

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Нижневартковский государственный университет»

В.П.Мироненко

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум



Издательство
Нижневартковского
государственного
университета
2013

ББК 31.23я73

М 64

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета
Нижевартовского государственного университета

Мироненко В.П.

М 64 **Электротехническое и конструкционное материаловедение:**
Лабораторный практикум. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт.
гос. ун-та, 2013. — 91 с.

ISBN 978–5–00047–097–8

Лабораторный практикум разработан в дополнение к Руководству по выполнению базовых экспериментов (ЭТМ.001 РБЭ 975. Челябинск: ИПЦ «Учебная техника»).

В Практикум собраны работы по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Работы предваряет теоретический материал и необходимые расчетные соотношения по тематике предстоящих исследований. В Приложении представлены справочные материалы.

ББК 31.23я73

ISBN 978–5–00047–097–8

© Мироненко В.П., 2013

© Издательство НВГУ, 2013

Три пути у человека, чтобы разумно поступить:
первый, самый благодарный — размышление,
второй, самый легкий — подражание,
третий, самый горький — опыт.

Конфуций (551—479 гг. до н.э.)

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум — завершающий этап изучения отдельных разделов (модулей) дисциплины. Если на лекциях исследуется теоретический базис, осознаются существующие в природе закономерности и зависимости, на практических занятиях, исходя из теоретических предпосылок, при решении конкретных задач, углубляются и закрепляются полученные представления. Лабораторная работа — эксперимент, законченное мини-исследование, в результате которого получают искомые (существующие) зависимости, исследуются влияющие факторы, определяются коэффициенты, строятся графики, подтверждающие объективные закономерности. Это творческая работа, успешное выполнение которой предполагает предварительную «проработку» теории, осознание (осмысление) цели работы, обоснование методики ее выполнения и понимание (представление) ожидаемых результатов.

Несколько советов по технике выполнения лабораторных работ:

1. Приступать к работе возможно только после проработки теории, понимая суть предстоящих экспериментов.
2. Собрать схему измерений, перепроверить ее, помня, что техника безопасности — залог успеха; наличие защитного заземления — обязательно!
3. После проверки стенда преподавателем приступить к работе, последовательно выполняя все пункты задания.
4. В процессе работы по мере заполнения таблиц следует строить экспериментальные зависимости, чтобы при необходимости корректировать получаемые результаты.
5. Работу завершает протокол, составленный по единому образцу, в котором указана цель работы, представлены расчетные соотношения, таблицы с результатами и экспериментальные зависимости (петля гистерезиса, ВАХ). Выводы обобщают полученные результаты.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Зонная теория твердого тела (ТТ).

Твердые вещества по способности проводить электрический ток делятся на проводники (металлы), диэлектрики (изоляторы), полупроводники (сульфиды, оксиды, арсениды...).

В первом приближении они отличаются удельным сопротивлением:

- у проводников $\rho_v < 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м},$
- у диэлектриков $\rho_v > 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м},$
- у полупроводников $10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м} < \rho_v < 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$

Эта классификация веществ (материалов) условна:

- между полупроводниками и диэлектриками принципиальных различий нет: при низких температурах полупроводники — диэлектрики,

- главное различие проводников и полупроводников — температурный коэффициент сопротивления (ТКС): у металлов с ростом температуры ТКС увеличивается, а у полупроводников — уменьшается.

Количественный анализ твердого тела базируется на зонной теории твердого тела.

Планетарная модель представляет атом как подвижную систему, в которой вокруг «тяжелого» положительно заряженного ядра (с нейтронами и протонами) вращаются «легкие» электроны, находящиеся на стационарных орбитах. Согласно зонной теории электроны изолированных атомов могут иметь только определенные дискретные уровни энергии, соответствующие своим орбитам, между которыми располагаются зоны запрещенных уровней. Процесс образования ТТ представляют «сжатием» изолированных атомов с совпадающими схемами энергетических уровней до расстояний, соответствующих межатомным расстояниям кристаллической решетки ТТ. При этом энергетические уровни *смещаются, расщепляются и расширяются в зоны*, образуя зонный энергетический спектр (рис. 1).

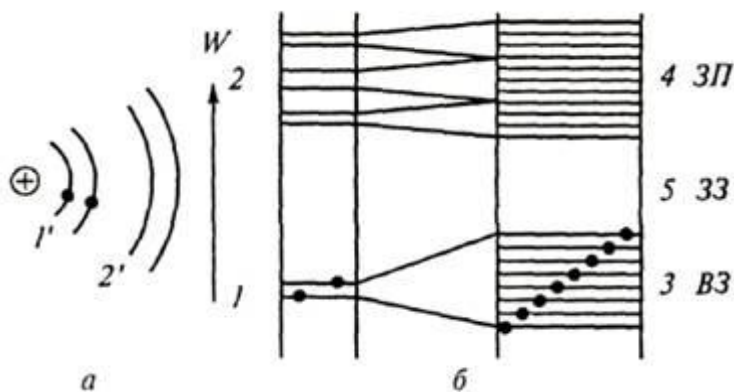


Рис. 1. Схема расположения энергетических уровней свободного атома (а) и неметаллического твердого тела (б):
 1 и 2 — уровни энергии атома в нормальном и возбужденном состоянии соответственно;
 1' и 2' — орбитали электронов атомов в нормальном и возбужденном состоянии

Подобно энергетическим уровням в изолированном атоме энергетические зоны могут быть полностью заполненными, частично заполненными и свободными. Причем, в соответствии с принципом Паули, на одном энергетическом уровне могут находиться не более двух электронов (с противоположными спинами). Самую верхнюю из заполненных электронами зон называют *валентной*. Она соответствует энергетическим уровням валентных электронов в изолированном атоме. Ближайшую к ней свободную, незаполненную электронами зону называют *зоной проводимости*. Между этими зонами располагается *запрещенная зона*. Ширина разрешенных энергетических зон определяется природой атомов, образующих ТТ. Количество же уровней в зоне равно числу атомов, составляющих твердое тело, следовательно, зависит от размеров тела. Запрещенные зоны соответствуют таким уровням энергии, которые электроны принимать не могут. Ширина запрещенной зоны определяется уровнем энергии ΔW между двумя соседними разрешенными зонами. Именно ширина запрещенной зоны позволяет разделить вещества на проводники, диэлектрики и полупроводники (рис. 2).

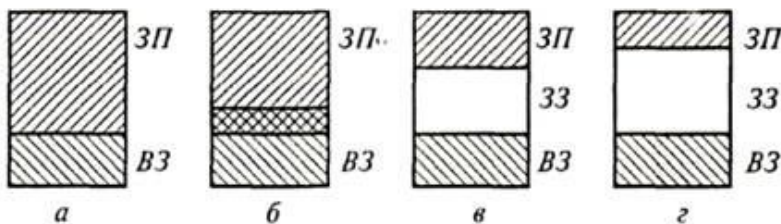


Рис. 2. Классификация веществ по ширине запрещенной зоны:

а, б — проводники; в — полупроводники; г — диэлектрики;

ВЗ — валентная зона; ЗЗ — запрещенная зона; ЗП — зона проводимости

Проводники (рис. 2 а, б) — материалы, у которых запрещенная зона практически отсутствует. Валентная зона вплотную прилегает к зоне проводимости или даже перекрывается ею, вследствие чего электроны в металле «свободны» и под влиянием слабых напряженностей приложенного электрического поля могут переходить из валентной (заполненной) зоны в зону проводимости.

Отличительное свойство проводников — сильно выраженная электропроводность.

Полупроводники (пп) (рис. 2 в) — вещества с шириной запрещенной зоны < 3 эВ. Наиболее применяемые в электронике материалы кремний (Si) и германий (Ge) — элементы четвертой группы таблицы Менделеева. Ширина запрещенной зоны у них невелика ($\Delta W_{Ge} = 0,72$ эВ; $\Delta W_{Si} = 1,12$ эВ). Поэтому возможно появление электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Проводимость полупроводников является возбужденной, т.е. появляется только под действием внешних факторов (температуры, электрического поля, облучения).

Отличительное свойство полупроводников — сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей и дефектов в материале, а также от внешних воздействий (температуры, света, электрических и магнитных полей).

Диэлектрики (рис. 2 г) — вещества с шириной запрещенной зоны, достигающей значения $\Delta W = 6...10$ эВ. Такую энергию электроны получить не могут. Поэтому проводимость в них невозможна.

Отличительное свойство диэлектриков — способность к поляризации и возможность существования в этих материалах электростатического поля.

Носители заряда (нз). Электропроводность ТТ имеет место при наличии в нем свободных носителей заряда. Ток — направленное движение носителей заряда. Направленное движение носителей заряда возникает в двух случаях:

- при наличии градиента концентрации носителей заряда возникает диффузия носителей заряда,

- при наличии градиента электрического поля — разности потенциалов — возникает дрейф носителей заряда.

Полупроводник с идеальной кристаллической решеткой называется *собственным полупроводником*. При абсолютном нуле ($T = 0$ К) в нем все электроны находятся в валентной зоне, свободные нз отсутствуют и это — идеальный диэлектрик. При повышении температуры возникают колебательные движения узловых атомов кристаллической решетки (КР). Носителями энергии механических колебаний кристаллической решетки являются квантовые частицы — *фононы* — аналоги световых *фотонов*. По мере нагрева кристалла энергия фононов возрастает, отдельные электроны, разрывая ковалентные связи между атомами решетки, образуют пару нз — *электрон-«дырка»*. «Дыркой» называют недостачу (потерю) электрона — незаполненную связь в КР. Процесс образования электронно-дырочных пар под действием фононов называют *термогенерацией*. Процесс восстановления связей называют *рекомбинацией*. Время от момента генерации до рекомбинации — время жизни нз. Расстояние, пройденное нз за время его жизни — длина свободного пробега. Проводимость, обусловленную парными нз, называют *собственной проводимостью полупроводника* (пп). Для создания проводимости определенного знака пп легируют — в них вводят примеси. Проводимость, обусловленную наличием примесных атомов, называют *примесной*.

Рассмотрим процесс образования примесных полупроводников:

- если в 4-валентный кремний (Si) ввести атом 5-валентного элемента (Р-фосфор, As-мышьяк, Sb-сурьма), четыре валентных электрона примеси вступят в связи с электронами соседних атомов,

образуя ковалентные связи кристаллической решетки, пятый электрон свободен, он может перейти в зону проводимости и участвовать в создании тока проводимости. При этом примесный атом превращается в неподвижный ион с единичным положительным зарядом. Такие полупроводники имеют электронную проводимость и называются *полупроводники n-типа*. Примеси, обуславливающие электронную проводимость, называют *донорами*;

— если в 4-валентный кремний (Si) ввести атом 3-валентного элемента (Al-алюминий, In-индий, Ga-галлий), все три валентных электрона примеси вступят в связи с электронами соседних атомов Si, четвертая оставшаяся вакансия электрона — незаполненная связь — называется «дыркой». Для устойчивой 8-электронной оболочки КР недостающий электрон может быть «отобран» у ближайшего атома. В результате образуется новая свободная незаполненная связь — «дырка», а атом примеси превратится в неподвижный ион с единичным отрицательным зарядом. Дырки примесей прибавляются к собственным, так что проводимость полупроводника становится дырочной, а *полупроводник* — *p-типа*. Примеси, обуславливающие дырочную проводимость, называют *акцепторами*.

В примесных полупроводниках принято называть носителей заряда преобладающего типа *основными* (ОНЗ), другого типа — *неосновными носителями заряда* (ННЗ):

- в пп-n-типа ОНЗ — электроны, ННЗ — дырки,
- в пп-p-типа ОНЗ — дырки, ННЗ — электроны.

Для появления в материале электропроводности необходимо часть электронов из валентной зоны перевести в зону проводимости. Энергии электрического поля для этого может оказаться недостаточно и потребуются более сильное энергетическое воздействие, например, нагревание твердого тела. Тогда часть электронов «перебрасывается» из валентной зоны в зону проводимости (через запрещенную зону) и, становясь свободными, могут перемещаться под действием электрического поля, создавая **электронную проводимость** образца. Электроны из зоны проводимости могут возвращаться в валентную зону, т.е. рекомбинировать с дырками. В связи с этим, при любой температуре наступает динамическое равновесие — количество электронов, переходящих в зону

проводимости, равно количеству электронов, возвращающихся в нормальное состояние (валентную зону).

Началом твердотельной электроники следует считать «создание» электронно-дырочного перехода (**р-п-перехода**), образуемого в полупроводниковом кристалле на границе раздела областей (металлургической границе) с n-типа и р-типа проводимостями (рис. 3).

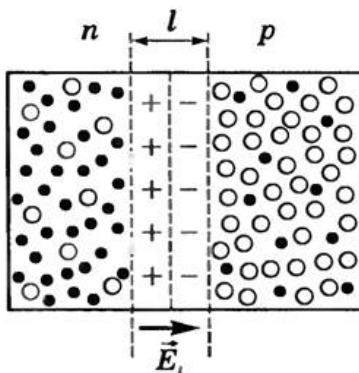


Рис. 3. Образование р-п-перехода

При соединении двух областей с противоположной проводимостью, из-за градиента концентрации носителей заряда (электронов — в **n**-области, дырок — в **p**-области) возникнет *диффузия* электронов из **n**- в **p**-область, и дырок из **p**- в **n**-область. Появляется *ток диффузии* — ток основных носителей заряда (ОНЗ). При этом на границе раздела в **n**-области остаются нескомпенсированные положительные ионы примеси-донора, а в области **p**-типа в результате рекомбинации электронов с дырками примеси появляются нескомпенсированные отрицательные ионы. Таким образом, вследствие диффузии, на границе раздела областей образуется двойной электрический слой разноименно заряженных ионов — так называемый обедненный слой (от слова «бедный» — «неполноценный» атом). Между слоями ионов возникает внутреннее электрическое поле **р-п-перехода**, напряженность которого $\vec{E}_z$ в процессе диффузии увеличивается. Это поле оказывает тормозящее для ОНЗ и в некоторый момент времени, когда энергия поля $\vec{E}_z$ сравняется с энергией носителей заряда, диффу-

зия прекратится. Взаимодействие ионов обедненного слоя создает встречный ток — неосновных носителей заряда (ННЗ), называемый током дрейфа. Таким образом, на границе раздела имеет место динамическое равновесие: дрейф ННЗ компенсируется диффузией ОНЗ и суммарный ток равен нулю.

Принципиальной особенностью р-п-перехода является его односторонняя проводимость: ток возможен только при определенном — «прямом» включении перехода, когда положительный потенциал прикладывают к области **р**-типа, а отрицательный — к области **п**-типа. При «обратном включении» внешнее поле будет суммироваться с внутренним $\vec{E}_z$ полем, расширяя область **р-п**-перехода и исключая возможность появления тока.

Твердотельная полупроводниковая электроника основана на приборах и устройствах, представляющих собой чередование элементарных р-п-переходов. Один р-п-переход представляет полупроводниковый диод, два р-п-перехода — биполярный транзистор, три, четыре — тиристор... Интегральные схемы — разумное сочетание на одной подложке (кристалле) множества неутомимых р-п-переходов, количество которых с развитием технологий непрерывно увеличивается.

Основные характеристики электроизоляционных материалов:

Электрическая прочность диэлектриков. Если приложить к диэлектрику напряжение U и постепенно его увеличивать, при некотором значении U возможен пробой — потеря диэлектриком его электроизоляционных свойств с образованием токопроводящего канала. Напряжение U_{np} , при котором наступает пробой, называется *пробивным*. Напряженность электрического поля E_{np} , при которой произошел пробой, характеризует электрическую прочность диэлектрика

$$E_{np} = U_{np}/h, \quad (1)$$

где h — кратчайшее расстояние по диэлектрику между точками приложения напряжения. Электрическая прочность для сухого воздуха составляет примерно 30 кВ/см, пропитанной лаком хлопчатобумажной ленты — 40—50 кВ/см, электрокартона — 80—100 кВ/см, фарфора — 60—150 кВ/см, слюды — 300—2000 кВ/см.

Диэлектрическая проницаемость. При внесении диэлектрика в электрическое поле, например, между двумя разноименно заряженными пластинами А и Б (рис. 4 а), происходит смещение положительно заряженных ядер атомов в сторону действия силовых линий поля (по направлению к отрицательной пластине Б), а электронных оболочек в противоположную сторону. В результате этого электрически нейтральные молекулы диэлектрика поляризуются, т.е. все положительные заряды, входящие в состав молекул, смещаются в направлении действия поля, а все отрицательные заряды — в противоположном направлении (рис. 4 б). Во время нахождения диэлектрика в электрическом поле молекулы находятся в поляризованном состоянии. При этом в диэлектрике возникает *ток смещения*. Ток смещения появляется при внесении диэлектрика в электрическое поле и удалении его из зоны действия поля или при изменении напряженности поля.

