

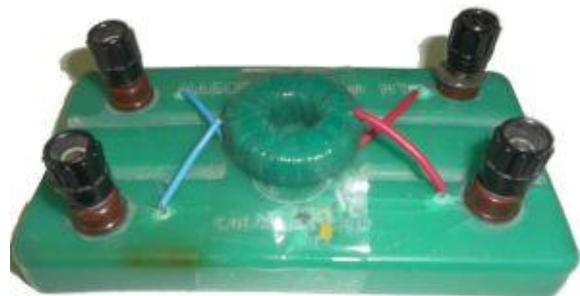
Лабораторная работа №8 Получение кривой намагничивания и определение магнитной проницаемости вещества¹

Цель работы: экспериментально изучить зависимость индукции магнитного поля в ферромагнетике от напряжённости магнитного поля и зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля.

Приборы и принадлежности:



генератор сигналов
низкочастотный ГЗ-109



тороидальный трансформатор



мультиметр М3900 – 2 шт.,
как вольтметры



магазин сопротивлений Р33



соединительные провода

¹ Работа подготовлена в рамках выполнения ВКР студенткой группы 5 «Д» факультета МФИИ Машковой Маргаритой Александровной. Научный руководитель Романов Р.В. – 2013 г.

Теоретическое введение

1. Характеристики магнитных свойств среды

Вещество, помещённое во внешнее магнитное поле, намагничивается. Степень намагничивания вещества принято характеризовать вектором намагничивания (намагниченностью) \vec{J} .

Вектором намагничивания (намагниченностью) называется физическая величина, численно равная суммарному магнитному моменту единицы объёма вещества

$$\vec{J} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_{m_i}}{\Delta V}, \quad \vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (8.1.1)$$

где \vec{p}_m – магнитный момент кругового тока I , охватывающего площадку S , \vec{n} – нормаль к площадке.

Вектор намагничивания пропорционален напряжённости магнитного поля \vec{H} , вызывающего намагничивание

$$\vec{J} = \chi \vec{H},$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества, численно равная величине вектора намагничивания магнетика при напряжённости магнитного поля равной единице.

Магнитное поле, создаваемое в магнетике, складывается с внешним магнитным полем, и суммарное поле характеризуется индукцией магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (8.1.3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\mu = 1 + \chi$ – магнитная проницаемость среды.

Каждый магнетик характеризуется магнитной проницаемостью, показывающей, во сколько раз индукция поля B в среде больше индукции B_0 магнитного поля в вакууме

$$\mu = \frac{B}{B_0} = 1 + \chi.$$

2. Виды магнетиков

По своим магнитным свойствам вещества делятся на слабомагнитные и сильномагнитные. К первым принадлежат диамагнетики и парамагнетики, а ко вторым – ферромагнетики.

В диамагнетиках намагниченность противоположна внешнему полю ($\chi < 0$ – отрицательна), в парамагнетиках – сонаправлена ($\chi > 0$ – положительна).

Для диамагнетиков $\mu < 1$, а для парамагнетиков $\mu > 1$.

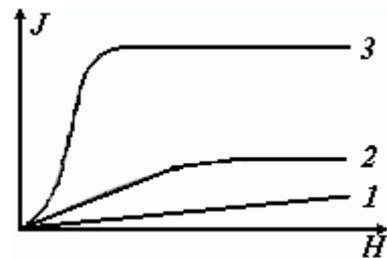


Рис. 8.2.1.

3 – ферромагнетики;
2 – парамагнетики;
1 – диамагнетики

Диаманетики и парамагнетики слабо изменяют внешнее магнитное поле, и магнитная проницаемость для них мало отличается от единицы.

Магнитная проницаемость некоторых веществ¹

диаманетики		парамагнетики		ферромагнетики	
висмут	0,999834	алюминий	1,000022	железо 99,8 %	5000
вода	0,999991	вольфрам	1,000068	никель 99 %	600
водород	0,999999937	воздух	1,00000038	феррит	> 640
медь	0,999990	кислород	1,0000019	пермаллой	100 000
стекло	0,999987	платина	1,000265	метглас	1 000 000

Человек в магнитном поле ведёт себя как диаманетик.

3. Качественное объяснение диа- и парамагнетизма

К диаманетикам относятся вещества, магнитные моменты атомов, молекул или ионов которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. Диаманетиками являются инертные газы, молекулярный водород, азот, цинк, медь, золото, висмут, парафин и некоторые другие органические и неорганические соединения.

В случае отсутствия магнитного поля диаманетик немагнитен, поскольку в данном случае магнитные моменты электронов взаимно компенсируются, и суммарный магнитный момент атома равен нулю.

Так как диаманитный эффект обусловлен действием внешнего магнитного поля на электроны атомов вещества, то диаманетизм свойственен всем веществам.

