

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Методические указания
к проведению лабораторных работ № 1 - 9
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
всех форм обучения

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.315.5/.6(076.5)

ББК 31.23-5*я73

Э45

Р е ц е н з е н т :

Н.И. Покинтелица - д-р. техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Пищевые технологии и оборудование»

Составители: С.М. Братан, А.О. Харченко, А.С. Часовитина, Т.В. Стадник

Э45 Электротехнические материалы: методические указания к проведению лабораторных работ № 1 - 9 для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Севастопольский государственный университет, Политехнический институт; сост.: С.М. Братан, А.О. Харченко, А.С. Часовитина [и др.]. – Севастополь: СевГУ, 2025. – 90 с. – Текст: электронный.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении лабораторных работ.

Предназначены для учебно-методического обеспечения дисциплины «Электротехнические материалы».

УДК 621.315.5/.6(076.5)

ББК 31.23-5*я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Автоматизация и технология машиностроения», протокол № 12 от 20 июня 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Проводники, полупроводники.....	4
Лабораторная работа № 1. Изучение температурной зависимости сопротивления проводников и резисторов.....	18
Лабораторная работа № 2. Контактные явления и термоэлектродвижущая сил.....	22
Лабораторная работа № 3. Изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников.....	25
Лабораторная работа № 4. Фотопроводимость.....	29
2. Диэлектрики.....	37
Лабораторная работа № 5. Измерение зависимости угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости диэлектрика от температуры.....	53
Лабораторная работа № 6. Измерение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь активных диэлектриков.....	56
3. Магнитные материалы.....	61
Лабораторная работа № 7. Основная кривая намагничивания ферромагнетик.....	72
Лабораторная работа № 8. Изучение свойств ферромагнетика при помощи петли гистерезиса.....	77
Лабораторная работа № 9. Определение точки Кюри.....	83
Список использованных источников.....	90

1. ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

Теоретическая часть

Все вещества по электрическим свойствам разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. К проводникам относятся металлы, обладающие малым удельным сопротивлением – менее 10^{-6} Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников обычно лежит в пределах $10^6 \dots 10^{14}$ Ом·м. Материалы, у которых величина удельного сопротивления больше 10^{14} Ом·м, считаются диэлектриками. Полупроводниками является ряд элементов III – VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (B, Ge, Si, As, Te ...), а также большое число химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC ...). В зависимости от внешних условий (температуры, давления) одно и то же вещество может проявлять разные электрические свойства. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком виде – проводник.

Зонная теория даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно современной зонной теории твёрдых тел свободные электроны внутри твёрдого тела так же, как и в атомах, могут иметь только некоторые фиксированные значения энергии, т.е. энергия электронов квантуется. Разрешённые уровни энергии при объединении атомов в кристалл образуют совокупность близко расположенных уровней – «разрешённые» зоны, разделённые «запрещёнными» зонами. Каждая разрешённая зона сохраняет наименование уровней, из которых она образована, например, 1s, 2s, 2p и так далее.

Зона, образованная из энергетических уровней самых удалённых от ядра атома валентных электронов, называется валентной зоной. Это самая верхняя из зон, заселённых электронами при температуре $T = 0$ К (-273 °C). Следующая, «пустая» разрешенная энергетическая зона, называется в полупроводниках зоной проводимости. Энергетические зоны валентных электронов для металлов, диэлектриков и полупроводников и их заполнение при $T = 0$ К представлены на рис. 1.1. Клеточками обозначены занятые уровни

энергии. Горизонтальные линии – свободные от электронов разрешённые уровни энергии.

Верхние разрешённые зоны разных веществ могут быть заполнены электронами частично или полностью, а также могут быть совершенно свободными от электронов.

Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. Такими являются валентные зоны полупроводников и диэлектриков при абсолютном нуле температуры (рис. 1.1). При этом согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины.

У металлов при $T = 0$ К валентная зона заполнена частично (рис. 1.1). Например, в кристалле щелочного металла натрия $_{11}\text{Na}$ в валентной зоне 3s электронами заполнена только половина уровней.

Ширина запрещённой зоны между зоной проводимости и валентной зоной при абсолютном нуле температуры называется энергией активации ΔW полупроводника (рис. 1.1). Энергия активации численно равна работе, которую необходимо совершить электрону при его переходе из валентной зоны в зону проводимости. Энергия активации измеряется в электрон-вольтах (эВ) и составляет у полупроводников $0,1 \dots 2$ эВ, у диэлектриков больше 4 эВ.

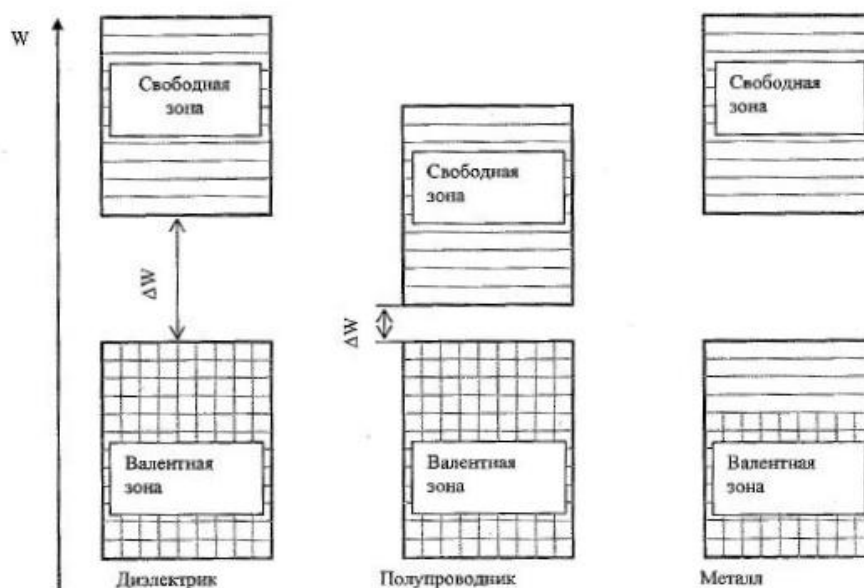


Рис 1.1. Энергетические уровни различных типов материалов

Чтобы в веществе при наложении электрического поля возник электрический ток, электроны должны начать двигаться направленно. Возникновение тока сопровождается увеличением энергии каждого электрона (к энергии теплового движения добавляется энергия направленного движения). В металлах электрон, получив за счет электрического поля дополнительную энергию на пути свободного пробега, переходит на более высокий уровень энергии в валентной зоне. Освободившийся уровень занимает электрон, расположенный ниже на «энергетической лестнице» и т.д. – возникает электрический ток.

В диэлектриках и полупроводниках электрон не может взять энергию от поля, поскольку, приняв её, он должен занять более высокий уровень, который оказывается либо запрещенным, либо занятым. Поэтому при абсолютном нуле и полупроводники, и диэлектрики являются изоляторами, т.е. не пропускают электрический ток.

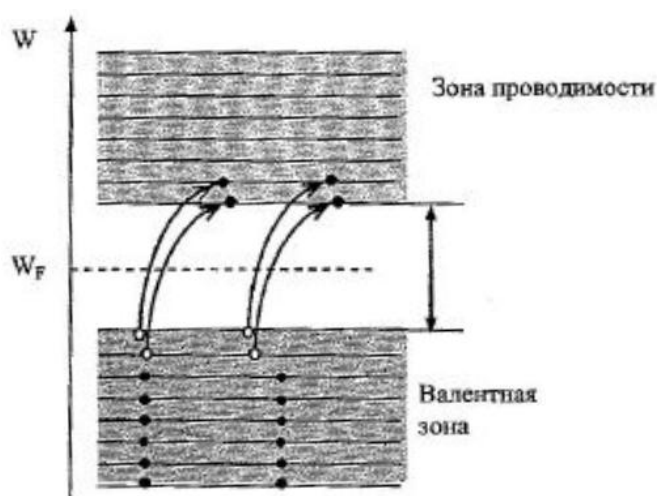


Рис. 1.2. Зоны энергетических уровней полупроводников

При повышении температуры энергия теплового движения электронов увеличивается (их средняя энергия теплового движения $\langle \varepsilon \rangle = 1,5kT$), и уже при температурах порядка 100 К некоторые электроны в полупроводниках за счет этой энергии могут перейти с верхних уровней заполненной валентной зоны в зону проводимости (рис. 1.2). В диэлектриках вероятность такого перехода очень мала, так как у них ширина запрещённой зоны значительно

больше, чем у проводников. Следовательно, в полупроводниках те валентные электроны, которые перешли в зону проводимости, получают возможность направленного движения под действием электрического поля – возникает электронная проводимость. В валентной зоне на верхних уровнях, где были электроны, перешедшие в зону проводимости, появляются свободные места – дырки, и оставшиеся в валентной зоне электроны тоже получают способность воспринимать энергию направленного движения от электрического поля – возникает дырочная проводимость.

В соответствии с распределением Больцмана концентрации n_e свободных электронов (перешедших в зону проводимости) меньше концентрации n_0 электронов, оставшихся в валентной зоне, поскольку потенциальная энергия свободных электронов на ΔW больше потенциальной энергии электронов, связанных с атомом:

$$n_e = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (1.1)$$

где $e = 2,718$; T – абсолютная температура, К; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К.

В рассмотренном нами полупроводнике концентрация подвижных дырок равна концентрации свободных электронов. Такой полупроводник называется электронно-дырочным, а его проводимость – собственной проводимостью. Собственной проводимостью обладают очень чистые элементы 4-й группы таблицы Менделеева (германий, кремний).

При наличии в германии или кремнии небольшого количества атомов примесей с другой валентностью баланс между концентрацией свободных электронов и дырок нарушается, и образуются полупроводники с преимущественным типом проводимости. Так, если примесью является элемент 5-й группы таблицы Менделеева (сурьма Sb, мышьяк As), то образуется избыток свободных электронов, и получается полупроводник с электронной проводимостью (n -типа). Если в качестве примеси присутствуют атомы 3-й группы (индий In, бор B), то образуется недостаток свободных электронов, и полу-

чается полупроводник с дырочной проводимостью (*p*-типа). Энергия активации примесных полупроводников значительно меньше ширины запрещённой зоны чистого полупроводника.

При отрыве электрона в атоме полупроводника образуется свободное место – дырка. Если теперь в полупроводнике создать электрическое поле, то дырка может переместиться в направлении силовых линий, если это свободное место займёт дрейфующий против поля электрон. Поэтому дырка подобна положительному заряду, равному по величине заряду электрона. Значит при затрате энергии ΔW образуются два свободных заряда, на создание одного носителя тока затрачивается половина энергии ΔW , и концентрация всех носителей тока будет определяться по формуле

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (1.2)$$

От концентрации свободных зарядов зависит удельная проводимость σ , обратная удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.3)$$

Удельная проводимость металлов не зависит от напряженности электрического поля, значение которой может изменяться в довольно широких пределах, что полностью соответствует закону Ома (дифференциальная форма записи):

$$j = \sigma E, \quad (1.4)$$

где j – плотность тока, А/м²; E – напряженность электрического поля, В/м.

Сопротивление проводника простейшим способом определяют, используя закон Ома для участка электрической цепи. Для этого нужно измерить вольтметром разность потенциалов U на концах проводника и амперметром силу тока I в проводнике и поделить одно на другое. Этот метод измерений (по току и напряжению) называют техническим. Однако при таком способе измерения вносятся систематические ошибки, величина которых за-

висит от сопротивлений измерительных приборов и величины измеряемых сопротивлений.

Действительно, при включении приборов по схеме на рис. 1.3 показания вольтметра соответствуют напряжению на сопротивлении ($U_V = U$), но показания амперметра соответствуют не току через сопротивление, а сумме токов через проводник и вольтметр:

$$I_A = I_V + I. \quad (1.5)$$

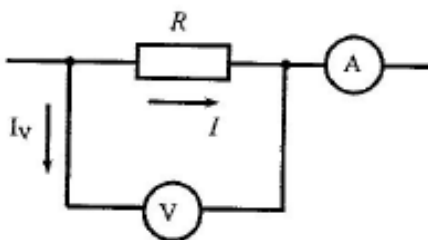


Рис. 1.3. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

При включении по схеме на рис. 1.4 показания амперметра соответствуют току через сопротивление ($I_A = I$), но вольтметр показывает не напряжение на сопротивлении, а суммарное напряжение на сопротивлении и амперметре:

$$U_V = IR + IR_A. \quad (1.6)$$

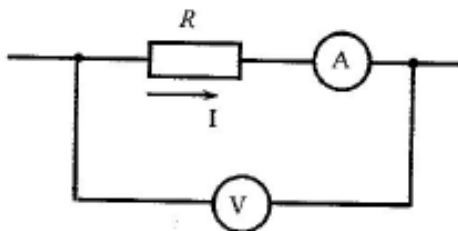


Рис. 1.4. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

Из выражений (1.5) и (1.6) следует, что для уменьшения погрешностей, вносимых при подключении приборов, сопротивление амперметра должно

быть малым, а сопротивление вольтметра – большим. Данный метод лежит в основе работы омметров. Прибор прикладывает известную разность потенциалов к измеряемому сопротивлению и измеряет протекающий ток.

Мостовой метод измерения сопротивления позволяет избавиться от ошибок, вносимых электроизмерительными приборами, так как здесь эти приборы используются не для измерения силы тока и напряжения, идущих в дальнейшие расчеты, а только в качестве чувствительных индикаторов, работающих либо в режиме постоянного показания, либо, чаще, в режиме отсутствия тока (нуль – метод).

Активное сопротивление зависит от формы и размеров проводника:

$$R = \int_0^l \rho \frac{dl}{S}. \quad (1.11)$$

Для однородного проводника с поперечным сечением S и длиной l :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.12)$$

Удельное электрическое сопротивление $\rho = RS/l$ является характеристикой материала проводника.

Полагая электрическое поле внутри проводника однородным, выразим напряжение U через напряжённость E и длину проводника:

$$U = El. \quad (1.13)$$

Закон Ома в дифференциальной форме записи:

$$j = \sigma E, \quad (1.14)$$

где $j = I/S$ – плотность тока в проводнике.

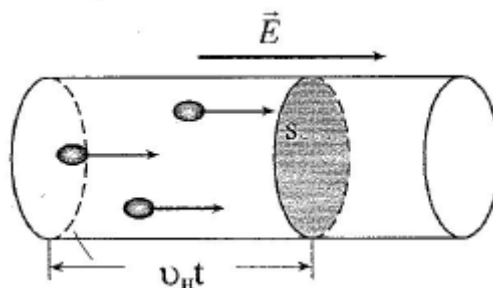


Рис. 1.5. Движение электронов через сечение проводника

С другой стороны, плотность тока может быть выражена через концентрацию n свободных зарядов и скорость v_n , их направленного движения, которая определяется напряжённостью электрического поля внутри проводника.

Пусть каждый носитель имеет заряд e , тогда весь заряд q , перенесённый через поперечное сечение проводника за время t , будет равен Ne , где N – число зарядов, прошедших за это время сквозь выделенное сечение (рис. 1.5). Если средняя скорость направленного движения v_n , то за время t сечение S пересекут лишь те носители, которые находились не дальше, чем на расстоянии $v_n t$ от него. Число носителей N пропорционально их концентрации n и объёму S элемента проводника:

$$N = n v_n t S. \quad (1.15)$$

Тогда перенесённый заряд определится по формуле

$$q = eN = e n v_n t S. \quad (1.16)$$

Сила тока в проводнике численно равна заряду, протекающему за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} = e n v_n S. \quad (1.17)$$

Из определения плотности тока $j = I/S$ и уравнения (1.17) получим:

$$j = n e v_n. \quad (1.18)$$

Из уравнений (1.14) и (1.18) следует, что средняя скорость направленного движения носителей тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля E :

$$v_n = \frac{\sigma E}{n e} = b E. \quad (1.19)$$

Коэффициент пропорциональности $b = \frac{\sigma E}{n e}$ называют подвижностью носителей зарядов. Подвижность зависит от типа носителей (у электронов она существенно выше, чем у дырок) и от их взаимодействия с атомами вещества.

Приравнивая правые части формул (1.18) И (1.14) и подставляя v_n в (1.19) получаем зависимость удельной проводимости от характеристик носителей тока:

$$\sigma = neb, \quad (1.20)$$

где n – концентрация носителей, e – заряд электрона, b – подвижность носителей.

В металлах (проводниках) концентрация носителей не зависит от температуры, а в полупроводниках и диэлектриках она с ростом температуры быстро увеличивается – это основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика.

Подвижность носителей с ростом температуры уменьшается, так как электроны чаще сталкиваются с ионами кристаллической решётки, амплитуда колебаний которых растёт с увеличением температуры. При постоянстве n это ведёт к уменьшению проводимости, и сопротивление проводников слабо увеличивается при повышении температуры:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1.21)$$

где t – температура в градусах; R_0 сопротивление проводника при 0 °С, α – температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС).

Коэффициент α называют температурным коэффициентом удельного сопротивления. Он показывает относительное изменение первоначального сопротивления при нагревании его на один градус:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}. \quad (1.22)$$

Для металлов значение α достаточно велико ($4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), а у большинства сплавов – значительно меньше.

Из формулы следует, что для определения температурного коэффициента удельного сопротивления металла необходимо знать сопротивление металла R_0 при 0 °С И R_t при некоторой температуре t °С. График зависимости сопротивления от температуры представлен на рис. 1.6.