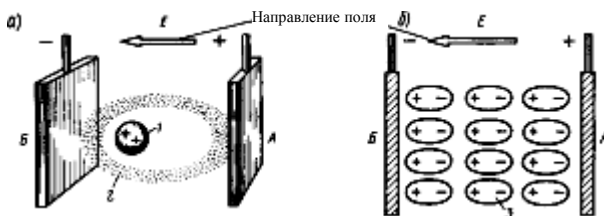


Рис. 4. Поляризация диэлектриков:

- а) смещение ядер атомов диэлектрика и их электронных оболочек в электрическом поле;
б) поляризация молекул диэлектрика

При поляризации диэлектриков поляризованные молекулы создают свое собственное поле, направление которого противоположно направлению внешнего поля, поэтому напряженность результирующего поля уменьшается. Способность диэлектрика поляризоваться определяется его диэлектрической проницаемостью ϵ . Таким образом, *диэлектрическая проницаемость характеризует степень поляризации диэлектрика, а следовательно, влияние поля его поляризованных молекул на результирующую напряженность поля*. Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; ее называют также *электрической*

постоянной. Абсолютную диэлектрическую проницаемость материала — ϵ_a выражают через диэлектрическую проницаемость вакуума ϵ_0 :

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon, \quad (2)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала.

Относительная диэлектрическая проницаемость вакуума принята за единицу. Для всех других веществ она больше единицы. Например, диэлектрическая проницаемость резины больше, чем вакуума, почти в 3 раза, фарфора — в 6 раз, слюды — в 4—8 раз, стекла — в 7—8 раз, а дистиллированной воды — в 80 раз. Следовательно, *относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля в какой-либо реальной среде (воздухе, фарфоре, стекле ...) по сравнению с вакуумом*.

Диэлектрические потери — часть энергии электрического поля в диэлектрике, необратимо преобразующаяся в теплоту, т.е. это электрическая мощность, затрачиваемая на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

К основным видам диэлектрических потерь относят:

1) *Потери на электропроводность*. Обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную.

2) *Релаксационные потери*. Обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Характерны для диэлектриков, обладающих замедленными видами поляризации, и проявляются в области достаточно высоких частот.

3) *Ионизационные потери*. Свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии.

4) *Резонансные потери*. Наблюдаются в некоторых газах при определенной частоте и выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля; возможны и в твердых телах, если частота вынужденных колебаний, вызываемая электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества.

Потери в диэлектриках имеют место как при постоянном, так и при переменном напряжении. При постоянном напряжении качество материала характеризуется значениями удельных объ-

емного и поверхностного сопротивлений. При воздействии переменного напряжения для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле введено понятие *тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$* .

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи опережает вектор напряжения на угол 90° ; при этом угол δ равен нулю. При наличии потерь, с увеличением рассеиваемой в диэлектрике мощности угол φ уменьшается. При этом появляется (и увеличивается) угол δ и его функция — $tg\delta$.

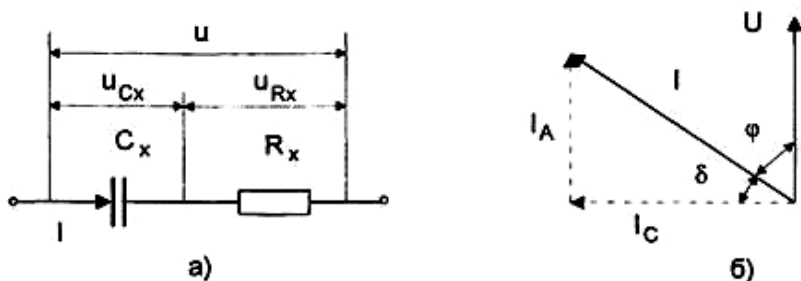


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения диэлектрика:
а — схема замещения диэлектрика; б — векторная диаграмма

Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ для последовательной схемы замещения диэлектрика, состоящей из идеального конденсатора с емкостью C_X и включенного последовательно с ним резистора сопротивлением R_X (рис. 5), при измерениях на рабочей частоте ω , определяют из выражения:

$$tg\delta = U_A/U_C = R_X/X_{C_X} = P_A/P_C. \quad (3)$$

У материалов, применяемых в высокочастотном диапазоне и при высоких напряжениях, $tg\delta$ лежит в пределах 10^{-3} — 10^{-4} ; для низкочастотных диэлектрических материалов — полярных диэлектриков — значения $tg\delta$ обычно 10^{-1} — 10^{-2} , для слабополярных — до 10^{-3} ; для хорошо осушенных газов, не содержащих влаги, значения могут достигать 10^{-5} — 10^{-8} .

Магнитные цепи. В природе существует единое электромагнитное поле, которое пронизывает все околоземное пространство. Электрическое и магнитное поле — лишь его составляющие. Электрическое поле E — статическое. Электрический заряд, помещенный в вакуум, может сохраняться бесконечно при отсутствии потерь (утечки). Магнитное поле — вихревое (замкнутое): оно появляется лишь при изменении электрического поля, т.е. при наличии электрического тока. Можно утверждать, что магнитное поле и электрический ток — взаимосвязанные явления: вокруг проводника с током присутствует магнитное поле $\vec{H}$, и при пересечении проводником магнитных силовых линий в нем наводится ЭДС и (в замкнутом проводнике) появляется электрический ток. Внешнее магнитное поле проводника с током I , на расстоянии R от проводника, характеризуется напряженностью магнитного поля $H = I/2\pi R$ (А/м). Наряду с напряженностью $\vec{H}$, магнитное поле характеризуют магнитной индукцией $\vec{B}$ — векторной величиной, определяющей силу, действующую на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Напряженность магнитного поля $\vec{H}$ и магнитная индукция $\vec{B}$ связаны физической константой μ_0 — магнитной проницаемостью вакуума:

$$\mu_0 = B/H = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,57 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Магнитный поток $\vec{\Phi}$ или поток вектора магнитной индукции через поверхность S определяется числом магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность:

$$\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot S \text{ (Вб, вебер)}. \quad (4)$$

Магнитная индукция — интенсивность магнитного поля:

$$B = d\Phi/dS \text{ (Тл, тесла)}. \quad (5)$$

Напряженность внешнего магнитного поля H не зависит от свойств среды, в которой создается магнитный поток Φ . Магнитная же индукция B определяется как величиной H , так и свойствами среды, характеризуемой относительной магнитной проницаемостью μ , которая показывает, во сколько раз проницаемость в веществе больше проницаемости вакуума:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H = \mu_a \cdot H, \quad (6)$$

где $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ — абсолютная магнитная проницаемость вещества.

Ферромагнитные материалы.

Магнитные свойства материала определяются магнитными свойствами элементарных частиц атомов (электронов, протонов, нейтронов). При этом определяющими являются электроны, магнитные свойства которых проявляются более, чем в 1000 раз сильнее свойств протонов и нейтронов. Важным свойством электрона является наличие у него, кроме электрического, собственного магнитного поля (спина), образующегося при вращении вокруг собственной оси. За счет движения вокруг ядра атома электрон создает также орбитальное магнитное поле, которое можно уподобить круговому микротоку.

Магнитный момент единицы объема вещества называется *намагниченностью*:

$$\vec{J} = \sum_v \frac{\vec{m}}{v} \text{ (А/м)}, \quad (7)$$

где $\sum \vec{m}$ — суммарный магнитный момент атомов, занимающих объем v .

Намагниченность можно рассматривать как напряженность, создаваемую микротоками электронных оболочек вещества. Тогда магнитную проницаемость вещества можно представить выражением: $B = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J})$, откуда

$$B/H = \mu_0 \cdot (1 + \vec{J} / \vec{H}). \quad (8)$$

Отношение $\vec{J} / \vec{H} = \chi$ называют *магнитной восприимчивостью вещества*.

Вводят понятие относительной магнитной проницаемости $\mu = 1 + \chi$. Тогда:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H. \quad (9)$$

Вещества крайне разнообразны по магнитным свойствам. У большинства веществ эти свойства выражены слабо. **Слабомагнитные вещества** делятся на *парамагнетики* и *диамагнетики*. У парамагнетиков $\mu > 1$, у диамагнетиков $\mu < 1$, но отличие

μ от единицы у этих материалов чрезвычайно мало (их относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1$). К парамагнетикам относятся платина, воздух и многие другие вещества (у алюминия $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$). К диамагнетикам относятся медь ($\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$), вода ($\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$), висмут и другие вещества. Образцы из пара- и диамагнетиков, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному — парамагнетики втягиваются в область сильного поля, диамагнетики — выталкиваются (рис. 6).

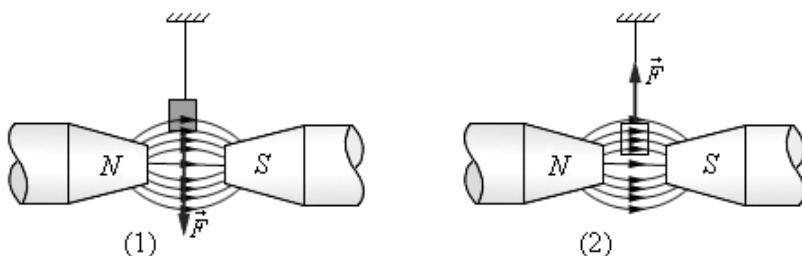


Рис. 6. Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле

Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным против направления индукции внешнего поля.

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитных полях, называются **ферромагнитными**. Их девять: железо — Fe, никель — Ni, кобальт — Co, гадолиний — Gd, и пять редкоземельных элементов: эрбий — Er, диспозий — Dy, тулий — Tm, гольмий — Ho, тербий — Tb. Их сплавы также оказываются ферромагнитными. По порядку величины μ ферромагнетиков лежат

в пределах 10^2 – 10^5 (у стали $\mu \approx 8000$, у сплава железа с никелем $\mu \approx 250000$).

Ферромагнитные материалы делятся на **магнито-мягкие** (чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы) и **магнито-жесткие** (углеродистые стали, вольфрамовые сплавы). Магнито-мягкие ферромагнетики почти полностью размагничиваются при исчезновении внешнего магнитного поля. Эти материалы используют в качестве магнитопроводов (трансформаторы, электродвигатели и др.). Магнито-жесткие материалы в значительной мере сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Они используются, в основном, для изготовления постоянных магнитов.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (**температура или точка Кюри**), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У кобальта, например, температура Кюри равна 1130°C , у железа — 770°C , у никеля — 360°C .

Характеристики ферромагнитных материалов

Кроме высокой магнитной проницаемости μ ферромагнетики обладают сильно выраженной нелинейной зависимостью магнитной индукции B от напряженности приложенного магнитного поля H , а при перемагничивании связь между B и H становится неоднозначной. Функции $\vec{B}(\vec{H})$ имеют особое значение, так как только с их помощью можно исследовать электромагнитные процессы в цепях, содержащих элементы, в которых магнитный поток Φ проходит в ферромагнитной среде. При этом различают кривые намагничивания, представляющие собой *однозначные зависимости* $\vec{B}(\vec{H})$, и петли гистерезиса — *неоднозначные зависимости* $\vec{B}(\vec{H})$ (рис. 7).

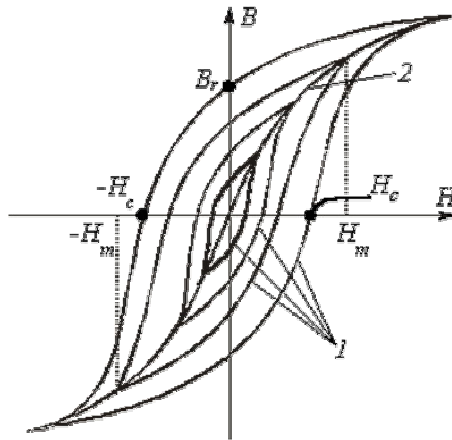


Рис. 7. Намагничивание ферромагнетиков (петли гистерезиса)

Намагничивание — процессы установления намагниченности образца, протекающие при действии внешнего магнитного поля. В диамагнетиках намагничивание состоит в возникновении микроскопических индукционных токов, создающих намагниченность, направленную против внешнего магнитного поля. В парамагнетиках происходит ориентация хаотически колеблющихся магнитных моментов атомов или ионов в направлении поля. В ферромагнетиках различают три механизма намагничивания: смещение границ между магнитными доменами, вращение вектора спонтанной намагниченности и парапроцесс. Вид зависимости $B(H)$ определяется магнитными свойствами материала, условиями измерений, формой образца, его магнитной предисторией.

На рис. 8 показана **кривая первого намагничивания (КПН)**, получаемая при намагничивании ферромагнетика из размагниченного состояния монотонно возрастающим от нуля магнитным полем. На КПН выделяют пять участков, на каждом из которых преобладает определенный механизм намагничивания. Участок I (рис. 8) соответствует обратимым (упругим) смещениям доменных границ. В области Рэлея (II) намагничивание осуществляется благодаря процессам смещения, как обратимым, линейно зависящим от напряженности магнитного поля H , так и необратимым, квадратично зависящим от H .



Рис. 8. Кривая первого намагничивания:
 а — кривая первого намагничивания;
 б — схематическое изображение процессов намагничивания
 в многодоменной ферромагнетике

Наиболее крутой участок КПН (III) соответствует максимальной восприимчивости и связан с необратимыми смещениями доменных границ. В области приближения к насыщению (IV) основную роль играют процессы вращения. Участок V — область парапроцесса.

Кривые циклического перемagnetизации или петли гистерезиса получаются при циклическом изменении магнитного поля между крайними значениями $+H_1$ и $-H_2$ (рис. 7). Кривые $B(H)$ при увеличении магнитного поля H_m изменяются от цикла к циклу, но постепенно становятся стабильными. Симметричная петля гистерезиса, полученная при максимальной напряженности поля H_m , соответствующей насыщению ферромагнетика, называется *предельным циклом*. Для предельного цикла устанавливают значение **Br** при $H = 0$, которое называют *остаточной индукцией*, и значение **H_c** при $B = 0$, называемое *коэрцитивной силой*. Коэрцитивная сила показывает, какую напряженность магнитного поля следует приложить к образцу, чтобы уменьшить остаточную индукцию до нуля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ (ТКС)

Цель работы: определить экспериментально температурный коэффициент сопротивления:

- полупроводникового резистора типа КТ110, КТУ81 (с положительным ТКС-РТС). Маркировка «600.13-1; РТС»;
- полупроводниковых резисторов типа В57861S, В57891М (с ТКС-NTC). Маркировка «600.19-3; NTC»;
- металлической пленки резистора типа MF, C2-33H. Маркировка «600.19-1; MF»;
- углеродной пленки резистора типа CF, C2-14. Маркировка «600.19-2; C»;
- медного провода (термопреобразователь сопротивления медный типа дТСО14-50М.В3.20/0Б2. Номинальное сопротивление при 0 °С — 50 Ом). Маркировка «600.19-4; Cu»;
- напряжения на р-п-переходе при прямом включении кремниевого диода типа КД522, 1N4148. Маркировка «600.19-5; диод».

Основные понятия и определения

Способность материала проводить электрический ток определяется наличием подвижных носителей заряда в нем. Наиболее общая формула для определения плотности тока J :

$$J = \sum n_i \cdot q_i \cdot V_i, \quad (1.1)$$

где n_i — концентрация зарядов i -сорта,

q_i — значение заряда,

V_i — скорость носителей заряда (НЗ).

Для всех сред, за исключением вакуума, скорость НЗ пропорциональна напряженности поля

$$V_i = \xi_i \cdot E, \quad (1.2)$$

где ξ — подвижность НЗ.

Подвижностью носителей заряда называется коэффициент пропорциональности между скоростью носителей заряда V_i и напряженностью поля E . Размерность ξ — $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Подвижность численно равна скорости НЗ при напряженности поля 1 В/м.

Помня, что $\rho = 1/\sigma$, выражение (1.1) можно представить в виде:

$$J = \sigma \cdot E = E/\rho, \quad (1.3)$$

где $\sigma = \sum n_i \cdot q_i \cdot \mu_i$ — удельная электропроводность,

ρ — удельное сопротивление.

