

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

кафедра физики твердого тела

«ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам

для студентов направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная
техника» профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники»
очной формы обучения



Воронеж 2022

УДК 621.38

Составители:

О.В. Стогней

И.В. Бабкина

Основы магнетизма: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: О.В. Стогней, И.В. Бабкина. - Воронеж, 2022. - 45 с.

В методических указаниях приводятся краткие теоретические сведения об основных понятиях и характеристиках, используемых в физике магнетизма твердых тел. Дается описание методик проведения измерений, последовательность практических действий и формулируются контрольные вопросы.

Издание предназначено для студентов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Осн_Магн_Лабы.pdf».

Табл. 4. Ил. 11. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.38

Рецензент - Е.К.Белоногов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
профессор кафедры физики ВГТУ

*Рекомендовано методическим семинаром кафедры ФТТ и
методической комиссией ФРТЭ Воронежского
государственного технического университета в качестве
методических материалов*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Исследование основных магнитных характеристик ферромагнитного материала

Цель: *Ознакомиться с устройством, принципом работы и методом калибровки вибрационного магнетометра.
Определить численные значения основных характеристик ферромагнитного образца: намагниченность насыщения, коэрцитивную силу, остаточную намагниченность.*

Объекты исследования:

1. ферромагнитный образец;
2. никелевый металлургический образец.

1. Теоретические сведения

Практически все материалы обладают магнитными свойствами, которые характеризуются с помощью специальных параметров. Если мы будем рассматривать ферромагнитные материалы, то к числу основных статических магнитных параметров, значения которых *не являются* структурно чувствительными, относятся постоянная обменного взаимодействия (A) [Дж/м], намагниченность насыщения (I_s) [А/м], температура Кюри (T_C) [К]. Основными структурно-чувствительными магнитными параметрами являются магнитная восприимчивость (χ) и магнитная проницаемость (μ) (в данном случае не рассматривается тот факт, что существует несколько видов магнитной проницаемости и восприимчивости, например, начальная, максимальная, дифференциальная и т.д.). Коэрцитивная сила (H_c) [А/м], константа магнитострикции (λ_s), константа магнитной анизотропии (K) [Дж/м³] (здесь не рассматривается, что может быть несколько видов анизотропии), которой соответствует поле анизотропии (H_a) [А/м], плотность энергии доменных границ (γ_w) [Дж/м²].

Кривые намагничивания и перемагничивания (петли магнитного гистерезиса), регистрируемые в статическом и динамическом режимах, являются важнейшими и наиболее ин-

формативными характеристиками магнитных материалов. По ним определяется значительное количество основных магнитных параметров. Кривые намагничивания и перемагничивания материала могут регистрироваться в виде зависимости магнитного потока (ψ) [Вб], намагниченности (I) [А/м], магнитной индукции (B) [Тл] или магнитного момента (p_m) [А·м²] исследуемого образца от напряженности внешнего магнитного поля H [А/м]. Величины, измеряемые непосредственно, не являются параметрами материала, поскольку они зависят от формы, от массы и ряда других характеристик **образца**. Поэтому при их определении обязательно необходимо учитывать особенности измеряемого объекта (то есть измеряемого образца).

Важно помнить о физическом смысле величин используемых в магнитных измерениях. Наиболее часто применяются следующие характеристики:

1. Магнитный момент (magnetic moment) – физическая величина, характеризующая магнитные свойства системы заряженных частиц и определяющая взаимодействие системы с внешними электромагнитными полями и с другими подобными системами. Единицы измерения - [А·м²]. При исследовании магнитных материалов под магнитным моментом образца подразумевается *суммарный магнитный момент, образованный его элементарными моментами (например, атомными магнитными моментами)*. Таким образом, магнитный момент не может быть характеристикой материала, поскольку зависит от размеров образца, его массы. Обозначение: p_m , или μ , или J , или m - к сожалению единообразия не существует.

2. Намагниченность (magnetization) – магнитный момент единицы объема. Данная величина является удельной, поэтому она может служить для описания и характеристики свойств вещества. Обозначение: чаще всего используют I ($I = p_m/V$), значительно реже может использоваться M , еще реже J . Единицы измерения намагниченности - [А/м] (1 А/м

это намагниченность при которой 1 м^3 вещества обладает магнитным моментом $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$).

3. Удельная намагниченность (specific magnetization) – магнитный момент единицы массы. Обозначение: чаще всего используют символы σ или m . Единицы измерения – $[\text{А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}]$.

В данной работе применяются следующие обозначения:
 ρ_m , I , σ .

Ферромагнитные материалы состоят из участков, которые даже при отсутствии внешнего поля намагничены до насыщения (области самопроизвольного намагничивания). Такие участки называются магнитными доменами. Обычно взаимная ориентация векторов намагниченности доменов ориентирована таким образом, что суммарный магнитный момент образца равен нулю. Процесс технического намагничивания ферромагнетика заключается в ориентировании векторов намагниченности доменов в направлении приложенного внешнего магнитного поля.

В общем случае намагниченность ферромагнетика не является однозначной функцией напряженности магнитного поля, а зависит от магнитной «предыстории» образца. За «начальное» состояние ферромагнетика принимают состояние так называемого полного размагничивания, которое характеризуется равенством нулю намагниченности материала при условии отсутствия внешнего магнитного поля. Если образец из ферромагнитного материала не подвергался действию магнитного поля, то он находится в полностью размагниченном состоянии. При помещении такого образца в магнитное поле, медленно изменяющееся от нуля до некоторой величины, можно определить его кривую намагничивания $I=f(H)$, которая называется кривой первого (первоначального) намагничивания. Обычный вид кривой первоначального намагничивания показан на рис. 1.

В общем случае кривую первоначального намагничивания можно разделить на пять участков (рис. 1 а). Представим

себе, что намагничивается небольшой кристаллик ферромагнетика, состоящий первоначально из четырех доменов (рис. 1 в). При наложении на образец небольшого магнитного поля H начальное распределение доменов становится энергетически невыгодным, и происходит рост одних доменов за счет других, вызванный соответствующим смещением доменных границ. Если поле убрать, выключить, восстановится прежняя картина. Поэтому участок «I₁» кривой намагничивания называется участком обратимого смещения (доменных границ).

В этой области магнитная восприимчивость χ_a и проницаемость μ_a - величины постоянные и не зависят от напряженности поля:

$$I = \chi_a H \quad (1)$$

$$B = \mu_a H \quad (2)$$

Второй участок кривой намагничивания («I₂» – область Рэлея) характеризуется квадратичной зависимостью намагниченности и индукции от напряженности магнитного поля:

$$I = \chi_a H + \frac{1}{8\pi} \alpha H^2; \quad (3)$$

$$B = \mu_0 H + \frac{1}{2} \alpha H^2. \quad (4)$$

Область Рэлея также находится в области слабых полей, значительно меньших коэрцитивной силы. В этой области восприимчивость и проницаемость линейно возрастают с увеличением напряженности поля:

$$\chi = \frac{I}{H} = \chi_a + \frac{1}{8\pi} \alpha H, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_a + \frac{1}{2} \alpha H. \quad (6)$$

Процесс намагничивания в области Рэлея происходит главным образом за счет опрокидывания (инверсии) областей са-

мопроизвольного намагничивания в направлении легкого намагничивания, ближайšie к направлению приложенного поля, и в меньшей степени за счет упругого смещения границ. У большинства ферромагнитных материалов намагниченность подчиняется в этой области закону Рэлея. Однако существуют материалы, у которых такой области на кривой намагничивания нет.