У парамагнитных веществ при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты электронов не компенсируют друг друга, и атомы (молекулы) парамагнетиков всегда обладают магнитным моментом. Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно, поэтому парамагнитные вещества магнитными свойствами не обладают. При внесении парамагнетиков во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов).

Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. В данных веществах парамагнитный эффект перекрывает диаманитный.

При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается.

¹ В 1778 году С. Дж. Бергман стал первым человеком, заметившим, что висмут и сурьма отталкиваются магнитным полем. Однако термин «диаманетизм» был введён позже (в сентябре 1845 года) Майклом Фарадеем, когда он понял, что все материалы в природе обладают диаманитным характером ответа на приложенное к ним магнитное поле. Тогда же был введён термин «парамагнетизм».

4. Ферромагнетики

К парамагнетикам относятся материалы, обладающие рядом свойств, которые заставляют выделить их в особую группу, получившую название ферромагнетиков.

К особым свойствам ферромагнетиков относятся:

1. большая магнитная проницаемость $\mu \gg 1$, сложным образом зависящая от напряжённости магнитного поля $\mu = \mu(H)$;
2. магнитная восприимчивость $\chi \gg 1$ и, кроме того, зависит от напряжённости магнитного поля;
3. нелинейность зависимостей вектора намагничивания J и индукции магнитного поля B от напряжённости магнитного поля H ;
4. наличие остаточной намагниченности после снятия внешнего магнитного поля и связанное с ней наличие гистерезиса¹ в зависимостях $J = J(H)$ и $B = B(H)$;
5. существование температуры, называемой точкой Кюри, при нагревании выше которой ферромагнетик теряет свои свойства и становится парамагнетиком.
6. явление магнитострикции, заключающееся в деформации ферромагнетика при намагничивании.

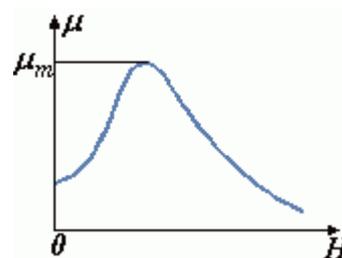


Рис. 8.4.1

Типичная зависимость $\mu(H)$ приведена на рис. 8.4.1. В справочных таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции магнитного поля от напряжённости внешнего магнитного поля.

Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый гистерезис, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется петлей гистерезиса ферромагнетика.

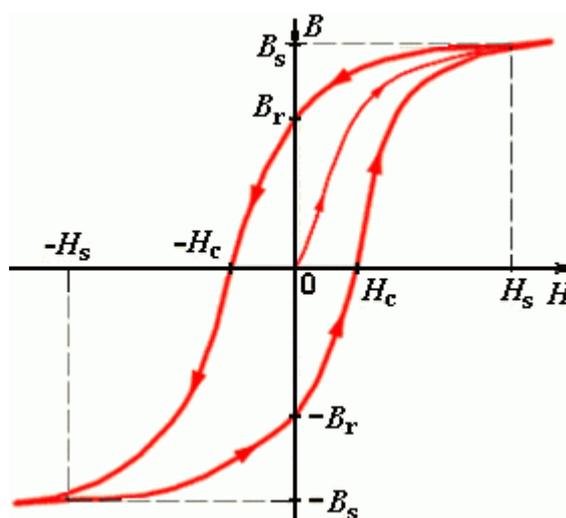


Рис. 8.4.2. Гистерезис

¹ Гистерезис (греч. ὑστέρησις – отстающий) – свойство систем (физических, биологических и т. д.), мгновенный отклик которых на приложенные к ним воздействия зависит в том числе и от их текущего состояния, а поведение системы на интервале времени во многом определяется её предысторией.

Из рисунка видно, что при $|H| > H_s$ наступает магнитное насыщение – намагниченность образца достигает максимального значения.

Если затем уменьшать напряжённость внешнего поля и довести её вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность – поле внутри образца будет равно B_r . Остаточная намагниченность позволяет создавать постоянные магниты.

Если изменить направление напряжённости внешнего поля и довести H до значения H_c , которое принято называть коэрцитивной силой¹, индукция магнитного поля станет равна нулю, но при выключении внешнего магнитного поля ($H = 0$) намагниченность останется. Для того чтобы полностью размагнитить образец, необходимо многократно совершить обход вдоль петли гистерезиса, как это указано стрелками на рисунке и постепенно уменьшать амплитуду напряжённости намагничивающего поля до нуля.

В связи с неоднозначностью зависимости $B(H)$ понятия магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости ферромагнетиков применяются лишь к основной кривой намагничивания, соответствующей намагничиванию ферромагнетика, не подвергавшегося ранее намагничиванию.