Все эти выражения — разные способы записи закона Ома в дифференциальной форме. В классической форме закон Ома для участка цепи:

$$I = U/R. \quad (1.4)$$

В металлах носители заряда — электроны. Количество электронов в металле составляет порядка 10^{22} ед/см³. Концентрация атомов типичного металла имеет примерно те же значения. Это означает, что все атомы ионизованы, и электроны не принадлежат каждому атому, а обобществлены во всем кристалле. Классическая теория металлов рассматривала электроны как идеальный газ, частицы которого сталкиваются с дефектами решетки, колебаниями атомов, за счет чего их скорость остается ограниченной в электрическом поле. До столкновения электрон должен ускоряться в течение времени τ . Длина свободного пробега λ , составляет:

$$\lambda = \frac{e \cdot E}{2m} \cdot \tau^2. \quad (1.5)$$

Приравнявая $\lambda \cdot n$ произведению плотности тока на время τ , получим:

$$J = \frac{e^2 \cdot n \cdot E}{2m} \cdot \tau. \quad (1.6)$$

Отсюда выражение для удельной электропроводности:

$$\sigma = \frac{e^2 \cdot n \cdot \tau}{2m}. \quad (1.7)$$

Если те же операции провести для переноса тепла электронным газом, то значение удельной теплопроводности k составит

$$k = \frac{3 \cdot k^2 \cdot n \cdot \tau \cdot T}{2m}. \quad (1.8)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, T — температура, m — масса электрона.

Поделив выражение (1.8) на (1.7) и дополнительно разделив на T , получим число Лоренца:

$$L = k/(\sigma \cdot T) = 3(k/e)^2, \quad (1.9)$$

т.е. теплопроводность материала пропорциональна его электропроводности. Действительно, измеренные числа Лоренца для разных металлов слабо отличаются друг от друга.

Экспериментальные значения удельной электропроводности металлов составляют величины порядка (10^8 — 10^7) См/м.

Для практики важно, что электропроводность металлов зависит от температуры. В ряде случаев эта зависимость близка к линейной. Обычно приводят температурную зависимость удельного сопротивления:

$$\rho(T) = \rho(T_0)(1 + TK\rho(T - T_0)). \quad (1.10)$$

Здесь $\rho(T_0)$ — удельное сопротивление при температуре T_0 , (обычно это 20 °С), $TK\rho = \alpha_\rho$ — температурный коэффициент удельного сопротивления. Он имеет размерность 1/К (или 1/°С), для металлов $TK\rho$ всегда положителен.

В узком интервале температур ρ определяют из выражения:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}. \quad (1.11)$$

Лабораторная (измерительная) установка и электрическая схема соединений

При выполнении работы используется электронагреватель (394.2). В блок встроен нагреватель с измерителем-регулятором температуры. Испытываемый образец вставляется в отверстие

на лицевой панели нагревателя. Его выходное сопротивление и напряжение измеряются с помощью мультиметра.

Блок электронагревателя

Блок электронагревателя (рис. 1.1) используется для определения температурного коэффициента сопротивления исследуемых материалов. Блок позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя. В блоке установлен маломощный источник +5 В, используемый как дополнительный источник питания в некоторых экспериментах.

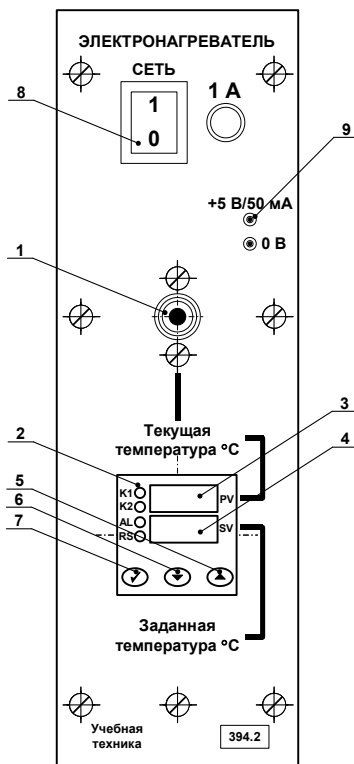


Рис. 1.1. Лицевая панель блока электронагревателя (394.2)

- 1 — отверстие нагревателя; 2 — измеритель-регулятор температуры;
- 3 — индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV);
- 4 — индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV);
- 5, 6, 7 — кнопки управления регулятором температуры;
- 8 — выключатель питания; 9 — гнездо источника питания +5 В

Слева от индикаторов 3 и 4 на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода:

K1 — включен при нагреве;

K2 — не используется;

AL — индикатор превышения предельных значений (не используется);

RS — индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

Задание температуры электронагревателя.

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2.

Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7. Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10° выше комнатной) и постепенно повышать ее величину до 100 °С, т.к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

Включение (отключение) режима автоматического регулирования.

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и после этого включить режим автоматического регулирования.

Переключение режима автоматического регулирования:

1. Однократно нажать кнопку 7 регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразится надпись «t-S».

На индикаторе 4 (зеленый, SV) — текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 — индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP»↔«rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние — на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен — режим «rUn» (РАБОТА), выключен — «StoP» (СТОП).

Схема электрических соединений

Схема электрических соединений при определении температурных коэффициентов сопротивления показана на рис. 1.2.

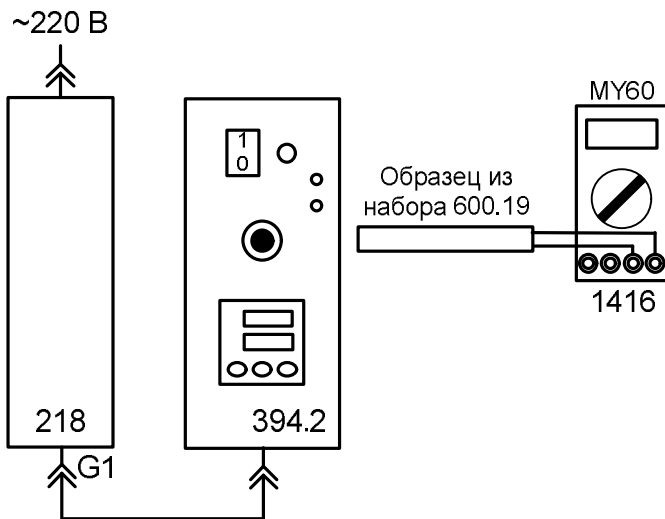


Рис. 1.2. Схема для определения температурного коэффициента сопротивления

Все образцы подключаются к гнездам «VΩ» и «COM» мультиметра MY60T (блок 1416) и устанавливается один из пределов измерения сопротивления, соответствующий сопротивлению об-

разца. При подключении кремниевого диода (образец 600.19-5, диод Si) необходимо соблюдать полярность: анод (красный провод) подключается к гнезду «VΩ», а катод (черный или синий провод) — к гнезду «СОМ». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения «». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить мультиметром, включив его последовательно с испытуемым диодом.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блока электронагревателя 394.2.

Перечень используемой аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A1	Электронагреватель	394.2	30...100 °С, источник +5 В,
	Набор образцов резисторов	600.19	6 образцов
A5	Мультиметр	1416	MY60T

Порядок выполнения работы

- Электричество опасно для жизни. Четко выполняйте требования электробезопасности. Приступая к работе, убедитесь, что измерительный стенд обесточен.
- Проверьте схему электропитания блоков электронагревателя (394.2) и источника питания G1 (218). Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.
- Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 1.2).
- Выберите значения температур, при которых будут происходить измерения сопротивления образцов. Из-за инерционности нагревателя целесообразно выбрать не более 5...7 точек в диапазоне температур до 100 °С. Начальное значение — комнатная температура.
- Измерьте сопротивление образцов при комнатной температуре. Для исключения нагрева образцов от рук их необходимо брать за корпус вблизи выводов.

- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока электронагревателя (394.2).
- При включении питания автоматический режим регулятора температуры электронагревателя выключен. Установите требуемую температуру (см. раздел «Блок электронагревателя»). Включите автоматический режим регулятора температуры. Начнется разогрев нагревателя (включены светодиоды индикаторов K1 и RS).
- После стабилизации температуры нагревателя вблизи заданного значения поочередно вставьте каждый из образцов в отверстие нагревателя до упора. Выждите 2—3 минуты для стабилизации температуры и измерьте сопротивление образца.
- Задайте следующее значение температуры, дождитесь ее стабилизации и повторите измерения сопротивления образцов. При высоких температурах образцов будьте осторожны: не касайтесь рабочей части образца, извлеченного из нагревателя.
- Результаты измерений занесите в таблицу 1.1.
- По результатам измерений постройте графики зависимостей сопротивления образцов (или напряжения для диода) от температуры.
- По завершении измерений отключите питание всех блоков.
- По результатам испытания отберите образцы, имеющие линейную зависимость сопротивления от температуры, и вычислите их температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R(t_2) - R(t_1)}{R(t_1) \cdot t_2 - R(t_2) \cdot t_1}, \quad (1.12)$$

где $R(t_2)$, $R(t_1)$ — сопротивление образца, соответственно, при температуре t_2 и t_1 ;

$\alpha \cdot [\text{град}^{-1}]$ — температурный коэффициент сопротивления образца.

Сопротивление образца при произвольной температуре T °C вычисляется по формуле:

$$R(t) = R(t_1) \cdot \frac{1 + \alpha \cdot t}{1 + \alpha \cdot t_1}. \quad (1.13)$$

Таблица 1.1

Исследуемый образец: полупроводниковый резистор с положительным ТКС (600.13-1; PTC)						
T °C	25	40	60	80	100	
R						
Исследуемый образец: металлическая пленка резисторов типа MF (600.19-1; MF)						
T °C						
R						
Исследуемый образец: углеродная пленка резисторов типа CF (600.19-2; C)						
T °C						
R						
Исследуемый образец: полупроводниковый резистор с отрицательным ТКС (600.19-3; NTC)						
T °C						
R						
Исследуемый образец: медный провод термопреобразователя (600.19-4; Cu)						
T °C						
R						
Исследуемый образец: p-n-переход кремниевого диода (600.19-5; диод — VD-Si)						
T °C						
U, (B)						

Расчетное значение α_r для измеренных образцов внесите в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Материал	(600.13-1; PTC)	(600.19-1; MF)	(600.19-2; C)	(600.19-3; NTC)	(600.19-4; Cu)
α ($10^{-3}/C$)					

По результатам измерений постройте зависимости $R(T^{\circ}\text{C})$ для измеренных образцов и $U_{VD}(T^{\circ}\text{C})$.

ТКС некоторых материалов при комнатной температуре представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Температурный коэффициент сопротивления α
при температуре 20 °С,

Металл	α ($10^{-3}/\text{K}$)	Металл	α ($10^{-3}/\text{K}$)
Алюминий	4.3	Ртуть	0.92
Вольфрам	4.1	Нихром	0.25
Золото	3.9	Константан	0.03
Медь	3.8	Никелин	0.23
Никель	6.5	Манганин	0.02
Платина	3.9		
Платина	3.9		

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Объясните понятия «температурный коэффициент линейного расширения, сопротивления, удельного сопротивления».
2. Почему ТКС металлов положительный, а полупроводников — отрицательный.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: определить материал проводника по измеренному сопротивлению и вычисленному удельному сопротивлению исследуемых образцов с использованием стандартных методов.

Основные понятия и определения

Электрическим током называют упорядоченное движение *носителей заряда* (нз). В металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны, в электролитах и ионизированных газах — положительные и отрицательные ионы.

Упорядоченное движение нз приводит к переносу заряда в направлении их скорости. Интенсивность этого переноса характеризуется плотностью тока, численно равной величине заряда, переносимого в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению движения нз. За направление тока принимается направление движения положительно заряженных частиц. В случае, когда все носители заряда одинаковы, плотность тока определяется формулой

$$J = \sum n_i \cdot q_i \cdot V_i, \quad (2.1)$$

где n_i — концентрация зарядов i -сорта,

q_i — значение заряда,

V_i — скорость носителей заряда (нз).

В случае, когда имеется несколько типов носителей тока, правая часть формулы (2.1) будет представлять собой сумму плотностей тока, создаваемого каждым типом частиц.

Силой тока через поверхность называется заряд, проходящий через эту поверхность в единицу времени. Бесконечно малый элемент поверхности характеризуется вектором dS , направленным по нормали к поверхности, модуль которого равен площади этого элемента. Сила тока, протекающего через бесконечно малый элемент поверхности dS , равна:

$$dI = j \cdot dS. \quad (2.2)$$

Сила тока, протекающего через конечную поверхность S , равна интегралу по этой поверхности от элементов силы тока:

$$I = \int j \cdot dS \quad (2.3)$$

Одним из основных способов возбуждения электрического тока в проводниках является создание и поддержание в них электрического поля. Как показывает опыт, для многих проводников в широких пределах плотность тока j пропорциональна напряженности электрического поля E . Это один из важнейших законов электродинамики. Он называется законом Ома. Математически закон Ома выражается формулой:

$$J = E \cdot \sigma, \quad (2.4)$$

где коэффициент пропорциональности σ называется *удельной электрической проводимостью*. Величина, обратная электрической проводимости, называется *удельным сопротивлением*:

$$\rho = 1/\sigma. \quad (2.5)$$

Удельная электрическая проводимость зависит от свойств материала. По ее значению материалы делятся на три класса: диэлектрики, полупроводники и проводники. Резкой границы между ними нет. Диэлектрики — вещества с малой электрической проводимостью (большим удельным сопротивлением). Идеальный диэлектрик характеризуется отсутствием проводимости. Однако это возможно лишь при 0 К. При температуре, отличной от 0 К, все материалы обладают определенной проводимостью. Диэлектриком принято называть материал, удельное сопротивление которого $\rho > 10^{+5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Полупроводники имеют удельное сопротивление: $10^{+5} \text{ Ом} \cdot \text{м} > \rho > 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Проводники характеризуются удельным сопротивлением, меньшим $10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. В основном это металлы. Наиболее хорошими проводниками среди них являются медь и серебро, удельное сопротивление которых имеет порядок $10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В случае, когда электрические токи текут по тонким проводам, направление тока будет совпадать с направлением оси провода, а величина плотности тока может считаться одинаковой во всех

точках его поперечного сечения. Сила тока через поперечное сечение провода площадью S равна:

$$I = j \cdot S. \quad (2.6)$$

Если ток постоянен, сила протекающего тока I будет одна и та же вдоль всего провода. Электрическое поле постоянного тока создается зарядами, находящимися на поверхности проводника, плотность которых не меняется со временем, хотя и происходит движение зарядов: на место ушедших зарядов приходит такое же количество новых зарядов. Поэтому, как и поле неподвижных зарядов, поле постоянного тока является потенциальным. Разность потенциалов между двумя точками провода численно равна работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E \cdot dl, \quad (2.7)$$

где dl — бесконечно малый элемент длины провода. С учетом (4) и (6) для разности потенциалов справедлива запись:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = I \int_1^2 \frac{dl}{\sigma \cdot S} = I \cdot R \quad (2.8)$$

Для однородного провода постоянного поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.9)$$

где l — его длина. Разность потенциалов (8) называют напряжением и обозначают $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

Тогда:

$$U = RI \quad (2.10)$$

выражает закон Ома в интегральной форме для участка цепи.