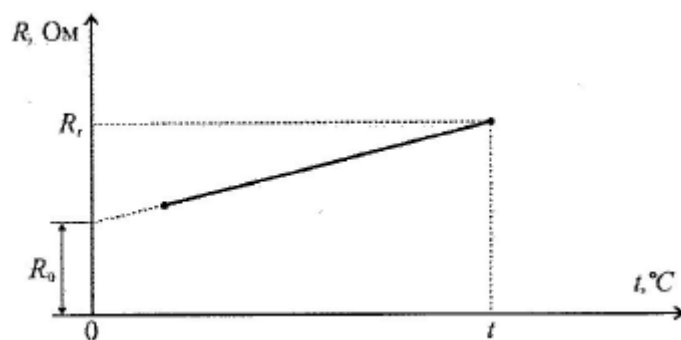


Рис. 1.6. График зависимости сопротивления от температуры

Согласно формуле (1.22) график имеет вид прямой линии, продолжение которой (экстраполяция) пересекает ось ординат в точке R_0 .

Для примесных полупроводников формулу зависимости сопротивления от температуры получаем следующим образом: используя формулы (1.3), (1.12) и (1.20) концентрация носителей $n = \frac{l}{nebR}$, подставляя выражение для n в формулу (1.2) и проведя несложные преобразования, окончательно зависимость сопротивления от температуры принимает следующий вид:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (1.23)$$

причем эта зависимость экспоненциальная.

Прологарифмировав выражение (1.23) получим:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (1.24)$$

Зависимость $\ln R$ от $1/T$ является линейной, следовательно, и график зависимости $\ln R$ от обратной температуры $1/T$ будет представлять собой некоторую прямую, угловой коэффициент которой $\operatorname{tg} \alpha = \Delta W/2k$ пропорционален энергии активации. Следовательно, найдя из графика угловой коэффициент, можно вычислить энергию активации:

$$\Delta W = 2k \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.25)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Полупроводниковые нелинейные резисторы – изделия электронной техники, основное свойство которых в отличие от линейных резисторов заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление под

действием управляющих факторов: температуры, напряжения, магнитного поля и др. Они имеют резко выраженную нелинейную вольтамперную характеристику и в зависимости от воздействующего фактора получили название терморезисторы, варисторы, магниторезисторы.

Терморезисторы (термисторы) – полупроводниковые резисторы с нелинейной вольтамперной характеристикой, основное свойство которых заключается в способности значительно изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры.

Сопротивление термочувствительного элемента при нагревании может либо уменьшаться (терморезисторы с отрицательным ТКС), либо увеличиваться (терморезисторы с положительным ТКС - позисторы). Характер изменения сопротивления при этом аналогичен температурной зависимости удельного сопротивления полупроводникового материала, из которого изготовлен терморезистор.

Контактные явления и термоЭДС

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов. Это явление открыл итальянский физик А. Вольты в 1797 г. Согласно квантовой теории, основной причиной появления разности потенциалов на контакте является различная энергия Ферми у сопрягаемых металлов.

Пусть в изолированном состоянии электронный газ в металлах А и В характеризуется энергиями Ферми W_F^A и W_F^B отсчитываемыми от дна зоны проводимости (рис. 1.7, а). Термодинамические работы выхода электронов равны соответственно χ_A и χ_B .

Кинетическая энергия электронов, находящихся на уровне Ферми, в различных металлах различна. Поэтому при контактировании материалов возникает более интенсивный переход электронов из области с большим значением энергии W_F в область, где энергия меньше, т. е. из металла В в металл А. Действительно, электроны стремятся занять состояние с минимальной

энергией. Фактически переход электронов из металла В в металл А есть переход электронов в данной системе на более низкие энергетические уровни. В результате такого процесса металл В заряжается положительно, а металл А – отрицательно; между ними возникает разность потенциалов, препятствующая дальнейшему переходу носителей заряда. Равновесие наступит тогда, когда работа электрона по преодолению сил возникшего поля станет равной разности энергий электронов, переходящих через контакт (см. рис. 1.7, б):

$$eU = W_F^B - W_F^A,$$

Таким образом, внутренняя контактная разность потенциалов определяется как разность энергий Ферми, отсчитываемых от дна зоны проводимости, для изолированных металлов А и В.

Наличие контактного поля обеспечивает равенство потоков электронов из одного металла в другой в состоянии равновесия. Так как скорости хаотического движения электронов весьма велики, равновесие устанавливается очень быстро – за время $\sim 10^{-16}$ с. В условиях установившегося равновесия уровень Ферми в обоих металлах должен быть одинаков: энергетические уровни в металле, зарядившемся отрицательно, поднимутся, а в металле, зарядившемся положительно, опустятся. Благодаря заряду областей выравнивание уровней может произойти при переходе небольшого количества электронов. Двойной электрический слой d , существующий в области контакта, очень тонок (порядка периода решетки) и не влияет на прохождение электрического тока через контакт. Так как энергия Ферми в металлах имеет значение порядка нескольких электрон-вольт, то контактная разность потенциалов между двумя металлами может составлять от десятых долей до нескольких вольт.

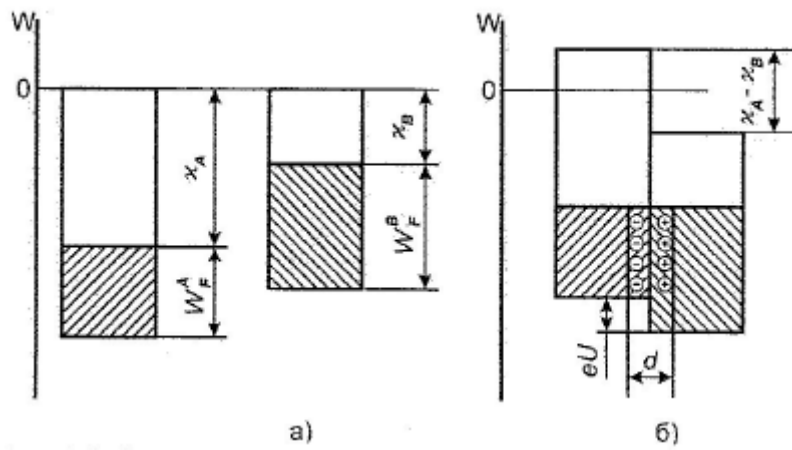


Рис. 1.7. Энергетические диаграммы: а) электронного газа в металлах А и В; б) контакта металлов А и В

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой (рис 1.8).

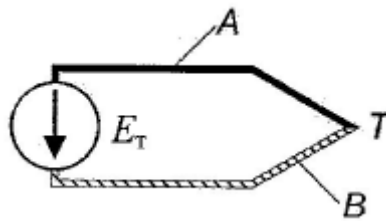


Рис. 1.8. Устройства термопары:

А и В – проводники из различных металлов, Т – спай

При различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает ток, называемый термоэлектрическим. Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появится разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой E_T . По имени первооткрывателя это явление получило название эффекта Зеебека. Как показывает опыт, в относительно небольшом температурном интервале термоЭДС пропорциональна разности температур $(T_2 - T_1)$ контактов (спаев):

$$E_T = \alpha_T(T_2 - T_1), \quad (1.26)$$

где α_T – относительная дифференциальная или удельная термоЭДС.

Значение α_T зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры. ТермоЭДС в контуре складывается из трех составляющих. Первая из них обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов. В металлах с увеличением температуры уровень Ферми, хотя и слабо, но смещается вниз по энергетической шкале. Поэтому на холодном конце проводника он должен располагаться выше, чем на горячем. Следствием смещения уровня Ферми и является возникновение контактной составляющей термоЭДС.

Вторая составляющая термоЭДС обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным. Средняя энергия электронов в металле, хотя и немного, но все же изменяется с температурой. Электроны, сосредоточенные на горячем конце, обладают несколько большей кинетической энергией и большей скоростью движения по сравнению с носителями холодного конца. Поэтому они в большем числе диффундируют в направлении температурного градиента, чем в обратном. Диффузионный поток, унося отрицательный заряд из горячего конца в холодный, создает между ними разность потенциалов.

Третья составляющая термоЭДС возникает в контуре вследствие увеличения электронов квантами тепловой энергии. Их поток также распространяется к холодному концу. Все составляющие термоЭДС определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми, и отстоящих от него на величину порядка kT . Поэтому удельная термоЭДС для металлов оказывается очень небольшой. Квантовая теория дает следующее выражение для удельной термоЭДС одновалентных металлов:

$$\alpha_T \approx \pi^2 \frac{k}{e} \frac{kT}{W_F},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл.

При комнатной температуре отношение kT/W_F имеет значение порядка 10^{-3} . Поэтому α_T должна составлять несколько мкВ/К.

Существенно большее значение удельной термоЭДС можно получить при использовании металлических сплавов, которые имеют сложную зонную структуру.

Металлические термопары широко используются для точного измерения температуры. В процессе измерений необходимо стабилизировать температуру одного из спаев.

В реальных условиях полностью исключить перепады температуры практически невозможно. Поэтому в электрических цепях могут возникать паразитные термоЭДС. Для уменьшения их влияния в цепях электроизмерительных приборов следует подбирать контактирующие материалы с малыми значениями α_T .

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ И РЕЗИСТОРОВ

Цель работы: определение температурных коэффициентов сопротивления проводниковых материалов и резисторов.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Измеритель RLC », минимодули «ТКС проводников» и «ТКС резисторов», соединительные проводники.

В данной лабораторной работе исследуется ТКС проводников (медь и вольфрам) и ТКС резисторов (проволочный и угольный).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 1.20 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «ТКС проводников» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления / емкости» модуля «Магнитомягкие материалы». Подключить термопару BK1 минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве омметра PR1 использовать RLC-метр в режиме измерения сопротивления.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр. Включить RLC-метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка L/C/R).

4. Значения сопротивлений проводников $R1$, $R2$ и комнатной температуры T занести в табл. 1.1. Переключения между проводниками с сопротивлениями $R1$ и $R2$ осуществляется тумблером SA3. Проводник с сопротивлением $R1$ – медь (верхнее положение ручки тумблера SA3). Проводник с сопротивлением $R2$ – вольфрам (нижнее положение ручки тумблера SA3).

5. Включить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P1$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1). По окончании нагрева (установившаяся температура не из-

меняется в течение 5-ти минут более чем на $1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$) занести в табл. 1.1 значения сопротивления проводников $R1$, $R2$ и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в нижнее положение).

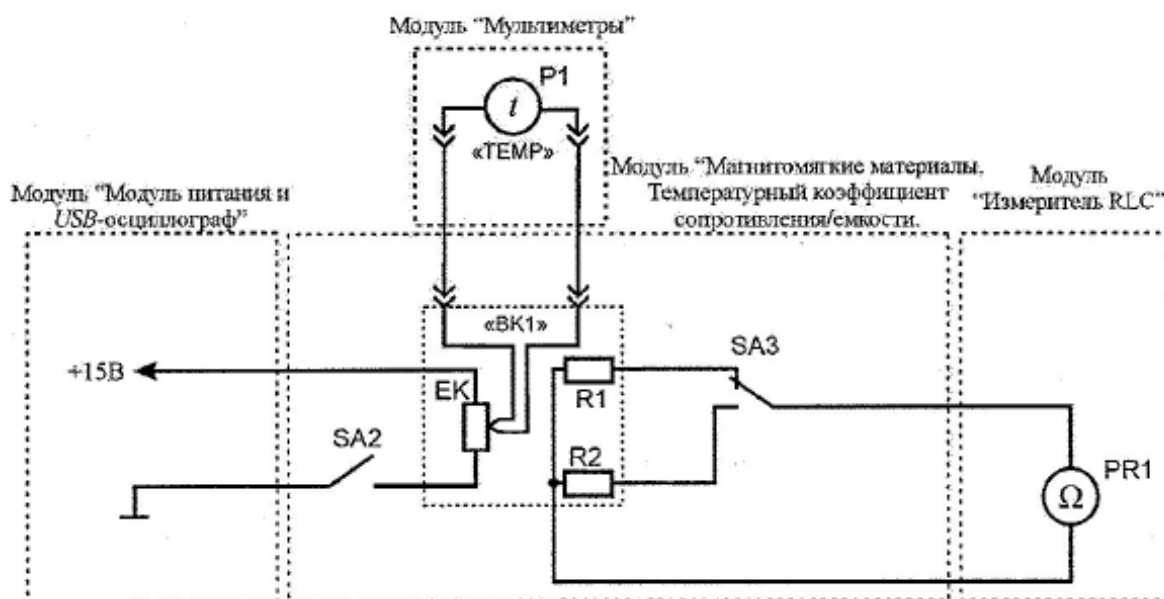


Рис. 1.20. Схема электрических соединений типового комплекта для измерения ТКС проводников

Т а б л и ц а 1.1

№	Температура $T, ^{\circ}\text{C}$	Сопротивление проводника R , Ом		ТКС, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	
		$R1$ (медь)	$R2$ (вольфрам)	Медь ($R1$)	Вольфрам ($R2$)
1					
2					

6. Используя данные табл. 1.1, построить график зависимости $R(T)$. Рассчитать ТКС проводников, используя формулу (1.22), значения ТКС занести в табл. 1.1.

7. Заменить минимодуль «ТКС проводников» на «ТКС резисторов». Подключить термопару минимодуля (гнезда $BK1$) к гнездам «TEMP» мультиметра 1 при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

Значения сопротивлений резисторов $R1$, $R2$ и комнатной температуры T занести в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

№	Температура T , °C	Сопротивление резистора R , Ом		ТКС, °C ⁻¹	
		$R1$ (проволоч- ный)	$R2$ (угольный)	Проволочный ($R1$)	Угольный ($R2$)
1					
2					

Переключение между резисторами $R1$ и $R2$ осуществляется тумблером SA3. Резистор с сопротивлением $R1$ – проволочный (верхнее положение ручки тумблера). Резистор с сопротивлением $R2$ – угольный (нижнее положение ручки тумблера).

8. Включить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1). По окончании нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5-ти минут более чем на 1...2 °C) занести в табл. 1.2 значения сопротивлений резисторов $R1$, $R2$ и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение).

9. Используя данные табл. 1.2, построить график зависимости $R(T)$. Рассчитать ТКС резисторов, используя формулу (1.22), значения ТКС занести в табл. 1.2.

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. Сравнить экспериментальные значения ТКС проводников и резисторов со справочными данными. Анализируя графики зависимости $R(T)$

проводников и резисторов, сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие проводника от диэлектрика?
2. Приведите определение ТКС. Единицы его измерения.
3. Материалы с какими ТКС используются для изготовления резисторов?
4. Чем отличаются положительный и отрицательный ТКС?
5. Приведите формулу определения температурного коэффициента сопротивления.
6. Приведите погрешность мультиметра типа MASTECH MY64 при измерении температуры.
7. Отличаются ли ТКС чистых атомарных металлов от ТКС металлов с примесями?

Лабораторная работа № 2

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Цель работы: изучить явления, возникающие при контакте двух проводников, измерить термоЭДС и определить относительную удельную термоЭДС исследуемой термопары.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», минимодуль «ТКС проводников», соединительные проводники.

Метод измерения

В данной лабораторной работе исследуется термопара типа *K* (алюмель-хромель).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 1.21 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «ТКС проводников» в гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления / емкости» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости».

Подключить термопару BK1 минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

Подключить термопару BK2 минимодуля к гнездам «VΩHz» и «COM» мультиметра (в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 200 мВ) при помощи соединительного кабеля с незащищенными штекерами 4,0 мм и незащищенными штекерами 2,0 мм.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

4. После включения мультиметров занести в табл. 1.3 значение температуры свободных концов t_c (P1). При проведении эксперимента комнатная температура не должна изменяться.

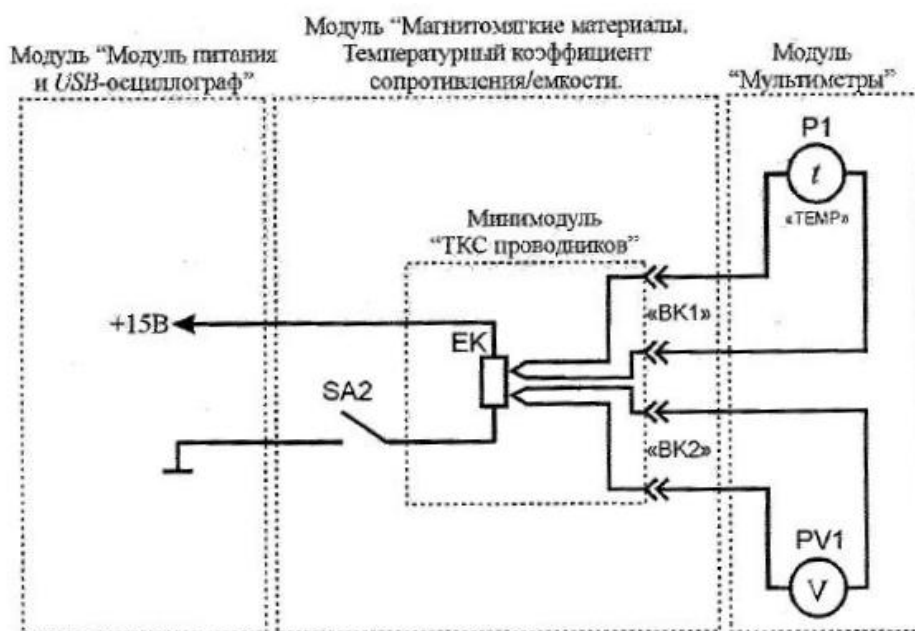


Рис. 1.21. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения термоЭДС

Т а б л и ц а 1.3

№ п.п	Температура свободных концов термопары t_C , °C	t_p , °C	$ E_T $, мВ	$t_p - t_C$, °C	α_T , мВ/°C
1					
2					
...					

5. Включить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в верхнее положение). Если показания температуры (P2) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1). Провести измерения температуры рабочего спая t_p (P1) и термоЭДС E_T (PV1) в диапазоне 30...100 °C с шагом 10 °C. Полученные значения E_T (по модулю) и t_p занести в табл. 1.3. Отключить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение).

6. Рассчитать разность температур рабочего спая и свободных концов термопары $t_p - t_C$, для каждого пункта табл. 1.3.

7. Построить график зависимости $E_T (t_p - t_C)$. Определить удельную термоЭДС α_T как тангенс угла наклона графика. Тангенс угла наклона графика определять как отношение приращения ΔE_T к соответствующему приращению $\Delta(t_p - t_C)$ разности температур рабочего спая и свободных концов термопары. Значения удельной термоЭДС α_T занести в табл. 1.3.

8. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

9. Сравнить экспериментальные значения термоЭДС со справочной таблицей термоЭДС стандартных термопар. Сравнить экспериментальное значение удельной термоЭДС α_T со справочной.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение термоЭДС.
2. В чем состоит эффект Зеебека?
3. Объясните механизм возникновения термоЭДС.
4. От каких параметров зависит величина термоЭДС?
5. Приведите определение и формулу удельной термоЭДС.

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель работы: изучить зависимость сопротивления полупроводниковых материалов от температуры.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления /

емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Измерить RLC », минимодуль «ТКС полупроводников», соединительные проводники.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 1.22 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

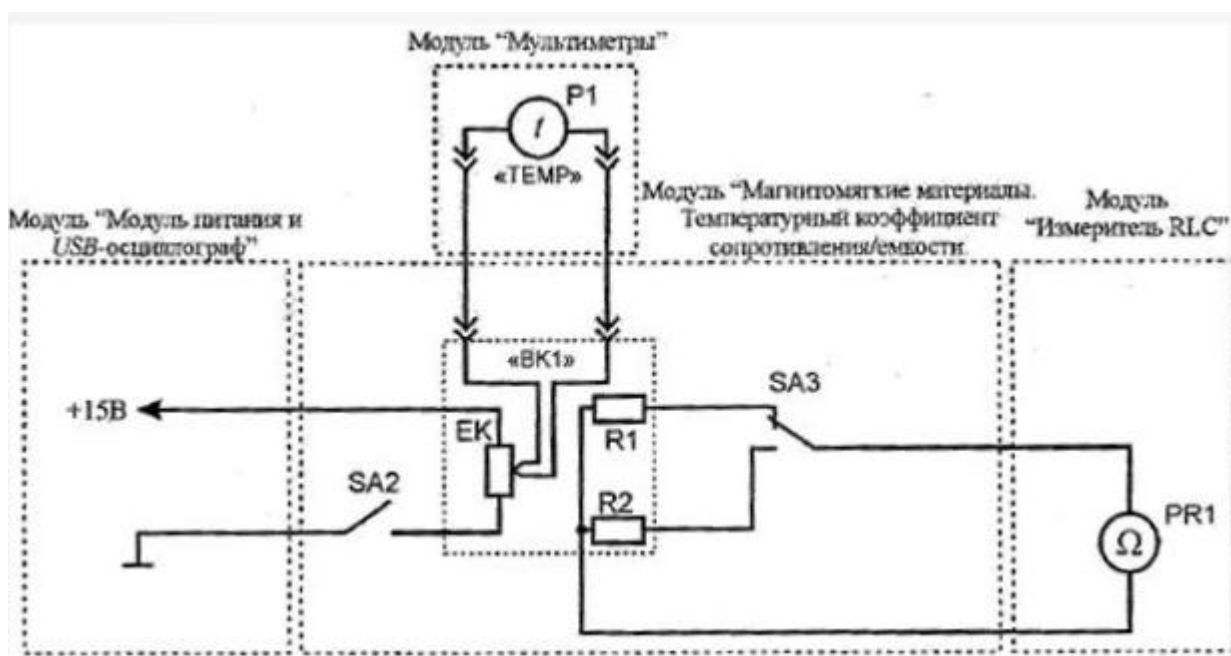


Рис. 1.22. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения ТКС полупроводников

Установить минимодуль «ТКС полупроводников» в гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления / емкости» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости». Подключить термопару *BK1* минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве омметра $PR1$ использовать RLC -метр в режиме измерения сопротивления.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить RLC -метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка $L/C/R$).

4. Значения сопротивлений полупроводников $R1$, $R2$ ($PR1$) и комнатной температуры t ($P1$) занести в табл. 1.4. Переключения между полупроводниками с сопротивлениями $R1$ и $R2$ осуществляется тумблером $SA3$.

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P1$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах « $TEMP$ » мультиметра 1).

Т а б л и ц а 1.4

№	Температура t , °C	Сопротивление полупроводника R , Ом		ТКС, °C ⁻¹	
		$R1$ (термистор)	$R2$ (позистор)	$R1$	$R2$
1					
2					
...					

Провести измерения температуры t ($P1$) и сопротивления полупроводников $R1$ и $R2$ ($P1$) при нагревании минимодуля в диапазоне 40...100 °C с шагом 10 °C. Полученные значения занести в табл. 1.4. Отключить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в нижнее положение).

6. Используя данные табл. 1.4, построить графики зависимостей $R1(t)$, $R2(t)$.

К точке на графике зависимостей $R1(t)$, $R2(t)$ (по указанию преподавателя) провести касательную линию и в некотором температурном диапазоне

рассчитать ТКС полупроводников как тангенс угла наклона графика. Тангенс угла наклона графика определять как отношение приращения сопротивления ΔR к соответствующему приращению температуры Δt .

7. Вычислить абсолютную температуру T , обратную температуру T^{-1} для каждого пункта табл. 1.4, используя формулы

$$T = t + 273, \quad T^{-1} = \frac{1}{T},$$

где t – температура, °C. Полученные значения T и T^{-1} занести в табл. 1.5.

Рассчитать $\ln R1$ (расчет энергии активации ΔW производится только для термистора) для каждого пункта табл. 1.4, полученные значения занести в табл. 1.5.

Т а б л и ц а 1.5

№	T, K	T^{-1}, K^{-1}	$\ln R1$	$\Delta W, эВ$
1				
2				
...				

8. Построить график зависимости $\ln R1(T^{-1})$. На графике провести прямую линию, усредняющую экспериментальные точки графика. Рассчитать тангенс угла наклона прямой как отношение приращения $\Delta \ln R$ к соответствующему приращению ΔT^{-1} . Используя формулу (1.25), рассчитать значение энергии активации ΔW , значение занести в табл. 1.5.

9. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

10. По графикам зависимости $R(T)$ полупроводников $R1$ и $R2$ определить тип полупроводника (термистор или позистор), сравнить экспериментальные значения ТКС и значение энергии активации ΔW термистора со справочными данными. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие полупроводника от проводника?
2. Приведите определение терморезистора.
3. Какие материалы используются для изготовления терморезисторов?
4. Приведите качественный характер зависимостей сопротивления от температуры терморезисторов с отрицательным и положительным ТКС.
5. Приведите формулу для определения температурного коэффициента сопротивления.

Лабораторная работа № 4

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

Цель работы: изучить явление фотопроводимости полупроводников, измерить сопротивление фоторезистора при различной освещенности.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Барьерный эффект. Фотопроводимость», модуль «Мультиметры», модуль «Функциональный генератор», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Изменение электрической проводимости (удельного сопротивления) вещества под воздействием электромагнитного излучения называется *фотопроводимостью* (фоторезистивным эффектом).

При фотопроводимости первичным является процесс поглощения фотонов. Фотопроводимость $\Delta\gamma$ равна разности проводимостей полупроводника на свету и в темноте:

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_T = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p,$$

где Δn и Δp – концентрации неравновесных носителей заряда, возникших вследствие оптической генерации; e – заряд электрона ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно.

Скорость оптической генерации носителей заряда g_0 определяется интенсивностью падающего света и показанием поглощения:

$$g_0 = \eta_0 \cdot \alpha \cdot E, \quad (1.29)$$

где η_0 – квантовый выход внутреннего фотоэффекта; α – показатель поглощения света; E – световой поток.

Квантовым выходом внутреннего фотоэффекта называют количество пар носителей заряда, приходящееся на один поглощенный квант. В фотоэлектрически активной области электромагнитного спектра квантовый выход чаще всего равен единице, то есть каждый фотон создает при возбуждении решетки одну пару носителей заряда.

Релаксация фотопроводимости. Изменение электрических свойств полупроводников под влиянием электромагнитного излучения носит временный характер. После прекращения облучения проводимость возвращается к тому значению, которое она имела до облучения. Знание инерционности фотопроводимости различных полупроводников веществ важно при разработке, например, фоторезисторов, к которым предъявляются высокие требования в отношении их быстродействия.

Рассмотрим процессы, происходящие в полупроводнике при воздействии на него прямоугольного светового импульса (рис. 1.23). Убыль или накопление неравновесных носителей заряда определяется разностью скоростей генерации и рекомбинации носителей:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = g_0 - \frac{\Delta n}{\tau}, \quad (1.30)$$

где τ – время жизни неравновесных носителей заряда.

Интегрируя (1.30) с начальным условием $\Delta n=0$ при $t=0$, найдем закон нарастания избыточной концентрации носителей заряда при включении освещения:

$$\Delta n = \Delta n_{\text{ст}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1.31)$$

где $\Delta n_{\text{ст}} = \tau g_0$.

По такому же закону происходит и нарастание фотопроводимости:

$$\Delta \gamma = \Delta \gamma_{\text{ст}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

Спадание фотопроводимости описывается выражением:

$$\Delta \gamma = \Delta \gamma_{\text{ст}} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Таким образом, скорость нарастания и спада фотопроводимости находится в тесной связи со временем жизни неравновесных носителей заряда и представляет собой экспоненциальную функцию времени. Время релаксации определяется как время максимальной скорости нарастания τ_n или спада $\tau_{\text{сп}}$ фотопроводимости $\Delta \gamma$ (рис. 1.23).

Явление изменения фотопроводимости $\Delta \gamma$ при включении и выключении освещения называют релаксацией фотопроводимости.

Фоторезистор – полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от интенсивности и спектрального состава внешнего излучения. На рис. 1.24 показаны типовые вольтамперные характеристики (ВАХ) фоторезистора для нескольких значений светового потока Φ .

При отсутствии внешнего светового потока ($\Phi = 0$) сопротивление фоторезистора велико и определяется собственной проводимостью полупроводникового материала. Ток, обусловленный собственной проводимостью, называется темновым $I_{\text{т}}$. Под действием светового потока сопротивление фоторезистора уменьшается. В этом случае ток называется световым $I_{\text{с}}$. Разность между световым и темновым токами составляет фототок $I_{\text{ф}}$.

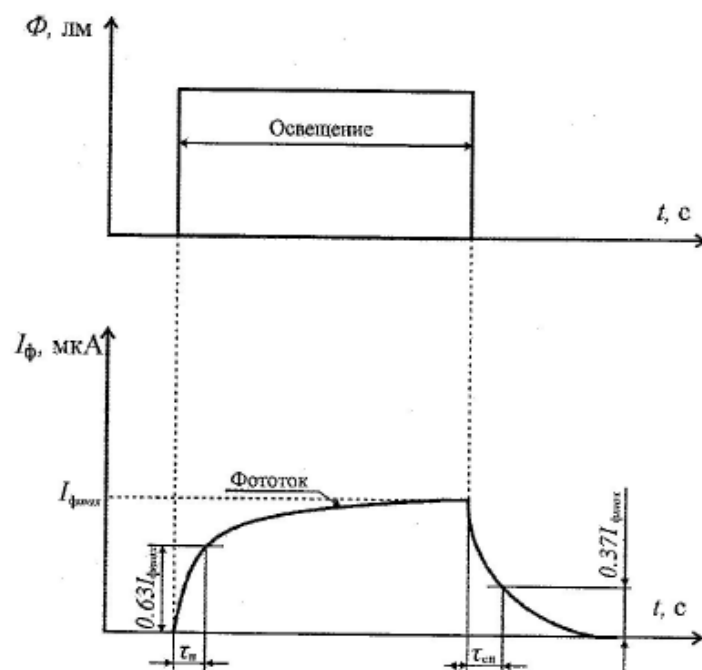


Рис. 1.23. График зависимости фотопотока полупроводника от времени при импульсном изменении интенсивности падающего на него света

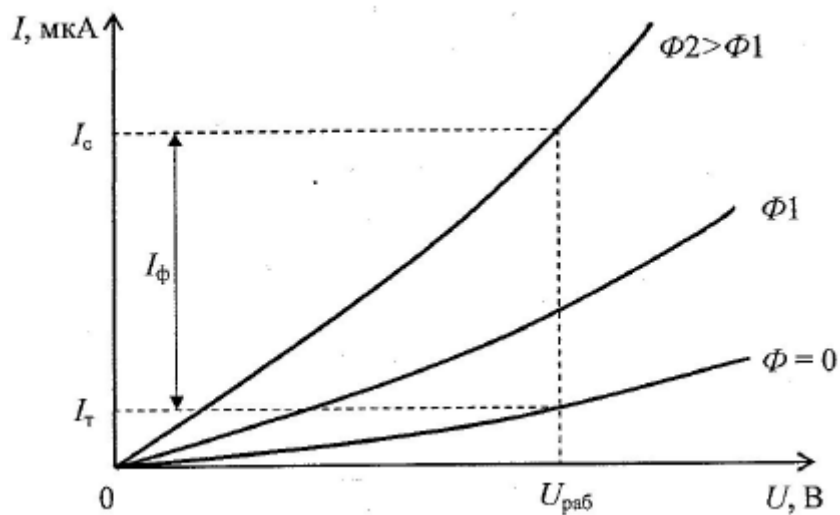


Рис. 1.24. ВАХ фоторезистора

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у препода-

вателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 1.25 выполнить электрические соединения модулей для изучения фоторезистора. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного тока с пределом 2 мА.

В качестве вольтметра $PV1$ – мультиметр 2 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Установить максимальное значение светового потока $\Phi 1$ светодиода, который пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать один из мультиметров в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

4. Увеличивая входное напряжение U_{BX} от 0 до +15 В с шагом 1,5 В (регулятором «0...+15В») заносить значения тока $I_{RK}(PA1)$ и напряжения $U_{RK}(PV1)$ в табл. 1.6.

5. Повторить измерения по пункту 4 при значениях светового потока $\Phi 2$ светодиода (сила тока в цепи светодиода ($I_{VD} = 7$ мА), $\Phi 3$ светодиода (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 1$ мА), $\Phi 4$ светодиода ($I_{VD} = 0$ мА) и отсутствия естественного фона освещенности $E = 0$. Для отсеечения естественного фона освещения необходимо затемнить фоторезистор RK (затемнить пластиковый корпус закрывающий фоторезистор со светодиодом).

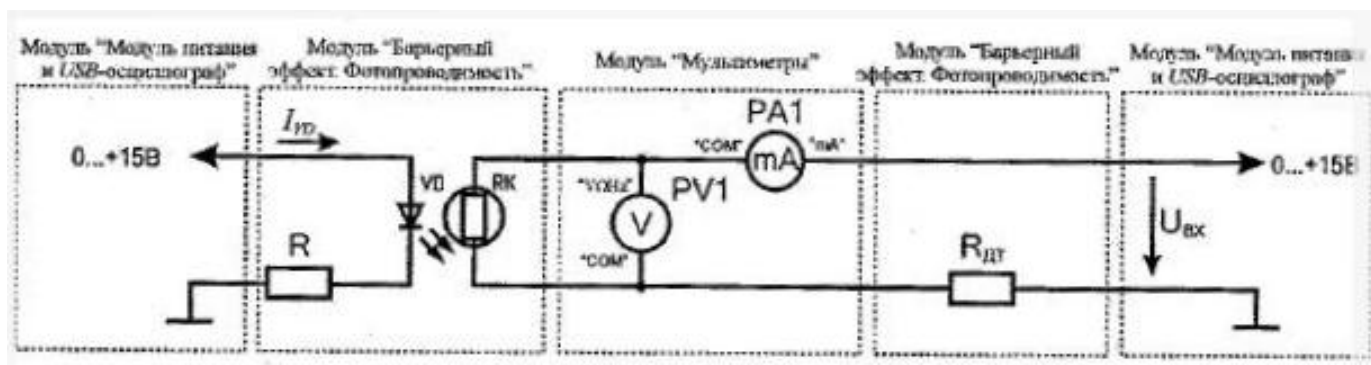


Рис. 1.25. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения зависимости проводимости фоторезистора от светового потока

6. Используя данные табл. 1.6 рассчитать сопротивления фоторезистора R_{RK} при различном световом потоке Φ для каждого значения входного напряжения U_{BX} по формуле $R_{RK} = U_{RK}/I_{RK}$, данные занести в табл. 1.6.

7. Используя данные табл. 1.6 построить ВАХ $U_{RK}(I_{RK})$ для всех значений светового потока: $\Phi 1$ ($I_{VD} = 15$ мА), $\Phi 2$ ($I_{VD} = 7$ мА), $\Phi 3$ ($I_{VD} = 1$ мА), $\Phi 4$ ($I_{VD} = 0$ мА, отсутствие светового потока).

8. Провести анализ ВАХ, сделать вывод о характере зависимости фотопроводимости от светового потока Φ .

Т а б л и ц а 1.6

$U_{вх}, В$		0	1,5	3	4,5	...	15
$I_{RK}, мкА$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 мА)$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 мА)$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 мА)$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 мА) и E = 0$						
$U_{RK}, В$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 мА)$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 мА)$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 мА)$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 мА) и E = 0$						
$R_{RK}, Ом$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 мА)$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 мА)$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 мА)$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 мА) и E = 0$						

9. Согласно рис. 1.26 выполнить электрические соединения модулей для определения среднего времени жизни неравновесных носителей заряда τ .

Монтаж схемы производить при отключенном питании. $G1$ – функциональный генератор.

10. Установить прямоугольную форму выходного сигнала функционального генератора $G1$, амплитуду $U_m = 4$ В, частоту $f_{вых} = 20$ Гц. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф DOSC-DLA». Настроить развертку и масштаб каналов A и B осциллографа таким образом, чтобы импульс занимал не менее половины экрана. Включить синхронизацию канала A .

Сравнить полученную осциллограмму с рис. 1.23. Определить по осциллограмме время нарастания τ_{nr} и спада τ_{cn} фототока (среднее время жизни неравновесных носителей заряда). Время нарастания τ_{nr} – время с момента начала освещения, за которое фототок увеличится в e раз (достигнет величины 0,63 от своего максимального значения). Время спада τ_{cn} – время с момента окончания освещения, за которое фототок уменьшится в e раз (составит 0,37 от своего максимального значения).

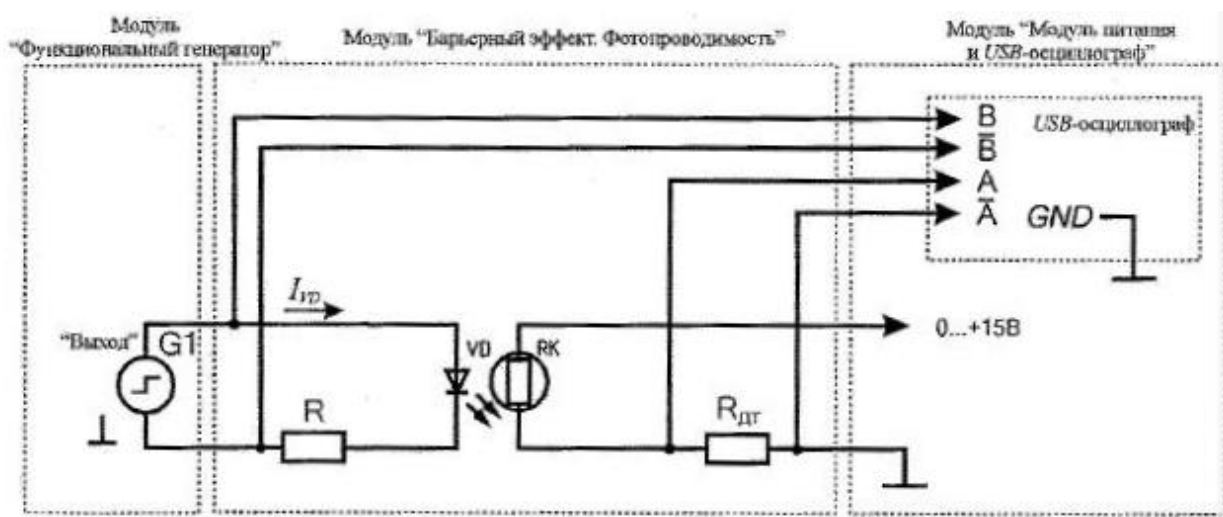


Рис. 1.26. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике

11. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Контрольные вопросы

1. Опишите явление фотоэффекта.
2. Приведите определение фоторезистора.
3. Чем объясняется изменение фотопроводимости.
4. Какие параметры характеризуют быстродействие фоторезисторов?
5. Приведите параметры фоторезисторов.
6. Приведите примеры источников света, какой источник света используется в данной лабораторной работе?

2. ДИЭЛЕКТРИКИ

В электронной технике, радиотехнике и приборостроении применяют множество различных диэлектриков. По функциям, выполняемым в аппаратуре и приборах, они подразделяются на электроизоляционные и конденсаторные материалы (пассивные диэлектрики) и управляемые материалы (активные диэлектрики).

Электроизоляционные материалы используют для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

Применение диэлектриков в конденсаторах позволяет получать требуемые значения емкости, а в некоторых случаях обеспечивает определенный характер зависимости этой емкости от внешних факторов. Диэлектрик конденсатора может запасать, а потом отдавать в цепь электрическую энергию (емкостный накопитель). Иногда конденсатор используют для разделения цепей постоянного и переменного токов, для изменения угла фазового сдвига и т. д.

Некоторые диэлектрики применяют как для создания электрической изоляции, так и в качестве конденсаторных материалов (например, слюда, керамика, стекло, полистирольные и другие пленки). Тем не менее, требования к электроизоляционным и конденсаторным материалам существенно различаются. Если от электроизоляционного материала требуется невысокая относительная диэлектрическая проницаемость и большое удельное сопротивление, то диэлектрик конденсатора, наоборот, должен иметь повышенную ϵ и малое значение $tg\delta$. Роль диэлектрика в конденсаторе также нельзя считать активной, но конденсатор уже является функциональным элементом в электрической схеме.

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов и отличаются большим разнообразием (рис. 2.1).

Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергооборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов. Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала:

- механические: плотность и вес материала, прочность;
- теплофизические: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть;
- электрофизические: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность;
- физико-химические: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д.

Зачастую все требования невозможно выполнить. Чтобы оценить значимость каждого из них и понять, какие требования, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие второстепенными (ими можно пренебречь) необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств.

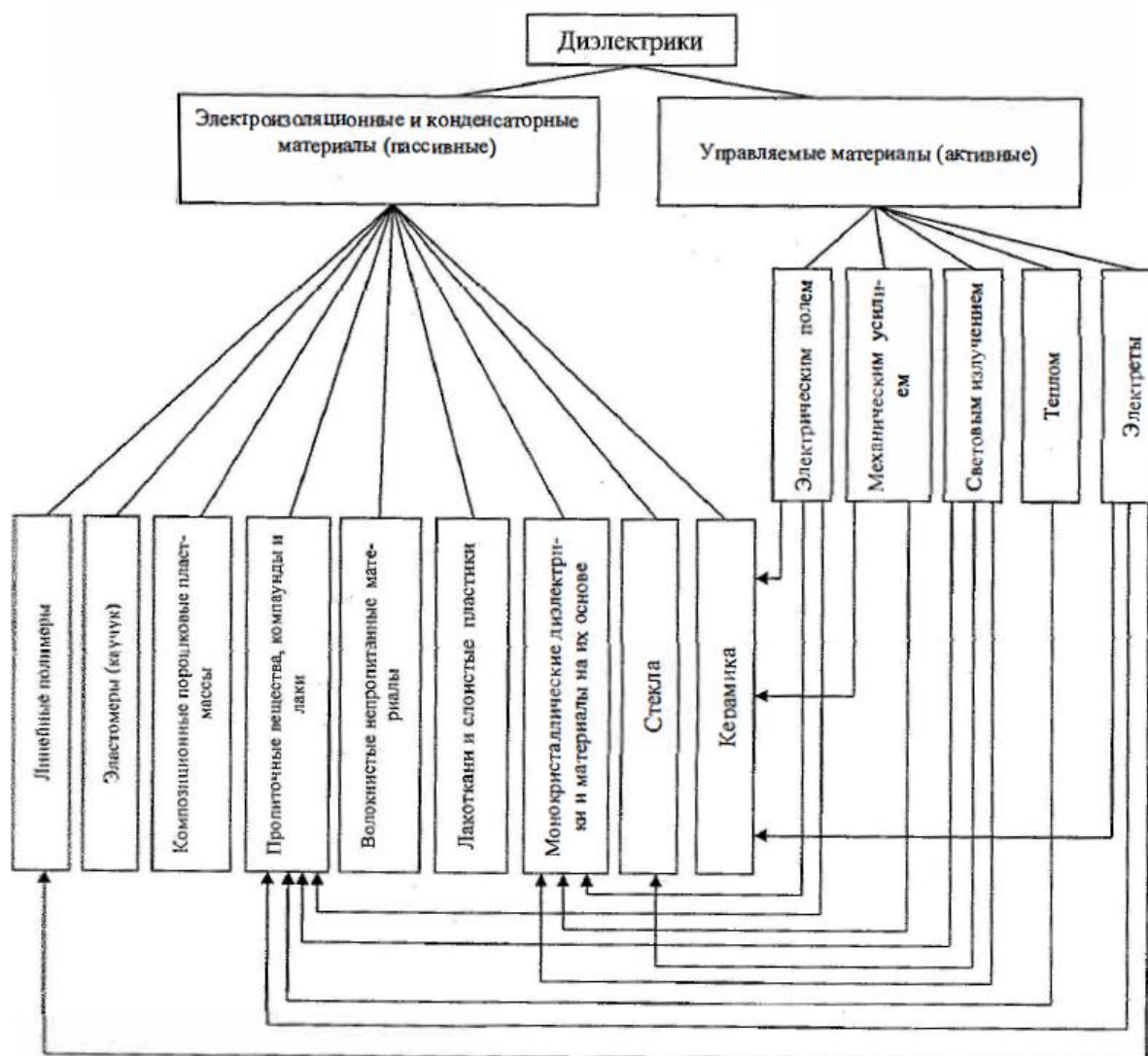


Рис. 2.1. Классификация диэлектриков

Дипольный момент молекулы.

Полярные и неполярные диэлектрики

Молекулы в зависимости от наличия в них асимметрии электрического поля делятся на полярные и неполярные. В полярных молекулах центры положительных суммарных зарядов противоположных знаков не совпадают, поэтому такие молекулы обладают дипольным моментом, модуль которого равен

$$P_{Qx} = |Q|x ,$$

где Q - суммарный заряд любого знака; x - взаимное смещение "центров" суммарных зарядов.

Дипольный момент молекулы P_{Qx} является вектором, направленным от отрицательного заряда к положительному. Модуль дипольного момента P_{Qx} равен произведению расстояния между зарядами на модуль заряда.

В неполярных молекулах эти центры совпадают, поэтому их дипольный момент равен нулю. Молекулы веществ, состоящие из однотипных атомов (например, газы H_2 , O_2 , N_2 и др.) симметричны и поэтому неполярны. Молекулы веществ, состоящие из двух разнотипных атомов, всегда полярные. Если же разнотипных атомов в молекуле три и более, то молекула может быть как полярной, так и неполярной. Например, молекула углекислого газа, состоящая из трёх разнотипных атомов ($CO_2 \rightarrow O - C - O$) симметрична и неполярна. Это остаётся справедливым и для молекулы ацетилена (C_2H_2). Молекулы H_2O и NNH_3 имеют несимметричное строение, поэтому проявляют полярные свойства.

Особую группу материалов составляют вещества, молекулы которых имеют ионную связь ($NaCl, KCl, KBr$ и др.). Их кристаллические решётки представляют собой систему знаочередующихся узлов - ионов. В таких решётках нельзя выделить отдельную молекулу, а саму решетку следует рассматривать в виде двух подрешеток, вставленных друг в друга. Как известно, молекулы состоят из атомов, окруженных электронными оболочками. При этом электроны могут равномерно распределяться по молекуле, а могут и концентрироваться на каких-либо атомах. В первом случае говорят, что молекула неполярная. Пример - молекула водорода или атом гелия.

Во втором случае в молекуле образуются области с положительным и отрицательным зарядами. Если в молекуле возможно выделить направление, вдоль которого с одной стороны располагаются положительные заряды, а с другой стороны - отрицательные, то такая молекула является полярной или дипольной.

В полярной молекуле под действием поля происходит ориентация диполя в направлении вектора напряженности. Диэлектрики, состоящие из полярных молекул, называют полярными диэлектриками. В этом случае в зави-

симости от значения дипольного момента молекулы и концентрации молекул поляризация может быть значительной.

В неполярной молекуле под воздействием электрического поля происходит смещение (деформация) электронных оболочек. В результате этой деформации возникает индуцированный дипольный момент молекулы, то есть молекула поляризуется. Поляризация за счет смещения электронов называется электронной. Возникающий дипольный момент невелик. Диэлектрики, состоящие из неполярных молекул, называются неполярными диэлектриками.

В некоторых твердых диэлектриках может существовать особый вид поляризации - спонтанная (самопроизвольная), или доменная поляризация. Она существует только в кристаллах, но далеко не во всех, в аморфных телах ее не бывает. В некоторых веществах самопроизвольно возникают поляризованные микроскопические области (домены). При этом происходит смещение положительно заряженных ионов решетки в одну сторону, а отрицательно заряженных ионов в другую сторону. Микрообласть со спонтанной поляризацией называется доменом. Суммарный дипольный момент любого образца макроскопических размеров равен нулю, т.к. дипольные моменты доменов направлены в разные стороны. Если дипольные моменты доменов хаотически направлены в разные стороны, то такой диэлектрик называется сегнетоэлектриком.

Под действием электрического поля размеры доменов, направленных вдоль вектора поля увеличиваются, а противоположно направленные домены уменьшают свой размер. Кроме того, домены в диэлектрике поворачиваются в направлении электрического поля, как гигантские диполи. Только в отличие от диполей, где молекулы физически поворачиваются, в доменах перестраивается структура, так, что результирующий вектор поляризации каждого домена чуть-чуть смещается в направлении поля.

Поляризация и электропроводность диэлектриков

В любом веществе, помещённом в электрическом поле, составляющие его электрические заряды (электроны, атомные ядра) испытывают силы со стороны этого поля. В результате часть зарядов, называемых свободными, направленно перемещаются, образуя электрический ток. Остальные же заряды (связанные упругими силами взаимодействия) перераспределяются так, что центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещаются друг относительно друга. В этом случае говорят о поляризации вещества.

Способность материалов реагировать на внешнее электрическое поле образованием областей связанных зарядов называют *поляризуемостью*.

Диэлектриками могут быть также жидкости и газы. В обычных условиях все газы состоят в основном из нейтральных молекул и поэтому являются диэлектриками. При наличии источника энергии, достаточной для ионизации, атомы и молекулы распадаются на ионы, и газ, превращаясь в плазму, начинает проводить электрический ток.

Основным процессом, протекающим в диэлектрике под воздействием электрического поля, является поляризация, или возникновение областей связанных зарядов. Разная физическая природа связанных зарядов определяет существенные отличия процессов поляризации для различных веществ.

Поляризация вещества имеет три основных механизма, в основе которых лежат процессы деформации электронных оболочек атомов, смещения ионов в кристаллах и ориентация полярных молекул. Большинство материалов обладают двумя и более типами поляризации.

Наличие в диэлектрике незначительной концентрации свободных зарядов приводит к возникновению малого тока проводимости. Протекание токов проводимости сквозь толщу диэлектрика и по его поверхности сопровождается рассеянием энергии и выделением тепла.

Под действием переменного электрического поля в диэлектрике возникают дополнительные составляющие тока проводимости. Их появление обу-

словлено особенностью процессов поляризации в переменных полях (замедленная поляризация), наличия проводящих микровключений, ионизацией газовых включений, особенно на высоких частотах.

Для количественного описания электропроводности диэлектриков на постоянном токе используют понятие удельного сопротивления (поверхностного и объёмного). На переменном токе используют другие характеристики - тангенс угла диэлектрических потерь и связанный с ним коэффициент диэлектрических потерь.

Основные типы поляризации диэлектриков

В соответствии с особенностями строения диэлектриков и существования различных видов связанных зарядов выделяют три основных типа поляризации:

- электронная (деформационная), обусловленная деформацией электронных оболочек неполярных молекул;
- ионная, заключающаяся в противоположном перемещении подрешеток кристаллической структуры под действием внешнего поля;
- дипольная (ориентационная), обусловленная пространственной ориентацией дипольных моментов и самих полярных молекул под действием сил поля.

Электронная и ионная поляризации происходят практически мгновенно и без рассеяния энергии, то есть упруго и без выделения тепла.

Электронная поляризация в той или иной степени характерна для любых диэлектриков. Эти два механизма поляризации (электронная и ионная) относятся к мгновенному типу поляризации.

Дипольная поляризация сопровождается частичной ориентацией молекул диэлектрика, находящихся в процессе хаотического теплового движения, под действием сил внешнего электрического поля. Этот тип поляризации сопровождается рассеянием энергии, выделением тепла и происходит замед-

ленно. Дипольная поляризация относится к так называемому релаксационному типу, включающему в себя и другие виды поляризации (ионно-релаксационную и электронно-релаксационную).

Известны и другие типы поляризации - миграционная и спонтанная.

В полярных диэлектриках (например, твёрдый сероводород) группы атомов молекулы или радикалы представляют собой электрические диполи, которые в отсутствии электрического поля ориентированы хаотично, а под действием поля эти диполи ориентируются вдоль него. Такая ориентационная (дипольная) поляризация типична для полярных жидкостей и газов. Сходный механизм поляризации связан с перескоком под действием электрического поля отдельных ионов из одних возможных положений равновесия в решётке в другие. Особенно часто такой механизм поляризации наблюдается в веществах с водородной связью (например, у льда), где ионы водорода имеют несколько положений равновесия.

Так как процесс поляризации заключается в перераспределении связанных зарядов, размещённых на частицах определённой массы (электроны, ионы и т.д.), то его результат зависит от скорости изменения напряжённости внешнего поля. Поэтому многие электрические свойства диэлектриков проявляют зависимость в той или иной степени от частоты изменения электрического поля, в котором они находятся. Это явление называется дисперсией. В стационарном поле, напряжённость которого сохраняется во времени постоянной, процессы поляризации происходят под действием электростатических сил поля. В этом случае свойства диэлектрика описывают статическими значениями соответствующих электрических характеристик. Для описания свойств диэлектрика в переменных полях используют динамические параметры и их зависимости от частоты.

Диэлектрическая проницаемость и электрические поля в диэлектриках

Каждая из заряженных обкладок плоского конденсатора создает вблизи поверхности электрическое поле, модуль напряженности которого выражается соотношением:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0},$$

где σ - поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора.

Согласно принципу суперпозиции, напряженность $\vec{E}$ поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей $\vec{E}^+$ и $\vec{E}^-$ полей каждой из обкладок:

$$\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$$

Внутри конденсатора вектора $\vec{E}^+$ и $\vec{E}^-$ параллельны; поэтому модуль напряженности суммарного поля равен:

$$E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

Откуда поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора:

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E.$$

При увеличении напряжения на обкладках конденсатора заряд на каждой обкладке увеличивается до нового значения Q :

$$Q = Q_0 + Q_d = \varepsilon_r Q_0, \quad (2.1)$$

где ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость, Q_0 - электрический заряд, накопленный в конденсаторе с вакуумом, Q_d - дополнительный заряд.

Электрическая емкость конденсатора с вакуумом между обкладками

$$C_0 = Q_0/U. \quad (2.2)$$

Емкость C_0 называют геометрической емкостью конденсатора. Емкость конденсатора с диэлектриком между обкладками

$$C_x = Q/U. \quad (2.3)$$

Из формул (2.1), (2.2), (2.3) следует, что ϵ_r равна отношению емкости конденсатора с диэлектриком C_x к емкости того же конденсатора, где между обкладками вакуум C_0 :

$$\epsilon_r = C_x / C_0. \quad (2.4)$$

Диэлектрическая проницаемость является важнейшим макроскопическим параметром диэлектрика, характеризующим процесс поляризации, и она может быть найдена по измеренной емкости конденсатора с диэлектриком.

Емкость плоского конденсатора в вакууме равна

$$C_0 = \epsilon_0 S/d. \quad (2.5)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная, S - площадь обкладок конденсатора, d - зазор между обкладками конденсатора.

Емкость плоского конденсатора с диэлектриком

$$C_x = \epsilon_0 \epsilon_r S/d, \quad (2.6)$$

где ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, поглощаемую диэлектриком под действием приложенного напряжения. Потери мощности вызываются электропроводностью и медленными поляризациями.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток при постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации. Качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений.

При переменном напряжении необходимо использовать другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе подразделяются на четыре основных вида:

- диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- ионизационные диэлектрические потери;
- диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Физический смысл тангенса угла диэлектрических потерь становится ясным, если обратиться к векторной диаграмме, изображенной на рис. 2.2, б. Из этой диаграммы следует, что

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p}.$$

Таким образом, $\operatorname{tg} \delta$ - это отношение активной и реактивной составляющих тока, возникающих под действием переменного (синусоидального) напряжения, приложенного к образцу диэлектрика.

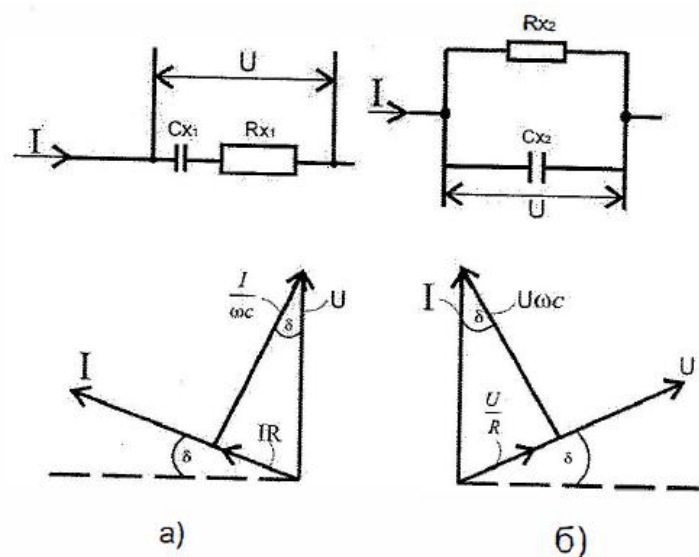


Рис. 2.2. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения реального конденсатора и соответствующие векторные диаграммы

Так как оба элемента схемы замещения (R и C) находятся под одинаковым напряжением, то отношение мощностей этих элементов оказывается равным отношению токов, протекающих через них. Поэтому тангенс угла потерь показывает, какую часть от реактивной мощности составляет мощность активных потерь.

Величина обратная тангенсу диэлектрических потерь $tg\delta$ называется добротностью:

$$Q = 1/tg\delta = ctg\delta.$$

Для последовательной схемы

$$tg\delta = \omega R x_1 C x_1,$$

для параллельной

$$tg\delta = \frac{1}{\omega R x_2 C x_2}.$$

Физически угол диэлектрических потерь - угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига и тем больше угол и его функция $tg\delta$.

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая, например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а, следовательно, и величину затухания.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от агрегатного состояния вещества. Диэлектрические

потери могут обуславливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими токов смещения.

В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации, возникают диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, оксидов железа; они значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

При высоких напряжениях потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика», особенно интенсивно происходящей на высоких частотах.

Дальнейшее рассмотрение диэлектрических материалов будем проводить на примере конденсатора.

В любом реальном конденсаторе при работе его на переменном токе неизбежны потери в диэлектрике, обусловленные переменной поляризацией. Кроме того, конденсатор имеет ещё активную проводимость через изоляцию электродов, поэтому реальный конденсатор представляется эквивалентной схемой в виде идеальной ёмкости, последовательно или параллельно соединённой с активным сопротивлением (рис. 2.2). Векторные диаграммы и схемы замещения для идеального диэлектрика и диэлектрика с потерями показаны на рис. 2.2.

Из векторной диаграммы видно, что тангенс угла потерь равен отношению активного и реактивного токов или отношению активной мощности P_A к реактивной P_C .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_A}{P_C}.$$

Сопоставление формул для последовательной и параллельной схем замещения показывает, что они дают взаимно противоположные зависимости параметров цепи конденсатора от частоты. Это объясняется тем, что ни одна из схем замещения не отражает полностью тех реальных процессов, которые имеют место в конденсаторах.

Последовательная схема и соответствующие ей формулы лучше отражают физические свойства реального конденсатора в области высоких частот (более 1 МГц), параллельная схема даёт более правильные результаты в области низких частот. В области средних частот обе схемы являются достаточно удовлетворительными.

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

Для упрощения расчетов часто пользуются комплексными величинами. Комплексная диэлектрическая проницаемость записывается в виде

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'',$$

где действительная часть ε' имеет физический смысл относительной диэлектрической проницаемости, а ε'' характеризует потери

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \text{tg}\delta$$

и называется коэффициентом диэлектрических потерь.

Выбор в каждом конкретном случае той или иной эквивалентной схемы определяется значениями величин, подлежащих измерению. В некоторых случаях данная схема для удовлетворения условий равновесия нуждается в применении образцовых мер какого-либо необычного или неудобного номинального значения, например, очень больших или, наоборот, очень, малых. Если объект измерения обладает малыми потерями, то при выборе парал-

лельной эквивалентной схемы активное сопротивление составит несколько сотен килом, что явно неудобно. Последовательная схема в этом случае будет, несомненно, целесообразнее. Если же предполагается, что объект измерения обладает большими потерями, то используется параллельная эквивалентная схема.

Поэтому, выбирая какую-либо схему, необходимо предварительно оценить порядок входящих в неё величин и параметров: если потери малы, то используется последовательная эквивалентная схема, если велики - то параллельная.

Частотная зависимость потерь является важной характеристикой материала и определяется не только структурой материала, но и наличием и составом примесей. Как правило, потери имеют максимум при одной или нескольких частотах, в зависимости от строения диэлектрика. Положение максимумов характеризуется собственными частотами установления поляризации. Они могут быть связаны с поворотом полярных молекул в жидком диэлектрике или с поворотом домена в сегнетоэлектрике.

При воздействии переменного напряжения, период которого много меньше времени установления соответствующей поляризации, диэлектрическая проницаемость и, соответственно, потери - малы. Поэтому в неполярных диэлектриках потери малы практически на всех частотах. Если период переменного напряжения близок к времени установления поляризации, то потери достигают максимального значения. Поясним это на примере дипольной поляризации.

При воздействии напряжения диполи начинают поворачиваться и ориентируются вдоль действия электрического поля примерно к моменту окончания первого полупериода напряжения. На следующем полупериоде они разворачиваются и ориентируются в новом направлении примерно к его окончанию.

Получается, что диполи непрерывно вращаются, а поскольку этот процесс происходит в вязкой среде, то энергия движения, поступающая из элек-

трического поля, передается окружающим молекулам. В результате этого энергия, поступающая из источника, расходуется на нагревание диэлектрика. При воздействии переменного напряжения, период которого много больше времени установления соответствующей поляризации, диэлектрическая проницаемость, соответствующая этому виду максимальна и потери, связанные с этим малы.

Знание частотной зависимости $\tan \delta$ необходимо для рационального выбора диэлектрика (или типа применяемого конденсатора), работающего при определённых напряжениях и частотах, определяющих уровень диэлектрических потерь, а значит и температуру материала, которая не должна превышать предельно допустимую.

Следует отметить, что влиянию температуры, частоты, влажности, напряженности поля подвержены не только диэлектрические потери, но и другие электрические характеристики диэлектриков: диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость γ (рис. 2.3).

Причиной такого влияния является зависимость характера движения связанных и свободных зарядов от указанных факторов.

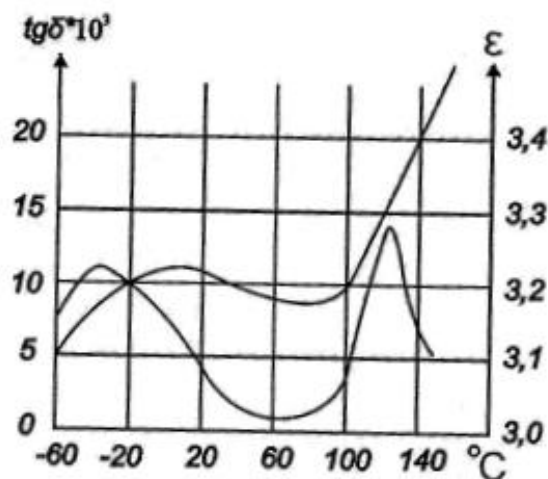


Рис. 2.3. Зависимость угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости полиэтилентерефталатной плёнки от температуры

Лабораторная работа № 5

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить зависимость тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от температуры.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «ТКС конденсаторов», модуль «Измеритель RLC», модуль «Мультиметры», соединительные проводники.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 2.4 выполнить электрические соединения модулей. Монтаж схемы производить при отключенном питании. Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «ТКС конденсаторов» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления/емкости» модуля «Магнитомягкие материалы».

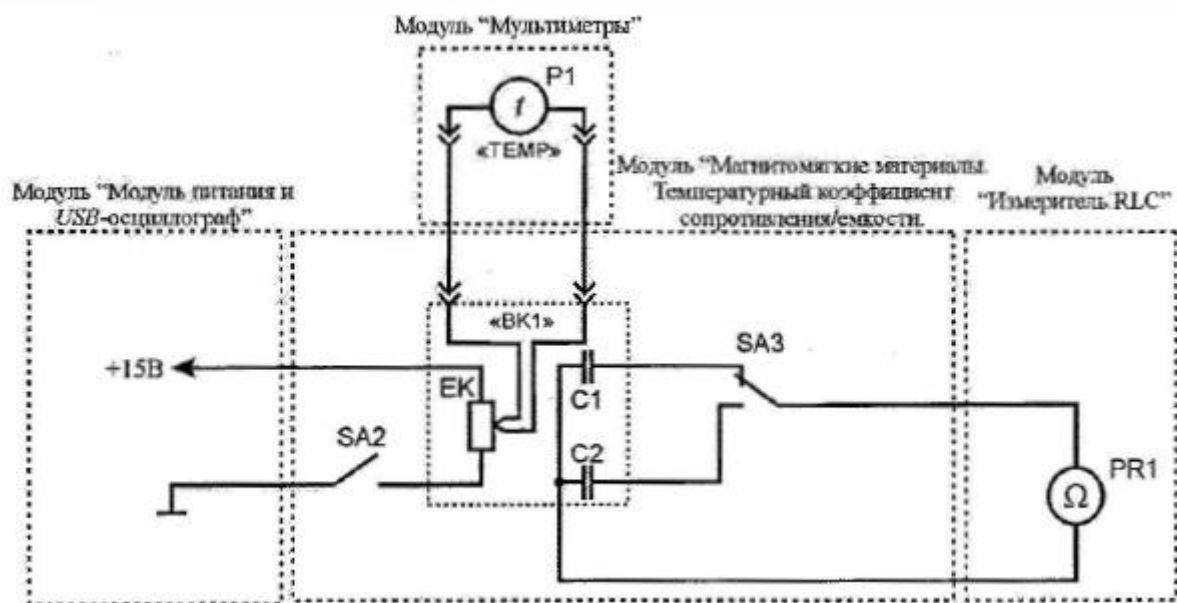


Рис. 2.4. Схема электрических соединений типового комплекта для измерения зависимости диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь от температуры

Подключить термопару *BK1* минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве измерителя емкости *P1* использовать *RLC*-метр в режиме измерения емкости.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить *RLC*-метр, выбрать режим измерения емкости (кнопка «L/C/R»), выбрать последовательную схему замещения (кнопка «ПАР ПОСЛ»), на дисплее *RLC*-метра отобразится «SER») установить частоту тест сигнала 1 kHz (кнопка «ЧАСТ»), установить режим измерения диэлектрических потерь (кнопка «L/C/R»).

4. Значения сопротивлений емкости *C1*, *C2*, тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и комнатной температуры *T* занести в табл. 2.1. Переключения между конденсаторами *C1* и *C2* осуществляется тумблером *SA3*. Конден-

сатор С1-К10-176-М1500 (верхнее положение ручки тумблера). Конденсатор С2- К10-47а-МП0 (нижнее положение ручки тумблера).

Т а б л и ц а 2.1

№	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Емкость конденсатора $C, \text{нФ}$		$\text{tg}\delta$	
		С1 (К10-176-М1500)	С2 (К10-47а-МП0)	С1	С2
1					
2					

5. Включить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1).

По окончании нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на $1 \dots 2 ^\circ\text{C}$) занести в табл. 2.1 значения емкости конденсаторов С1, С2, тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение).

6. Используя данные табл. 2.1 построить графики зависимости $\text{tg}\delta(T)$ для конденсаторов С1 и С2. Так как диэлектрическая проницаемость пропорциональна емкости конденсатора $\epsilon_r = C_x/C_0$, то зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_r от температуры T будет иметь такой же вид как зависимость емкости конденсатора C_x от температуры T . Построить графики зависимости $C_x(T)$.

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

8. Анализируя графики зависимости $C(T)$ конденсаторов сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Приведите понятие диэлектрической проницаемости.
2. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора.
3. Приведите определение добротности конденсатора.
4. Какие физические процессы обуславливают нагрев диэлектрика, ведущие к изменению его основных параметров?

Лабораторная работа № 6

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: определить тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическую проницаемость пьезоэлектрика.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Модуль питания и *USB* осциллограф», модуль «Прямой и обратный пьезоэффект. Наборное поле», модуль «Измеритель *RLC*», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Активными называют диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий и использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электротехники и электроники. Активные диэлектрики позволяют осуществлять генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации. По мере наращивания сложности электронной аппаратуры и перехода к функциональной электронике, роль и значение активных диэлектриков при решении важнейших научных и технических задач непрерывно возрастают.

К числу активных диэлектриков относят сегнето-, пьезо- и пьезоэлектрики; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и др.

Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твердые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам они подразделяются на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные диэлектрики. Ряд материалов проявляет свою активность лишь благодаря наличию в них спонтанной или устойчивой остаточной поляризации. Однако, поляризованное начальное состояние не является обязательным условием проявления активности материала при внешних воздействиях. Строгая классификация активных диэлектриков, охватывающая многие отличительные признаки этих материалов, оказывается весьма затруднительной. К тому же резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Один и тот же материал в различных условиях его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

В зависимости от технического назначения существенно различны и требования к материалам. Так, одно из главных требований, предъявляемых к пассивным диэлектрикам, заключается в сохранении стабильности свойств при внешних воздействиях. В то же время требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних возмущениях, тем лучше может выполнять активный элемент функции управления энергией или преобразования поступающей информации.

В большинстве случаев активные диэлектрики классифицируют по роду физических эффектов, которые используются для управления свойствами материалов. Однако такая классификация, хотя и является вполне логичной и обоснованной, все же не позволяет четко отделить одну группу материалов

от другой. Это связано с тем, что многие материалы проявляют высокую чувствительность по отношению к нескольким видам энергетических воздействий. Наибольшей универсальностью в этом плане характеризуются сегнетоэлектрики, которые сочетают в себе свойства пьезо- и пироэлектриков, электрооптических и нелинейно-оптических материалов. Они могут выступать и в качестве электретов. Вместе с тем, сегнетоэлектрики обладают рядом специфических, только им присущих свойств. Важнейшим из них является нелинейное изменение поляризованности при воздействии электрического поля. Это обстоятельство позволяет выделить сегнетоэлектрики в самостоятельную группу активных диэлектриков, аналогично и жидкие кристаллы, спецификой которых является анизотропия свойств и высокая структурная подвижность молекул, проявляющаяся во многих оптических эффектах, несвойственных другим веществам.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

В данной лабораторной работе производится измерение емкости C_x и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ конденсаторов прямым методом – измерителем RLC .

В качестве $P1$ использовать измеритель RLC модуля «Измеритель RLC ».

2. Согласно рис. 2.5 выполнить электрические соединения модулей (полярность подключения значения не имеет). Монтаж схемы производить при отключенном питании. Подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф».

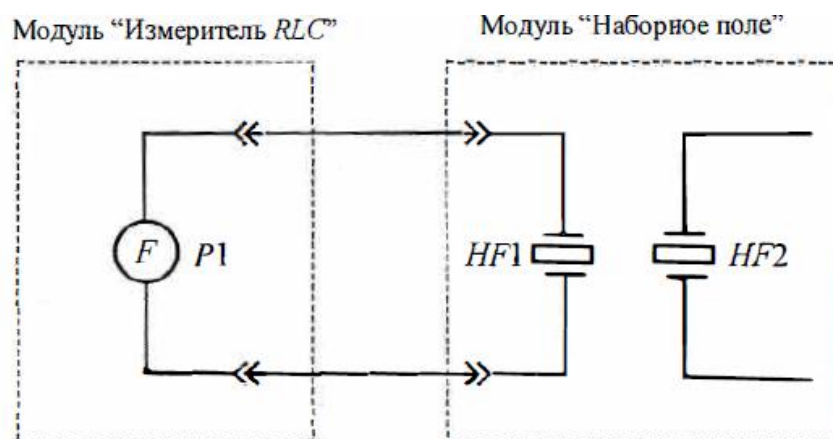


Рис. 2.5. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь пьезоэлектрика

3. Включить измеритель RLC (рис. 2.5), нажав кнопку “ⓘ”, нажатием кнопки “ $L/C/R$ ” установить режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать символ « F » - фарады в нижнем правом углу дисплея. Установить частоту тест сигнала 1 kHz нажатием кнопки “ЧАСТ”, частота тест сигнала отображается в правой части дисплея « 1 kHz ». Установить режим измерения тангенса угла диэлектрических потерь нажатием кнопкой “ $Q/D/R$ ”, о чем будет свидетельствовать символ « D » в верхней части дисплея. Выбрать последовательную схему замещения (кнопка “ПАР ПОСЛ” на дисплее RLC -метра отобразится « SER ».

Значение емкости отображается цифрами в центральной части дисплея, в правом нижнем углу расположена единица измерения: « μF » - $10^{-6}\Phi$; « nF » - $10^{-9}\Phi$; « pF » - $10^{-12}\Phi$.

В правой верхней части дисплея отображается тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

После установки показаний RLC метра занести значения емкости C_x и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ в табл. 2.2.

4. Не выключая измеритель RLC повторить измерения по пункту 3 для второго пьезоэлемента $HF2$. Результаты измерений занести в табл. 2.2.

5. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость ϵ пьезоэлектрика, по формуле:

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

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ - диэлектрическая постоянная, Ф/м; $S = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $d = 170 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε для каждого пьезоэлемента занести в табл. 2.2.

6. Сравнить экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ пьезоэлектрика со справочными.

Т а б л и ц а 2.2

№ п.п.	$\text{tg}\delta$	$C_x, \text{мкФ}$	ε
HF1			
HF2			

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение поляризации
2. Назовите основные механизмы поляризации
3. Приведите определение относительной диэлектрической проницаемости.
4. Физическая природа диэлектрических потерь.
5. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь.

3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основные типы магнитного состояния вещества. Все вещества в природе считаются магнетиками, так как они обладают определенными магнитными свойствами не соответствующим образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. В течение длительного времени магнетики классифицировали по внешним признакам, прежде всего по их магнитной восприимчивости $\chi = I/H$, где I - намагниченность (интенсивность намагничивания); H - напряженность магнитного поля.

В зависимости от значения χ , характера ее зависимости от H и температуры выделили следующие основные типы магнетиков (магнитных явлений): диамагнетики (диамагнетизм), парамагнетики (парамагнетизм), ферромагнетики (ферромагнетизм). Затем установили, что кроме указанных трех групп следует выделять еще две: антиферромагнетики (антиферромагнетизм) и ферримагнетики (ферримагнетизм). Однако при этом формальный классификационный признак оказывается несостоятельным. Дело в том, что магнитные свойства вещества, представляющего собой сложную динамическую систему атомов, состоящую из большого числа ядер и электронов, определяются внутри и межатомными взаимодействиями элементарных носителей магнетизма: частиц, диполей, квадруполь и т. д. Только изучение видов связей и значений энергии взаимодействий между микроносителями магнетизма позволяет объяснить различные типы магнитного состояния вещества.

Диамагнитный эффект является результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи и проявляется в том, что возникает магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю. Следовательно, диамагнитная восприимчивость отрицательна; по значению она весьма мала ($\chi \ll 10^{-5}$) в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Диамагнетизм существует во всех веществах, независимо от структуры их атомов и видов связи, т. е. в жидком, твердом и газообразном состояниях. Однако в «чистом виде» он проявляется только в тех

веществах (диамагнетиках), в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. Для веществ, а которых собственный суммарный магнитный момент атомных образований не равен нулю, на диамагнетизм накладывается значительно больший его по значению некомпенсированный момент электронов. В этом случае наблюдаются другие типы магнитного состояния, подавляющие диамагнетизм.

Парамагнитный эффект возникает в веществах с наличием некомпенсированных магнитных моментов и отсутствием магнитного атомного порядка. Это проявляется в том, что отсутствие внешнего поля векторы магнитных моментов под действием тепловой энергии располагаются равновероятно, в результате чего магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля возникает направление преимущественной ориентации магнитных моментов, совпадающее с направлением поля. т. е. появляется положительная намагниченность ($\chi > 0$). Для большинства парамагнетиков χ сильно зависит от температуры.

Ферромагнитный эффект состоит в том, что при температуре не выше точки Кюри (особой для каждого ферромагнетика) даже в отсутствие внешнего магнитного поля энергетически выгодно существование или не ферромагнитного атомного порядка. Этому порядку соответствует параллельное расположение спинов. Следовательно, даже в отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик находится в состоянии технического насыщения (самопроизвольного или спонтанного намагничивания). Магнитная восприимчивость у ферромагнетиков имеет очень большое положительное значение и существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнитный эффект характеризуется наличием антиферромагнитного атомного порядка, заключающегося в том, что в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты одинаковых соседних атомов или ионов вследствие взаимодействия ориентированы антипараллельно, так что результирующий магнитный момент равен нулю. При воздействии

внешнего поля магнитные моменты стремятся установиться вдоль него, и антиферромагнетик обладает малой положительной χ . значение которой зависит от температуры.

Ферримагнитный эффект представляет собой нескомпенсированный антиферромагнетизм (ферромагнитный атомный порядок).

При температуре выше точки Кюри у ферромагнетиков и точки Нееля у антиферромагнетиков и ферромагнетиков атомный магнитный порядок разрушается, и вещества переходят в парамагнитное состояние.

Диамагнетики и парамагнетики иногда объединяют под названием слабомагнитных веществ, не обладающих атомным магнитным порядком, а ферро-магнетики и ферримагнетики – под названием сильномагнитных веществ, обладающих атомным магнитным порядком; для антиферромагнетиков характерен атомный магнитный порядок, но количественно этот эффект весьма мал.

К сильномагнитным веществам относятся не только чистые ферромагнитные элементы, но и ряд металлических и интерметаллических сплавов, твердых растворов, полупроводниковых и диэлектрических соединений. Магнитный порядок в этих разнообразных типах веществ обусловлен наличием в их химическом составе компонентов из числа переходных элементов и обменным взаимодействием между элементарными носителями магнетизма, энергия которого превышает среднюю энергию теплового движения. Типы обменных взаимодействий и механизм их действия зависят от строения вещества, параметров его микроструктуры, природы химической связи. Так, для металлов и их сплавов, у которых магнитный момент обусловлен не полностью застроенным третьим слоем электронной оболочки, имеет место прямое обменное взаимодействие за счет перекрытия электронов, принадлежащих соседним атомам в решетке, поскольку расстояние между атомами в данной решетке мало. В веществах, атомы которых расположены на значительном расстоянии друг от друга, прямое обменное взаимодействие мало и возникают различные виды косвенных взаимодействий. Например, у редко-

земельных металлов имеет место косвенный обмен через электроны проводимости. Для ряда кристаллических химических соединений, у которых магнитоактивные носители атомных магнитных моментов разделены между собой магнитонейтральными ионами, осуществляется косвенное обменное взаимодействие между магнитными ионами через возбужденные немагнитные промежуточные ионы.

Для электротехники особое место среди магнитных материалов занимают ферромагнетики, они используются для производства трансформаторов, дросселей, постоянных магнитов.

Общие сведения о ферромагнетизме

К ферромагнетикам относятся: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При относительно низких температурах ферромагнитами являются некоторые редкоземельные элементы (гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий и тулий).

Все ферромагнетики характеризуются:

- кристаллическим строением;
- большим положительным значением магнитной восприимчивости (магнитной проницаемости), а также существенной и нелинейной ее зависимостью от напряженности поля и температуры;
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;
- гистерезисом - зависимостью магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния («магнитной предыстории»);
- точкой Кюри, т. е. температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства.

Кривые намагничивания. Магнитные свойства ферромагнетиков характеризуются зависимостями магнитной индукции B или намагниченности I от напряженности поля H и потерь на перемагничивание P от индукции и частоты.

Магнитные свойства материала зависят не только от напряженности поля, температуры, наличия или отсутствия механических напряжений и т. д., но и от предшествующего магнитного состояния.

Во многих случаях для получения кривых намагничивания в качестве исходного принимают размагниченное состояние образца, при котором в отсутствие внешнего поля индукция равна нулю и нет преимущественного направления намагничивания доменов, т. е. их магнитные моменты расположены статистически равновероятно.

Наилучшее размагничивание возможно при нагреве материала выше точки Кюри и последующего охлаждения при отсутствии внешнего поля, однако в технике этот способ применяют редко в связи с неудобствами его практического осуществления. Чаще всего образец размагничивают, воздействуя на него переменным полем с убывающей до нуля амплитудой, используя для этой цели специальные устройства или измерительную схему.

Максимальная напряженность размагничивающего поля, необходимая для полного размагничивания, различна у разных групп материалов и должна в несколько раз превышать значение коэрцитивной силы (H_c).

При намагничивании предварительно размагниченного образца различают следующие типы зависимостей:

1) *начальную (нулевую) кривую намагничивания*, которую получают при монотонном увеличении H ;

2) *безгистерезисную (идеальную) кривую намагничивания*, получаемую при одновременном действии постоянного поля и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой (кривая а на рис. 3.1).

3) *основную (коммутационную) кривую намагничивания*, представляющую собой геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании (кривая б на рис. 3.1).

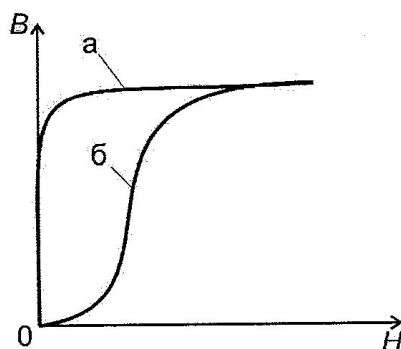


Рис. 3.1. Кривые намагничивания

Основная кривая намагничивания является важнейшей характеристикой магнитных материалов, отвечает требованиям хорошей воспроизводимости и широко используется для характеристики намагничивания материалов в постоянных полях.

На основной кривой намагничивания принято различать три участка: начальный, соответствующий нижнему колену кривой, участок быстрого возрастания индукции (намагниченности) и участок насыщения (выше верхнего колена кривой).

Петли гистерезиса. При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует петлю гистерезиса (рис. 3.2).

Если намагничивание происходит так, как показано стрелками на рис. 3.2, а, то при однократном прохождении петли точки A и A' , соответствующие одной и той же напряженности поля H_A , не совпадают, что объясняется различной для этих точек магнитной историей.

Для получения более определенной симметричной (установившейся) петли (рис. 3.2, б) при измерениях в цепях постоянного тока производят так называемую магнитную подготовку, которая состоит в многократном (5-10 раз) коммутировании тока в намагничивающей обмотке после установления его значения.

Форма петли для данного материала зависит не от значения поля. Для слабых полей она имеет вид эллипсов, с увеличением поля у нее начинают вытягиваться «носики», соответствующие точкам A_1 и A_2 (рис. 3.2, б). Петлю гис-

терезиса, полученную при условии насыщения, называют предельной. В справочниках обычно приводятся симметричные предельные петли гистерезиса.

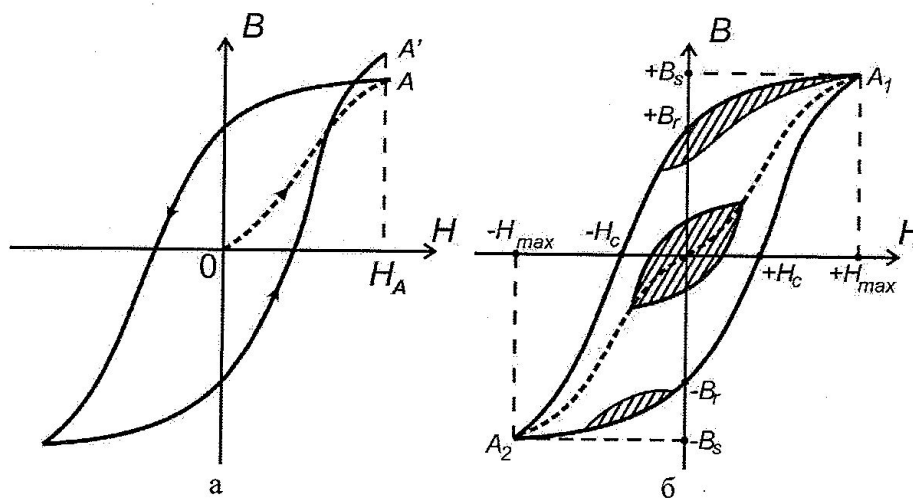


Рис 3.2. Петля гистерезиса при циклическом перемагничивании ферромагнетика

Основными характеристиками петли гистерезиса являются *остаточная индукция* B_r , *коэрцитивная сила* H_c , *индукция насыщения* B_s и площадь петли, характеризующая *потери на гистерезис* P за один цикл перемагничивания.

Остаточной индукцией B_r называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c - это размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу, для того чтобы индукция в нем стала равной нулю.

Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема вещества (удельные потери),

$$P_r = \oint H dB. \quad (3.1)$$

При перемагничивании материала с частотой f (Гц) потери на гистерезис

$$P_r = \frac{f \cdot \oint H dB}{\rho}, \quad (3.2)$$

где ρ - плотность материала, кг/м³

Кроме петли гистерезиса, вершины которой соответствуют основной кривой намагничивания, во многих случаях рассматривают так называемые частные петли гистерезиса, у которых вершины не лежат на основной кривой. Примеры частных петель приведены на рис 3.2, б (заштрихованные области). Особое значение имеют частные петли возврата, получающиеся при уменьшении размагничивающего поля.

Магнитная проницаемость. Различают абсолютную $\mu_a = H/B$ и относительную $\mu_r = H/B\mu_0$ магнитные проницаемости.

Подставляя в эти отношения конкретные значения B и H , получают различные виды магнитной проницаемости, применяемые в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия нормальной магнитной проницаемости μ , начальной $\mu_{нач}$ максимальной $\mu_{макс}$ дифференциальной $\mu_{диф}$.

Для точки A (рис. 3.3) магнитная проницаемость μ , определяется как тангенс угла наклона секущей OA к оси абсцисс, т. е.

$$\mu_A = \operatorname{tg} \alpha_A = \frac{B_A}{\mu_0 H_A}.$$

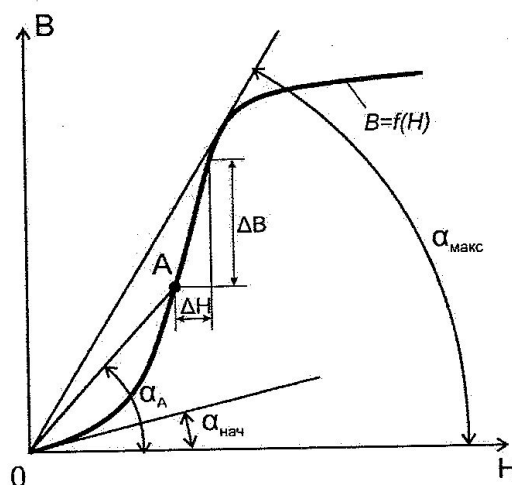


Рис. 3.3. Основные участки кривой намагничивания

Начальная и максимальная магнитные проницаемости определяются как частные случаи нормальной проницаемости, т. е. наклон касательной на начальном участке кривой $B=f(H)$ характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальной проницаемости.

$$\mu_{\text{нач}} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{нач}}, \quad (3.4)$$

$$\mu_{\text{макс}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{макс}} = \frac{B_{\text{макс}}}{\mu_0 H_{\text{макс}}}. \quad (3.5)$$

Дифференциальную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т. с. она представляет собой тангенс угла между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{dB}{\mu_0 dH}. \quad (3.6)$$

Понятие $\mu_{\text{диф}}$ чаще всего используют при анализе вопросов, связанных с одновременным действием на магнитный материал постоянного и переменного магнитных полей.

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов. При этом используется магнитная энергия, возникающая между полюсами магнита. Следовательно, магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т. с. иметь полетный (рабочий) воздушный зазор. Поток в зазоре возникает после намагничивания материала при кратковременном помещении его в сильное магнитное поле.

Большое значение для материалов, применяемых в постоянных магнитах, имеет размагничивающий участок петли гистерезиса - ее часть, расположенная во втором квадранте (рис. 3.4).

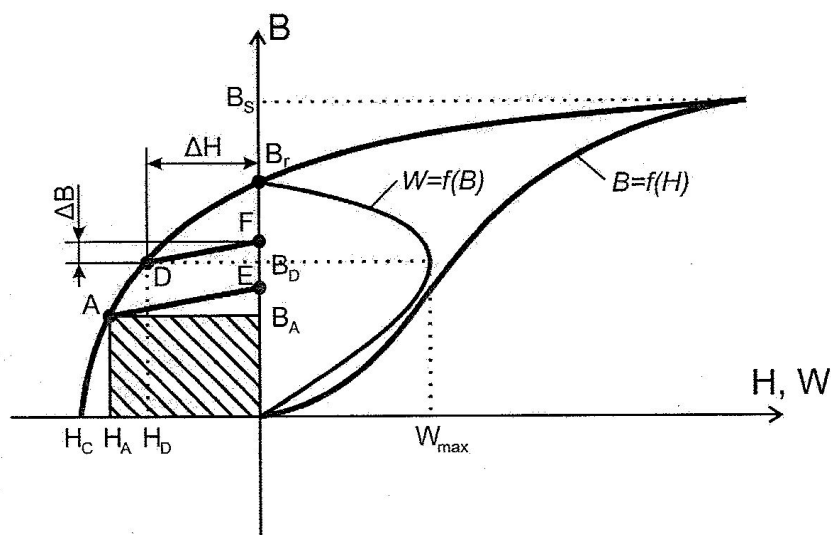


Рис. 3.4. Графики кривых, характеризующих магнитные свойства магнитотвердых материалов

На рис. 3.4 приведены кривые, характеризующие магнитные свойства магнитотвердых материалов. После снятия внешнего поля магнитные свойства материала характеризуются кривой размагничивания - участком гистерезисной петли, расположенным во втором квадранте. Положение рабочей точки A на этой кривой определяется конфигурацией магнитной цепи системы с постоянным магнитом. Индукцию B_a называют кажущейся остаточной индукцией или остаточной индукцией в замкнутой цепи.