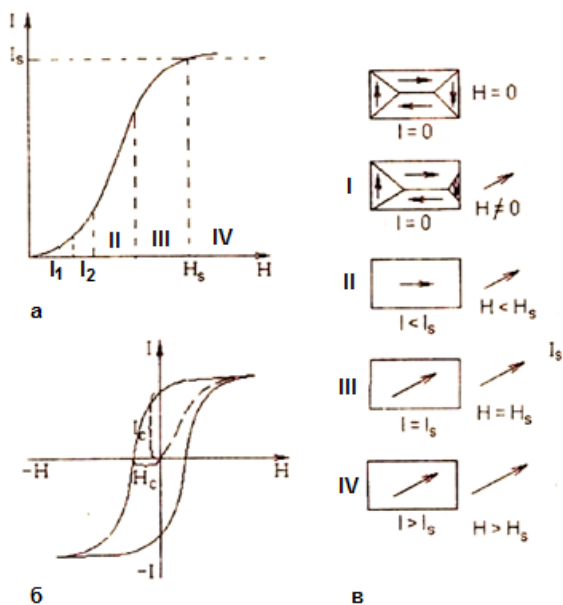


Рис. 1. Намагничивание ферромагнетика: а - основная кривая намагничивания; б – полная петля гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного материала; в - схема поведения доменов при намагничивании.

Если поле будет продолжать расти, верхний (на рис. 1 в) домен постепенно вытеснит все остальные и образец станет «однодоменным». Этот процесс называется необратимым смещением (участок «II» на рис. 1 а). Необратимость заключается в том, что если теперь выключать поле, прежняя картина

распределения доменов сама не восстановится: отсутствуют даже «зародыши» исчезнувших доменов. Тем не менее (конец участка II) результирующий вектор магнитного момента нашего единственного домена всё ещё «привязан» силами магнитной анизотропии к направлению оси кристалла. Дальнейшее увеличение поля оторвет этот вектор от направления оси кристалла и повернет его ближе к направлению напряженности поля. Участок «III» носит название «вращение» (результирующих векторов магнитных моментов доменов) и заканчивается (при совпадении направлений поля и моментов) так называемым «техническим насыщением» намагниченности (I_s), которое достигается в поле насыщения H_s .

Если продолжать увеличивать поле выше H_s , намагниченность будет продолжать медленно расти. Для большинства материалов этот рост так мал, что его очень трудно измерить. Это явление соответствует участку «IV» на рис. 1 а, в и носит название «парапроцесса», или «истинного намагничивания». Дело в том, что силы теплового движения не могут нарушить параллельность магнитных моментов домена, но способны все-таки внести некоторое разупорядочение атомных магнитных моментов (тем большее, чем выше температура). Увеличение внешнего поля дает обратный эффект - увеличивает их упорядочение, что и составляет сущность парапроцесса.

2. Экспериментальная часть

Вибрационный магнетометр это измерительная установка, позволяющая проводить магнитные измерения твердых тел с помощью магнитоэлектрического метода.

Магнитоэлектрический метод измерений основан на использовании *закона электромагнитной индукции*, суть которого заключается в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении плотности магнитного потока, проходящего через этот контур.

Применительно к вибрационному магнетометру этот закон выражает связь между ЭДС (e_u), возникающей на концах электропроводящего контура с площадью (S), и величиной магнитного момента образца p_m , при условии, что данный контур пересекается некоторой частью (η) магнитного потока (Ψ), создаваемого образцом, объем которого - V :

$$e_u = -d\Psi / dt = -\eta \frac{d}{dt} \int \bar{B} \cdot d\bar{S} = -\frac{\eta\mu_0}{V} \frac{d}{dt} \int_S \bar{p}_m \cdot d\bar{S}, \quad (7)$$

p_m – магнитный момент образца,

B – индукция, создаваемая образцом,

μ_0 – магнитная постоянная.

В случае вибрационного магнетометра электропроводящим контуром являются измерительные катушки. Обычно применяют четыре измерительные катушки, соединенные последовательно. Такая конфигурация из четырех катушек снижает паразитные шумы и повышает чувствительность метода. Магнитным потоком Ψ является магнитное поле, которое создает вокруг себя образец, обладающий магнитным моментом.

Величина e_u , возникающая в измерительной катушке, зависит от величины магнитного момента образца. Если намагниченный образец колеблется (вибрирует) с частотой f вдоль оси u относительно катушки с числом витков w по закону

$$y = Y \cos \omega t, \quad (8)$$

то магнитный поток через контур (катушку) также будет изменяться по синусоидальному закону:

$$\Psi_w = \mu_0 \eta w S V^{-1} p_m Y \omega \sin \omega t, \quad (9)$$

где Y – амплитуда колебаний.

Отсюда следует, что возникающая в контуре ЭДС также будет меняться синусоидальному закону:

$$e_{II} = \mu_0 \eta w S V^{-1} p_m Y \omega \sin \omega t , \quad (10)$$

а постоянная составляющая возникающего сигнала будет равна

$$e_{II} = \mu_0 \eta w S V^{-1} p_m Y f . \quad (11)$$

Аппаратно вибрационный магнетометр устроен следующим образом (см. рис. 2). Образец 1, расположенный между измерительными катушками 2, обладавая собственным магнитным моментом p_m , создает вокруг себя магнитное поле (собственное поле образца), которое пересекает витки измерительных катушек 2.

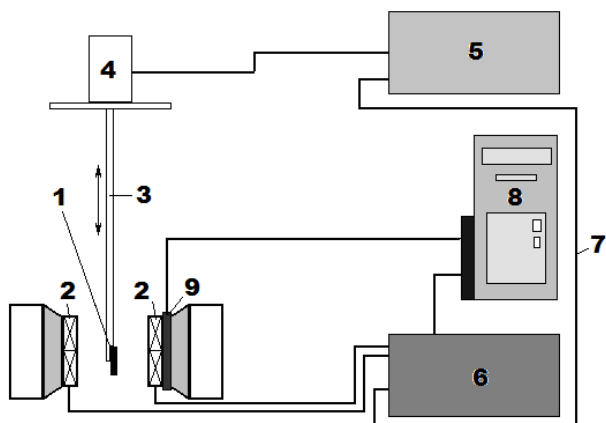


Рис. 2. Схема вибрационного магнетометра
 1 – образец, 2 – измерительные катушки, 3 – шток, 4 – источник механических колебаний, 5 – генератор синусоидальных сигналов Г6-26, 6 - селективный усилитель УПИ-2, 7 – канал подачи опорного сигнала на усилитель, 8 – регистрирующий компьютер с платой аналого-цифрового преобразования, 9 – датчик Холла

Если образец совершает колебания (вибрирует в вертикальном направлении), то вместе с ним в вертикальном направлении перемещается и магнитный поток (его собственное магнитное поле), связанный с образцом. Таким образом, получается, что

поле, в котором находятся витки измерительных катушек 2, постоянно меняется. Еще раз следует подчеркнуть, что поле, пронизывающее катушки 2, меняется потому что сам образец перемещается относительно катушек. Изменяющееся магнитное поле индуцирует в витках измерительных катушек ЭДС $e_{и}$, пропорциональную магнитному моменту образца в соответствии с выражением (11). Если образец неподвижен, то тогда изменение потока в измерительных катушках отсутствует и ЭДС, соответственно, не возникает.

Образец закреплен на длинном штоке (3), передающем ему колебания от специального устройства (4), в котором механические колебания возбуждаются благодаря электрическому синусоидальному сигналу, поступающему с генератора (5). Полезный сигнал, возникающий в измерительных катушках, представляет собой синусоиду с частотой, равной частоте колебания образца. Сигнал, возникающий в измерительных катушках, как правило, очень слабый, поэтому он подается на селективный усилитель УПИ-2 (6). С помощью этого усилителя сигнал, идущий от измерительных катушек, преобразуется в постоянный и усиливается до значений, которые могут быть зарегистрированы с помощью обычных приборов (в данном случае это плата аналого-цифрового преобразования компьютера). Особенностью усилителя УПИ-2 является то, что он усиливает лишь те колебания, частота которых совпадает с частотой опорного сигнала. Поскольку в качестве опорного сигнала используется тот же сигнал, что и сигнал, поступающий на устройство возбуждения механических колебаний (4), именно ЭДС, наводимая образцом в измерительных катушках (2), будет усиливаться УПИ-2, в то время как колебания других частот (шумы) усиливаться не будут. Усиленный полезный сигнал поступает на плату АЦП регистрирующего компьютера (8). Этот сигнал, пропорциональный по величине магнитному моменту образца, будет откладываться по оси ординат на измеряемой зависимости.