Целью настоящей лабораторной работы является определение удельного сопротивления проводника. Предварительно измерив сопротивление проводника и зная его геометрию, вычисляется значение ρ :

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right]. \quad (2.11)$$

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Электрическая схема соединений приведена на рис. 2.1. Для удобства присоединения миниблока с испытуемым проводником к измерителю E7-22 используется наборное поле блока генераторов напряжений (код 213.2)

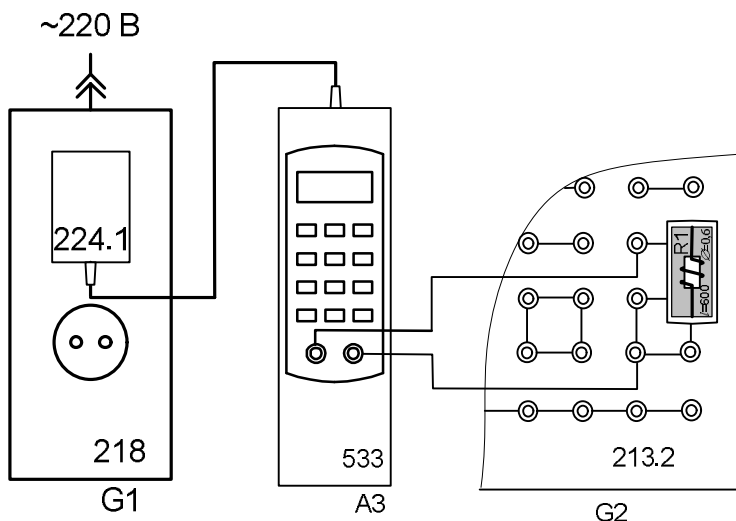


Рис. 2.1. Электрическая схема соединений для измерения сопротивлений образцов

Перечень используемой аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
П2	Блок генераторов напряжений с наборным полем	213.2	± 15 В, 0...+15 В, ~0...10 В, Л 15В. 0,2...20 кГц
A3	Измеритель R, L, C	534	Цифровой мультиметр E7-22
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки «R1» и «R2»

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 2.1). При этом миниблок «R1» установите в наборную панель и подключите его к измерителю R, L, C (прибор Е7-22). Подключите блок питания 224.1 к разъему на верхней стороне корпуса прибора Е7-22. Вилку блока питания подключите к источнику питания (218).
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Если прибор Е7-22 не включился, кратковременно нажмите левую верхнюю кнопку на лицевой панели прибора — **ⓘ**.
- Выберите вид измеряемого параметра, нажимая кнопку «L/C/R», пока на дисплее слева не появится символ R. Запишите значение сопротивления, которое показывает прибор, в таблицу 2.1.
- Измените частоту, нажимая кнопку «ЧАСТ», и убедитесь, что на обеих частотах прибор показывает одно и то же значение сопротивления.
- Замените миниблок «R1» миниблоком «R2» и аналогично измерьте сопротивление установленного в нем резистора.
- Вычислите удельные сопротивления испытываемых проводников по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right].$$

Таблица 2.1

Миниблок	$R, \text{Ом}$	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Материал (предположительно), исходя из справочных данных
«R1»			
«R2»			

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Дайте определения силы и плотности тока.
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
3. Дайте определения разности потенциалов, электродвижущей силе и напряжению.
4. От чего зависит электрическое сопротивление провода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ (ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ)

Цель работы: экспериментально определить характеристики изоляционных материалов: относительную диэлектрическую проницаемость — ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь — $\operatorname{tg} \delta$.

Основные понятия и определения

Диэлектрическая проницаемость ϵ — величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Диэлектрические потери — часть энергии электрического переменного поля, которая при переполаризации превращается в диэлектрике в теплоту и нагревает его. При протекании переменного тока через конденсатор векторы напряжения и тока сдвинуты на угол $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$, где δ — угол диэлектрических потерь. При отсутствии потерь $\delta = 0$.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ — определяется отношением активной мощности P_a к реактивной P_r при воздействии синусоидального напряжения. Величина, обратная $\operatorname{tg} \delta$, называется добротностью конденсатора.

Емкость плоского конденсатора, между обкладками которого находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d} \quad (3.1)$$

где S — площадь пластины конденсатора; d — расстояние между ними.

Из этой формулы видно, что емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости. Чем больше ϵ ,

тем больше емкость. Если между обкладками конденсатора вакуум, то емкость конденсатора будет равна

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d}. \quad (3.2)$$

Отсюда видно, что диэлектрическая проницаемость ϵ показывает, во сколько раз емкость C конденсатора, между обкладками которого находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , больше емкости C_0 конденсатора, между обкладками которого вакуум.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (3.3)$$

Используя это соотношение, можно опытным путем определять значение диэлектрической проницаемости различных материалов.

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Для определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных изоляционных материалов измеряются параметры последовательной схемы замещения конденсатора (C и R) с диэлектриком из испытываемого материала. Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора приведена на рис. 3.1. Плоский конденсатор (блок 2355), между пластинами которого помещен испытываемый диэлектрик, подключается к измерителю параметров RLC E7-22 (блок 533). Блоки питания 218 и 224.1 обеспечивают напряжение питания +12 В для E7-22.

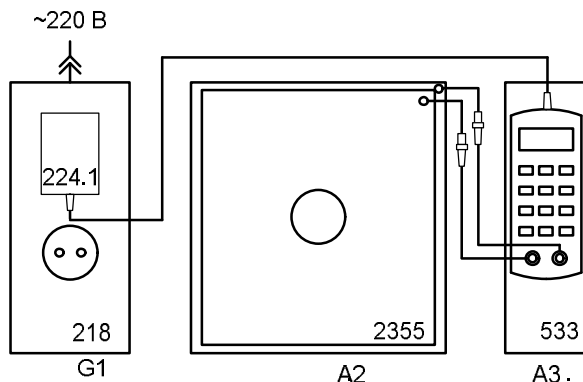


Рис. 3.1. Схема соединений для измерения параметров конденсатора с испытываемым диэлектриком

Емкость конденсатора с исследуемым диэлектриком определяется соотношением (8)

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d},$$

где $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость) вакуума;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость исследуемого диэлектрика;

S — площадь пластин конденсатора в кв. метрах;

d — расстояние между пластинами конденсатора в метрах, равное толщине испытываемого диэлектрика.

В эксперименте учитывается площадь верхней пластины конденсатора. Влиянием краевого эффекта пренебрегаем.

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика измеренная емкость C сравнивается с расчетной емкостью этого конденсатора C_0 без диэлектрика (среда между пластинами — воздух). Отношение емкостей равно относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика. С учетом (3.1) и (3.2) получаем:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S / d}{\varepsilon_0 S / d} = \varepsilon. \quad (3.4)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется для последовательной схемы замещения конденсатора, состоящей из идеального конденсатора с емкостью C и, включенного последовательно с ним, сопротивления R . При измерении на частоте ω .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{1/\omega C}.$$

Отсюда можно определить сопротивление R последовательной схемы замещения конденсатора:

$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}.$$

Перечень используемой в экспериментах аппаратуры

	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A3	Измеритель R-L-C	533	Измерение R, L, C при частоте 120 Гц и 1 кГц
A2	Блок конденсатора	2355	Площадь пластин 790 кв. см
	Набор образцов диэлектриков	600.20	Образцы диэлектриков размером 285x297 мм

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Подключите блок питания 224.1 к блоку «Измеритель R-L-C» (533) и к розетке «220 В» однофазного источника питания G1 (блок 218) в соответствии со схемой 3.1.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель ❶ «Измерителя R-L-C» (533).
- Выберите:

- вид измеряемого параметра — емкость C (кнопка «L/C/R»);
- вспомогательный измеряемый параметр — $\operatorname{tg} \delta D$ (кнопка «Q/D/R»);
- схему замещения элемента — последовательную (кнопка «ПАР/ПОСЛ», «SER» на индикаторе);
- частоту измерения — 120 Гц (кнопка «ЧАСТ»).
- Вложите испытываемый образец диэлектрика между пластинами конденсатора и подключите конденсатор к измерителю RLC, как показано на рис. 3.1. Верхнюю пластину блока конденсатора 2355 необходимо установить примерно по центру нижней пластины с равномерным отступом от краев по всему периметру пластины.
- На расстоянии менее 10...15 см от блока конденсаторов 2355 не должно быть посторонних и электропроводных предметов. **Недопустима подача напряжения от внешних источников на вход прибора и пластины блока конденсатора!**
- Измерьте емкость C и $\operatorname{tg} \delta (D)$ конденсатора 2355 с диэлектриком.
- Вычислите емкость конденсатора без диэлектрика $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$.
Площадь S указана на верхней пластине конденсатора 2355, а расстояние между пластинами d равно толщине диэлектрика, указанной на испытываемом образце.
- Вычислите относительную диэлектрическую проницаемость испытываемого диэлектрика и сопротивление последовательной схемы замещения

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}.$$

- Занесите результаты измерений в табл. 3.1 и повторите измерения для других образцов диэлектриков.
- Выключите питание блока G1 (218).

Таблица 3.1

Образец	C, пФ	tg δ D	ϵ	R, Ом

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Что такое электроемкость уединенного проводника? Какова ее единица измерения?
2. Опишите устройство конденсатора.
3. Чему равна емкость плоского конденсатора?
4. Как направлен вектор напряженности электрического поля в конденсаторе?
5. Чему равна напряженность электрического поля в конденсаторе?
6. Если зарядить каждый из конденсаторов C_{x1} , C_{x2} , C_{x3} от одного и того же источника электрической энергии, будут ли у них одинаковые электроемкости, заряды пластин, разность потенциалов, напряженность электрического поля, объемная плотность энергии электрического поля?
7. Как влияет диэлектрик на напряженность электрического поля в конденсаторе и на электроемкость конденсатора?
8. Чем объясняется воздействие диэлектрика на напряженность электрического поля?
9. Механизм поляризации диэлектриков. Что такое поляризованность?
10. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости?
11. От чего зависит энергия электрического поля в конденсаторе?
12. Чему равна объемная плотность энергии в плоском конденсаторе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: получить экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора $q(u)$ при различных температурах. Рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика $P(E)$, зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля $\varepsilon(E)$, приняв площадь поверхности обкладки конденсатора равной $S = 300 \text{ мм}^2$ и толщину изоляции $d = 0,01 \text{ мм}$.

Основные понятия и определения

Электрический конденсатор — элемент, характеризующийся емкостью. Емкость C определяется отношением заряда q на обкладках конденсатора к напряжению u между ними и зависит от геометрии обкладок и свойств находящегося между обкладками диэлектрика.

$$C = \frac{q}{u}(\Phi). \quad (4.1)$$

Кулон-вольтовая характеристика (КВХ) — зависимость заряда конденсатора от приложенного к нему электрического напряжения.

Большинство диэлектриков, используемых на практике, линейны (их относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \text{const}$).

В этом случае зависимость $q(u)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 4.1 б — *сплошная линия*):

$$C = m_c \text{ tga} = \text{const}. \quad (4.2)$$

Нелинейными свойствами обладают конденсаторы, диэлектрическая проницаемость ε которых является функцией от напряженности электрического поля E в диэлектрике. Такие конденсаторы описываются нелинейной вольт-кулоновой характеристикой — $q(u)$ (рис. 4.1 б — *штриховая линия*), которая обуслов-

лена нелинейным характером зависимости электрического смещения $D(E)$.

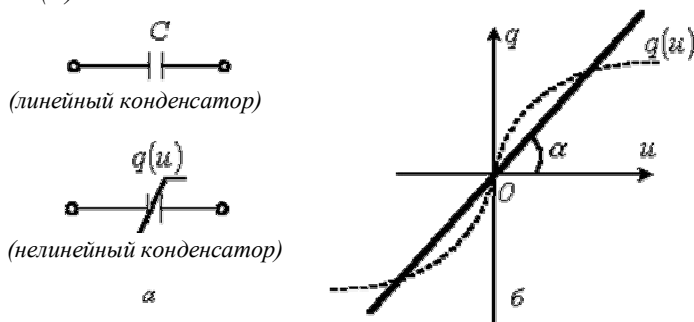


Рис. 4.1. Условное графическое обозначение конденсатора (а), КВХ конденсатора (б)

Электрический ток — скорость изменения заряда. Для конденсаторов с нелинейной емкостью введено понятие дифференциальной емкости C_∂ :

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{du} \cdot \frac{du}{dt}, \quad C_\partial(u) = \frac{dq}{du}. \quad (4.3)$$

$$i = C_\partial(u) \cdot \frac{du}{dt}.$$

Подобными свойствами обладают сегнетоэлектрики, аналогичные по виду характеристикам ферромагнетикам (рис. 4.2 а), обратно смещенные p - n -переходы (рис. 4.2 б).

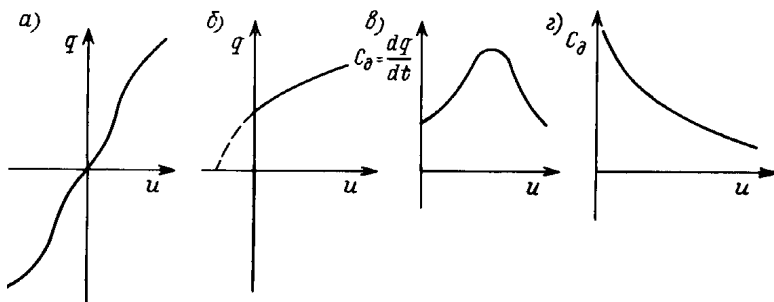


Рис. 4.2. Нелинейные КВХ сегнетоэлектрика (а), обратно смещенного p - n -перехода (б), дифференциальная емкость (в), статическая емкость (г)

Как и другие нелинейные элементы, нелинейные емкости характеризуются *статической емкостью* $C_{ст} = q/u$ и *дифференциальной емкостью* $C_d = dq/du$. Зависимости дифференциальной емкости C_d от напряжения для конденсаторов обоих типов изображены на рис. 4.2 в, г.

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 4.3.

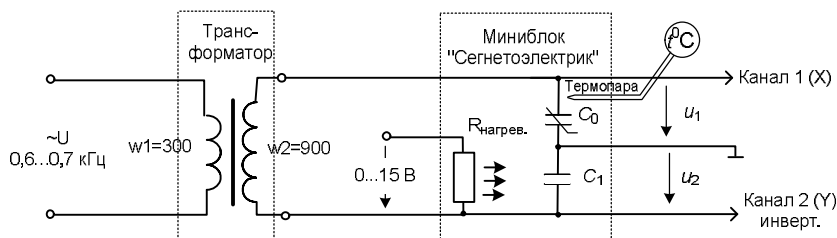


Рис. 4.3. Принципиальная схема для снятия кулон-вольтовой характеристики конденсатора

Синусоидальное напряжение подается через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединенных линейного конденсатора C_1 и нелинейного конденсатора C_0 типа К10-17 с изоляцией из сегнетоэлектрика. (Повышающий трансформатор необходим для достижения насыщения диэлектрика). Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению u_1 :

$$q = C_1 u_1.$$

Напряжение u_1 подается на вертикальный вход осциллографа, а u_2 — на горизонтальный. Сигнал u_1 на осциллографе необходимо инвертировать, чтобы положительному напряжению соответствовало отклонение луча на дисплее вверх. На экране осциллографа появляется зависимость $q(u)$ для нелинейного конденсатора, примерный вид которой для разных температур показан на рис. 4.4. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику $P(E)$.

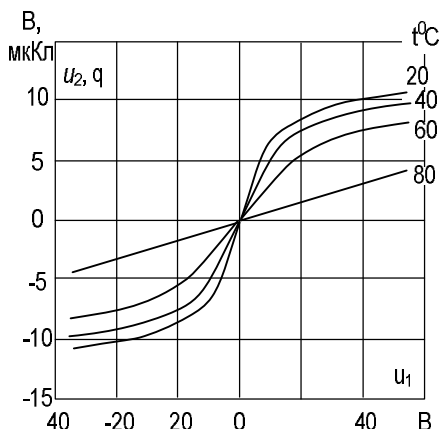


Рис. 4.4. Примерный вид кулон-вольтной характеристики нелинейного конденсатора при разных температурах

Напряженность электрического поля:

$$E = \frac{u_1}{d},$$

где d — толщина диэлектрика.

Вектор электрического смещения:

$$D = \frac{C_1 u_2}{S},$$

где S — площадь обкладок конденсатора.

Поляризованность:

$$P = D - \varepsilon_0 E,$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость пустоты.

Нагревание конденсатора осуществляется специальным резистором $R_{\text{нагрев}}$ от регулируемого источника постоянного напряжения. Измерение температуры производится с помощью термопары мультиметром МУ60Т.

Точка Кюри диэлектрика конденсатора К10-17 лежит в области отрицательных температур, поэтому в данной работе она не определяется.

Для сборки схемы используется наборная панель блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 4.5).