Удельная магнитная энергия во внешнем пространстве

$$W_A = \frac{B_A H_A}{2} = [\text{Дж/м}^3]. \quad (3.7)$$

При изменении конфигурации магнитной пени, например, величины воздушного зазора, меняется положение рабочей точки на кривой размагничивания. Если цепь замкнута, то индукция будет наибольшей, равной остаточной индукции B_r , материала. Но так как воздушный зазор, где может быть использована энергия магнита, при этом отсутствует ($H=0$, то $B=0$). Второму предельному значению, при котором энергия также равна нулю, соответствует $H=H_c$; $B=0$.

Из рис. 3.4 видно, что точке D соответствует наибольшее значение удельной магнитной энергии $W_{\text{макс}}$. Этот параметр является важнейшим при оценке качества магнитотвердого материала.

В процессе эксплуатации магнита положение рабочей точки не остается постоянным. Изменение магнитного состояния происходит при этом по кривым возврата, представляющим собой частные петли гистерезиса, одна из вершин которых лежит на кривой размагничивания. Кривые возврата являются весьма узкими, поэтому их обычно заменяют прямыми возврата (на рис. 3.4 прямые AE и DF). Ход прямой возврата оценивается коэффициентом возврата

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}, \quad (3.8)$$

где ΔB - изменение индукции, соответствующее изменению поля ΔH (рис. 3.4).

Чем меньше коэффициент возврата, тем меньше изменения кажущейся остаточной индукции в результате смещения положения рабочей точки. Значит, коэффициент возврата определяет в некоторой степени стабильность магнитной цепи.

По преобладающему технологическому признаку (с учетом химического состава) магниты подразделяют:

- на стали, закаливаемые на мартенсит - углеродистые стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом с относительно невысокими магнитными свойствами;
- дисперсионно твердеющие сплавы, подвергающиеся холодной или горячей механической обработке давлением с несколько более лучшими магнитными свойствами, чем у сталей, закаливаемых на мартенсит.
- диффузионно-твердеющие сплавы на основе системы железо - никель - алюминий с добавками кобальта, меди, титана, ниобия и пр.:

- прессованные магниты из порошков на основе мелкодисперсных порошков железа и сплава железо кобальт с однодоменным и размерами частиц преимущественно с анизотропией формы;
- сплавы с применением благородных металлов типа платина кобальт, платина железо, серебро - марганец - алюминий и пр. с высокими значениями коэрцитивной силы;
- интерметаллическое соединение марганец - висмут;
- магнитотвердые ферриты бария, стронция и кобальта с высокой коэрцитивной силой и сравнительно небольшой остаточной магнитной индукцией;
- сплавы металлов группы железа с редкоземельными металлами, изготавливаемые методами порошковой металлургии, с рекордными значениями всех основных магнитных свойств;
- композиционные магнитотвердые материалы, изготавливаемые на основе порошков магнитотвердых материалов и полимерной связки.

Линия размагничивания магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов близка к прямой.

Лабораторная работа № 7

ОСНОВНАЯ КРИВАЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: изучение свойств ферромагнетика при помощи основной кривой намагничивания $B(H)$ и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu_r(H)$.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерений

В данной работе для получения основной кривой намагничивания $B(H)$ используется методика, заключающаяся в следующем: на кольце из ферромагнитного материала расположены две обмотки (рис. 3.5). Первичная обмотка ω_1 , намагничивающая, а вторичная ω_2 предназначена для измерения наводимой ЭДС.

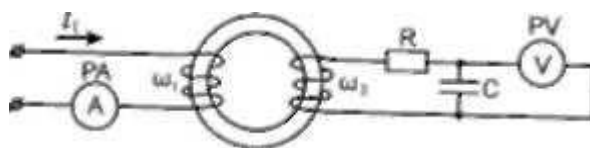


Рис. 3.5. Схема электрическая функциональная установки
для получения основной кривой намагничивания

Напряженность магнитного поля, которое создастся в кольцевом сердечнике при протекании по первичной обмотке тока i_1 рассчитывается по формуле

$$H = \frac{i_1 \cdot \omega_1}{l_{cp}}, \quad (3.9)$$

где ω_1 - число витков первичной обмотки; l_{cp} - длина средней линии сердечника; i_1 - действующее значение тока в обмотке ω_1 ; значения ω_1 и l_{cp} указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри».

ЭДС, наводимая во вторичной обмотке, является производной от потоко-
сцепления по времени:

$$E = \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.10)$$

где Ψ - потоко-сцепление в сердечнике. Потоко-сцепление Ψ определяется выражением:

$$\Psi = \omega_2 \cdot \Phi, \quad (3.11)$$

где ω_2 - число витков во вторичной обмотке; Φ - магнитный поток в сердечнике. Магнитный поток в сердечнике Φ зависит от индукции магнитного поля и геометрических размеров сердечника:

$$\Phi = B \cdot S_M, \quad (3.12)$$

где B - индукция магнитного поля; S_M - эффективная площадь сечения магнитопровода.

В цепь вторичной обмотки введен интегратор - RC -звено с постоянной времени $\tau = RC$ (напряжение на выходе которого пропорционально индукции в сердечнике).

Путем математических преобразований вышеуказанных выражений получаем:

$$B = \frac{U_2 \cdot R \cdot C}{\omega_2 S_M}, \quad (3.13)$$

где U_2 - напряжение на вторичной обмотке ω_2 .

Значения ω_2 и S указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри».

Для упрощения расчетов объединим постоянные параметры в коэффициент K_B :

$$B = k_B \cdot U_2, \quad (3.14)$$

$$k_B = \frac{R \cdot C}{\omega_2 \cdot S_M}. \quad (3.15)$$

Зная значение магнитной индукции B и напряженность магнитного поля H . Магнитная проницаемость:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3.16)$$

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

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 3.6 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Для отсечения постоянной составляющей переменного тока в цепь первичной обмотки включен конденсатор C_1 .

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости».

В качестве амперметра PA использовать мультиметр 1 в режиме измерения переменного тока 200 мА.

В качестве вольтметра PV использовать мультиметр 2 в режиме измерения переменного напряжения с пределом 20 В.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Включить функциональный генератор. Установить прямоугольную форму выходного сигнала с частотой $f = 250$ Гц.

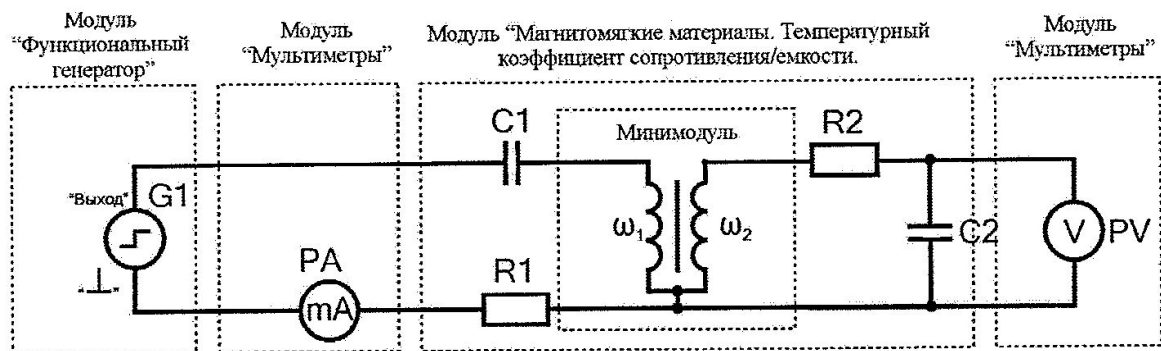


Рис. 3.6. Схема электрическая соединений типового комплекта
для изучения основной кривой намагничивания:

$$R1 = 24 \text{ Ом}, R2 = 5.1 \text{ кОм}, C2 = 0.33 \text{ мкФ}, C1 = 50 \text{ мкФ}$$

4. Изменяя силу тока I (PA) в цепи первичной обмотки w_1 при помощи кнопок «Амплитуда» модуля «Функциональный генератор» в диапазоне $0 \dots 100 \text{ мА}$ (с шагом 10 мА). Заносить значения значения напряжения $U(PV)$ и тока $I(PA)$ в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	μ_r
$0 \cdot 10^{-3}$				
$10 \cdot 10^{-3}$				
$20 \cdot 10^{-3}$				
...				
$100 \cdot 10^{-3}$				

5. Используя данные табл. 3.1 рассчитать значения H , B и μ_r для каждого пункта по формулам

$$H = \frac{I \cdot w_1}{l_{\text{ср}}}, \quad B = \frac{U R_2 C_2}{w_2 S_{\text{м}}}, \quad \mu_r = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $l_{\text{ср}}$, $S_{\text{м}}$, w_1 , w_2 указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри» ($l_{\text{ср}}$, $S_{\text{м}}$ указаны на корпусе минимодуля в мм и мм², которые при расчете необходимо перевести в м и м²: соответственно). Полученные значения занести в табл. 3.1.

6. Построить графики зависимостей магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$ (основная кривая намагничивания ферромагне-

тика) и относительной магнитной проницаемости сердечника от напряженности магнитного поля $\mu_r(H)$.

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

8. Анализируя основную кривую намагничивания и зависимость $m_r(H)$ определить индукцию насыщения B_s (при максимальной напряженности магнитного поля H), начальную $\mu_{нач}$ и максимальную μ_{max} относительные магнитные проницаемости.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные виды кривых намагничивания магнитомягких материалов.
2. Приведите определение магнитной проницаемости и её основные виды.
3. Приведите основные точки и участки кривой намагничивания.
4. Почему в области магнитного насыщения ферромагнетика индукция не возрастет с увеличением напряженности магнитного поля?

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПРИ ПОМОЩИ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Цель работы: определение параметров петли магнитного гистерезиса, изучение семейства частных петель, определение удельной энергии перемagnetизации ферромагнетика.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Мультиметр».

ры», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерений

Согласно методике измерения магнитной индукции и напряженности поля описанного в лабораторной работе №12 имеем:

$$H = k_H U_x \quad (3.17)$$

$$B = k_B U_y \quad (3.18)$$

где U_x, U_y - значения напряжений на осциллограмме петли гистерезиса:

$$k_B = \frac{R_2 C_2}{\omega_2 S_m} - \text{масштабный коэффициент индукции магнитного поля};$$

$$k_H = \frac{\omega_1}{R l_{cp}} - \text{масштабный коэффициент напряженности магнитного поля}.$$

Удельные потери энергии на перемагничивание магнитного материала:

$$P_{yd} = \frac{f}{\rho} \oint B \cdot dH,$$

где f - частота перемагничивания; ρ - плотность материала (указана на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри»).

Подставив значения индукции (3.18) и напряженности (3.17) магнитного поля получим:

$$P_{yd} = \frac{f}{\rho} k_H k_B \oint U_y dU_x = \frac{f}{\rho} k_H k_B S_n, \quad (3.19)$$

где $S_n = \oint U_y \cdot dU_x$ - площадь петли гистерезиса. Расчет площади петли гистерезиса приведен ниже.

Расчет площади петли гистерезиса

Определим площадь петли гистерезиса методом трапеций.

Разобьем половину петли (положительные значения U_y) на n участков (рис. 3.7), площадь каждого участка определяется как разность площадей

прямоугольных трапеций, образованных верхней и нижней кривой петли. На рис. 3.7 петля разбита на 7 участков.

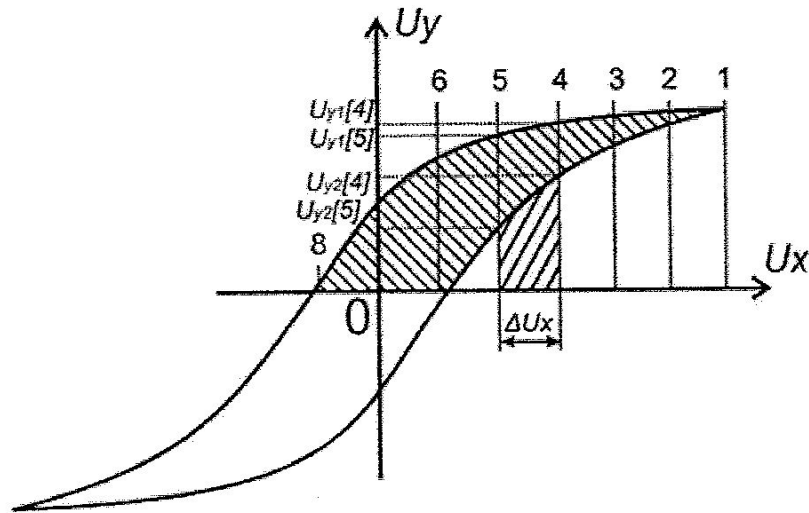


Рис. 3.7. Расчет площади петли гистерезиса

Площадь всей петли будет равна удвоенной сумме площадей всех участков. Таким образом, получаем, что площадь петли равна:

$$S_n = \Delta U_x \sum_{i=1}^n (U_{y1}[i] + U_{y1}[i-1] - (U_{y2}[i] + U_{y2}[i-1]))$$

где ΔU_x - шаг разбиения; n - количество элементов (для расчетов достаточно 5 - 10 элементов); U_{y1} - значение напряжения, отсекаемое линией на верхней кривой петли; U_{y2} - значение напряжения, отсекаемое линией на нижней кривой петли.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

Часть 1. Определение параметров петли магнитного гистерезиса и вычисление удельной энергии перемagnetизации.

2. Согласно рис. 3.8 выполнить электрические соединения модулей для изучения свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления, емкости».

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить модуль «функциональный генератор».

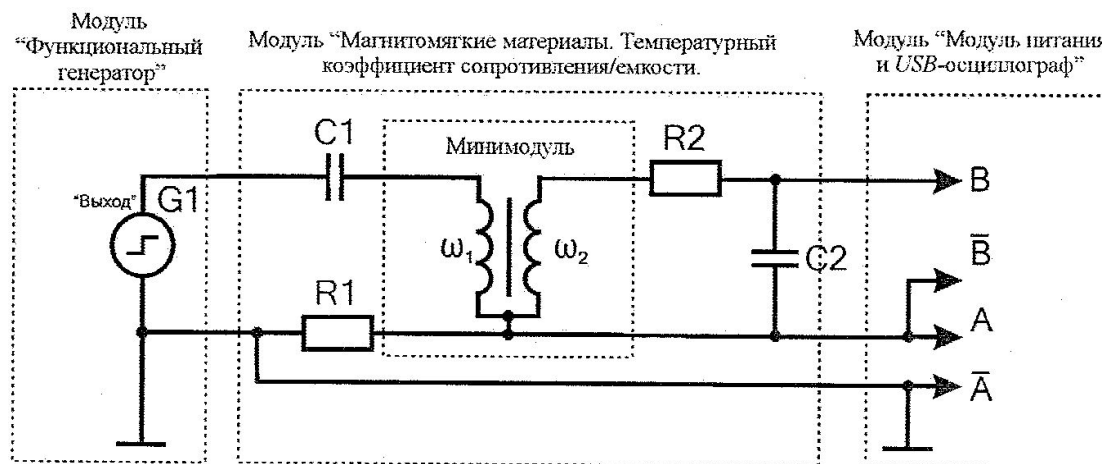


Рис. 3.8. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения петли гистерезиса: $R1 = 24 \text{ Ом}$, $R2 = 5.1 \text{ кОм}$, $C2 = 0.33 \text{ мкФ}$, $C1 = 50 \text{ мкФ}$

Установить прямоугольную форму выходного сигнала функционального генератора G . частоту $f_{\text{вых}} = 250 \text{ Гц}$. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф DOSC-DLA». Перейти в режим «XY» Задать размах шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» "Канал A/B (Вольт/экран)" 0.2 В/деление . Повернуть ручку "Время (с/дел)" (разверт-

ка) в положение 0.5 мс/дел. Нажать на кнопку «цикл». Увеличивая ток I в первичной обмотке с помощью кнопок увеличения и уменьшения амплитуды функционального генератора, получить изображение предельной петли гистерезиса, при которой рост тока не приводит к увеличению площади петли гистерезиса.