5. Краткое качественное объяснение ферромагнетизма

Природа

ферромагнетизма может быть до конца понято только на основе квантовых представлений.

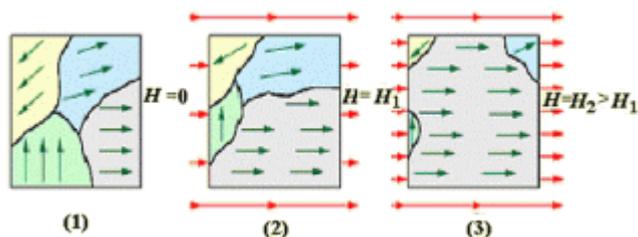


Рис. 8.5.1. Доменная структура

Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-2} \div 10^{-4}$ см. Эти области называются доменами. Каждый домен представляет собой небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой материал в среднем окажется ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля происходит смещение границ доменов так, что объём доменов, ориентированных по

¹ от лат. coercitio – удерживание, residui – остаток, saturation – насыщение.

внешнему полю, увеличивается. С увеличением напряжённости внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рисунок может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

6. Температурные зависимости

Зависимость магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости от температуры для различных классов магнетиков отличается. Для диамагнетиков χ от температуры не зависит. Для парамагнетиков имеет место зависимость, определяемая законом Кюри:

$\chi = \frac{C}{T}$, где C – постоянная Кюри, зависящая от свойств материала.

Для ферромагнетиков в достаточно большом интервале температур χ почти не зависит от температуры, однако при температурах выше точки Кюри T_C тепловое движение разупорядочивает параллельную ориентацию спиновых магнитных моментов. Домены перестают существовать, и ферромагнетик становится обычным парамагнетиком, магнитная восприимчивость которого в парамагнитной области подчиняется закону Кюри–Вейсса

$$\chi = \frac{C}{T - T_C},$$

C – постоянная, зависящая от рода вещества.

Температура Кюри для некоторых веществ

	°C	K
железо, Fe	+769	1042
никель, Ni	+358	631
кобальт, Co	+1121	1394
гадолиний, Ga	+19	292

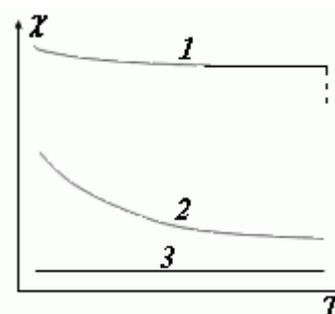


Рис. 8.6.1.

1 – ферромагнетики;
2 – парамагнетики;
3 – диамагнетики

7. Описание установки

Для изучения зависимостей $B = B(H)$ и $\mu = \mu(H)$ ферромагнетиков используется электрическая схема, показанная на рисунке, где Tp – тороидальный трансформатор; V_1 , V_2 – вольтметры; r – магазин сопротивлений. Первичная намагничивающая обмотка L_1 питается переменным током от генератора сигналов низкочастотного ГЗ-109.

Ток в намагничивающей катушке из N_1 витков, намотанной на замкнутый сердечник исследуемого ферромагнетика, создаёт в сердечнике магнитное поле, напряжённость которого

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l},$$

где l – длина сердечника по средней линии. Так как вольтметр V_1 измеряет действующее значение напряжения U_1 на сопротивлении r , то

$$I_m = \frac{U_m}{r} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{r},$$

и максимальное значение напряжённости магнитного поля в сердечнике

$$H_m = \frac{N_1 I_m}{l} = \frac{N_1 U_1 \sqrt{2}}{rl}. \quad (8.7.3)$$

ЭДС индукции в измерительной катушке из N_2 витков по закону Фарадея–Максвелла равна скорости изменения магнитного потока в ней

$$\varepsilon(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB(t)}{dt},$$

где $B(t) = B_m \cos \omega t$ – индукция магнитного поля в сердечнике из исследуемого ферромагнетика, S – площадь поперечного сечения сердечника. Учитывая зависимость $B(t)$, получаем $\varepsilon(t) = N_2 S B_m \omega \sin \omega t$. Максимальное значение ЭДС индукции

$$\varepsilon_m = N_2 S B_m \omega = N_2 S B_m 2\pi\nu.$$

Из последнего выражения получаем, учитывая, что вольтметр V_2 измеряет действующее значение ЭДС индукции $\left(U_2 = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}} \right)$

$$B_m = \frac{U_2 \sqrt{2}}{N_2 S 2\pi\nu}. \quad (8.7.6)$$

Магнитная проницаемость для каждого значения тока в намагничивающей катушке

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}. \quad (8.7.7)$$

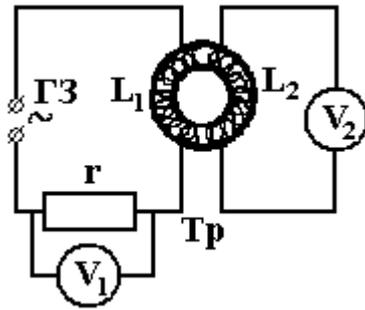


Рис. 8.7.1



Рис. 8.7.2. Общий вид установки

Лабораторная работа №8
Получение кривой намагничивания
и определение магнитной проницаемости вещества