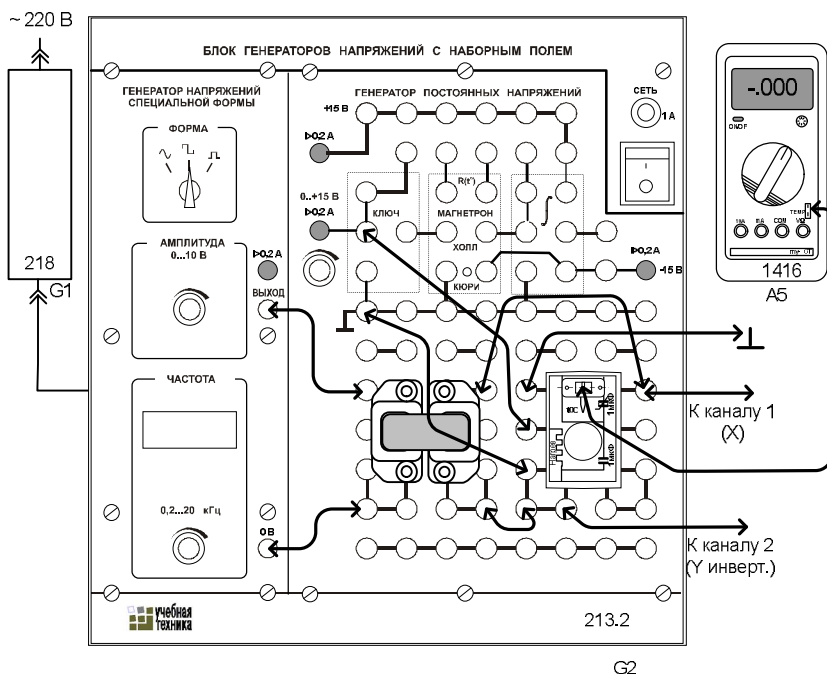


Рис. 4.5. Монтажная схема для снятия кулон-вольтовых характеристик нелинейного конденсатора при разных температурах

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжений	213.2	+15 В, 0...+15 В, ~0...10 В, Л 15В. 0,2...20 кГц
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки «Сегнето-электрик» и «Трансформатор с разъемным сердечником»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф		
	Ноутбук		

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 4.5). ***При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение $\times 10$. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.***
- Ручку регулирования выходного напряжения 0...15 В генератора постоянного напряжения G2 (213.2) поверните против часовой стрелки до упора.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу, а **затем** к ноутбуку. Включите ноутбук и активизируйте программу Осциллограф. (Ярлык  DSO-2090USB на рабочем столе).
- Установите на дисплее по каждому каналу осциллографа множители $\times 10$ и чувствительность 20 В/дел. по первому каналу и 5 В/дел. — по второму.
- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: Wiew — Complete Tools, и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щелкнув на пунктах меню: Wiew — Top Toolbar 1 и Top Toolbar 2 (***Top Toolbar Left оставьте***).
- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: Ch1 --  , Ch2 -- ). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей CH1: Top=**** и CH1: Top=****. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите. (*Top — положительная средневзвешенная амплитуда периодического сигнала*).
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока генераторов напряжений G2.
- Установите частоту синусоидального сигнала 0,6...0,7 кГц и, регулируя амплитуду сигнала, убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух кривых.
- Отрегулируйте развертку так, чтобы на дисплее было изображение одного-двух периодов кривых. (Чувствительность по горизонтали 0,2 мс/дел.). Выведите кривые в центр экрана, сделайте инвертирование второго канала (пункты меню: Channel — CH2 Setting — Invert Off).
- Убедитесь, что сигналы совпадают по фазе, что при регулировании подаваемого синусоидального напряжения они не выходят за пределы экрана, что измеряются «CH1 Top» и «CH2 Top».
- Включите режим X-Y и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора (узкой петли гистерезиса).
- Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 4.1 амплитуды напряжений на нелинейном конденсаторе — U_1 (CH1) и на линейном — U_2 (CH2).
- Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика $P(E)$ и дифференциальную зависимость $\varepsilon(E)$. Выберите масштабы и постройте графики.
- При максимальном значении амплитуды приложенного напряжения сохраните изображение в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте его в отчет.
- Получите кулон-вольтовую характеристику при различных температурах (выбираем четыре температуры в пределах комнатная — максимальная: 25 °C — 80 °C).
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо до упора. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.

- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую в отчет при выбранных значениях температуры.
- После достижения температуры 80 °С отключите нагрев и выключите все используемые блоки.
- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку ×.
- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь.

Таблица 4.1

U_1 , В (горизонтальный канал)	U_2 , В (вертикальный канал)	E , В/м	$D = \frac{C_1 u_1}{S}$ Кл/м ²	$P = D - \varepsilon_0 E$ Кл/м ²	$\varepsilon = \Delta D / (\varepsilon_0 \Delta E)$	$E_{\text{ср}}$, В/м
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Электрический конденсатор линейный и нелинейный. Их особенности.
2. Объясните понятие статической и дифференциальной емкости нелинейного конденсатора.
3. Какие элементы электрической цепи обладают нелинейной КВХ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА И ПОСТРОЕНИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Цель работы: получить экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика; снять экспериментально основную кривую намагничивания; рассчитать и построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu(H)$.

Основные понятия и определения

Магнитные свойства магнетиков характеризуются вектором намагниченности $\vec{I}$ и магнитной восприимчивостью χ или магнитной проницаемостью $\mu = 1 + \chi$. Величины μ и χ безразмерные, а намагниченность I измеряется в $\frac{A}{m}$.

Намагниченностью вещества $\vec{I}$ называется векторная величина, равная суммарному магнитному моменту атомов (молекул) единицы объема вещества:

$$\vec{I} = \frac{\sum_i \vec{P}}{\Delta V}, \quad (5.1)$$

где $\vec{P}_{mi}$ — магнитный момент атома (молекулы).

Понятие магнитного момента $\vec{P}_{mi}$ квантово-механическое. Однако, представление о $\vec{P}_{mi}$ можно дать на простейшем примере. Рассмотрим замкнутый круговой ток (рис. 5.1). Такой круговой ток обладает магнитным моментом P_m , который равен произведению силы тока I на площадь S поверхности, охватываемой замкнутым током, т.е.

$$P_m = IS. \quad (5.2)$$

Единица измерения P_m — Am^2 . Направление вектора $\vec{P}_m$ определяется правовинтовой системой, как показано на рис. 5.1.

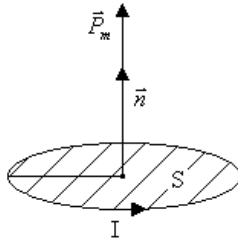


Рис. 5.1. Магнитный момент магнетика

В приближении классической физики электроны в атоме вращаются по круговым орбитам. Они, следовательно, создают электрический ток и, соответственно, обладают орбитальным магнитным моментом $\vec{P}_e$. Кроме того, электрон, вращаясь вокруг собственной оси, обладает собственным (спиновым) магнитным моментом $\vec{P}_s$. Поэтому результирующий магнитный момент равен сумме орбитального и спинового магнитных моментов всех электронов, входящих в атом.

Для изотропного и однородного магнетика намагниченность определяется формулой:

$$\vec{I} = \chi \vec{H}, \quad (5.3)$$

где $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля, $\frac{A}{m}$.

Напряженностью магнитного поля называется векторная физическая величина, равная

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{I}, \quad (5.4)$$

где $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции магнитного поля, которая является силовой характеристикой магнитного поля; единица измерения B — Тл (тесла);

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Ф/м}$ $\frac{\Gamma H}{m}$ — магнитная проницаемость вакуума.

Магнетики — это вещества, способные намагничиваться под действием внешнего магнитного поля H . В зависимости от величины магнитной восприимчивости χ магнетики делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

Вещества, у которых $\chi < 0$, а $|\chi| \ll 1$, т.е. $|\chi|$ порядка 10^{-8} , называются *диамагнетиками*. К ним относятся все инертные газы, Cu, Ca, Zn, Au, Ag, Sb, Si, P, Hg, вода, бензолы и др.

Диамагнетики намагничиваются противоположно внешнему магнитному полю H . Кривая намагничивания показана на рис. 5.2. Диамагнитные атомы не обладают результирующим магнитным моментом ($\vec{P}_m = 0$).

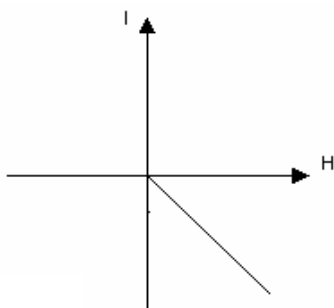


Рис. 5.2. Кривая намагничивания диамагнетика

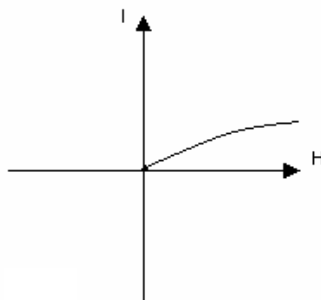


Рис. 5.3. Кривая намагничивания парамагнетика

Если $1 > \chi > 0$, но χ порядка $10^{-5} - 10^{-3}$, то такие вещества называются *парамагнетиками*. Это O_2 , H_2 , лутеций Lu, иттрий Y, щелочные металлы, Mg, Al, Ti, V, Mo, многие химические соединения, FeC l_2 , MnO и другие. Атомы, ионы, молекулы этих элементов обладают результирующим магнитным моментом ($\vec{P}_m \neq 0$). Кривая намагничивания показана на рис. 5.3.

У парамагнетиков магнитная восприимчивость зависит от температуры:

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (5.5)$$

где C — постоянная Кюри.

Парамагнетики намагничиваются вдоль магнитного поля H .

У *ферромагнетиков* магнитная восприимчивость велика и достигает величины до 10^6 . Это железо Fe, никель Ni, кобальт Co, гадолиний Gd, редкоземельные металлы (РЗМ) — гольмий Ho, диспрозий Dy, тербий Tb и др., а также их сплавы, химические соединения, например: SmCo_5 , TbFe_2 , Fe+Ni+Co и другие.

Ферромагнетики обладают необычными физическими свойствами:

а) они имеют нелинейную сложную кривую намагничивания (рис. 5.4), которая называется петлей гистерезиса: H_c — **коэрцитивная сила**, это величина напряженности обратного магнитного поля, при котором намагничённость I ферромагнетика равна нулю; I_R называется **остаточной намагничённостью**;

б) намагничённость насыщения I_s зависит от температуры (рис. 5.5); T_c — температура Кюри — такая температура, ниже которой ферромагнетик находится в ферромагнитном состоянии, а выше — в парамагнитном (т.е. в размагничённом) состоянии;

в) магнитная восприимчивость χ ферромагнетика зависит от магнитного поля H (рис. 5.6) и температуры (рис. 5.7). Выше температуры Кюри T_c зависимость восприимчивости определяется по формуле:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}; \quad (5.6)$$

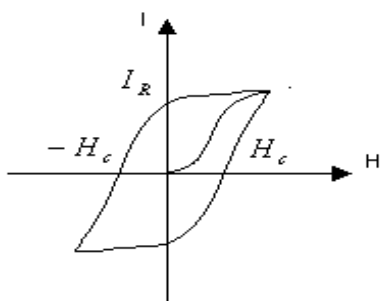


Рис. 5.4. Кривая намагничивания ферромагнетика

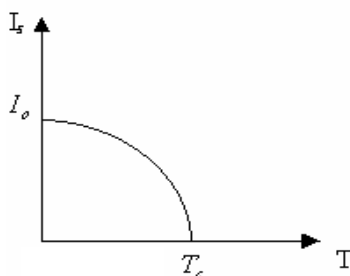


Рис. 5.5. Температура Кюри T_c ферромагнетика

При перемагничивании ферромагнетика затрачивается энергия W , $\frac{Дж}{м^3}$. Величина энергии, затрачиваемой на совершение одного цикла перемагничивания единицы объема ферромагнетика, определяется выражением:

$$W = \oint H dB. \quad (5.7)$$

Из рис. 5.4 видно, что интеграл $\oint H dB$ пропорционален площади S петли гистерезиса, т.е.

$$\oint H dB \sim S_n. \quad (5.8)$$

Эта энергия идет на нагревание ферромагнетика.

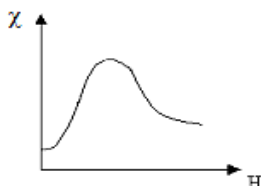


Рис. 5.6. Зависимость магнитной восприимчивости χ ферромагнетика от магнитного поля H

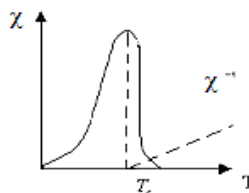


Рис. 5.7. Зависимость магнитной восприимчивости χ ферромагнетика от температуры T

У магнито-мягких ферромагнетиков H_c мала, приблизительно меньше 10^4 А/м, и петля узкая, поэтому при перемагничивании они нагреваются меньше. Используются они, главным образом, для изготовления магнитных сердечников, трансформаторов и дросселей. Примером магнито-мягких ферромагнетиков является электротехническая сталь, никель — Ni, пермаллой — Ni (40%) + Si (0,15%) + Mn (0,8%) + Fe (53%) и другие.

У магнито-жестких ферромагнетиков H_c очень велика, достигает до 10^6 А/м, петля широкая; они характеризуются большей магнитной энергией. Используются для изготовления постоянных магнитов, аудио- и видеокассет, памяти ЭВМ и др. Пример магнитотвердых ферромагнетиков — SmCo_5 , Fe_3O_4 , TbFe_2 , ферриты-гранаты, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Me}_2\text{O}_3$, где Me = Y, Gd, Tb, Dy, Ho и т.д.

Необычные магнитные свойства (т.е. ферромагнетизм) у ферромагнетиков обусловлены наличием в них доменов.

Магнитный домен — это микрообласть размером порядка $10^{-3} \div 10^{-2}$ см, в которой спиновые магнитные моменты электронов ориентированы параллельно, так что данная область спонтанно (самопроизвольно) намагничена (рис. 5.8), т.е. магнитный домен можно представить как микроскопический магнит.

При определенных условиях (минимум полной энергии) ферромагнетик разбит на большее число доменов. Между доменами существует доменная граница. При температуре выше T_c и в отсутствии внешнего магнитного поля из-за теплового движения магнитные домены располагаются беспорядочно, так что в целом ферромагнетик находится в размагниченном состоянии. Под действием внешнего поля H домены ориентируются вдоль поля и ферромагнетик намагничивается.

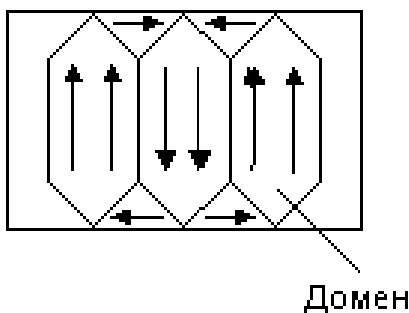


Рис. 5.8. Структура ферромагнетика

Кривая намагничивания. Процесс намагничивания ферромагнитного материала можно изобразить в виде кривой намагничивания (рис. 5.9 а), которая представляет собой зависимость магнитной индукции B от напряженности приложенного магнитного поля H . Так как величина H определяется силой тока, посредством которого намагничивается ферромагнитный материал, эту кривую можно рассматривать как зависимость индукции от намагничивающего тока I .

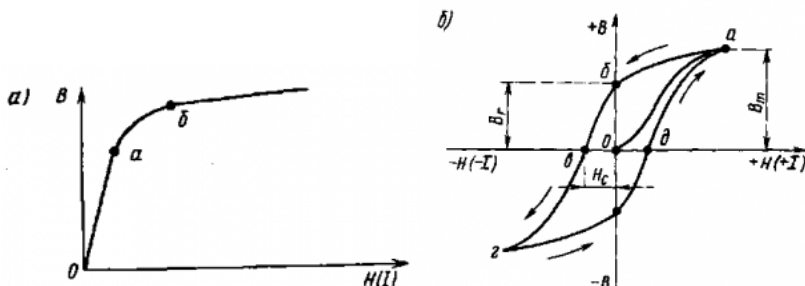


Рис. 5.9. Кривая намагничивания ферромагнитного материала (а) и петля гистерезиса (б)

На рис. 5.9 б представлена зависимость $\vec{B}(H)$ — изменение индукции при намагничивании и размагничивании ферромагнитного материала (при изменении намагничивающего тока I или напряженности магнитного поля H). Как видно из графика, при одних и тех же значениях напряженности магнитного поля магнитная индукция, полученная при размагничивании ферромагнитного тела (участок а-б-в), будет больше индукции, полученной при намагничивании (участки О-а и б-а). Когда напряженность поля (намагничивающий ток) будет доведена до нуля, индукция в ферромагнитном материале не уменьшится до нуля, а сохранит некоторое значение B_r , соответствующее отрезку Об. Это значение называется *остаточной индукцией*. Явление отставания, или запаздывания, изменений магнитной индукции от соответствующих изменений напряженности магнитного поля называется *магнитным гистерезисом*, а сохранение в ферромагнитном материале магнитного поля после прекращения протекания намагничивающего тока — *остаточным магнетизмом*.

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Зависимость $B(H)$ — кривая намагничивания ферромагнитного материала — при циклическом перемагничивании имеет вид петли. Она может быть снята с помощью осциллографа.

Если на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение $U_x \sim H$, а на вертикально отклоняющие пластины — напряжение $U_y \sim B$, то на экране осциллографа появится петля гистерезиса.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 5.10.