При исследовании кривых намагничивания (или кривых перемагничивания) необходимо плавно менять магнитное поле, воздействующее на образец. С этой целью вибрационный магнетометр смонтирован в зазоре между кернами электромагнита. Цепь питания электромагнита показана на рис. 3. Она включает в себя переменный трехфазный автотрансформатор (1) с помощью которого можно изменять питающее напряжение катушек электромагнита (5) от нуля до 150 В. Переменный ток с автотрансформатора подается на диодный выпрямитель (2) и RC фильтр (3), после чего ток (уже постоянный и с минимальными биениями) через переключатель полярности магнита (4) подается на катушки (5).

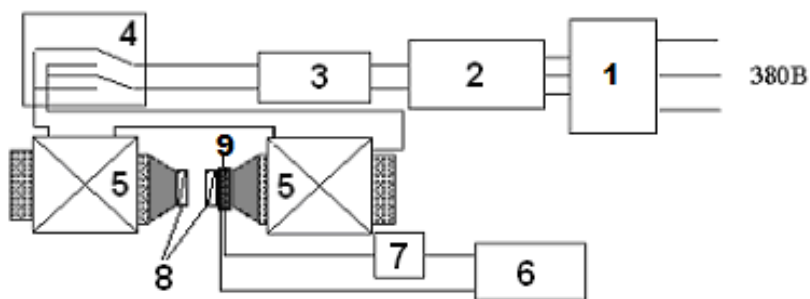


Рис. 3. Система создания внешнего магнитного поля для перемагничивания образца:

1 – трехфазный переменный автотрансформатор, 2 – выпрямитель, 3- RC-фильтр, 4 – переключатель полярности электромагнита, 5 -катушки электромагнита, 6 – источник постоянного тока, 7 – амперметр, 8 – измерительные катушки магнетометра (на рис. 2 они обозначены цифрой 2), 9 - датчик Холла

Таким образом, цепь питания позволяет плавно и равномерно менять магнитное поле в зазоре между кернами электромагнита в пределах 0 – 11 кЭ. Напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита определяется с помощью датчи-

ка Холла 9, запитываемого источником постоянного тока (6), стабильность которого контролируется амперметром (7). Холловское напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля в зазоре электромагнита, подается на регистрирующий компьютер (см. рис. 2, поз. 8).

3. Калибровка магнетометра

Как следует из выражения (11) величина ЭДС зависит от магнитного момента образца p_m . При этом необходимо помнить, что магнитный момент любого ферромагнитного объекта являясь величиной аддитивной и поэтому зависит от количества вещества. Иными словами, величина ЭДС, возникающей в измерительных катушках, определяется не только свойствами исследуемого материала, но и массой этого самого материала. Следовательно, любые измерения, проводимые на вибрационном магнетометре, должны быть калиброваны. Это значит, что проведенные измерения исследуемого образца должны быть сопоставлены с результатами измерения калибровочного образца, для которого известны как магнитные характеристики (намагниченность насыщения), так и масса. В качестве такого стандартного, калибровочного образца используют никелевый образец. Дело в том, что никель достигает технического насыщения в относительно невысоких магнитных полях, и поэтому получить сигнал от полностью намагниченного никеля (удельное значение намагниченности насыщения которого известно) достаточно просто. Значение удельной намагниченности насыщения никеля при 289 К составляет: $\sigma_S(Ni) = 54.39 \text{ [A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}]$.

В соответствии с (11), ЭДС e пропорциональна частоте, амплитуде колебаний, площади контура, объёму и магнитному моменту образца. Очевидно, что в двух последовательно проведенных измерениях частота, амплитуда и площадь измерительных катушек остаются одинаковыми. Кроме того, объём образца пренебрежимо мал по отношению к объёму всего пространства между измерительными катушками. Это дает

возможность записать упрощенный вид зависимости для e в виде:

$$e = C \cdot p_m, \quad (12)$$

где C – константа, включающая в себя:

$$C = 4\mu_0\eta w' SV^{-1}Yf \quad (13)$$

С другой стороны, в состоянии магнитного насыщения, магнитный момент образца p_m зависит от его массы и удельной намагниченности и может быть записан в виде:

$$p_m = \sigma_S \cdot m, \quad (14)$$

где m – это масса образца, σ_S – удельная намагниченность насыщения образца. Таким образом, если провести два последовательных измерения сначала никелевого образца, а затем исследуемого образца, можно получить две зависимости $e=f(H)$, причем для состояния насыщения можно записать, что

$$e_{(Ni)} = C \cdot \sigma_{S(Ni)} \cdot m_{(Ni)}, \quad (15)$$

$$e_{(Обр)} = C \cdot \sigma_{S(Обр)} \cdot m_{(Обр)}. \quad (16)$$

Разделив одно на другое получим:

$$\frac{e_{(Ni)}}{e_{(Обр)}} = \frac{\sigma_{S(Ni)} \cdot m_{(Ni)}}{\sigma_{S(Обр)} \cdot m_{(Обр)}} \quad (17)$$

отсюда

$$\sigma_{S(Обр)} = \frac{e_{(Обр)}}{m_{(Обр)}} \cdot \frac{\sigma_{S(Ni)} \cdot m_{(Ni)}}{e_{(Ni)}} \quad (18)$$

Второй множитель в (18) фактически представляет собой постоянную магнетометра или коэффициент калибровки. Действительно, зная численное значение этого коэффициента и массу образца можно легко пересчитать измеренные значения ЭДС ($e_{(Обр)}$, выраженные, в милли- или микровольтах) к значе-

ниям удельной намагниченности в стандартных единицах ($A \cdot m^2 / kg$).

4. Практическое задание

1. Получив образцы никеля и исследуемого материала взвесить их на лабораторных весах.

2. С помощью преподавателя измерить кривые намагничивания этих двух образцов.

3. Зная массу никеля (результат взвешивания), значение его удельной намагниченности насыщения (справочное значение) и значение ЭДС, наведенной в измерительных катушках в тот момент, когда никель вышел в состояние насыщения (внешнее поле примерно 2-3 кЭ), определить постоянную магнетометра (коэффициент калибровки).

4. Зная массу образца (результат взвешивания) и значение постоянной магнетометра **построить** зависимость **удельной намагниченности** ферромагнитного сплава от напряженности внешнего магнитного поля в реальных единицах намагниченности.

5. Определить значение удельной намагниченности насыщения исследуемого образца во внешнем магнитном поле, напряженностью 8 кЭ.

6. Определить значение коэрцитивной силы никелевого образца и исследуемого образца.

7. Определить значение остаточной удельной намагниченности никеля и исследуемого образца.

5. Контрольные вопросы

1. Дать определение терминов *намагниченность*, *удельная намагниченность*, *коэрцитивная сила*.
2. Что понимается под «начальным» состоянием ферромагнетика?
3. Что такое намагниченность насыщения?
4. Как происходит процесс перемагничивания ферромагнетика? Стадии процесса намагничивания.
5. В чем суть закона электромагнитной индукции?
6. Объяснить принцип работы вибрационного магнетометра.
7. От чего зависит сигнал, возникающий в измерительных катушках магнетометра?
8. Для чего необходима вибрация образца при проведении измерений с помощью вибрационного магнетометра?
9. Почему образец расположен в зазоре электромагнита? Для чего необходимо внешнее магнитное поле?
10. Если внешнее магнитное поле отсутствует, будет ли возникать сигнал в измерительных катушках?
11. Какая величина реально измеряется при проведении исследований с помощью вибрационного магнетометра (имеется в виду, какая величина фиксируется компьютером)?
12. Для чего проводится калибровка магнетометра? Как она осуществляется?
13. Почему для калибровки магнетометра используют никелевый образец?
14. Почему численное значение магнитного момента измеряемого образца не может служить характеристикой материала, из которого сделан образец?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
**Исследование концентрационной зависимости
комплексной магнитной проницаемости
двухфазных образцов ферромагнетик-диэлектрик**

Цель: *Ознакомиться с резонансным методом измерения магнитной проницаемости с помощью измерителя добротности.*

Измерить зависимость величины комплексной магнитной проницаемости двухфазных образцов от концентрации ферромагнитной фазы в двухфазных композитах.

Объекты исследования: *Тонкие пленки двухфазного композитного материала, состоящего из двух фаз (ферромагнитной и немагнитной) с различным объемным соотношением этих фаз.*

1. Магнитная проницаемость

В общем случае магнитная проницаемость (μ) это коэффициент, характеризующий связь между магнитной индукцией (B) материала и напряжённостью магнитного поля (H), действующего на этот материал:

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (1)$$

здесь μ_0 это магнитная постоянная (иногда её называют магнитной проницаемостью вакуума), которая входит в выражения некоторых законов электромагнетизма в виде коэффициента пропорциональности. В упрощенном виде можно представить себе, что B - это магнитное поле внутри материала, а H - это магнитное поле, которое воздействует на материал. Магнитная проницаемость это характеристика материала, показывающая, как вещество реагирует на прикладываемое к нему внешнее магнитное поле: каким образом элементарные (атомные или спиновые магнитные моменты) ориентируются относительно внешнего поля. В

общем случае μ это тензор, но для макроскопически изотропных сред принимают, что проницаемость это скалярный коэффициент, одинаковый относительно любого направления внутри среды.

В Международной системе единиц (СИ) размерность абсолютной магнитной проницаемости такая же, как и размерность магнитной постоянной μ_0 , то есть Гн/м или Н/А². Однако гораздо чаще используют величину, которая называется *относительная магнитная проницаемость* (μ_r), и представляет собой отношение абсолютной проницаемости и магнитной постоянной:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

В этом случае магнитная проницаемость (как любая относительная величина) будет безразмерной. На практике, в большинстве случаев используют относительную магнитную проницаемость, причем, по умолчанию, термин «относительная» не применяется. В таблице приведены значения абсолютной проницаемости и значения относительной проницаемости - удобства использования относительных единиц очевидны.

Таблица 1

Материал	Абсолютная проницаемость μ [Гн/м]	Относительная проницаемость μ/μ_0
Метгласс (аморфный сплав специального состава типа FeBSi)	1.25	1 000 000
Электротехническая сталь	5.0×10^{-3}	4 000
Сталь	8.75×10^{-4}	100
Никель	1.25×10^{-4}	100 — 600
Алюминий	1.2566650×10^{-6}	1.000022
Платина	1.2569701×10^{-6}	1.000265
Медь	1.2566290×10^{-6}	0.999994
Сапфир	1.2566368×10^{-6}	0.99999976

Значения магнитной проницаемости (относительной проницаемости) у разных типов магнетиков отличаются качественно. У диамагнетиков (например, Cu, сапфир) магнитная проницаемость всегда чуть меньше единицы; у парамагнетиков (платина, алюминий) она всегда чуть больше единицы; у ферромагнетиков магнитная проницаемость значительно больше единицы.

С одной стороны, магнитная проницаемость μ является индивидуальной характеристикой материала, меняясь в очень широких пределах в зависимости от элементного состава вещества (см. таблицу). С другой стороны, для любого конкретного материала μ зависит от температуры, давления и иных внешних условий. Помимо этого магнитная проницаемость вещества зависит от напряженности магнитного поля, воздействующего на материал. Для ферромагнетиков эта зависимость носит сложный, нелинейный характер (рис. 1).

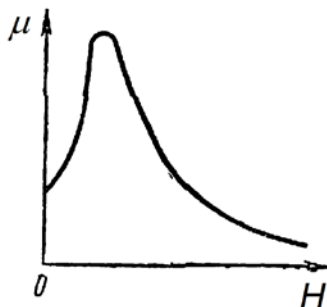


Рис. 1. Схематическое изображение зависимости магнитной проницаемости ферромагнитного материала от напряженности внешнего магнитного поля

Обычно на практике используют «начальную» магнитную проницаемость

$$\mu_a = \lim_{H \rightarrow 0} B / H \quad (3)$$

и «дифференциальную» магнитную проницаемость

$$\mu_d = dB / dH, \quad (4)$$

численные значения которых определяются в соответствии с выражениями (3) и (4).

2. Комплексная магнитная проницаемость

Если на материал воздействует не постоянное, а переменное магнитное поле высокой частоты, то магнитная проницаемость вещества будет являться комплексной величиной:

$$\mu = \mu' + i\mu'' \quad (5)$$

где μ' и μ'' функции частоты переменного магнитного поля. Величина μ' называется действительной частью полной магнитной проницаемости, μ'' - мнимой частью. Мнимая часть магнитной проницаемости определяет поглощение, то есть потери электромагнитной энергии в веществе при его перемагничивании.

Имеется несколько факторов, обуславливающих потери при перемагничивании. В области сравнительно низких частот основным механизмом возникновения потерь является необратимое движение доменных стенок и преодоление пиннинга стенок на структурных дефектах материала. При увеличении частоты магнитного поля в материалах с большой электрической проводимостью существенную роль играют вихревые токи, приводящие к большим потерям энергии (μ'' в таких материалах велико). Собственно поэтому широкое применение в технике нашли высокоомные магнитные материалы – ферриты, в которых потери на вихревые токи минимизированы и ферриты «работают» на значительно более высоких частотах по сравнению с обычными металлическими ферромагнетиками. Тем не менее, и в ферритах большие значения μ' при малых потерях μ'' наблюдаются лишь в определённом интервале частот. Это обусловлено явлением ферромагнитного резонанса.

Ещё одной причиной потерь являются релаксационные процессы, связанные с отставанием намагниченности от

внешнего поля. Система элементарных магнитных моментов вещества не успевает перемагничиваться синфазно изменению напряженности внешнего поля. Вектор магнитной индукции B будет «запаздывать» переориентироваться вслед за переориентацией вектора напряженности магнитного поля H . Чем выше частота перемагничивающего поля, тем сильнее будет «запаздывать» магнитная индукция. Это явление часто называется магнитной вязкостью вещества.

Информация о потерях энергии, происходящих при перемагничивании магнетиков, является важной и актуальной поскольку практически вся электротехника и радиоэлектроника использует переменные сигналы.

3. Методика измерения комплексной магнитной проницаемости

Для определения значений комплексной магнитной проницаемости используется резонансный метод, в котором измерения проводятся с помощью измерителя добротности Е9-5А.

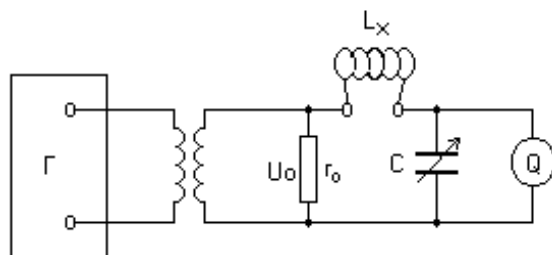


Рис. 2. Принципиальная схема для измерения индуктивности и добротности

Идея метода состоит в следующем. Имеется колебательный контур, состоящий из внешней катушки индуктивности (L), расположенной над верхней панелью прибора Е9-5А, и внутренними элементами прибора, главным из которых является подстраиваемый конденсатор (C).

Изменяемая вручную ёмкость конденсатора C позволяет настроить колебательный контур в резонанс, добившись максимальных значений добротности (Q). В приборе Е9-5А имеется блок для измерения этой величины (на рисунке 2 блок условно обозначен символом Q). Условием резонанса является определенное значение индуктивности катушки и определенное значение ёмкости конденсатора. Для каждой частоты (f) есть свое, определенное соотношение этих величин. Если в катушку L поместить образец, обладающий какими-либо магнитными характеристиками, величина *индуктивности катушки* изменится. При этом происходит нарушение условий резонанса (разбаланс контура), и величина добротности колебательного контура резко падает. Ввести контур в резонанс можно за счет изменения величины ёмкости переменного конденсатора C . Таким образом, процедура измерения заключается в определении двух величин: добротности контура Q и ёмкости колебательного контура C в исходном состоянии (то есть без образца в катушке L) и с образцом в катушке. В первом случае определяются Q_0 и C_0 , во втором случае – Q_1 и C_1 .