Выполнил студент _____
Факультет _____ курс _____ группа _____
Проверил _____
Показания сняты _____
Зачтено _____

Порядок выполнения работы

Параметры установки:

$l = 7,54 \cdot 10^{-2}$ м – длина сердечника по средней линии;

$S = 6,4 \cdot 10^{-5}$ м² – площадь поперечного сечения сердечника;

$N_1 = 105$, $N_2 = 120$ – число витков в первичной и вторичной обмотках тороидального трансформатора соответственно.

1. Соберите цепь по схеме (рис. 8.7.1).
2. На магазине сопротивлений установите сопротивление $r=30$ Ом.
3. Установите на генераторе частоту 100 Гц¹. Ручка «Усиление»  должна быть повернута против часовой стрелки до упора в минимальное положение.
4. Мультиметр V_1 установите на предел «переменный ток – 20 В», мультиметр V_2 установите на предел «переменный ток – 2 В». Включите генератор, включите мультиметры².
5. Очень плавно изменяя напряжение, подаваемое генератором ручкой «Усиление», примерно через 0,1 В измерьте соответствующие напряжения U_1 , U_2 и занесите их значения в таблицу. Необходимо получить не менее 15 экспериментальных точек, особенно на начальном этапе измерений.

№	U_1 , В	U_2 , В	H , А/м	B , Тл	μ
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

¹ Показания приборов на 50 Гц достаточно нестабильны.

² Диапазон рабочих частот мультиметров 40÷1000 Гц

12					
13					
14					
15					

6. Для каждого измерения рассчитайте H , B , μ по формулам (8.7.3), (8.7.6), (8.7.7). Результаты занесите в таблицу.

7. Постройте по экспериментальным данным графики зависимости $B(H)$, $\mu(H)$.

8. Сделайте выводы. В работе используется сердечник с начальной магнитной проницаемостью $\mu = 1000 \pm 200$, и $\mu_{max} = 1800$.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитные свойства вещества?
2. На какие группы можно разбить вещества по их магнитным свойствам?
3. Чем характерно строение ферромагнетиков?
4. Каковы в теории графики зависимостей $B = B(H)$ и $\mu = \mu(H)$ ферромагнетиков?
5. Что такое явление гистерезиса и чем оно обусловлено?
6. Что называется остаточной индукцией и коэрцитивной силой?
7. Что такое точка Кюри и что она характеризует?

Литература

(см. основной список литературы)

Приложение

Магнитные восприимчивость и проницаемость некоторых веществ

данные из разных источников, не всегда совпадают,
в разных системах единиц. Жирный шрифт – сверенные.

Вещество	восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-6}$	проницаемость, μ
диамагнетики		
азот, N ₂	-12,0	
водород, H ₂	-4,0	0,999999937
германий, Ge	-7,7	
кремний, Si	-3,1	
вода (жидкая), H₂O	-9,1	0,999991
поваренная соль, NaCl	-14,0	0,999986
ацетон, C ₃ H ₆ O	-33,8	
висмут, Bi	-166,0	0,999834
сурьма, Sb		
медь, Cu	-10,0	0,999990
серебро, Ag	-26,0	0,999974
золото, Au	-29,59	
стекло		0,999987
графит, C	-16,0	0,999984
сверхпроводники		0
парамагнетики		
алюминий, Al	22,0	1,000022
натрий, Na	7,2	1,0000072
калий, K	16,1	
марганец, Mn		
вольфрам, W	68,0	1,000068
воздух		1,00000038
кислород, O₂	1,9	1,0000019
кислород жидкий		1,003400
платина, Pt	265,0	1,000265
ферромагнетики		
железо 99,8% очистки		5000
никель 99% очистки		600
кобальт 99% очистки		250
Гадолиний		Больше никеля
пермаллой (сплав Fe-Ni)		до 100.000
Феррит (марганец-цинк)		> 640
Метглас (англ. <i>Metglas</i>)		1 000 000

URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/magprop.html#c1>,

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/magprop.html#c2>,

http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%93%D0%98%D0%92%D0%9F_%D0%9F%D0%9E%D0%98%D0%95%D0%9C%D0%9E%D0%92%D0%9C, http://www.chem.msu.su/Zn/Co/Co_c.html.