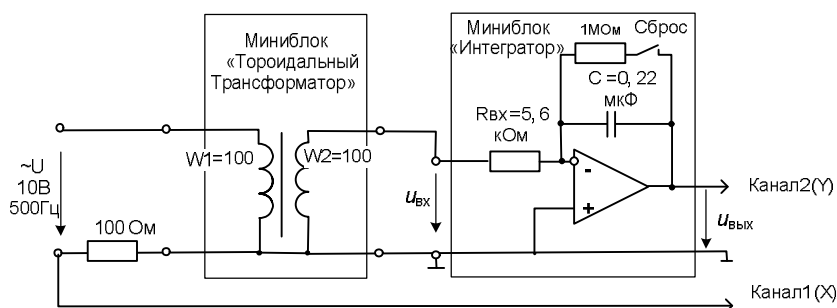


Рис. 5.10. Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса

Исследуемые образцы ферромагнетиков представляют собой кольцевые сердечники, на которые намотаны по 2 обмотки (100 витков каждая). Они заключены в миниблоки: «Трансформатор тороидальный» (феррит М2000НМ), «ГМ14ДС» и «ГМ11ДС» (по обозначению марки ферромагнетика). Аналогично может сниматься петля гистерезиса кольцевого сердечника из феррита М6000НМ, который помещен в миниблоке «Точка Кюри». Сечение магнитопровода и длина средней линии указаны на этикетках миниблоков. Первичная обмотка подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К вторичной обмотке подключен интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{вых} = \frac{1}{R_{ex}C} \int u_{ex}(t) dt = \frac{1}{R_{ex}C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{ex}C} \Phi = \frac{w_2}{R_{ex}C} BS, \quad (5.9)$$

где R_{ex} и C — параметры интегратора, S — сечение сердечника а B — магнитная индукция.

Для исключения интегрирования постоянной составляющей входного сигнала переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}} C}{w_2 S} = u_{\text{вых}}. \quad (5.10)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = \frac{i w}{l}, \quad (5.11)$$

где l — длина средней линии сердечника.

Напряжение с шунта 100 Ом подается на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение $u_{\text{вых}}$ с выхода интегратора — на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряженности магнитного поля, а второе — магнитной индукции, на экране осциллографа отображается в определенном масштабе зависимость $B(H)$. Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 5.11). Причем интегратор устанавливается в наборную панель точно на отведенное для него место. Тогда к нему автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В.

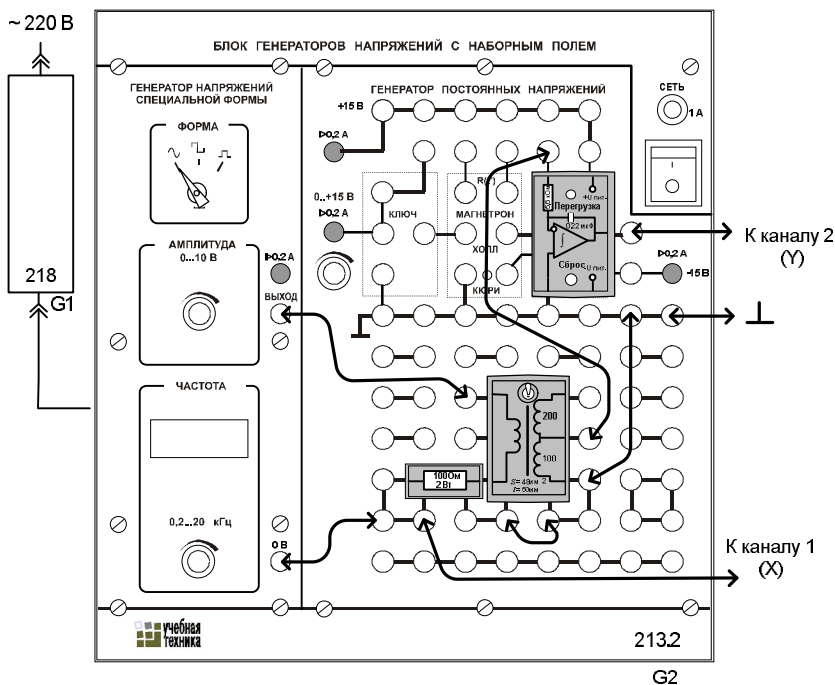


Рис. 5.11. Монтажная схема для снятия петли гистерезиса

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	± 15 В, 0...+15 В, ~0...10 В, $\square$ 15В, 0,2...20 кГц
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки: «Трансформатор торроидальный», «Интегратор», «ГМ11ДС», «ГМ14ДС», «Резистор 100 Ом»
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой рис. 5.11. *При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение $\times 1$. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров*
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу, а **затем** к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO-2090 USB» на рабочем столе Windows и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развертку так, чтобы на дисплее было 1, 2 периода синусоиды. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.
- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: View — Complete Tools и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щелкнув на пунктах меню: View — Top Toolbar 1 и Top Toolbar 2. (*Top Toolbar Left оставьте*).
- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: Ch1 -- , Ch2 -- ). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей CH1: Top = **** и CH1: Top = ****. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите.

(*T_{ор}* — положительная средневзвешенная амплитуда периодического сигнала).

- Включите режим X-Y (канал 1 — X, канал 2 — Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. При необходимости измените чувствительность.
- Запишите в таблицу 5.1 исходные значения амплитуды напряжения на шунте (CH1) и амплитуды выходного напряжения интегратора (CH2).
- Уменьшая шаг за шагом намагничивающий ток до нуля, снимите зависимость амплитуды выходного напряжения интегратора от амплитуды тока (Ток определяется как $U_{\text{шунта}}/R_{\text{шунта}}$).
- Рассчитайте соответствующие значения магнитной индукции, напряженности магнитного поля и постройте график $B(H)$ на рис. 5.12.
- Вычислите относительную магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n}, \quad (5.12)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума.

- На рис. 5.13 постройте график $\mu(H)$, относя каждое вычисленное значение μ к среднему значению напряженности:

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}. \quad (5.13)$$

Повторите опыт, вычисления и построения для трансформаторов «ГМ11ДС» и «ГМ14ДС». При замене миниблока с трансформатором не забудьте соединить вторичную обмотку с интегратором в соответствии с рисунком на этикетке миниблока.

- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку $\times$.

- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь.

Таблица 5.1

$I_{\text{макс}}, \text{мА}$	$U_{\text{макс}}, \text{мВ}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ	$H_{\text{ср}}, \text{А/м}$
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					

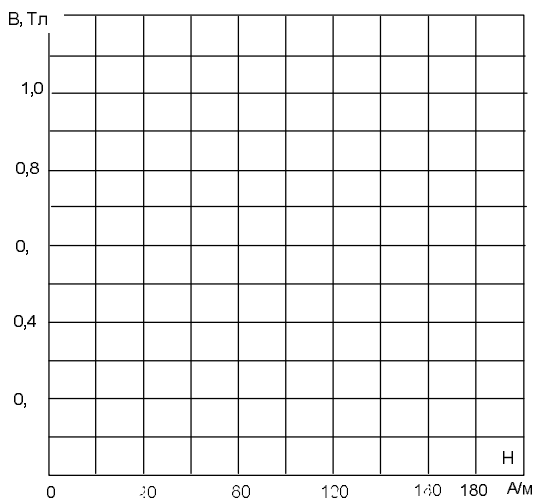


Рис. 5.12. Зависимость $B(H)$

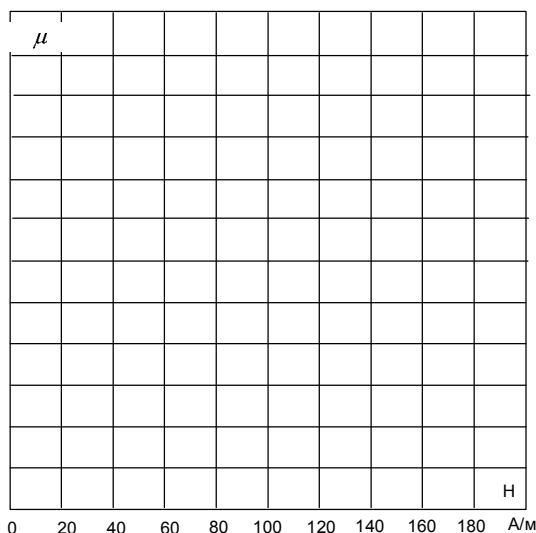


Рис. 5.13. Зависимость $\mu(H)$

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относят к классу ферромагнетиков?
2. В чем причина сильных магнитных свойств ферромагнетиков?
3. Что такое предельный гистерезисный цикл намагничивания? Какие параметры из него определяют?
4. Что такое магнитная проницаемость, какие существуют ее виды?
5. Как происходит процесс намагничивания ферромагнетиков?
6. Как и от каких факторов зависит магнитная проницаемость?
7. Какие потери возникают в ферромагнетике при его периодическом перемагничивании?
8. Что такое магнито-мягкие и магнито-жесткие ферромагнетики? Которые из них обладают меньшими потерями и почему?
9. Как практически можно разделить потери в ферромагнетике по видам?
10. Как получить на экране осциллографа характеристику намагничивания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ

Цель работы: получить экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика при различных температурах, определить температуру Кюри и намагниченность насыщения.

Основные понятия и определения

Точка Кюри (температура Кюри) — температура *фазового перехода* II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (магнитной — в *ферромагнетиках*, электрической — в *сегнетоэлектриках*, кристаллохимической — в упорядоченных сплавах). Названа по имени П.Кюри. При температуре T ниже точки Кюри T_K ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью и определенной магнитно-кристаллической симметрией. В точке Кюри ($T = T_K$) интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его самопроизвольной намагниченности («магнитного порядка») и изменения симметрии, в результате ферромагнетик становится *парамагнетиком*.

Наличие температуры Кюри связано с разрушением при $T > T_K$ упорядоченного состояния в магнитной подсистеме кристалла — параллельной ориентации магнитных моментов. Для никеля температура Кюри равна 360 °С. Если подвесить образец никеля вблизи пламени свечи так, чтобы он находился в поле сильного постоянного магнита, то не нагретый образец может располагаться горизонтально, сильно притягиваясь к магниту (рис. 6.1). По мере нагрева образца и достижения температуры $T > T_K$ ферромагнитные свойства у никеля исчезают, и образец никеля падает. Остыв до температуры ниже точки Кюри, образец вновь притянется к магниту. Нагревшись, вновь падает и т.д., колебания будут продолжаться все время, пока горит свеча.

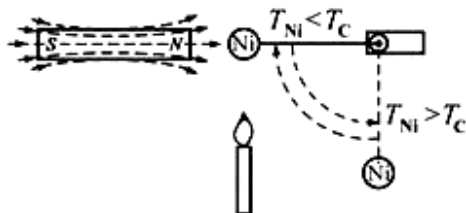


Рис. 6.1. Схема исследования температуры Кюри

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 6.2.

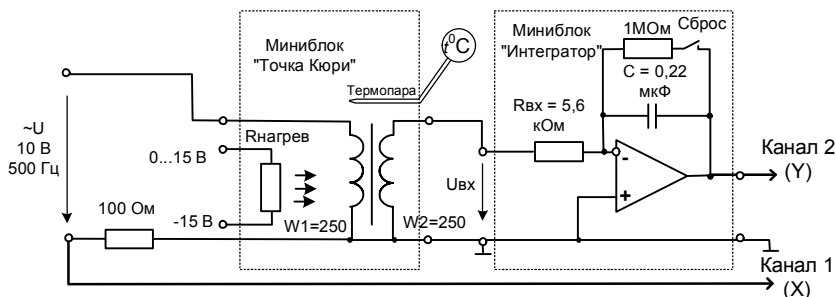


Рис. 6.2. Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Точка Кюри». На сердечнике имеются две одинаковых катушки по 250 витков. Одна из них подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К другой катушке подключен интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int u_{\text{ex}}(t) dt = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} BS, \quad (6.1)$$

где R_{ex} и C — параметры интегратора, S — поперечное сечение сердечника феррита, B — магнитная индукция.

Для исключения интегрирования постоянной составляющей входного сигнала переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике равна:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{ex} C}{w_2 S} u_{вых} \quad (6.2)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = iw/l, \quad (6.3)$$

где l — длина средней линии сердечника.

Напряжение с шунта 100 Ом подается на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение $u_{вых}$ с выхода интегратора — на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряженности магнитного поля, а второе — магнитной индукции, на экране осциллографа отображается в определенном масштабе зависимость $B(H)$.

Нагревание образца осуществляется встроенным в миниблок «Точка Кюри» резистором $R_{нагрев}$. Напряжение на нем можно регулировать от 15 до 30 В с помощью ручки управления регулируемого источника постоянного напряжения. С увеличением напряжения увеличивается яркость свечения сигнальной лампочки, встроенной в миниблок.

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 6.3). Причем миниблоки «Интегратор» и «Точка Кюри» устанавливаются в наборную панель точно на отведенное для них место. Тогда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В, а к нагревателю миниблока «Точка Кюри» подается напряжение — 15 В. Кроме того, вторичная катушка трансформатора, встроенного в миниблок, соединяется с входом интегратора. Это существенно уменьшает количество внешних соединений.

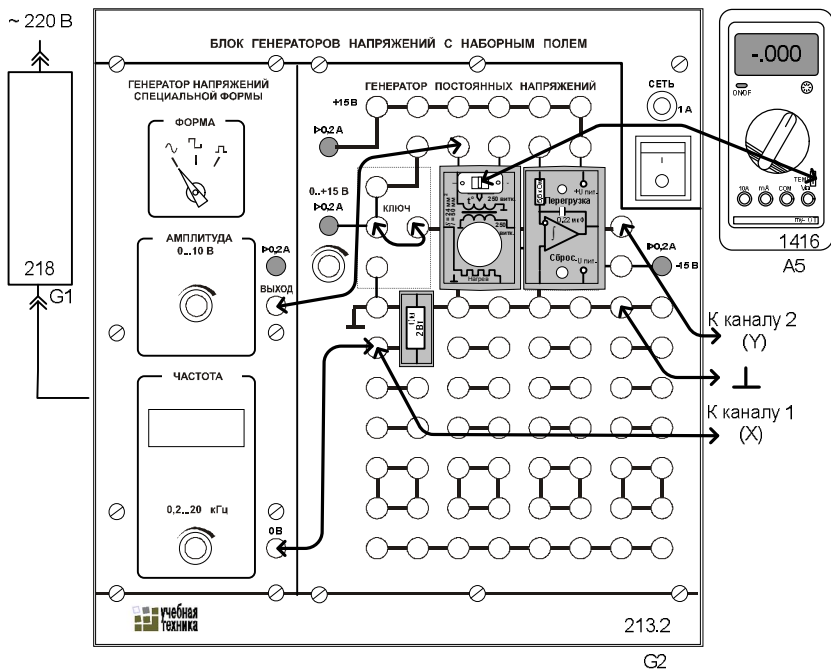


Рис. 6.3. Монтажная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\sim 220 \text{ В} / 16 \text{ А}$
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	$\pm 15 \text{ В}$, $0 \dots +15 \text{ В}$, $\sim 0 \dots 10 \text{ В}$, $\perp 15 \text{ В}$. $0,2 \dots 20 \text{ кГц}$
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки: «Точка Кюри», «Интегратор» и «Резистор 100 Ом»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 6.3). ***При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение $\times 1$. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров.***
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу, а затем к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов A1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15 В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO-2090 USB» на рабочем столе Windows и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развертку так, чтобы на дисплее было 1, 2 периода сигналов. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.
- Включите режим X-Y (канал 1 — X, канал 2 — Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. Для этого уменьшайте ток до тех пор, пока не исчезнут однолинейные концы петли

гистерезиса. При необходимости сместите изображение в центр экрана.

- Сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File) или перерисуйте ее в отчет.
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. *Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.*
- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую при выбранных значениях температуры.
- Дождитесь нагрева до температуры точки Кюри (примерно 110–120 °С) и сразу же отключите или убавьте нагрев. Сохраните новое изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File) и перерисуйте ее в отчет. Запишите температуру точки Кюри.

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются магнитными?
2. Что такое магнитный момент системы, намагниченность?
3. Дайте определение магнитной индукции и напряженности магнитного поля.
4. Что такое диамагнетики, парамагнетики? Приведите примеры.
6. Что такое ферромагнетики? Приведите примеры.
7. Как определяется магнитная восприимчивость вещества, какова ее величина и какова ее связь с магнитной проницаемостью?
8. Как изменяется намагниченность диа-, пара- и ферромагнетиков от напряженности внешнего магнитного поля?
9. Что такое магнитный гистерезис?
10. Петля гистерезиса. От чего зависит вид петли гистерезиса?
11. Что такое размагничивающий фактор? От чего зависит его величина?