3. Измерить координаты (напряжения) точек петли, которые соответствуют положительной и отрицательной значениям коэрцитивной силы $+H_c$ и $-H_c$, остаточной индукции $+B_r$ и $-B_r$, индукции насыщения $+B_s$ и $-B_s$, (рис. 3.9). Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

k_B	k_H	Координаты (напряжения) точек петли, В			Основные характеристики петли
		$U_{x+}(H_c)=$	$U_{x-}(H_c)=$	$U_{xcp}(H_c)=$	$H_c=$
		$U_{y+}(B_r)=$	$U_{y-}(B_r)=$	$U_{ycp}(B_r)=$	$B_r=$
		$U_{y+}(B_s)=$	$U_{y-}(B_s)=$	$U_{ycp}(B_s)=$	$B_s=$

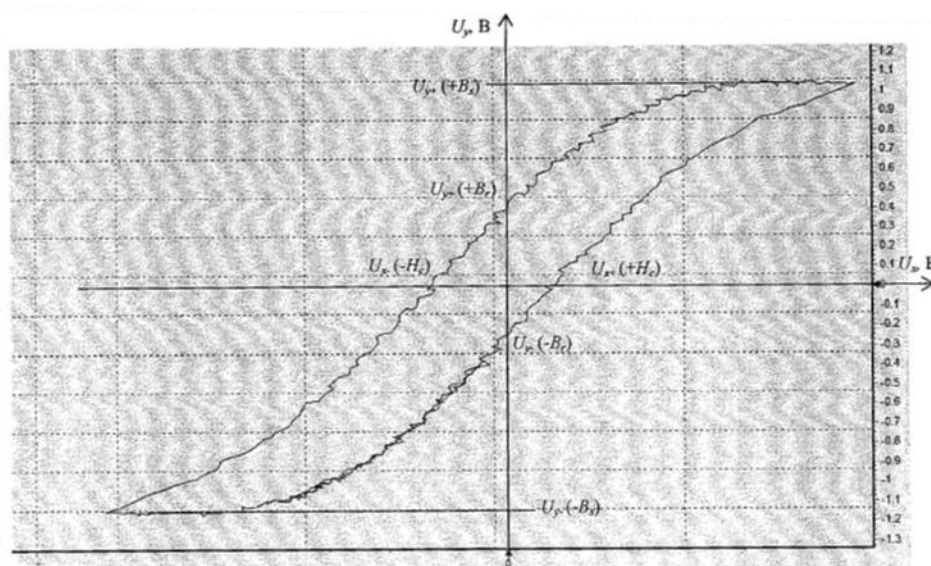


Рис. 3.9. Соответствие точек петли гистерезиса значениям коэрцитивной силы $+H_c$ и $-H_c$, остаточной индукции $+B_r$ и $-B_r$, индукции насыщения $+B_s$ и $-B_s$,

4. Используя данные табл. 3.2 рассчитать средние значения напряжений $U_{xcp}(H_c)$, $U_{ycp}(B_r)$, $U_{ycp}(B_s)$, среднее арифметическое положительных и отрицательных координат $U_{ycp}=(U_+|U_-|)/2$, полученные значения занести в табл. 3.2.

Рассчитать масштабные коэффициенты k_B и k_H формулам:

Т а б л и ц а 3.3

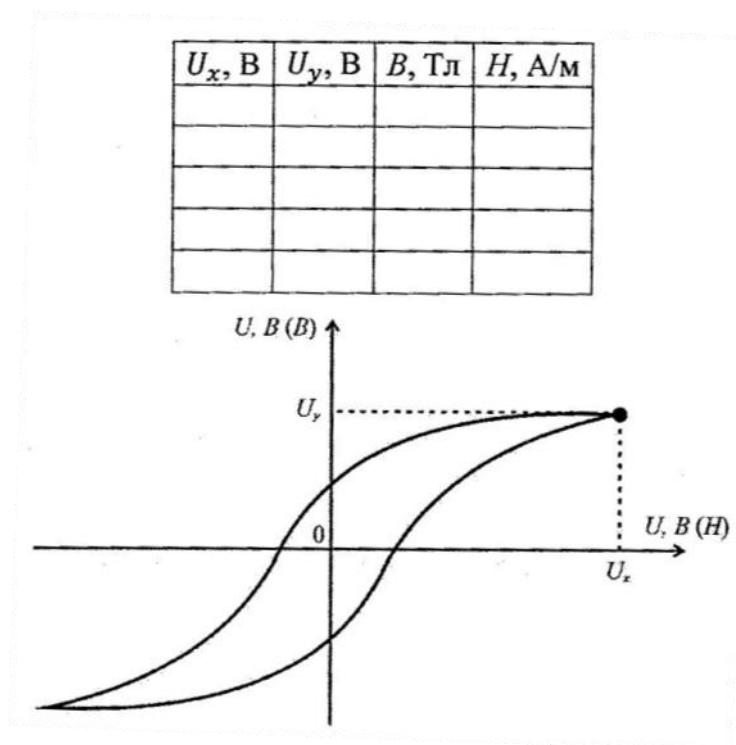


Рис. 3.10. Координаты вершин петли гистерезиса

Используя данные табл. 3.3 рассчитать значения H , B для каждого пункта табл. 3.3 по формулам:

$$H = k_H U_x, \quad B = k_B U_y.$$

Полученные значения занести в табл. 3.3.

5. Используя данные табл. 3.3 построить основную кривую намагничивания $B(H)$.

6. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

7. Сравнить основную кривую намагничивания $B(H)$ с основной кривой намагничивания, полученной в лабораторной работе № 10. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры ферромагнетика определяются по предельной петле гистерезиса?
2. Как определить удельные потери на перемагничивания ферромагнетика?
3. Как изменяются удельные потери с увеличением частоты перемагничивания ферромагнетика?

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ

Цель работы: наблюдение изменения петли гистерезиса в процессе перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние, построение зависимости магнитной индукции от температуры, определение температуры Кюри.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерения

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

По мере уменьшения температуры ниже T_c намагниченность ферромагнетика J возрастает, так как магнитные моменты его атомов в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при

котором намагниченность вещества J_s максимальна. Ее величина (магнитный момент единицы объема образца) равна сумме магнитных моментов атомов:

$$J_s = n\mu_m, \quad (3.20)$$

где n - концентрация молекул ферромагнетика; μ_m - магнитный момент одного атома.

Полное насыщение, для которого справедлива формула (3.20), возможно только при $T = 0\text{ К}$. Соответствующая этой температуре величина $J_s(0)$ находится из связи магнитной индукции $\vec{B}$ с намагниченностью вещества $\vec{J}$:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad (3.21)$$

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

Согласно выражению (3.21), намагниченность насыщения при $T = 0\text{ К}$

$$J_s(0) = B_s(0)/\mu_0 - H_s(0) \cong B_s(0)/\mu_0, \quad (3.22)$$

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

Методика определения величин индукции B и напряженности H магнитного поля в сердечнике магнитопровода приведена в лабораторной работе № 7.

Для построения зависимости индукции насыщения B_s от температуры ферромагнетика T измеряют координату B_s вершины петли гистерезиса при нагревании образца. По мере роста температуры ордината B_s петли уменьшается, а напряженность поля H остается постоянной. При этом площадь петли S_n гистерезиса уменьшается и по достижении температуры Кюри вырождается в прямую линию. В лабораторной работе изучают зависимость $B_s(T)$.

Участок кривой (1 - N) проводят по полученным в ходе эксперимента точкам (рис. 3.11). При этом ось температуры на графике начинается при $T = 0\text{ К}$. Для определения $B_s(0)$ из точки «1» продолжают зависимость $B_s(T)$ до пересечения с осью B_s ($T = 0\text{ К}$) двумя линиями: проводят нормаль к оси B и

касательную к кривой на начальном участке. Точки пересечения этих линий с осью B_s дают интервал ΔB_s внутри которого лежит искомая величина:

$$B_s(0) = B_{s1} + \Delta B_s/2. \quad (3.23)$$

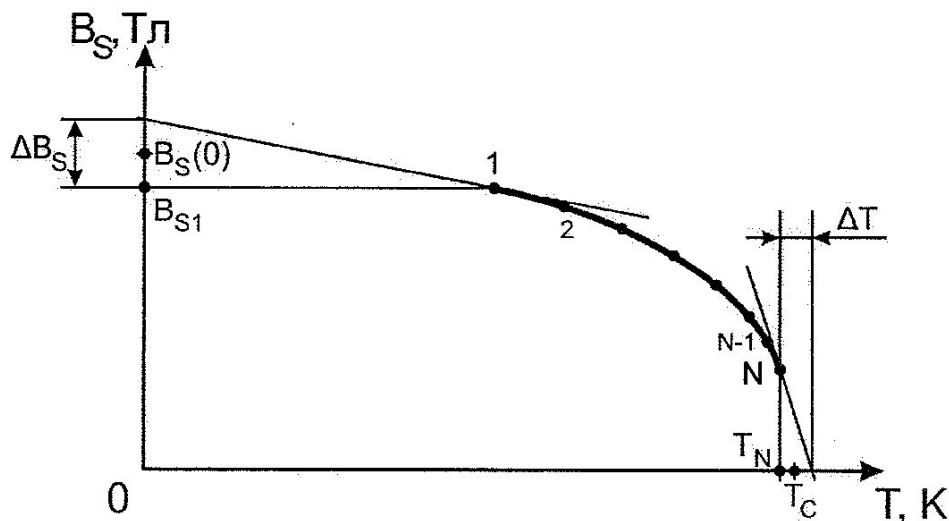


Рис. 3.11. График зависимости магнитной индукции материала от его температуры

Используя найденные значения $B_s(0)$, по формуле (3.22) рассчитывается намагниченность J при насыщении, затем используя соотношение (3.20) рассчитывается магнитный момент μ_m , одной молекулы ферромагнетика. В данной работе ферромагнитный образец выполнен из сплава $M_n - Z_n$, для которого концентрация атомов – $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Из графика зависимости $B_s(T)$ определяем температуру точки Кюри T_c данного ферромагнетика. Если последняя экспериментальная точка (N) близка к оси температур, то при надевании была достигнута температура точки Кюри, при этом точка пересечения опытной кривой с осью T (где $B_s = 0$) дает значение T_c .

Иначе находят точку Кюри путем экстраполяции опытной зависимости до значения $B_s = 0$ (рис. 3.11). Для чего, из точки « N » продолжают зависимость $B_s(T)$ до пересечения с осью T ($B_s = 0 \text{ Тл}$) двумя линиями: проводят нормаль к оси T касательную к кривой на конечном участке. Точки пересече-

ния этих линий с осью T дают интервал ΔT , внутри которого лежит искомая величина значения температуры точки Кюри T_C :

$$T_C = T_N + \Delta T/2. \quad (3.26)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 3.12 выполнить электрические соединения модулей для определения точки Кюри и магнитного момента атома ферромагнетика. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA1 перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости». Подключить термопару ВК минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить модуль «Функциональный генератор».

Установить прямоугольную форму выходного сигнала функциональной генератора G , частоту $f_{\text{вых}} = 250$ Гц. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф DOSC-DLA». Перейти в режим «XY». Задать ритм шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» "Канал А/В (Вольт/деление)" 0.2 В/деление. Повернуть ручку "Время (с/дел)"

(развертка) в положение 0.5 мс/дел. Нажать на кнопку «цикл». Увеличивая ток намагничивания I в первичной обмотке с помощью кнопок увеличения и уменьшения амплитуды функционального генератора получить изображение предельной петли гистерезиса, при которой рост тока не приводит к увеличению площади петли гистерезиса.

При необходимости установил, режим сглаживания каналов A и B , если это не изменит форму сигнала (в меню «Аналоговые сигналы» пункты «Сглаживание канала A » и «Сглаживание канала B »).

4. Значения температуры t , положительной U_+ и отрицательной U_- ординат вершин (рис. 3.13) петли гистерезиса (соответствуют величине индукции насыщения $\pm BS$) занести в табл. 3.4

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA1$ перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра).

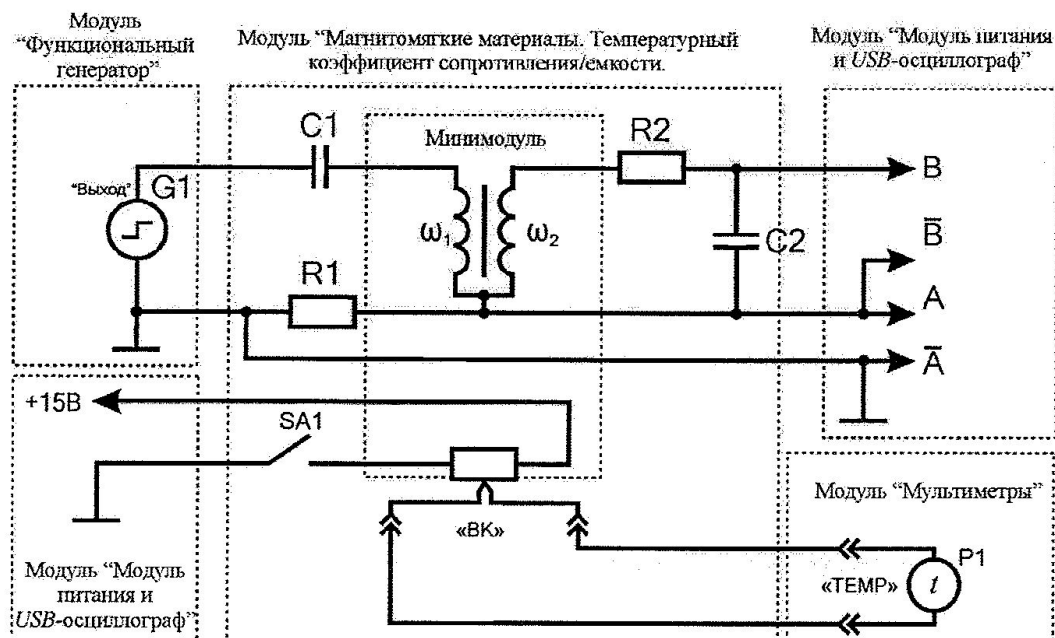


Рис. 3.12. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения точки Кюри ферромагнетика:

$$R1 = 24 \text{ Ом}, R2 = 5.1 \text{ кОм}, C2 = 0.33 \text{ мкФ}, C1 = 50 \text{ мкФ}$$

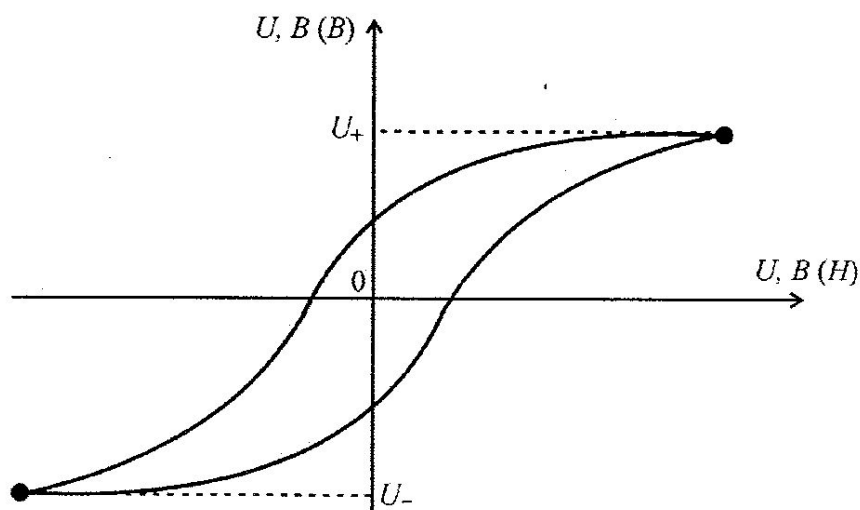


Рис. 3.13. Координаты вершин петли гистерезиса

Таблица 3.4

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$U_+, \text{В}$	$U_-, \text{В}$	$U_{\text{ср}}, \text{В}$	$B_s, \text{Тл}$
20					
30					
...					
120					

По мере нагревания образца каждые 10°C . а после 100°C - каждые 5°C , проводить измерения положительной U_+ и отрицательной U_- ординат вершин петли гистерезиса и температуры t , полученные значения заносить в табл. 3.4.

При проведении эксперимента необходимо поддерживать предельную форму петли гистерезиса (так как с изменением температуры происходит уменьшение индукции насыщения B_s), для чего необходимо уменьшать амплитуду выходного сигнала кнопками увеличения и уменьшения амплитуды модуля «Функциональный генератор» при повышении температуры.

6. Измерения продолжать до окончания нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5-ти минут более чем на $1...2^\circ\text{C}$).

7. Для каждой строки табл. 3.4 рассчитать средние значения напряжений U_+ и U_- :

$$U_{cp} = (U_+ + |U_-|)/2$$

полученные значения занести в табл. 3.4.

Для каждой строки табл. 3.4 рассчитать значения индукции насыщения B_s , по формуле:

$$B_s = \frac{R_2 C_2}{\omega_2 S_M} U_{cp},$$

где $R_2 = 5.1$ кОм. $C_2 = 0.3 \mu\text{Ф}$. S_M - указана на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри» (S_M приведена на корпусе минимодуля в $[\text{мм}^2]$, которые при расчете необходимо перевести в $[\text{м}^2]$ соответственно). Полученные значения занести в табл. 3.4.

Рассчитать температуру точки T по формуле $T = 273 + t$, полученные значения занести в табл. 3.4.

8. Используя данные табл. 3.4 построить график зависимости $B_s(T)$

9. Согласно методике измерений, изложенной в данной лабораторной работе, определить значение температуры точки Кюри T_c , определить индукцию образца $B_s(0)$ при температуре 0 К. рассчитать магнитный момент одного атома μ_m .

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. Сравнить полученные значения температуры точки Кюри T_c и магнитный момент атома μ_m ферромагнетика со справочными (тип ферромагнетика приведен на корпусе минимодуля), сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение температуры точки Кюри?
2. Приведите определение парамагнитного состояния вещества?
3. Как изменяется намагниченность ферромагнетика при приближении к температуре точки Кюри.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие для студентов вузов, под ред. Чередниченко. – 2-е изд., перераб. – М.: Омега-Л, 2006. – 752 с.
2. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др.; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – 7-е, стереотип. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 648 с.
3. Материаловедение и технология металлов. Под ред. Фетисова Г.П. – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с.
4. Ржевская С. В. Материаловедение: учебник для вузов / С. В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб и доп. – М.: Логос, 2004. – 424 с.
5. Журавлева Л. В. Электроматериаловедение: учебник / Л. В. Журавлева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Academia, 2004. – 312 с.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

*Методические указания
к проведению лабораторных работ № 1 – 9*

Составители: **Братан** Сергей Михайлович, **Харченко** Александр Олегович,
Часовитина Анастасия Сергеевна, **Стадник** Татьяна Валерьевна

Издается в авторской редакции

Изд. № 134/2025. Объем 5,75 п. л. Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 5,64.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»