Введение образца в катушку меняет её индуктивность, поскольку при наличии образца магнитная проницаемость среды внутри катушки изменяется. Без образца проницаемость этого объема принимается равной 1, а с образцом – она иная. Собственно эту величину и необходимо найти при проведении эксперимента. Значение магнитной проницаемости образца вычисляется косвенно, по результатам измерения добротности и емкости.

Аналитические выражения для вычисления действительной и мнимой частей магнитной проницаемости получены следующим образом. Известно, что добротность колебательного контура Q определяется уравнением

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (6)$$

где ω – частота колебаний, L – индуктивность контура, R – активное сопротивление. Для двух случаев измерений можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} Q_0 = \frac{\omega L_0}{R} \\ Q_1 = \frac{\omega L'}{R + \omega L''} \end{cases}, \quad (7)$$

где L' – действительная часть индуктивности колебательного контура с образцом, L'' – мнимая часть индуктивности колебательного контура с образцом, L_0 – индуктивность катушки без образца. Решая систему уравнений, находим мнимую часть индуктивности колебательного контура с образцом L''

$$L'' = \frac{L'}{Q_1} - \frac{L_0}{Q_0}. \quad (8)$$

Выражение для индуктивности катушки имеет вид

$$L_0 = \mu_0 \mu \frac{S_0 N^2}{l} \left(1 - \frac{8\pi R}{3 l} \right), \quad (9)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, S_0 – сечение катушки без образца, N – количество витков катушки индуктивности, l – длина катушки индуктивности, R – радиус катушки индуктивности. Подставляя формулу (8) в (9), находим мнимую часть комплексной магнитной проницаемости исследуемого образца

$$\mu'' = \left(\frac{L'}{Q_1} - \frac{L_0}{Q_0} \right) \frac{l}{\mu_0 S_1 N^2 \left(1 - \frac{8\pi R}{3 l} \right)}, \quad (10)$$

где S_1 – сечение образца, находящегося в катушке. Величины L' и L_0 определяются из соотношений

$$L' = \frac{K}{f^2 C_1}, \quad (11)$$

$$L_0 = \frac{K}{f^2 C_0}, \quad (12)$$

где K – индивидуальный численный коэффициент для измерителя добротности Е9-5А, равный 2.53×10^{10} , f – частота резонанса. Таким образом, окончательно, мнимая часть комплексной магнитной проницаемости равна

$$\mu'' = \left(\frac{1}{Q_1 C_1} - \frac{1}{Q_0 C_0} \right) \frac{lK}{\mu_0 S_1 N^2 f \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right)^2}. \quad (13)$$

Для нахождения действительной части комплексной магнитной проницаемости μ' решается следующая система уравнений

$$\begin{cases} L_0 = \mu_0 \frac{S_0 N^2}{l} \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right) \\ L' = \mu_0 \frac{(S_0 - S_1)}{l} N^2 \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right) + \mu_0 \mu' \frac{S_1}{l} N^2 \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right) \end{cases}. \quad (14)$$

Отсюда

$$\mu' = \frac{l(L' - L_0)}{\mu_0 S_1 N^2 \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right)} + 1. \quad (15)$$

С учетом (11) и (12) получаем

$$\mu' = \frac{lK}{\mu_0 S_1 N^2 f^2 \left(1 - \frac{8\pi R}{3l} \right)} \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_0} \right) + 1. \quad (16)$$

Следует добавить, что значения, получаемые в соответствии с (13) и (16) это относительные величины магнитной проницаемости.

4. Порядок выполнения работы

1. Изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации измерителя добротности типа Е9-5А.

2. Включить тумблер "сеть" (при этом должна загореться индикаторная лампочка). Прогреть прибор в течение 15 минут.

3. Установить переключатель "диапазоны" в промежуточное положение (на индикаторе диапазона частот должно быть выставлено 45-75 МГц). Установить ручкой "нуль Q" нуль Q - вольтметра.

4. Ручками "диапазоны" и "частота, МГц" установить частоту, на которой должна быть измерена добротность катушки (выбрать значение 50 МГц). Переключатель "шкалы Q" поставить в положение "Q=400". Ручкой "установка K" установить стрелку прибора "коэффициент уровня K" на отметку "Г".

5. Вращая ручку "емкость, pF", настроить колебательный контур в резонанс по максимуму отклонения стрелки Q - вольтметра.

6. Если стрелка Q - вольтметра находится в начальной части шкалы, переключатель "шкалы Q" следует перевести в положение "Q=100", при этом необходимо проверить и в случае необходимости установить нуль Q - вольтметра.

7. При «зашкаливании» стрелки Q - вольтметра, установить множитель необходимый для измерений (1,5; 2 или 3). Измеряемая добротность равна произведению показаний Q - вольтметра и вольтметра "коэффициент уровня K".

8. Настроить контур в резонанс. Определить значения емкости (C_0 - емкость контура без образца) и добротности (Q_0 - добротность контура без образца).

9. Взять серию образцов различного состава и, последовательно помещая каждый из них в катушку индуктивности, измерить значения емкости C_1 и добротности Q_1 в момент резонанса с образцом.

10. Контролировать значения C_0 и Q_0 после каждого измерения с образцом.

11. Данные измерений занести в таблицу, построенную в программе Origin и рассчитать значения μ' и μ'' для каждого образца с помощью этой программы. Таблица помимо введенных заранее данных (длина образца, длина катушки и т.п.), а также данных, вводимых непосредственно при проведении эксперимента (значения C и Q), содержит «защитые» в нее формулы 13 и 14. По этим формулам программа автоматически должна произвести расчет значений μ' и μ'' для всех исследованных образцов и вывести их в столбцы с соответственным обозначением.

Таблица 2

$N_{\text{обр}}$	x , ат. %	f , МГц	Q_0	$L_{\text{обр}}$, мм	N^2	$L_{\text{кат}}$, мм	$h_{\text{обр}}$, мкм	$S_{\text{обр}}$, мм ²	Q_1	C_0 , pF	C_1 , pF	μ'	μ''

12. Построить зависимости действительной и мнимой части магнитной проницаемости от концентрации металлической компоненты в образце: $\mu'(x)$ и $\mu''(x)$.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое магнитная проницаемость?
2. В чём отличие абсолютной и относительной магнитной проницаемости?
3. Какова разница магнитной проницаемости диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков?
4. Какой физический смысл имеет понятие комплексная магнитная проницаемость, что показывает её мнимая и действительная части?
5. Основные причины потерь при перемагничивании ферромагнетиков.
6. Объяснить суть резонансного метода измерения комплексной магнитной проницаемости.
7. Объяснить полученную зависимость. Почему магнитная проницаемость так немонотонно зависит от концентрации ферромагнитной фазы в образцах.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
**Исследование магнитного фазового перехода.
Определение температуры Кюри
ферромагнитного материала**

Цель: *Исследовать температурную зависимость намагниченности ферромагнитного материала.
Определить значение температуры Кюри ферромагнитного образца.*

Объекты исследования:

Образец ферромагнитного материала.

1. Теоретические сведения

Одной из важнейших характеристик любого ферромагнитного (или ферримагнитного) материала является температура Кюри. В общем случае температура Кюри это температура фазового перехода II рода. Что такое фазовый переход второго рода? Эта такая трансформация материала, при которой плотность и внутренняя энергия вещества не меняются. Если не проводятся специальные измерения каких-либо характеристик материала, то такой переход совершенно незаметен в отличие от фазового перехода первого рода, при котором скачком меняются основные параметры системы (объем, внутренняя энергия, концентрация компонент). Примером фазового перехода первого рода может быть плавление или кристаллизация расплава, испарение или конденсация.

При фазовом переходе второго рода скачок испытывают производные основных параметров по температуре или давлению: теплоёмкость, коэффициент теплового расширения, восприимчивость и т. д. В настоящее время принято говорить о появлении в точке перехода параметра порядка, равного нулю в менее упорядоченной фазе и изменяющегося от нуля (в точке перехода) до ненулевых значений в более упорядоченной фазе. Как правило, более упорядоченная фаза это низко-

температурная фаза, повышение температуры практически всегда приводит к снижению упорядоченности. Наиболее распространённый пример фазового перехода второго рода это переход **ферромагнетик-парамагнетик** (в этом случае параметр порядка — намагниченность).

Как известно, ферромагнитный материал характеризуется тем, что обладает спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью. В этом состоянии элементарные магнитные моменты ферромагнетика сонаправлены друг другу и результат их сложения создает суммарный магнитный момент материала. Удельный магнитный момент (магнитный момент единицы объема) называется намагниченностью (I) и в условиях магнитного насыщения является характеристикой материала. Причиной сонаправленности магнитных моментов ферромагнитного материала является обменное взаимодействие. Энергия обменного взаимодействия зависит от многих параметров и в общем случае для каждого материала она имеет вполне определенное значение. Таким образом, ферромагнитное состояние - это магнитно-упорядоченное состояние, которое существует при сравнительно низких температурах.

При нагреве материала происходит увеличение кинетической энергии всех его структурных элементов (атомов в узлах решетки, коллективизированных электронов). Часто говорят об увеличении тепловой энергии материала, являющейся мерой кинетической энергии частиц, формирующих материал

. Когда тепловая энергия окажется больше, чем энергия обменного взаимодействия - ферромагнитное состояние разрушается. Материал из ферромагнетика превращается в парамагнетик. Собственно здесь-то и происходит тот самый фазовый переход второго рода, когда намагниченность материала (обусловленная сонаправленностью магнитных моментов) обращается в ноль. Парамагнитная фаза является магнитно-разупорядоченной фазой.

Температура Кюри - это температура ограничивающая существование магнитоупорядоченного состояния в ферро-

магнетике. Как уже было сказано ранее, энергия обменного взаимодействия различна по величине в разных материалах. Отчасти именно поэтому значения температуры Кюри очень сильно различаются у разных материалов (см. таблицу).

Значения температуры Кюри
3d- и 4f- ферромагнитных металлов

3d-металл	Температура Кюри, К	4f-металл	Температура Кюри, К
Co	1403	Gd	289
Fe	1043	Tb	223
Ni	631	Dy	87
		Ho	20
		Er	19.6
		Tm	38

Значение температуры Кюри можно определить из простых магнитных измерений. Экспериментально находят температурную зависимость намагниченности и из крутой части кривой $I=f(T)$ методом экстраполяции этой зависимости к оси T определяют температуру Кюри.

В лабораторной работе предстоит осуществить измерение температурной зависимости намагниченности материала, у которого значение температуры Кюри меньше 273 К. Исследуемый материал, находящийся при комнатной температуре в парамагнитном состоянии, охлаждается до температуры жидкого азота, а затем отогревается в небольшом подмагничивающем поле до комнатной температуры. Очевидно, что при 77 К материал будет находиться в ферромагнитном состоянии и обладать спонтанной намагниченностью. Внешнее подмагничивающее магнитное поле, в котором образец нагревается, необходимо для того, чтобы создавать ненулевую макроскопическую намагниченность которую можно фиксировать приборами. В отсутствие такого поля суммарная намагниченность

образца может быть равна нулю, несмотря на ферромагнитное состояние, поскольку материал разбивается на домены. В окрестности температуры Кюри намагниченность образца должна уменьшаться практически до нуля. Некоторое ненулевое значение намагниченности образца при этом будет оставаться, поскольку внешнее магнитное поле не равно нулю, а материал находится в парамагнитной фазе.

2. Экспериментальная часть

Измерение температурной зависимости намагниченности образцов проводят на вибрационном магнитометре, устройство и принцип действия которого описаны в лабораторной работе № 1. Для низкотемпературных измерений используется проточный криостат во внутреннюю часть которого помещается шток вибратора с закрепленным на нем образцом. На рис. 1 показан **только** проточный криостат, размещенный на сосуде Дьюара с жидким азотом.

Проточный криостат представляет собой систему коаксиально совмещенных трубок. Пространство между внешней трубкой и внутренней вакууммируется для уменьшения тепловых потоков. Капилляр (3), находящийся в нижней части криостата, помещается в сосуд Дьюара (4) и закрепляется на нем с помощью уплотняющей гайки (6). При подаче тока на испаритель азота (7) в Дьюаре начинается кипение жидкого азота и давление возрастает. Благодаря избыточному давлению жидкий азот поднимается вверх по капилляру (3) до уровня образца (1), охлаждая его до температуры кипения азота (77.4 К). При этом пары азота свободно выходят в атмосферу через патрубок (8). Для измерения температуры образца используется термопара медь-константан, спай которой (9) размещается непосредственно вблизи образца. Таким образом, об изменении температуры образца судят по изменению ЭДС термопары, составленной из двух стандартных элементов –

хромели и копели. Чтобы получить значения температуры в градусах необходимо пересчитать величину напряжения, снимаемого с выводов термопары, используя специальный полином.

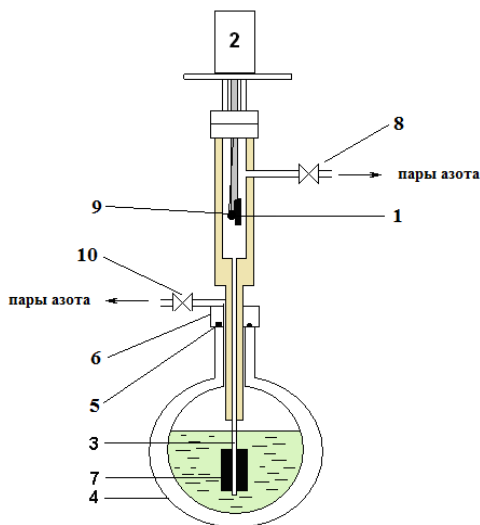


Схема работы проточного криостата для измерения температурной зависимости намагниченности:

1- образец; 2 - механический осциллятор; 3 -капилляр для подачи жидкого азота к образцу; 4 – сосуд Дьюара; 5 – резиновое уплотнение; 6 – уплотняющая гайка; 7 –испаритель азота (резистивный нагреватель); 8 – патрубок для отвода паров азота; 9 – термопара; 10 – патрубок для «сброса» избыточного давления паров азота в сосуде Дьюара.

Поскольку процесс охлаждения не является стабильным и изменение температуры образца происходит скачками, практическое измерение температурной зависимости осуществляется при отогреве от 77 К до 300 К. Для этого перекрывается патрубок 8 и открывается патрубок (10) для «сброса» избыточного давления паров азота в сосуде Дьюара. В результате этого уровень жидкого азота в том объеме, где находится об-

разец, начинает понижаться, а температура образца – увеличиваться.

3. Практическое задание

1. Осуществить вакууммирование изоляционной «рубашки» проточного криостата.

2. Разместить образец на штоке вибратора и закрепить вибратор на верхнем фланце проточного криостата.

3. Наполнить рабочий Дьюар азотом.

4. Поместить в Дьюар испаритель и тщательно зафиксировать его накидной гайкой, убедившись в том, что резиновое уплотнение входит в паз.

5. Разместить сосуд Дьюара с испарителем под электромагнитом.

6. Аккуратно поместить проточный криостат с образцом на стационарной полочке электромагнита таким образом, чтобы капилляр входил в отверстие керны электромагнита и в отверстие сосуда Дьюара.

7. Подключить все необходимые коммуникации (выводы термопары, кабель с возбуждающим колебания сигналом от генератора, выводы датчика Холла).

8. Убедиться в том, что поле между кернами электромагнита отсутствует.

9. Закрыв патрубков 10 подать питание на нагреватель 7 и приступить к охлаждению образца.

10. Охладив образец до температуры жидкого азота, приоткрыть патрубок 10, отключить питание нагревателя 7 и запустить измерительную программу на компьютере.

11. Измерить температурную зависимость магнитного момента образца (ЭДС, наводимой в измерительных катушках) в нулевом магнитном поле от 77.4 К до 293 К.

12. Провести пересчет ЭДС термопары к значениям температуры и получить, тем самым, зависимость магнитного

момента образца (ЭДС, наводимой в измерительных катушках) от температуры.

13. Включить питание электромагнита и установить поле в зазоре между кернами равным 100 Э.

14. Закрыв патрубков 10 подать питание на нагреватель 7 и приступить к охлаждению образца.

15. Измерить температурную зависимость магнитного момента образца (ЭДС, наводимой в измерительных катушках) в магнитном поле 100 Э от 77.4 К до 293 К.

16. Провести пересчет ЭДС термопары к значениям температуры и получить, тем самым, зависимость магнитного момента образца (ЭДС, наводимой в измерительных катушках) от температуры.

17. Определить значение температуры фазового перехода. Сделать вывод о том, какой материал был исследован.

4. Контрольные вопросы

1. Дать определение терминов *намагниченность*, *удельная намагниченность*. Что такое намагниченность насыщения?

2. Привести примеры фазового перехода первого и второго рода

3. Что такое температура Кюри ферромагнетика?

4. Почему значения температуры Кюри у разных ферромагнетиков отличаются?

5. Как экспериментально можно определить значение температуры Кюри?

6. Почему измерение температурной зависимости намагниченности ферромагнитного материала для определения значения температуры Кюри проводится во внешнем магнитном поле?

7. Объяснить разницу в зависимостях, измеренных в нулевом магнитном поле и в поле, равном 100 Э.

8. Объяснить работу проточного криостата, каким образом образец охлаждается до температуры кипящего азота?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование пространственного распределения напряженности магнитного поля, создаваемого катушками с электрическим током. Катушки Гельмгольца

Цель: Исследовать пространственное распределение напряженности магнитного поля, создаваемого одной и двумя катушками. Рассмотреть влияние ферромагнитного сердечника на магнитное поле, создаваемое катушкой с током

Объект исследования: Катушки Гельмгольца.

1. Теоретические сведения

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами. Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является **линейный проводник** с электрическим током (рис. 1, а). В пространстве вокруг него существует поле,

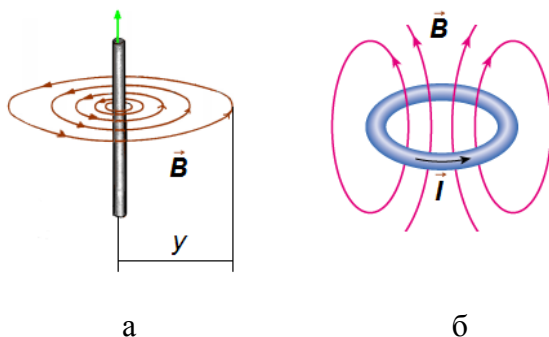


Рис. 1. Индукция магнитного поля, создаваемого: а – прямым проводником с током; б – круговым проводником с током.

направление которого можно определить с помощью «правила буравчика» (правило правой руки). Величина магнитной индукции такого проводника (в предположении, что он бесконечно длинный) на расстоянии y определяется формулой:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi y} , \quad (1)$$

где I - сила тока в проводнике,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Очевидно, что поле проводника с током неоднородно (чем дальше от него, тем оно слабее).

Если проводник согнуть в **кольцо** радиуса R (рис. 1, б), поле в центре кольца будет иметь индукцию

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R} . \quad (2)$$

Это поле также неоднородно. Однако если рядом с первым витком соосно расположить второй, то, подобрав расстояние между витками, можно получить довольно протяженную область пространства, где магнитное поле будет значительно более однородным (рис. 2).

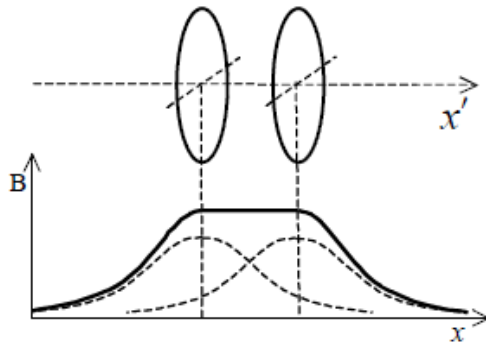


Рис. 2. Расположение двух витков с током и создаваемое ими магнитное поле: пунктирные линии $B(x)$ – поле каждого витка в отдельности; сплошная линия $B(x)$ – результирующее поле.

Катушки Гельмгольца. Катушками Гельмгольца называют систему двух одинаковых катушек, расположенных на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками неоднородность поля может быть не хуже 0,5 %. Индукция магнитного поля в центре катушек Гельмгольца может быть вычислена по формуле

$$B = \mu_0 \left(\frac{16\pi}{5^{3/2}} \right) \frac{NI}{R} \approx 0,90 \cdot \mu_0 \frac{NI}{R}, \quad (3)$$

где N – общее число витков обеих катушек, I – сила тока, текущего в катушках, R – средний радиус катушек.

Катушки Гельмгольца широко применяют в лабораторной практике для создания небольших (примерно до 0,3 тесла) однородных полей. Преимущество катушек Гельмгольца заключается в том, что в пространство между катушками достаточно легко поместить исследовательское оборудование (например, микроскоп для наблюдения доменной структуры или держатель образцов вибрационного магнетометра) для исследования влияния магнитного поля на физические свойства магнитных материалов.

Измерение индукции магнитного поля с помощью датчика Холла

Для измерения индукции магнитного поля применяют полупроводниковые датчики Холла. Эффект Холла состоит в следующем. Если полупроводник в виде прямоугольной пластины поместить в магнитное поле с индукцией B и пропустить через него ток плотности J то между противоположными сторонами пластины, как показано на рис. 3, возникнет разность потенциалов U . Эта поперечная (относительно J и B) разность потенциалов пропорциональна плотности тока, маг-

нитной индукции и расстоянию между соответствующими гранями пластины d :

$$U_{\text{Холла}} = R \cdot d \cdot J \cdot B, \quad (4)$$

где R – постоянная, зависящая от свойств полупроводника, называемая постоянной Холла. Физической причиной эффекта Холла является сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на движущиеся заряды (электроны или дырки, в зависимости от типа проводимости полупроводника) и отклоняющая эти заряды к одной из граней пластины.

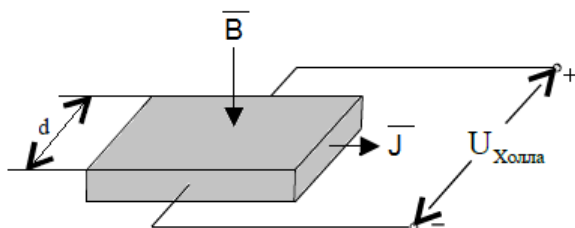


Рис. 3. К возникновению разности потенциалов Холла $U_{\text{Холла}}$ в образце, по которому течет электрический ток с плотностью J , когда образец находится под действием магнитного поля с индукцией B

Если полупроводниковую пластину поместить в область пространства, в которой существует магнитное поле неизвестной величины, то, при постоянной плотности тока J , протекающего через пластину, известных размерах (ширина пластины d) и значения постоянной Холла R , можно определить величину индукции магнитного поля B . При фиксированной плотности тока J , произведение $R \cdot d \cdot J$ является величиной постоянной, поэтому на практике Холловские датчики калибруются и для каждого приводится коэффициент чувствительности, фактически являющийся коэффициентом пропорциональности между индукцией магнитного поля и Холловским напряжением.

С помощью датчиков Холла измеряются поля с индукцией от долей Э до десятков кЭ с высокой точностью. Достоинством датчиков Холла являются их малые размеры, а также малая инерционность, т. е. независимость от частоты, что позволяет с их помощью измерять переменные поля, частота которых достигает 10^{10} Гц .

2. Экспериментальная часть

Для исследования пространственного распределения напряженности магнитного поля, создаваемого катушками с электрическим током, используются катушки Гельмгольца, запитываемые источником постоянного тока СИП-35 (рис. 4). На данном стенде возможно различное подключение катушек к источнику питания. В том случае, если задействована клемма «3» (рис. 4) поле будет создаваться только одной катушкой. Если для коммутации использовать клемму «4» (рис. 4) поле

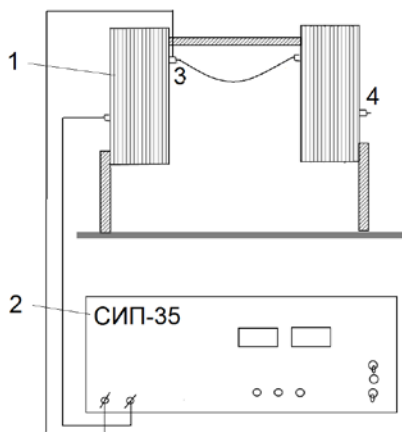


Рис. 4. Схема лабораторного стенда:
1 – катушки Гельмгольца, 2 – источник питания СИП-35,
3 и 4 клеммы для коммутации катушек с источником питания

будет создаваться двумя катушками – это рабочий режим катушек Гельмгольца.

