $y$ , мм	$\bar{y}$ , мм	$T$ , К	$B_s$ , мТл
20					
30					
...					

График зависимости  $B_s(T)$ .

7. Выводы.

*Учебное издание*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА  
МОЛЕКУЛЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА**

Составители:  
**Аминев Александр Валерьевич**  
**Кириллов Олег Евгеньевич**

Редактор *И. В. Коришунова*

Компьютерный набор *авторский*

Подписано в печать 22.04.2011. Формат 60x84 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 0,70.  
Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 50 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ  
620002, Екатеринбург, Мира, 19  
[rio@mail.ustu.ru](mailto:rio@mail.ustu.ru)

Ризография НИЧ УрФУ  
620002, Екатеринбург, Мира, 19