12. Что такое магнитомягкие и магнитожесткие вещества?
13. Что такое домены?
14. Как ведут себя ферромагнетики при нагревании?
15. Что такое антиферромагнетики?
16. Объясните по принципиальной схеме работу установки.
17. Осциллограф, применяемый в данной установке, является двухлучевым. Является ли это условие обязательным?
18. Что может служить источником магнитного поля?
19. Что такое соленоид? Какие параметры соленоида следует изменить, чтобы увеличить магнитное поле внутри него?
20. В каком магнитном поле — переменном или постоянном — снимается петля гистерезиса?
21. Что такое частная петля гистерезиса? как снять частную петлю?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Цель работы: получить экспериментально начальную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить зависимости $B(H)$ и $\mu(H)$.

Основные понятия и определения

Разделение веществ на диа-, пара- и ферромагнетики носит в значительной степени условный характер, т.к. первые два вида веществ отличаются по магнитным свойствам от вакуума менее чем на 0,05%. На практике все вещества обычно разделяют на ферромагнитные (ферромагнетики) и неферромагнитные, для которых относительная магнитная проницаемость μ может быть принятой равной 1,0.

Ферромагнетики имеют магнитную проницаемость, превышающую проницаемость вакуума в тысячи раз. Поэтому все электротехнические устройства, использующие магнитные поля для преобразования энергии, обязательно имеют **конструктивные элементы, изготовленные из ферромагнитного материала и предназначенные для проведения магнитного потока**. Такие элементы называются **магнитопроводами**.

Ферромагнетики обладают сильно выраженной нелинейной зависимостью $\vec{B}(\vec{H})$. Функции $\vec{B}(\vec{H})$ имеют особое значение: с их помощью можно исследовать электромагнитные процессы в цепях, содержащих элементы, в которых магнитный поток проходит в ферромагнитной среде. Эти функции бывают двух видов: **кривые намагничивания** и **петли гистерезиса**.

Если в процессе намагничивания довести напряженность поля до некоторого значения, а затем начать уменьшать, то уменьшение индукции будет происходить медленнее, чем при намагничивании, и новая кривая будет отличаться от первоначальной.

Кривая изменения индукции при увеличении напряженности поля для предварительно полностью размагниченного вещества называется **начальной кривой намагничивания**. На рис. 7.1 она показана утолщенной линией.

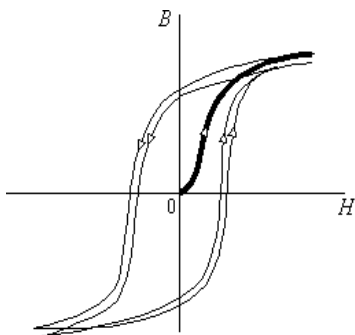


Рис. 7.1. Кривая намагничивания ферромагнетика

После нескольких (около 10) циклов изменения напряженности от положительного до отрицательного максимальных значений зависимость $B = f(H)$ начнет повторяться и приобретет характерный вид симметричной замкнутой кривой, называемой **петлей гистерезиса**. Гистерезисом называют отставание изменения индукции от напряженности магнитного поля. Явление гистерезиса характерно вообще для всех

процессов, в которых наблюдается зависимость какой-либо величины от значения другой не только в текущем, но и в предыдущем состоянии, т.е. $B_2 = f(H_2, H_1)$, где H_2 и H_1 , соответственно, — текущее и предыдущее значения напряженности.

Петли гистерезиса можно получить при различных значениях максимальной напряженности внешнего поля H_m (рис. 7.2).

Основная кривая намагничивания практически совпадает с начальной кривой. Петля гистерезиса, полученная при максимальной напряженности поля H_m (рис. 7.2), соответствующей насыщению ферромагнетика, называется **предельным циклом**.

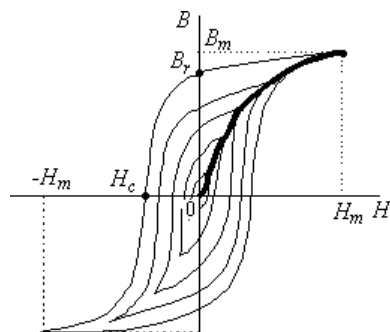


Рис. 7.2. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

Для предельного цикла устанавливают также значения индукции B_r при $H = 0$, которое называется **остаточной индукцией**, и значение H_c при $B = 0$, называемое **коэрцитивной силой**. Коэрцитивная (удерживающая) сила показывает, какую напряженность внешнего поля следует

приложить к веществу, чтобы уменьшить остаточную индукцию до нуля.

Форма и характерные точки предельного цикла определяют свойства ферромагнетика. Вещества с большой остаточной индукцией, коэрцитивной силой и площадью петли гистерезиса (кривая 1 на рис. 7.3) называются **магнито-жесткими**. Они используются для изготовления постоянных магнитов. Вещества с малой остаточной индукцией и площадью петли гистерезиса (кривая 2 на рис. 7.3) называются **магнито-мягкими** и используются для изготовления магнитопроводов электротехнических устройств.

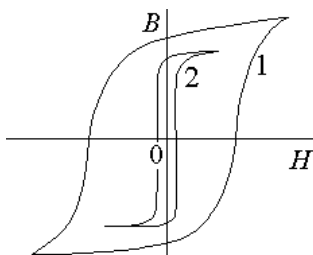


Рис. 7.3. Кривые намагничивания

Важнейшими видами кривых намагничивания являются следующие:

I. Кривая первого (первоначального) намагничивания (КПН) получается при намагничивании ферро- или ферритмагнетика из полностью размагниченного состояния монотонно возрастающим от нуля магнитным полем H , причем направление последнего относительно намагничиваемого тела остается неизменным.

На КПН можно выделить пять участков, на каждом из которых преобладает определенный механизм намагничивания. Участок I (рис. 7.4) соответствует обратимым (упругим) смещениям доменных границ: здесь

$$\vec{M} = \mu_a \vec{H},$$

где μ_a — начальная магнитная восприимчивость.

В области Рэлея (участок 2) имеют место наряду с обратимыми также необратимые процессы смещения, и зависимость $M(H)$ здесь квадратичная.

Наиболее крутой участок 3 КПН соответствует максимальной восприимчивости и связан с необратимыми смещениями доменных границ. В области приближения к насыщению (участок 4) основную роль играют процессы вращения M_s к направлению

намагничивающего поля. Наконец, участок 5 характеризуется слабым ростом намагниченности и соответствует парапроцессу.

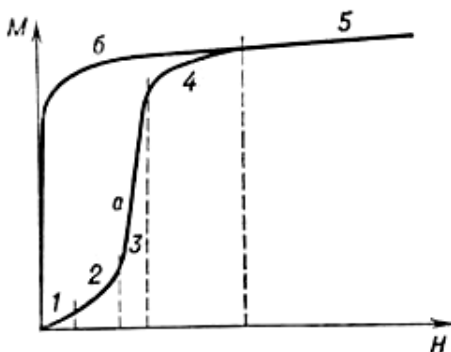


Рис. 7.4. Кривая первоначального намагничивания ферромагнетика

II. При циклическом изменении магнитного поля между крайними значениями H_1 и H_2 кривые $\vec{M} = (\vec{H})$ сначала несколько изменяются от цикла к циклу, но постепенно становятся стабильными. Их называют кривыми циклического перемагничивания или петлями *гистерезиса магнитного*. При $H_1 = -H_2$ петля гистерезиса симметрична, в других случаях — асимметрична. Наиболее симметричная петля гистерезиса называется предельной и является важной характеристикой магнитных материалов.

III. Безгистерезисная (идеальная) кривая намагничивания изображает зависимость $\vec{M} = (\vec{H})$ для таких состояний, которые при каждом значении H являются наиболее устойчивыми, т.е. обладают наименьшей свободной энергией. Эти состояния могут быть получены в результате наложения на постоянное поле намагничивания переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой.

IV. Основная (коммутационная) кривая намагничивания — геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса. Основная и безгистерезисная кривые намагничивания, в отличие от КПН, фиксируют только избранные магнитные состояния, не показывая действительных процессов намагничивания.

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

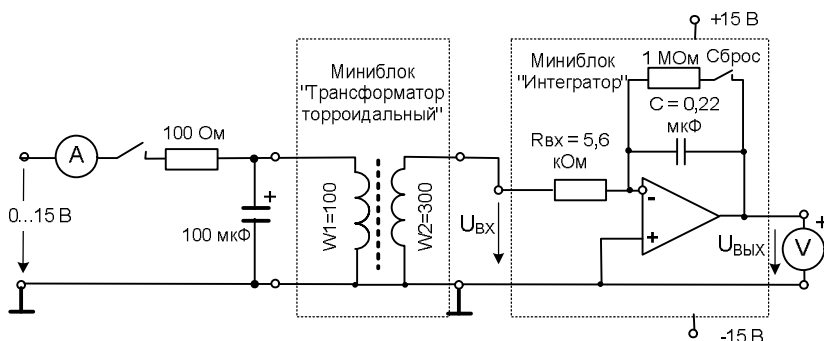


Рис. 7.5. Принципиальная схема для снятия начальной кривой намагничивания

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетках миниблока «Трансформатор торроидальный». На сердечнике имеются две катушки. Катушка $w_1 = 100$ витков подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения и служит для создания магнитного поля в сердечнике. Направление тока можно изменять тумблером на миниблоке. К другой катушке ($w_2 = 300$ витков) подключен интегратор для измерения магнитного потока.

Начальная кривая намагничивания снимается путем включения катушки w_1 на различные по величине постоянные токи. Ток регулируется величиной подаваемого напряжения и ограничивается резистором 100 Ом на входе. Конденсатор 100 мкФ, включенный параллельно катушке, служит для ограничения перенапряжений и создания колебательного контура при отключении цепи. При выключении цепи в катушке возникает затухающий колебательный процесс, и сердечник размагничивается.

При включении цепи магнитный поток изменяется от 0 до $+\Phi$ и в процессе этого изменения во вторичной катушке наводится ЭДС:

$$e(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7.1)$$

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt + u_{\text{вых}}(0), \quad (7.2)$$

где R_{ex} и C — параметры интегратора, а $u_{\text{вх}}(t) = e(t)$.

На интеграторе имеется переключатель «Сброс», с помощью которого перед началом интегрирования устанавливается $u_{\text{вых}}(0) = 0$. Поэтому:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int_0^t w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int_0^{+\Phi} d\Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} BS, \quad (7.3)$$

где S — сечение сердечника, а B — магнитная индукция.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}}. \quad (7.4)$$

Напряженность магнитного поля определяется по закону полного тока:

$$H = \frac{I_1 w_1}{l}, \quad (7.5)$$

где l — длина средней линии сердечника.

Включая катушку на различные по величине токи и измеряя выходное напряжение интегратора $u_{\text{вых}}$ и ток I_1 , можно вычислить начальную кривую намагничивания $B(H)$.

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 7.6). Причем микроблок «Интегратор» устанавливается в наборную панель точно на отведенное для него место. Тогда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В.

Для измерения тока используется мультиметр, а для измерения выходного напряжения интегратора — USB осциллограф с ноутбуком.

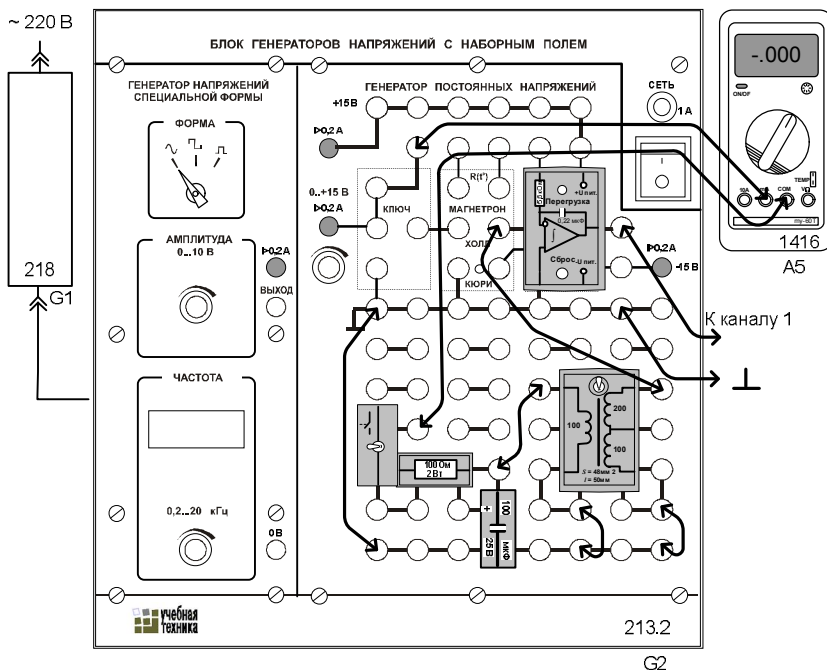


Рис. 7.6. Монтажная схема для снятия начальной кривой намагничивания

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	± 15 В, 0...+15 В, ~0...10 В, Л 15В. 0,2...20 кГц
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки: «Трансформатор торроидальный», «Интегратор», «ГМ11ДС», «ГМ14ДС», «Резистор 100 Ом», «Конденсатор 100 мкФ», «Тумблер»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

Порядок выполнения работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 7.6). ***При подключении осциллографа аттенюаторы пробника-делителя установите в положение $\times 1$. Для подключения пробника-делителя к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.***
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу, а **затем** к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов A1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15 В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора и включите генератор. Переключатель на интеграторе должен быть в положении «Сброс».
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO-2090 USB» на рабочем столе Windows. Установите развертку по горизонтали 10 мс/дел., включите инвертирование первого канала (пункты меню: Channel — CH1 Setting — Invert Off) и переключите первый канал на «открытый вход» (с постоянной составляющей). Второй канал можете отключить.
- Включите тумблер на входе исследуемой цепи и установите первое значение тока I_1 , например, 5 мА. Включая и выключая тумблер, убедитесь по осциллографу, что на выходе появляется напряжение, причем, при включении и отключении цепи возникает колебательный процесс.
- Отрегулируйте чувствительность по оси Y так, чтобы броски напряжения при включении и выключении не выходили за пределы экрана.

- При выключенном токе переведите переключатель «Сброс» в нижнее положение и сразу же включите ток тумблером на входе цепи. На выходе интегратора произойдет бросок напряжения, который нужно сразу зафиксировать (записать, запомнить или измерить с помощью курсора и горизонтальной оси, как описано в Руководстве пользователя). В дальнейшем напряжение будет медленно меняться в ту или другую сторону вследствие интегрирования токов утечки и неточности балансировки усилителя. *Для большей достоверности повторите этот опыт несколько раз и запишите в таблицу среднее либо наиболее часто повторяющееся значение выходного напряжения.* Переведите тумблер в положение «Сброс».
- Установите следующее значение тока, выключите ток и повторите опыт при новом значении тока. При этом, возможно, понадобится изменение масштаба по оси Y.
- Постепенно увеличивайте ток намагничивания и повторяйте опыт при каждом его значении, записывая результаты в табл. 7.1.
- Вычислите магнитную индукцию и напряженность магнитного поля.
- Вычислите магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума.