Для измерения индукции магнитного поля применяется датчик Хилла, питание которого осуществляется от стабилизирующего источника АКПП-1105, Холловское напряжение измеряется с помощью цифрового вольтметра В7-78/1. Сила тока через Холловский датчик должна быть 100 мА. Эта величина задается с помощью источника питания. Важно, чтобы это значение не было превышено, в противном случае датчик будет введен из строя (сгорит!). В работе используется калиброванный датчик Холла с коэффициентом чувствительности равным 45,76 мкВ/Э.

Целью лабораторной работы является измерение распределения индукции магнитного поля в пространстве между катушками при различной схеме их подключения (одна работающая катушка, две работающие катушки) и исследование влияния наличия ферромагнитного сердечника в катушке на величину магнитного поля. Для этого при фиксированном токе через катушки (две или одну) производится измерение индукции магнитного поля в различных областях пространства внутри катушек Гельмгольца. Получаемые значения заносятся в таблицы, а затем строится график распределения магнитной индукции. Необходимо выполнить три практических задания: измерить распределение поля, создаваемого одной катушкой; измерить распределение поля, создаваемого одной катушкой с ферромагнитным сердечником; измерить распределение поля, создаваемого двумя катушками Гельмгольца.

3. Практическое задание

3.1. Измерение пространственного распределения магнитного поля, создаваемого одной катушкой.

1. Изначально к блоку питания СИП-35 подключена одна катушка. Поэтому необходимо включить три прибора:

блок питания катушек СИП-35, вольтметр и блок питания датчика Холла.

2. Не подавая напряжения на датчик Холла выставить величину тока **100 мА** с помощью соответствующей рукоятки на передней панели источника.

3. Подать напряжение на Холловский датчик.

4. С помощью ручек грубой и плавной регулировок тока на передней панели СИП-35 установить ток через катушку 25 А.

5. С помощью датчика Холла провести измерения величины магнитной индукции вдоль оси x (вдоль линии, соединяющей центры катушек Гельмгольца (рис. 5) с шагом 2 см. Результаты измерений занести в таблицу.

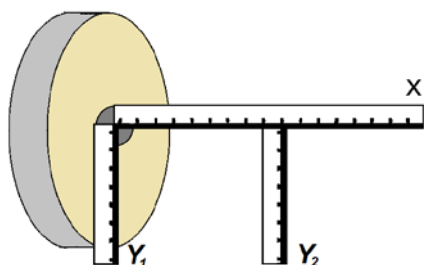


Рис. 5. Схема, поясняющая области и направления вдоль которых необходимо измерять индукцию магнитного поля

6. Провести измерения величины магнитной индукции вдоль оси y_1 (вдоль радиуса катушки Гельмгольца, рис. 5) с шагом 2 см. Результаты измерений занести в таблицу.

7. Провести измерения величины магнитной индукции вдоль оси y_2 (из центральной точки катушек Гельмгольца – вниз, рис. 5) с шагом 2 см. Результаты измерений занести в таблицу.

8. Построить график распределения магнитной индукции в пространстве вблизи единичной катушки (от центра катушки по горизонтали и вертикали; от центральной точки катушек Гельмгольца по вертикали).

Измеряемый параметр	Значения параметра						
Расстояние от центра катушки x , см							
$U_{\text{холла}}$, мВ							
Расстояние от центра катушки y_1 , см							
$U_{\text{холла}}$, мВ							
Расстояние от центра катушек Гельмгольца, y_2 , см							
$U_{\text{холла}}$, мВ							

3.2. Измерение пространственного распределения магнитного поля, создаваемого одной катушкой с сердечником.

1. Поместить в цент левой (работающей) катушки ферромагнитный сердечник.
2. Провести измерения, по схеме, изложенной в п. 3.1. Результаты измерений занести в таблицу.

3.3. Измерение пространственного распределения магнитного поля, создаваемого двумя катушками Гельмгольца.

1. **Уменьшить ток** через катушку до нуля, используя соответствующие «ручки» на внешней панели источника СИП-35, и выключить прибор полностью.
2. Извлечь сердечник из левой катушки.
3. Перекоммутировать катушки: отсоединить провод от клеммы № 3 и подключить его к клемме № 4, тем самым задействовав обе катушки. При данном подключении катушки Гельмгольца работают в штатном режиме.
4. Включить СИП-35 и установить ток через катушки Гельмгольца 25 А.
5. Провести измерения, по схеме, изложенной в п. 3.1. Результаты измерений занести в таблицу.

6. Уменьшить ток через катушку до нуля, используя соответствующие «ручки» на внешней панели источника СИП-35, и выключить прибор полностью. Отключит вольтметр В7-78/1 и источник питания Холловского датчика.

4. Контрольные вопросы

1. Нарисовать распределение линий индукции магнитного поля линейного проводника.

2. Нарисовать распределение линий индукции магнитного поля кольцевого тока.

3. Что позволяет определить правило «буравчика»?

4. Нарисовать распределение линий индукции магнитного поля в соленоиде.

5. Нарисовать распределение интенсивности магнитного поля одиночной катушки и катушек Гельмгольца.

6. Дать определение катушек Гельмгольца.

7. В чем преимущества катушек Гельмгольца по сравнению с одиночной катушкой.

8. Как меняется пространственное распределение магнитного поля если вместо одной катушки использовать катушки Гельмгольца?

9. Как изменяется магнитное поле катушки при помещении в неё ферромагнитного сердечника? Объяснить, почему это происходит.

10. Как изменится магнитное поле катушки при помещении в неё сердечника, изготовленного из парамагнитного материала?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вонсовский С.И. Магнетизм [Текст] - М.: Наука. - 1971. - 1032 с.
2. Ашкрофт Н. Физика твердого тела. Т. 1, 2. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин [Текст] - М.: Мир. - 1979. - 486 с.
3. Павлов П.В. Физика твердого тела [Текст] / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов - М: Высшая школа. - 1985. - 494 с.
4. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений [Текст] - М.: Изд-во МГУ. - 1985. - 336 с.
5. Бозорт Р. Ферромагнетизм [Текст] - М.: Изд-во ин. Литература. - 1956. - 784 с.
6. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические приложения [Текст] - М.: Мир. - 1987. - 416 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование основных магнитных характеристик ферромагнитного материала	3
Лабораторная работа № 2. Исследование концентрационной зависимости комплексной магнитной проницаемости двухфазных образцов ферромагнетик-диэлектрик	17
Лабораторная работа № 3. Исследование магнитного фазового перехода. Определение температуры Кюри ферромагнитного материала	27
Лабораторная работа № 4. Исследование пространственного распределения напряженности магнитного поля, создаваемого катушками с электрическим током. Катушки Гельмгольца.....	34
Библиографический список	43

ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам
для студентов направления 28.03.01
«Нанотехнологии и микросистемная техника»,
профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники»
очной формы обучения

Составители:

О.В. Стогней

И.В.Бабкина

Отпечатано в авторской редакции

Подписано к изданию 27.12.2021.

Объём данных 0.6 Мб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект, 14

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет»

(Кафедра физики твердого тела)

СПРАВОЧНИК МАГНИТНОГО ДИСКА

ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам
для студентов направления 28.03.01
«Нанотехнологии и микросистемная техника»,
профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники»
очной формы обучения

Составители:

О.В. Стогней

И.В.Бабкина

Осн_Магн_Лабы.pdf. 0.6 Мб 27.12.2021 2,2 уч.-изд.л.