

Лабораторная работа № 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА МОЛЕКУЛЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА

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

ОБОРУДОВАНИЕ: генератор сигналов специальной формы, регулируемый источник постоянного напряжения, мультиметр, осциллограф, миниблоки «Реостат», «Интегратор тока», «Точка Кюри».

Введение

Точка Кюри – это температура T_k , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю. Причина этого - разориентирующее тепловое движение молекул, в результате чего ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

По мере уменьшения температуры ниже T_k 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:

$$J_s = n p_m \quad (1)$$

, где n – концентрация молекул ферромагнетика;

p_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 $\vec{J}$:

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

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

Метод измерений

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

$$J_s(0) = \frac{B_s(0)}{\mu_0} - H_s(0) \cong \frac{B_s(0)}{\mu_0} \quad (3)$$

где $H_s(0) \ll \frac{B_s(0)}{\mu_0}$, а индекс «s» означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика.

Так как 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.

Метод определения величин индукции B и напряженности H магнитного поля с помощью петли гистерезиса описан в работе № 9 ([3], стр.63). Там получены следующие расчетные формулы.

Напряженность поля H в вершине петли гистерезиса

$$H = \frac{\sqrt{2}IN_1}{l}, \quad (4)$$

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 у вершины петли гистерезиса:

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

где m – коэффициент, зависящий от параметров установки,

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

где γ - 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 $B_s = f(T)$, 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 точки (1) продолжают зависимость $B_s = f(T)$, 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 ΔB_s , внутри которого лежит искомая величина:

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

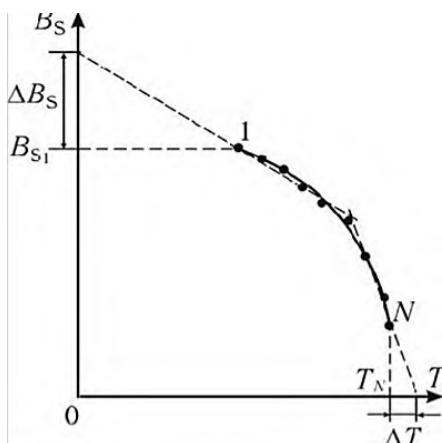


Рис. 1. Зависимость индукции насыщения B_s от температуры магнетика T

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 μ_m магнитного момента одной молекулы ферромагнетика.

По графику зависимости $B_s = f(T)$ определяют также температуру Кюри T_k данного ферромагнетика. 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_k . 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 ΔT оценивают в первом приближении значение температуры Кюри T_k :

Описание установки

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

Рис.2.Электрическая схема:

1 – генератор сигналов специальной формы;

2 – миниблок «Реостат» с сопротивлением R_1 ;

3 – тороид с первичной N_1 и вторичной N_2 обмотками;

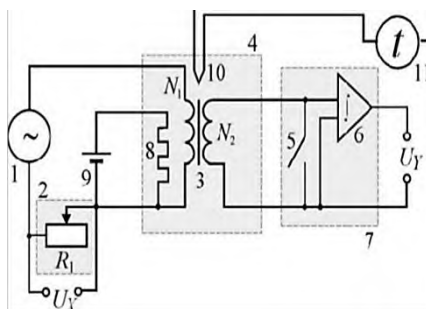
4– миниблок «Точка Кюри»;

5–демпферный ключ;

6 – интегратор; 7 – миниблок «Интегратор тока» (положение тумблера «Сброс»); 8–электронагреватель; 9–регулируемый источник постоянного напряжения «0...+15В»;

10 – термопара; 11 – мультиметр (*режим °С, входы 5 (см. рис. 3 на стр. 97))*; U_x - напряжение на входе X осциллографа, $U_x = U_R \sim I \sim H$; U_y – напряжение на входе Y осциллографа, $U_y = U_{\text{инт}} \sim Q \sim B$.

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 ферромагнетика и по ее параметрам определяют напряженность магнитного поля H .

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

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

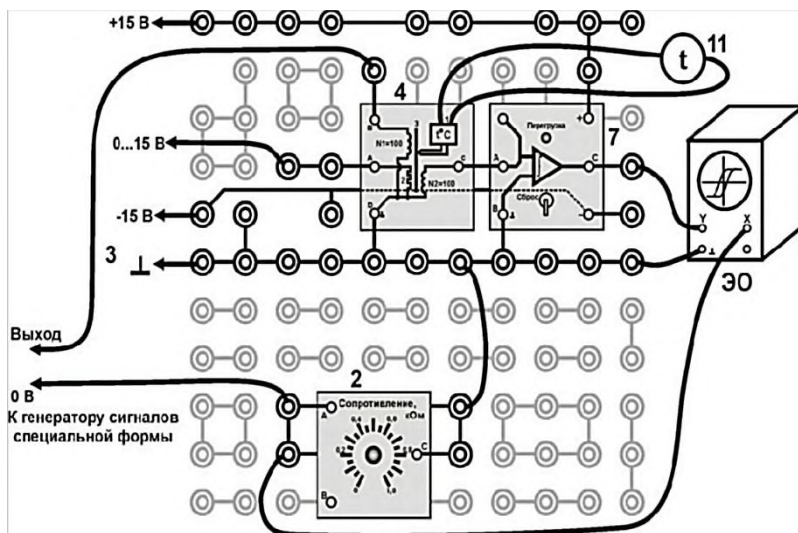


Рис. 3. Монтажная схема: ЭО – электронный осциллограф;
2, 4, 7, 11 – см. рис. 2

Порядок выполнения работы

Выполнение измерений

1. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис.3.
2. Включите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров. Нажмите кнопку «Исходная установка» (поз. 19, см. рис. 1 на стр. 93).
3. Включите осциллограф и выведите электронный луч в центр экрана.

Калибровка установки

4. Увеличивая ток I в первичной обмотке кнопками установки напряжения выхода «0 – 15 В» (поз. 10, см. рис. 1 на стр. 93) генератора сигналов специальной формы, получите на экране осциллографа 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 осциллографа.
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 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;

γ – 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;

n - концентрация молекул. В данной работе ферромагнитный образец выполнен из сплава MnZn, для которого значение концентрации - $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$).

Таблица 1

$N_1 = N_2 = 100$ $l = 50.264 \text{ мм}$ $S = 24 \text{ м}^2$ $R = 2.5 \text{ кОм}$ $\gamma = 23,7 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/В}$ $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$	$K,$ В/дел	$l_{\text{дел}},$ мм	$N,$ $\text{А/(м} \cdot \text{мм)}$	$m,$ мТл/мм

Измерение $B_s(T)$ исследуемого ферромагнетика

7. Перенесите на кальку осциллограмму предельной петли гистерезиса.

8. Измерьте температуру $t^{\circ}\text{C}$ и значения положительной (+y) и отрицательной (-y) ординаты вершин петли, которые соответствуют величине индукции насыщения B_s . Результаты измерений запишите в табл. 2.

Таблица 2

$t, ^{\circ}\text{C}$	+y, мм	-y, мм	$\bar{y}, \text{мм}$	$T, \text{К}$	$B_s,$ мТл
20					
30					
...					

9. Кнопками установки напряжения «0...15 В» (поз. 14, см. рис. на стр. 93) регулируемого источника постоянного напряжения выставить по световому индикатору (поз. 15, см. рис. на стр. 93) максимальное напряжение на электронагревателе.

10. По мере нагревания образца через каждые 10°C , а начиная с 50°C – через каждые 5°C проводите измерения ординаты у петли гистерезиса и температуры $t^{\circ}\text{C}$ согласно п. 8. Измерения продолжайте до тех пор, пока петля гистерезиса не превратится в прямую линию. Результаты измерений запишите в табл. 2.

11. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 вычислите с помощью формулы (6) коэффициент m , зависящий от параметров установки:

$$m = \frac{\gamma R_2}{N_2 S l_{\text{дел}}} K = \dots \quad \text{мТл/мм}$$

Результаты расчетов запишите в табл. 1.

2. По данным табл. 2 рассчитайте по формуле (5) значения индукции насыщения B_s для каждой температуры:

$$B_s = m \mu = \dots \quad \text{мТл}$$

Результаты расчетов запишите в табл. 2.

3. Используя результаты расчетов табл. 2, постройте график зависимости $B_s = f(T)$, начиная ось температур с 0 К.

4. По графику $B_s = f(T)$ определите температуру Кюри T_k и значение $B_s(0)$, (см. рис. 1 и описание метода измерений).

5. С помощью формулы (3) найдите намагниченность насыщения J_s

$$J_s(0) = \frac{B_s(0)}{\mu_0} = \dots \quad \text{А/м},$$

а из выражения (1) – магнитный момент молекулы ферромагнетика μ_m :

$$\mu_m = J_s / m = \dots \quad \text{А} \cdot \text{м}^2$$

6. В выводе по работе сделайте анализ полученных данных:

а) по форме петли магнитного гистерезиса при комнатной температуре (на осциллограмме) сделайте заключение о материале сердечника: магнитомягкий или магнито жесткий;

б) поясните, как изменение намагниченности сердечника по мере роста его температуры отражается на форме петли гистерезиса;

в) сравните магнитный момент молекулы исследуемого магнетика μ_m с величиной спинового магнитного момента электрона, равной магнетону Бора $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А/м}^2$.

Контрольные вопросы

1. Покажите вид основной кривой намагничивания $B = f(H)$ и графика зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu_r = f(H)$ 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 $B = f(H)$, при нагревании ферромагнетика? Какой вид принимает зависимость $B = f(H)$, 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 μ_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 ?

9. Укажите способ включения и назначение следующих элементов:

а) сопротивления R_1 в цепи первичной обмотки;

б) интегратора в цепи вторичной обмотки.

10. Назовите величины, пропорционально которым изменяются значения напряжений U_x и U_y (на входах X и Y осциллографа).

11. По каким формулам в работе определяют следующие величины:

а) индукцию насыщения B_s ;

б) намагниченность J_s образца при насыщении;

в) магнитный момент μ_m молекулы ферромагнетика?

12. С какой целью в работе строят график зависимости $B_s = f(T)$?

13. Каким образом по графику $B_s = f(T)$ определяют температуру точки Кюри ферромагнетика?