- Постройте зависимости $B(H)$ (рис. 7.7) и $\mu(H)$ (рис. 7.8), относя каждое вычисленное значение μ к среднему значению напряженности

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

Таблица 7.1

$I_{\text{макс}}, \text{мА}$	$U_{\text{макс}}, \text{мВ}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ	$H_{cp}, \text{А/м}$
10					
20					

30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					

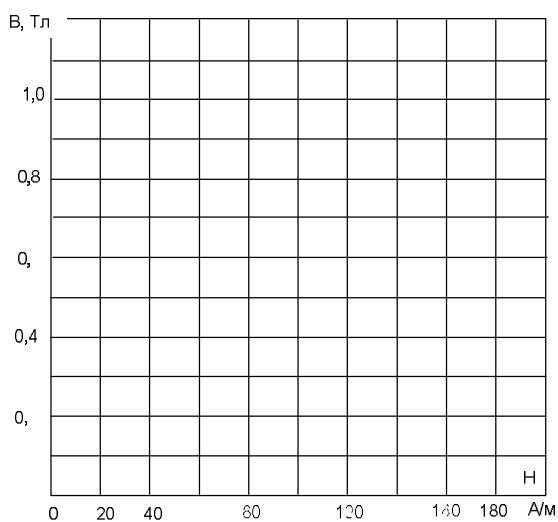


Рис. 7.7. Экспериментальные кривые $B(H)$

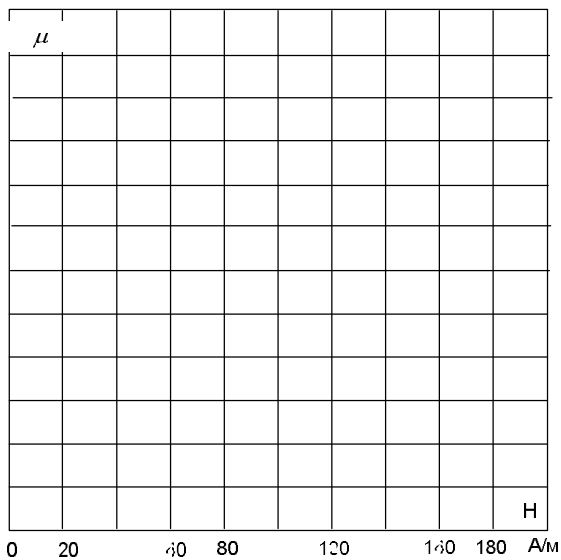


Рис. 7.8. Экспериментальные кривые $\mu(H)$

Выводы:

Контрольные вопросы

1. Объяснить смысл создания в магнитных цепях магнитопровода.
2. Применение магнито-мягких и магнито-твердых материалов.
3. Объяснить причины нелинейности зависимости $B(H)$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 1

Фундаментальные физические константы

Абсолютный ноль температуры	$t = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Атомная единица массы	$1\text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11}\text{ Н.м}^2/\text{кг}^2$
Заряд α -частицы	$q = 2e = 3,204 \cdot 10^{-19}\text{ Кл}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}\text{ м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}$
Магнитный момент протона	$\mu_p = 1,4106171 \cdot 10^{-26}\text{ Дж/Тл}$
Магнитный момент электрона	$\mu_e = 9,28483 \cdot 10^{-24}\text{ Дж/Тл}$
Масса α -частицы	$m_\alpha = 6,644 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}\text{ кг}$
Постоянная Ридберга	$R_n = 1,097 \cdot 10^7\text{ 1/м}$
Объем 1-го моля идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{моль}$
Нормальные условия: атмосферное давление	$p_0 = 101325\text{ Н/м}^2$
температура	$T = 273\text{ К}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23}\text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23}\text{ Дж/К}$
Постоянная Вина	$b = 2,90 \cdot 10^{-3}\text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34}\text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Фарадея	$F = 96,48456 \cdot 10^3\text{ Кл/моль}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8\text{ м/с}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31441\text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Элементарный заряд	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}\text{ Кл}$
Удельный заряд электрона	$e/m = 1,76 \cdot 10^{11}\text{ Кл/кг}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85418783 \cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$
Электрон-вольт	$1\text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$
Удельная теплоемкость воды	$C = 4,19 \cdot 10^3\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
Удельная теплота плавления льда	$\lambda = 333,7 \cdot 10^3\text{ Дж/кг}$

Удельная теплота парообразования воды	$r = 2,256 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$
Масса Земли	$M_3 = 5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Земли	$R_3 = 6,371 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Солнца	$M_c = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$R_c = 6,955 \cdot 10^8 \text{ м}$
Масса Луны	$M_{\text{л}} = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Радиус Луны	$R_{\text{л}} = 1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$

Таблица 2

Размерности физических величин в системе СИ

Название и обозначение величины	Единица измере- ния	Обозначение			Формула
		русское	между- народное		
Длина	L	метр	м	m	L
Масса	m	килограмм	кг	kg	m
Время	t	секунда	с	s	t
Сила электрического тока	I	ампер	A	A	I
Термодинамическая температура	T	кельвин	K	K	T
Сила света	I _v	кандела	кд	cd	J
Площадь	S	кв. метр	м ²	m ²	S
Объем	V	куб. метр	м ³	m ³	V
Частота	f	герц	Гц	Hz	f = 1/t
Скорость	v	—	м/с	m/s	v = dL/dt
Ускорение	a	—	м/с ²	m/s ²	ε = d ² L/dt ²
Плоский угол	φ	радиан	рад	rad	φ
Угловая скорость	ω	—	рад/с	rad/s	ω = dφ/dt
Угловое ускорение	ε	—	рад/с ²	rad/s ²	ε = d ² φ/dt ²
Сила	F	ньютон	Н	N	F = ma
Давление	P	паскаль	Па	Pa	P = F/S
Работа, энергия	A	джоуль	Дж	J	A = F·L
Импульс	p	—	кг·м/с	kg·m/s	p = m·v
Мощность	N	ватт	Вт	W	N = A/t
Электрический заряд	q	кулон	Кл	C	q = I·t
Электрическое на- пряжение, электри- ческий потенциал	U	вольт	В	V	U = A/q

Напряженность электрического поля	E	—	В/м	V/m	$E = U/L$
Электрическое сопротивление	R	ом	Ом	Ω	$R = U/I$
Электрическая емкость	C	фарада	Ф	F	$C = q/U$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл	T	$B = F/I \cdot L$
Напряженность магнитного поля	H	—	А/м	A/m	
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб	Wb	$\Phi = B \cdot S$
Индуктивность	L	генри	Гн	H	$L = U \cdot dt/dI$

Температурный коэффициент сопротивления — это отношение относительного изменения сопротивления к изменению температуры.

Таблица 3

Температурный коэффициент сопротивления α 20 °С

Металл	α ($10^{-3}/K$)	Металл	α ($10^{-3}/K$)
Алюминий	4,3	Ртуть	0,92
Алюминиевый провод	3,7	Серебро	3,8
Вольфрам	4,1	Константан	0,03
Золото	3,9	Манганин	0,02
Медь	3,8	Нейзильбер	0,33
Никель	6,5	Никелин	0,23
Платина	3,9	Нихром	0,25

Таблица 4

Значения диэлектрической проницаемости некоторых веществ

Вещество	Химическая формула	Условия измерения	Характерное значение ϵ_r
Вакуум	—	—	1
Воздух	—	Нормальные условия, 0,9 МГц	$1,00058986 \pm 0,00000050$

Углекислый газ	CO ₂	Нормальные условия	1,0009
Тефлон	—	—	2,1
Нейлон	—	—	3,2
Полиэтилен	C ₂ H ₄ или	—	2,25
Полистирол	[-CH ₂ -C(C ₆ H ₅)H-] _n	—	2,4-2,7
Каучук	—	—	2,4
Битум	—	—	2,5-3,0
Сероуглерод	CS ₂	—	2,6
Парафин	C ₁₈ H ₃₈ – C ₃₅ H ₇₂	—	2,0-3,0
Бумага	—	—	2,0-3,5
Эбонит	—	—	2,5-3,0
Плексиглас (оргстекло)	—	—	3,5
Кварц	SiO ₂	—	3,5-4,5
Бакелит	—	—	4,5
Бетон	—	—	4,5
Фарфор	—	—	4,5-4,7
Стекло	—	—	4,7 (3,7-10)
Стеклотекстолит FR-4	—	—	4,5-5,2
Гетинакс	—	—	5-6
Слюда	—	—	7,5
Резина	—	—	7
Поликор	98% Al ₂ O ₃	—	9,7
Алмаз	—	—	5,5-10
Поваренная соль	NaCl	—	3-15
Графит	C	—	10-15
Керамика	—	—	10-20
Кремний	Si	—	11,68
Аммиак	NH ₃	20 °C	17
Спирт этиловый	C ₂ H ₅ OH или CH ₃ -CH ₂ -OH	—	27
Метанол	CH ₃ OH	—	30
Этиленгликоль	HO-CH ₂ -CH ₂ -OH	—	37
Глицерин	C ₃ H ₅ (OH) ₃	0 °C	41,2
		20 °C	47
		25 °C	42,5
Вода	H ₂ O	200 °C	34,5
		20 °C	81

		0 °C	88
Плавиковая к-та	HF	0 °C	83,6
Формамид	HCONH ₂	20 °C	84
Серная кислота	H ₂ SO ₄	20-25 °C	84-100
Перекись водорода	H ₂ O ₂	-30 °C — +25 °C	128
Синильная кислота	HCN	(0-21 °C)	158
Двуокись титана	TiO ₂	—	86-173
Титанат кальция	CaTiO ₃	—	170
Титанат стронция	SrTiO ₃	—	310
Барий-стронций титанат	—	—	500
Титанат бария	BaTiO ₃	(20-120 °C)	1250-10000
Цирконат-титанат свинца	(Pb[Zr _x Ti _{1-x}])O ₃ , 0 < x < 1)		500-6000
Сополимеры	—	—	до 100000

Таблица 5

Свойства магнитномягких ферромагнитных материалов

Материалы магнито- мягкие	Состав (%) остальное железо и примеси	Относит. началь- ная про- ницае- мость	Относит. макси- мальная проницае- мость	Коэффи- циентная сила, А/м	Индукция насыще- ния, Тл
Железо чистое	0,05 (прим)	10 000	200 000	4	2,15
Железо техниче- ское	0,2 (прим)	150	5000	80	2,15
Железо кремнистое	3 Si	1 500	40 000	8	2,0
Сталь мяг- кая	0,2 C	120	2 000	140	2,12
Пермаллой	78,5 Ni	8 000	100 000	4	1,08
Пермен- дюр	50 Co	800	5 000	160	2,45
Кобальт	99 Co	70	250	800	1,79
Никель	99 Ni	110	600	56	0,61
Феррит	Ni — Zn	1000	2 000	8	0,25

Таблица 6

Свойства магнито-жестких ферромагнитных материалов

Материалы магнито-жесткие	Состав (%), остальное железо	Коэрцитивная сила, А/м	Остаточная индукция, Тл
Сталь углеродистая	0,9 С; 1 Mn	4000	1,0
Сталь вольфрамовая	0,4 С; 6 W	5200	1,05
Сталь кобальтовая	1,0 С; 3 Co; 4 Cr; 0,4 Mn	6400	1,0
Альнико	19 Ni; 10 Al; 18 Co; 3 Cu	52 000	0,9
Магнико	13,5 Ni; 9 Al; 24 Co; 3 Cu	40 000	1,23
Платина — железо	78 Pt	120 000	0,6
Платина — кобальт	77 Pt; 23 Co	320 000	0,5

Таблица 7

Характеристики некоторых металлов

Материал	Удельное сопротивление при 20 °С, Ом·мм²/м	ТКС, %/°С	Температура плавления, °С	Плотность, г/см³
Алюминий	0,028	0,49	660	2,7
Бронза фосфорстая	0,1150	0,4	900	8,8
Золото	0,024	0,37	1060	19,3
Латунь	0,03...0,06	0,2	900	8,5
Медь электротех- ническая	0,0175	0,4	1080	8,9
Никель	0,07	0,6	1450	8,8
Олово	0,115	0,42	230	7,3
Платина	0,1	0,3	1770	21,4
Свинец	0,21	0,4	330	11,4
Серебро	0,016	0,38	960	10,5
Сталь	0,098	0,62	1520	7,8
Уголь	0,33...1,85	0,06	—	—
Хром	0,027	—	—	6,6
Цинк	0,059	0,35	420	7,0

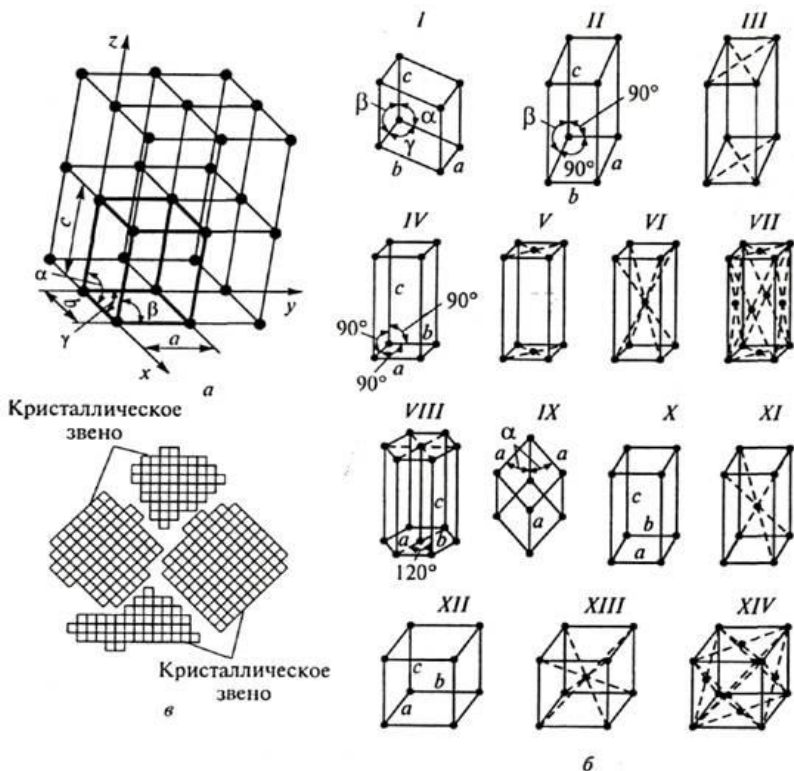


Рис. 1. Пространственные решетки шести кристаллических систем, соответствующие таблице

Таблица 8

Пространственные решетки кристаллических систем

Кристаллическая система	Пространственная решетка		Соотношения между осевыми углами и осевыми единицами
1. Триклинная	I	Простая	$a \neq b \neq c$; $\gamma \neq \beta \neq \alpha = 90^\circ$
2. Моноклинная	II III	Простая Базоцентрированная	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta 90^\circ$

3. Ромбоэдрическая (ортодромическая)	IV V VI VII	Простая Базоцентрированная Объемоцентрированная Гранецентрированная	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. Гексагональная	VIII IX	Простая Ромбоэдрическая	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
5. Тетрагональная	X XI	Простая Объемоцентрированная	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. Кубическая	XII XIII XIV	Простая Объемоцентрированная Гранецентрированная	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Таблица 9

Законы Кирхгофа и Ома для магнитных цепей

Наименование закона	Аналитическое выражение закона	Формулировка закона
Первый закон Кирхгофа	$\sum \Phi = 0$	Алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитопровода равна нулю
Второй закон Кирхгофа	$\sum F = \sum U_M = \sum HI$	Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС, действующих в контуре
Закон Ома	$U_M = \Phi R_M$, где $R_M = l / \mu_0 \mu S$	Падение магнитного напряжения на участке магнитопровода длиной l равно произведению магнитного потока и магнитного сопротивления R_M участка

Сформулированные законы и понятия магнитных цепей позволяют провести формальную аналогию между основными величинами и законами, соответствующими электрическим и магнитным цепям, которую иллюстрирует таблица 10.

Таблица 10

**Аналогия величин и законов для электрических
и магнитных цепей**

Электрическая цепь	Магнитная цепь
Ток I, A	Поток $\Phi, Bб$
ЭДС E, B	МДС (НС) F, A
Электрическое сопротивление $R, Ом$	Магнитное сопротивление $R_M, Гн^{-1}$
Электрическое напряжение U, B	Магнитное напряжение U_M, A
Первый закон Кирхгофа: $\sum I = 0$	Первый закон Кирхгофа: $\sum \Phi = 0$
Второй закон Кирхгофа: $\sum E = \sum U$	Второй закон Кирхгофа: $\sum F = \sum U_M$
Закон Ома: $U = IR$	Закон Ома: $U_M = \Phi R_M$

Десятичные кратные и дольные единицы образуют с помощью стандартных приставок СИ.

Таблица 10

Десятичные кратные и дольные единицы

Кратные				Дольные			
величина	название	обозначение		величина	название	обозначение	
10^1	дека	да	da	10^{-1}	деци	д	d
10^2	гекто	г	h	10^{-2}	санти	с	c
10^3	кило	к	k	10^{-3}	милли	м	m
10^6	мега	М	M	10^{-6}	микро	мк	μ
10^9	гига	Г	G	10^{-9}	нано	н	n
10^{12}	тера	Т	T	10^{-12}	пико	п	p
10^{15}	пета	П	P	10^{-15}	фемто	ф	f
10^{18}	экса	Э	E	10^{-18}	атто	а	a
10^{21}	зетта	З	Z	10^{-21}	zepto	з	z
10^{24}	иотта	И	Y	10^{-24}	иокто	и	y

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
ОСНОВЫ ТЕОРИИ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	20
Определение температурного коэффициента сопротивления (ТКС)	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	30
Определение удельного сопротивления проводника	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	36
Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков (изоляционных материалов)	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	42
Исследование поляризационной характеристики диэлектриков	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5	50
Исследование петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6	64
Исследование петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7	71
Исследование начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости	71
ПРИЛОЖЕНИЕ	82

Учебное издание

Мироненко Виктор Павлович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 23.12.2013
Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов
Гарнитура Times. Усл. печ. листов 5,75
Тираж 300 экз. Заказ 1488

*Отпечатано в Издательстве
Нижневартковского государственного университета
628615, Тюменская область, г.Нижневартовск, ул.Дзержинского, 11
Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru*