

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

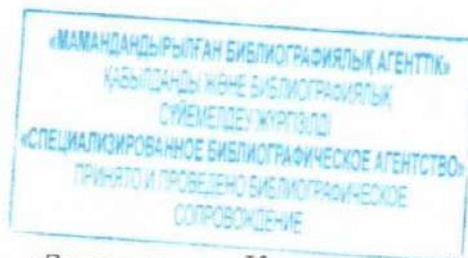
**ГККП «ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
КОЛЛЕДЖ»**

ЖҰМАГЕРЕЕВА АЙДАНА СЕРІКҚЫЗЫ

**СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 1013000 – МЕХАНООБРАБОТКА,
КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И
АВТОМАТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ
МОДУЛЬ: «Электротехнические материалы»
(Учебно-методический комплекс)**

Уральск, 2019

УДК 621.3
ББК 31.2
№81



РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Бектасов Б.Ө. – «Западно – Казахстанский аграрно – технический университет» старший преподаватель

Арстанов К.Б. – Преподаватель первой категории «Западно-Казахстанского индустриального колледжа»

Жұмагереева А.С.

Специальность: 1013000 – «Механообработка, контрольно-измерительные приборы и автоматика в промышленности», модуль: *81 «Электротехнические материалы»: Учебно-методический комплекс/ А.С. Жұмагереева. – Уральск: Западно-Казахстанский индустриальный колледж, 2019. – 159 стр.

ISBN 978-601-7062-44-6

Учебно-методический комплекс позволяет студентам изучить общие характеристики материалов с особыми физическими свойствами, проводниковые материалы, материалы высокой проводимости, сверхпроводящие металлы и сплавы, общие сведения о диэлектриках, органические твердые диэлектрики на основе полимеров, общие сведения о полупроводниковых материалах, фотопроводимость полупроводников, люминесценция, элементарные полупроводники, общие сведения о магнитных материалах, классификация магнитных материалов, магнитные материалы специального назначения, магнитотвердые материалы.

Учебно-методический комплекс по модулю «Электротехнические материалы» предназначен для обучения студентам.

По решению Учебно – методического совета Западно-Казахстанского индустриального колледжа от 27.03.2019 г. Был утвержден и предоставлен к печати, протокол № 5

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-601-7062-44-6

© Жұмагереева А.С., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретическая часть

Глава 1. Введение.

Лекция 1. Введение

Глава 2. Общая характеристика электротехнических материалов

Лекция 2. Общая характеристика материалов с особыми физическими свойствами

Лекция 3. Проводниковые материалы

Лекция 4. Материалы высокой проводимости

Лекция 5. Сверхпроводящие металлы и сплавы

Глава 2. Диэлектрики

Лекция 6. Общие сведения о диэлектриках

Лекция 7. Виды диэлектриков

Лекция 8. Органические твердые диэлектрики на основе полимеров

Глава 3. Полупроводниковые материалы

Лекция 9. Общие сведения о полупроводниковых материалах

Лекция 10. Фотопроводимость полупроводников. Люминесценция

Лекция 11. Элементарные полупроводники

Глава 4. Магнитные материалы

Лекция 12. Общие сведения о магнитных материалах

Лекция 13. Классификация магнитных материалов

Лекция 14. Магнитные материалы специального назначения

Лекция 15. Магнитотвердые материалы

2. Практикум

Лабораторная работа № 1. Испытание воздуха на пробой при различной форме электродов

Лабораторная работа № 2. Измерение емкости и диэлектрических потерь высоковольтной изоляции

Лабораторная работа № 3. Испытание трансформаторного масла

Лабораторная работа № 4. Исследование электрической прочности твердых диэлектриков и явлений разряда по поверхности

Лабораторная работа № 5. Определение основных характеристик магнитных материалов

3. Глоссарий

4. Диагностико – контролирующий блок

5. Приложение 1. Оценочный лист

6. Список использованной литературы

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ МОДУЛЯ

Электротехнические материалы являются основой конструкции электрического оборудования электроподвижного состава (ЭПС). На ЭПС возникает необходимость в применении материалов, обеспечивающих как определенные электрические, так и магнитные свойства конструктивных элементов электрических аппаратов и машин.

Цель изучения модуля – изучение свойств материалов, используемых в конструкциях электрических аппаратов и машин ЭПС. Знания и навыки, полученные при изучении модуля «Электротехнические материалы» будут использованы студентами в дальнейшем при изучении специальных модулей.

Задачами изучения модуля являются: 1) получение студентами представления о физических явлениях, определяющих свойства и особенности диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов 2) получение студентами знания о количественных параметрах, используемых при выборе материалов электрического оборудования ЭПС; видах диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, применяемых в конструкциях электрических аппаратов и машин, об особенностях и областях применения этих материалов.

ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МОДУЛЯ

Изучив модуль «Электротехнические материалы», согласно Государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования и государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника предполагают, что в результате изучения модуля студент должен:

- иметь представление:

- о предмете, цели, задачи модуля и об ее значении для будущей профессиональной деятельности;
- о физических явлениях, определяющих свойства и особенности диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов;

- знать:

- количественные параметры, используемых при выборе материалов электрического оборудования ЭПС,
- видах диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, применяемых в конструкциях электрических аппаратов и машин, об особенностях и областях применения этих материалов;

- уметь:

- применять знание о количественных параметрах, используемых при выборе материалов электрического оборудования ЭПС, при изучении специальных модулей и в будущей профессиональной деятельности;

- использовать знание о видах диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, применяемых в конструкциях электрических аппаратов и машин, об особенностях и областях применения этих материалов при изучении специальных модулей и в будущей профессиональной деятельности;

- приобрести навыки:

- использования учебной и технической литературы,
- информационных материалов из Интернета,
- работы с приборами,
- проведения измерений и расчётов, решения задач по модулю «Электротехнические материалы»,
- осмысления, анализа и защиты полученных результатов.

Знания и навыки, полученные при изучении модуля «Электротехнические материалы» дают возможность студентам изучать все последующие модуля учебного плана на качественно более высоком уровне.

1. Теоретическая часть

Лекция 1. Введение – 1 час

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с разработкой и использованием новых материалов. Совершенствование применяемых материалов является необходимым условием успешного развития любой отрасли техники. В полной мере это относится к таким техническим отраслям, как электротехника и радиоэлектроника, для которых именно качество материалов становится ключом к разработке сложных инженерных решений и созданию новейшей электронной аппаратуры. Применяемые в этих областях металлические и неметаллические материалы обладают особыми физическими свойствами: электрическими, магнитными, свойствами теплового расширения и т.д. Знание свойств материалов и объективных закономерностей зависимости этих свойств от физической природы, структуры, состава, технологических и эксплуатационных факторов позволяет специалисту не только грамотно выбирать материал при проектировании электротехнических устройств, но и грамотно эксплуатировать их.

История целенаправленного применения специализированных материалов для электротехники началась в 1802 г. при создании академиком В.В.Петровым в качестве источника электрической энергии большой гальванической батареи. В 1832 г. русский ученый П.Л.Шиллинг в опытах по созданию электромагнитного телеграфа использовал в качестве изоляции пленку, пропитанную воском, каучук и шелковую пряжу. В 1872 г. изобретатель А.Н.Лодыгин создал первую угольную лампу накаливания, а инженер П.Н.Яблочков в 1876 г. изобрел электрическую «свечу». В этих изобретениях были использованы проводники, электрическая изоляция и магнитные материалы, которые были объединены в большую группу электротехнических материалов.

Наука об электротехнических материалах приобретала все большее значение по мере развития радиотехники, в частности, с изобретением радио великим русским ученым А.С.Поповым.

Электротехническое материаловедение базируется на основах классического материаловедения, для которого исключительным вкладом явилось открытие Д.И.Менделеевым (1834-1907) периодической системы элементов, ставшей теоретическим фундаментом для развития физики и химии материалов.

Значительное место среди электротехнических материалов занимают металлы и сплавы. Большой вклад в развитие отечественного металлостроения внесли русские и советские ученые Д.К.Чернов, В.С.Курнаков, С.С.Штейнберг, Н.А.Минкевич, Г.В.Курдюмов, А.М.Бочвар, А.А.Бочвар, В.Д.Садовский, И.И.Сидорин, Ю.М.Лахтин.

С разработкой пластмасс, синтетических смол и других полимерных материалов группа электротехнических материалов значительно расширилась. Создание этих материалов связано с развитием химии высокомолекулярных соединений, основы которой были заложены выдающимся русским ученым А.М.Бутлеровым. В разработку таких неорганических материалов, как стекла и керамика, внесли вклад советские ученые В.А.Каргин, К.А.Андрианов, Н.П.Богородицкий. Благодаря фундаментальным исследованиям в области ферромагнетизма Н.С.Акулова, С.В.Вонсовского, существенно увеличился спектр магнитных материалов различного назначения. Работы

академика А.Ф.Иоффе позволили разработать новый класс полупроводниковых материалов.

Существенный скачок в разработке материалов был связан с увеличивающимися потребностями радиоэлектроники в послевоенные 40-50-е годы прошлого века. Собираемая из множества деталей электронная аппаратура была громоздкой и тяжелой. Плотность монтажа среднего телевизора составляла 0,05 деталей на 1 см², а надежность электронной аппаратуры была невысока. Техническая задача сокращения размеров и массы аппаратуры, увеличения ее надежности и долговечности логически привела к интенсивному развитию микроэлектроники, которая основана на минимизации энергетических процессов в электронных схемах, что потребовало разработки новой элементной базы и технологий.

В настоящее время с использованием планарной технологии формирования интегральных схем на подложке в 1 см² удается разместить до 600 тысяч функциональных элементов.

Достижения последних лет в области разработки новых электротехнических материалов весьма значительны. Для их изготовления применяют разнообразные методы химического синтеза, искусственного выращивания монокристаллов, нанесения тонких пленок (высокопроводящих, резистивных и магнитных) на подложку, способы глубокой очистки от примесей, ионноплазменную обработку, воздействие на материалы электромагнитным полем, ионизирующими излучениями и т.д.

На основе современных электротехнических материалов изготавливаются принципиально новые электротехнические и радиоэлектронные устройства: многочисленные полупроводниковые приборы, твердые схемы, нелинейные конденсаторы и резисторы с параметрами, регулируемые бесконтактными способами, выпрямители, усилители, стабилизаторы тока и напряжения, преобразователи энергии, устройства для хранения и считывания информации; квантовые генераторы, усилители-лазеры, жидкие кристаллы, ферритные устройства для управления электромагнитной энергией СВЧ, датчики ЭДС Холла, термоэлектрические генераторы с высоким КПД, аппаратура голографии и многие другие аппараты и приборы новой техники.

В учебно – методическом комплексе рассмотрены основные группы электротехнических материалов: проводники, диэлектрики, полупроводники и магнитные материалы, а также материалы с особыми свойствами теплового расширения и особыми упругими свойствами. По каждой группе материалов рассмотрены: физическая сущность явлений, происходящих в материалах при взаимодействии с электромагнитным полем, основные электрофизические характеристики материалов и влияние на них различных факторов, особенности технологии получения материалов и их применение в электротехнических и радиоэлектронных устройствах, элементах автоматики и прибора.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое материаловедение?
2. Что такое электроматериаловедение?
3. Ученые внесли вклад в развитие электротехнических материалов?

Лекция 2. Общая характеристика материалов с особыми физическими свойствами – 2 часа

Классификация материалов по применению

Материалы, применяемые в электронной технике, принято классифицировать на электротехнические, конструкционные и материалы специального назначения. **Электротехническими** называют материалы, обладающие особыми свойствами по отношению к электромагнитному полю. К ним относятся: проводники, диэлектрики, полупроводники и магнитные материалы.

Проводники -это материалы с сильно выраженной электропроводностью. По применению их делят на материалы высокой проводимости (для проводов различного назначения, токопроводящих деталей, электрических контактов) и материалы высокого сопротивления (для резисторов и нагревательных элементов).

Диэлектрики -это материалы, способные поляризоваться и сохранять электростатическое поле. По применению различают пассивные диэлектрики (электроизоляционные) и активные диэлектрики (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.), свойствами которых можно управлять внешним энергетическим воздействием.

Полупроводники -это материалы с сильной зависимостью электропроводности от концентрации и вида примесей, дефектов структуры и внешних энергетических воздействий (температуры, электромагнитных полей, освещенности и т.д.).

По отношению к магнитному полю большинство электротехнических материалов - немагнитные либо слабомагнитные вещества. Существует особая группа материалов, проявляющих сильные магнитные свойства.

Магнитные материалы способны сильно намагничиваться во внешнем магнитном поле. По особенностям процесса намагничивания, связанным с их строением, они делятся на ферромагнетики и ферримагнетики (ферриты). Различают магнитомягкие и магнитотвердые материалы. **Магнитомягкие** материалы легко перемагничиваются. Их применяют в электромагнитах и переменных магнитных полях в качестве сердечников трансформаторов, магнитопроводов электрических машин, реле и т.д. **Магнитотвердые** материалы трудно размагничиваются, обладают большим запасом магнитной энергии; их используют для изготовления постоянных магнитов и устройств для записи и хранения информации.

Основной характеристикой электротехнических материалов является **удельная электропроводность** - γ , Сименс/м, как коэффициент пропорциональности между плотностью тока j (А/м²) и напряженностью электрического поля E (В/м) в законе Ома

$$j = \gamma \cdot E . \quad (1.1)$$

Удельная электропроводность зависит только от свойств материала. Этой характеристикой обычно пользуются в теории. На практике, для оценки электропроводности материалов и систем более широко используется обратная величина - **удельное электрическое сопротивление** - ρ , Ом·м,

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (1.2)$$

Для основных групп электротехнических материалов значение ρ составляет:

- проводники - $\rho < 10^{-5}$ Ом·м;
- диэлектрики - $\rho > 10^8$ (до 10^{16}) Ом·м;
- полупроводники - $\rho = 10^{-5} \dots 10^8$ Ом·м.

Что касается магнитных материалов, по величине удельной проводимости (удельному сопротивлению) они могут быть проводниками, полупроводниками или диэлектриками.

Среди материалов, применяемых в электротехнических устройствах и приборах, особое место занимают сплавы с высокими упругими свойствами, которые применяются для упругих элементов (токопроводящие пружины, подвески, растяжки, мембраны и т.д.), сплавы с особыми свойствами теплового расширения (сплавы инварного типа). Различают сплавы с минимальным коэффициентом линейного расширения, предназначенные для деталей приборов с повышенными требованиями постоянства линейных размеров при изменении температуры, и сплавы с заданным коэффициентом линейного расширения для создания вакуумплотных спаев с другими материалами (стеклом, керамикой и т.д.).

Основы зонной теории твердого тела

Зонная теория является основой современных представлений о процессах, происходящих в твердом кристаллическом веществе при воздействии на него электромагнитного поля. Она рассматривает движение валентных электронов в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки с учетом корпускулярно-волновых свойств элементарных частиц.

В квантовой теории движение электронов описывается волновой функцией, и разрешенными орбитами для электронов изолированного атома являются только те, на длине волны которых ($2\pi r$) укладывается целое число волн де Бройля λ : $2\pi r = n \cdot \lambda$, $n = 1, 2, 3 \dots$. Длина волны де Бройля составляет

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot u} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}}}, \text{ [м]}, \quad (1.3)$$

где m_e - масса электрона; h - постоянная Планка; u - тепловая скорость движения свободных электронов, м/с; $\mathcal{E} = \frac{m_e \cdot u^2}{2}$ - кинетическая энергия электронов.

Исходя из этого постулата, можно определить радиус разрешенных орбит и соответствующие им энергетические уровни электронов. Таким образом, изолированный атом имеет дискретный энергетический спектр: электроны занимают определенные энергетические уровни. Некоторые из них электроны занимают в нормальном невозбужденном состоянии атома, на более высоких энергетических уровнях электроны могут находиться в возбужденном состоянии при внешнем энергетическом воздействии. После прекращения энергетического воздействия электроны возвращаются на более низкие энергетические уровни. Переход электронов с одних энергетических уровней на другие происходит дискретно и сопровождается поглощением, либо выделением квантов энергии (рис. 1).

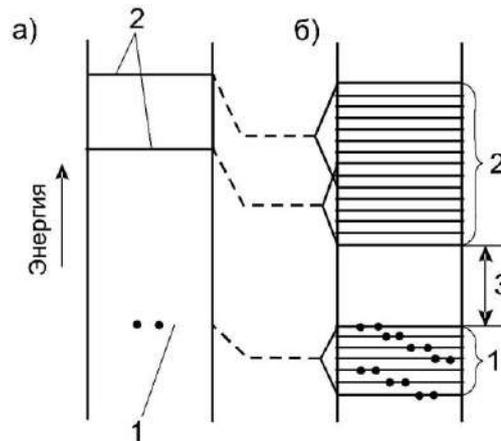


Рис. 1. Схема энергетических уровней: а - атома: 1 - уровень невозбужденного атома, 2 - уровни возбужденного атома; б - твердого тела: 1 - валентная зона (заполнена электронами), 2 - зона проводимости (зона свободных энергетических уровней), 3 - запрещенная зона

В кристалле между соседними атомами возникают силы обменного взаимодействия, что приводит к перекрытию электронных оболочек и обобществлению электронов. Обобществленные валентные электроны любого вещества могут свободно перемещаться без затраты энергии от атома к атому по всему кристаллу путем обмена (туннельный переход). Вследствие обменного взаимодействия дискретные энергетические уровни изолированных атомов в

кристалле расщепляются, образуя *энергетические зоны*. Разрешенные энергетические зоны разделены запрещенными интервалами энергии.

Количество энергетических уровней, составляющих энергетическую зону, определяется числом атомов в твердом теле. Если в 1см^3 кристалла содержится $10^{22}\dots 10^{23}$ атомов, а ширина зоны в среднем составляет 1 эВ (электронвольт), то уровни в зоне отстоят друг от друга на $10^{-22}\dots 10^{-23}$ эВ. Это означает, что энергетическая зона характеризуется квазинепрерывным спектром, и достаточно малейшего энергетического воздействия, чтобы вызвать переход электронов с одного уровня на другой при наличии там свободных состояний. Внутренние электронные оболочки изолированных атомов, как правило, заполнены электронами, соответствующие им энергетические зоны также оказываются заполненными. Самую внешнюю из заполненных электронами зон называют *валентной зоной*. Ближайшую к валентной разрешенную зону свободных энергетических уровней называют *зоной проводимости*. Валентная зона и зона проводимости отделены друг от друга *запрещенной зоной* - энергетическим барьером, $\Delta\mathcal{E}$ (рис. 1).

Принципиальное отличие проводниковых материалов от диэлектриков и полупроводников заключается в различной реакции на внешнее электрическое поле, что иллюстрируют энергетические диаграммы (рис. 2).

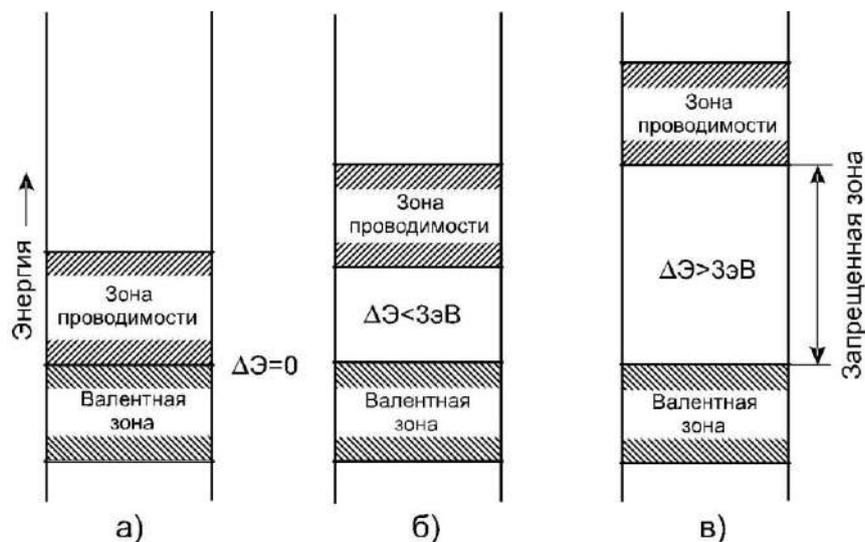


Рис. 2. Схема энергетических зон: а - проводника, б - полупроводника, в - диэлектрика

В проводниках (металлах) зона проводимости вплотную примыкает к валентной зоне ($\Delta\mathcal{E} = 0$). Валентная зона не полностью заполнена электронами, имеются свободные энергетические подуровни, которые с зоной проводимости образуют энергетический спектр свободных уровней (рис. 2,а). В электрическом поле добавочная энергия, приобретаемая электронами на длине свободного пробега ($10^{-8}\dots 10^{-4}$ эВ), намного превосходит энергетический интервал между уровнями в зоне ($10^{-22}\dots 10^{-23}$ эВ), и электроны переходят на ближайшие свободные уровни, создавая упорядоченное движение (электрический ток). Этим объясняется высокая проводимость металлических материалов.

В полупроводниках и диэлектриках валентная зона и зона проводимости разделены запрещенной зоной ΔE (рис. 2,б,в). При температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена электронами, свободных энергетических уровней нет. Электроны полностью заполненной валентной зоны не могут принимать участие в создании электрического тока - зона проводимости абсолютно свободна. Для создания электрического тока необходимо часть валентных электронов перебросить из валентной зоны в зону проводимости, но энергии электрического поля недостаточно для преодоления энергетического барьера ΔE . Нужны дополнительные энергетические воздействия, например, нагрев, так как при комнатной температуре энергия валентных электронов за счет теплового движения составляет порядка 0,04 эВ, что значительно меньше ширины запрещенной зоны.

Различие между полупроводниками и диэлектриками заключается в ширине запрещенной зоны. Условно к полупроводникам относят вещества с запрещенной зоной $\Delta E < 3$ эВ. В полупроводниках переход электронов в зону проводимости может быть осуществлен путем тепловых, электромагнитных и иных воздействий, либо обеспечить проводимость с помощью атомов примеси.

В диэлектриках ширина запрещенной зоны настолько велика (ΔE от 3 до 10 эВ), что энергии внешних возбуждающих воздействий недостаточно для перехода электронов в зону проводимости. Это означает, что электронная проводимость в них не играет определяющей роли.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите классификацию электротехнических материалов по применению.
2. Какова основная характеристика электропроводности материалов?
3. Охарактеризуйте области применения материалов с особыми физическими свойствами.
4. Опишите зонное строение твердых тел.
5. В чем различие энергетических диаграмм для проводников, полупроводников и диэлектриков?
6. Объясните на основе зонной теории возникновение высокой электропроводности в проводниках.

Лекция 3. Проводниковые материалы – 2 часа

Свойства проводниковых материалов

Проводниковые свойства проявляют металлы, металлические сплавы, графит (модификация углерода) и электролиты. Металлы относятся к проводникам с электронной проводимостью. В электролитах (растворы кислот, солей, щелочей) перенос электрических зарядов осуществляют ионы.

Физическая природа электропроводности металлов

Металлы имеют кристаллическое строение: в узлах кристаллической решетки находятся положительно заряженные ионы, окруженные коллективизированными электронами (электронным газом).

Современные представления об электронном строении металлов, распределении электронов по энергетическим состояниям, их взаимодействии с другими элементарными частицами и кристаллической решеткой дает квантовая теория, основы которой были разработаны советским ученым Я.И.Френкелем и немецким физиком А.Зоммерфельдом.

Свободные электроны хаотически перемещаются по кристаллу со средней тепловой скоростью $u = 10^5$ м/с. В электрическом поле напряженностью E электроны получают добавочную скорость упорядоченного движения v - скорость дрейфа, благодаря чему и возникает электрический ток. Плотность тока зависит от скорости дрейфа, заряда электрона e и концентрации свободных электронов n .

$$j = e \cdot n \cdot v . \quad (2.1)$$

Скорость дрейфа в реальных условиях существенно меньше скорости теплового движения электронов $v \ll u$. Так, в медном проводнике при плотности тока $j = 1$ А/мм² скорость дрейфа составляет $v = 1 \cdot 10^{-4}$ м/с.

За время τ между столкновениями с узлами кристаллической решетки на длине свободного пробега l , электроны, двигаясь с ускорением

$$a = 1/e \cdot E , \quad (2.2)$$

Приравняв аналитическое выражение закона Ома (1.1) к выражению (2.1) с учетом (2.2), получим формулу для удельной проводимости

$$\gamma = \frac{e^2 \cdot n \cdot l}{m_e \cdot u} . \quad (2.3)$$

Выразим произведение $m_e \cdot u$ через концентрацию свободных электронов, используя квантовую статистику, базирующуюся на принципе Паули, согласно которому в каждом энергетическом состоянии может находиться только один электрон, а на каждом энергетическом уровне - не более двух (с антипараллельными спинами). Тогда при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) половина из общего числа

свободных электронов в кристалле $(n/2)$ займет наиболее низкие энергетические уровни.

В квантовой теории вероятность заполнения электронами энергетических состояний с энергией уровня \mathcal{E} определяется функцией Ферми

$$F(\mathcal{E}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{kT}\right)}, \quad (2.4)$$

где \mathcal{E}_F - энергия Ферми, т.е. максимальная энергия, которую может иметь электрон в металле при температуре абсолютного нуля.

Из формулы (2.4) следует, что при $\mathcal{E} = \mathcal{E}_F$, вероятность заполнения электронами уровня Ферми равна 0,5. Энергия Ферми для большинства металлов составляет от 3 до 15 эВ. Уровни, расположенные ниже уровня Ферми ($\mathcal{E} < \mathcal{E}_F$), с вероятностью $> 0,5$ заполнены электронами, а уровни, лежащие выше уровня Ферми ($\mathcal{E} > \mathcal{E}_F$), с такой же вероятностью свободны от электронов.

В соответствии с квантовой статистикой Ферми-Дирака концентрация свободных электронов в металле определяется путем интегрирования по всем заполненным энергетическим состояниям, что дает следующее выражение

$$n = \frac{8\pi}{3} \frac{2m}{h^2} \frac{e\mathcal{E}_F^{3/2}}{F}. \quad (2.5)$$

Выразив из этого соотношения значение энергии Ферми через концентрацию электронов n , учитывая, что $\mathcal{E}_F = m_e \cdot u^2 / 2$, получим

$$m_e u = \frac{313}{8\pi} \cdot n^{1/3} \cdot h.$$

Подставляя $m_e u$ в формулу (2.3), найдем выражение для удельной проводимости металлов

$$\gamma = \frac{e^2 n^2}{h} \frac{313^2}{8\pi^2} \cdot n^{1/3}. \quad (2.6)$$

Концентрация свободных электронов в чистых металлах, характер их распределения по энергиям и энергия Ферми с повышением температуры почти не изменяются. Например, при нагреве серебра от 0 до 1000 К энергия Ферми

уменьшается лишь на 0,2%. Такие малые изменения в широком температурном диапазоне можно не учитывать. Следовательно, формула (2.6) справедлива при любой температуре. Поэтому электропроводность металла определяется, в основном, средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от электронного строения атомов и типа кристаллической решетки. Длина свободного пробега для некоторых металлов дана в табл. 1.

Таблица 1

*Длина свободного пробега электронов в
некоторых металлах при 0°С*

Металл	Ag	Cu	Au	K	Na	Li	Fe	Ni
Тип КР	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ГЦК
$l, \text{нм}$	57	42	41	37	35	11	22	13,3

Наибольшая длина свободного пробега наблюдается в металлах с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой (Ag, Cu, Au), которые и являются лучшими проводниками.

Переходные металлы (Fe, Ni, Co, Cr, Mn, V, Zr, Nb, Mo, W, Hf, Ta, Re, Pt и др.) имеют меньшую электропроводность, что связано с их специфическим электронным строением. В этих элементах внутренние d - или f -оболочки неполностью заполнены электронами. В электрическом поле часть валентных электронов из внешней s -оболочки переходят на свободные уровни внутренних оболочек, что приводит к уменьшению числа свободных электронов, участвующих в проводимости.

Особенности электронного строения переходных металлов являются причиной многих их специфических свойств: тепловых, магнитных, склонности к полиморфизму, переменной валентности и др.

И в заключение, у чистых металлов при нагреве средняя энергия электронов практически остается без изменения, что свидетельствует о малой теплоемкости электронного газа.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов

Рассмотрим движение свободных электронов в виде плоских электронных волн, длина которых λ определяется соотношением де Бройля (1.3). Такая электронная волна распространяется в строго периодическом потенциальном поле без рассеяния энергии. Это означает, что в идеальном кристалле длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно нулю.

Причинами рассеяния электронов в реальных металлах, создающего электрическое сопротивление, являются:

- тепловые колебания узлов кристаллической решетки (ρ_T - тепловая составляющая электрического сопротивления);
- примеси и дефекты структуры ($\rho_{\text{ост}}$ - составляющая ρ , обусловленная

нетепловыми факторами).

Известно, что эффективное рассеяние энергии электронов происходит в том случае, если размер рассеивающих центров (дефектов) превышает $1/4$ длины волны. В металлах энергия электронов проводимости составляет $3...15$ эВ, этой энергии соответствует длина электронной волны $\lambda = 0,3...0,7$ нм. Поэтому любые микронеоднородности и несовершенства кристаллического строения вызывают снижение проводимости.

Итак, удельное сопротивление реальных металлов представляет собой сумму двух составляющих:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост} . \quad (2.7)$$

Относительное изменение удельного сопротивления металлов при изменении температуры характеризует **температурный коэффициент удельного сопротивления**:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} . \quad (2.8)$$

Металлы имеют положительное значение α_ρ , т.е. с ростом температуры ρ увеличивается, что связано с увеличением амплитуды тепловых колебаний узлов кристаллической решетки. Причем удельное сопротивление растет пропорционально температуре. Однако линейная зависимость $\rho(T)$ нарушается при низких температурах из-за снижения амплитуды и частоты тепловых колебаний атомов. Максимальная частота тепловых колебаний определяет характеристическую температуру - температуру Дебая ($\theta_D \approx 400$ К)

$$\theta_D = \frac{h \cdot \nu_{max}}{k} , \quad (2.9)$$

где h - постоянная Планка; k - постоянная Больцмана.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов приведена на рис. 3. В области сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю, значение ρ практически не зависит от температуры (участок I) и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{ост}$. В этой области у некоторых металлов наблюдается состояние **сверхпроводимости** ($T_{св}$ - критическая температура сверхпроводимости). В узкой переходной области II (до температуры θ_D) удельное сопротивление растет по степенной зависимости $\rho \sim T^n$. Экспериментально установлено, что линейная зависимость $\rho(T)$ справедлива от $T = 2/3 \theta_D$ и сохраняется у большинства металлов вплоть до температуры плавления. В области линейной зависимости (III) удельное электрическое сопротивление определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho(T - T_0)] , \quad (2.10)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при начальной температуре (например, при комнатной $T_0 = 293$ К).

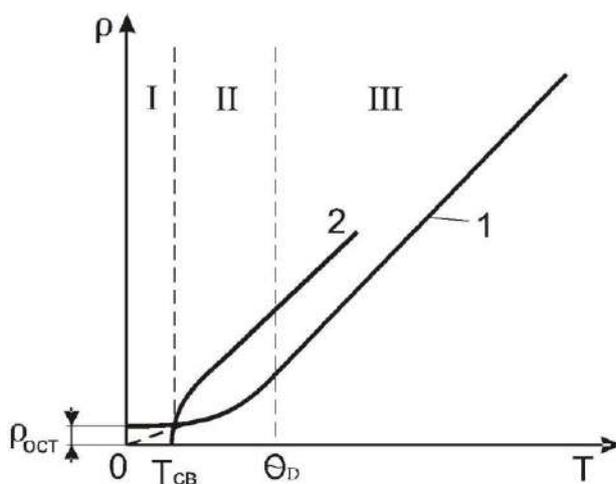


Рис. 3. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металла (1) и сверхпроводника (2)

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается резкое увеличение удельного сопротивления (в 1,5...2 раза), связанное с нарушением ближнего порядка в расположении атомов. Исключение составляют висмут, сурьма, галлий, объем которых при плавлении уменьшается, что сопровождается уменьшением удельного сопротивления.

В табл. 2 приведены основные характеристики некоторых металлов.

Таблица 2

Значения характеристик некоторых металлов при 20°C

Металл	Хим. символ	Тип КР	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	ρ , мкОм м	$\alpha_p \cdot 10^{-1}$, К ⁻¹
Алюминий	Al	ГЦК	2,7	658	0,028	0,41
Барий	Ba	ОЦК	3,75	710	0,5	0,36
Бериллий	Be	ГПУ	1,84	1284	0,041	0,66
Ванадий	V	ОЦК	6,11	1900	0,241	0,36
Висмут	Bi	Ромбоэдр.	9,8	271	1,16	0,42
Вольфрам	W	ОЦК	19,3	3380	0,055	0,5
Галлий	Ga	Ромбич.	5,92	30	0,560	0,39
Железо	Fe	ОЦК/ ГЦК	7,87	1539	0,098	0,62
Золото	Au	ГЦК	19,3	1063	0,0225	0,4
Индий	In	Тетрагон.	7,3	156	0,090	0,47
Иридий	Ir	ГЦК	22,4	2410	0,054	0,41
Кадмий	Cd	ГПУ	8,65	321	0,076	0,42
Калий	K	ОЦК		64	0,069	0,58
Кобальт	Co	ГПУ/ГЦК	8,85	1500	0,064	0,6
Литий	Li	ОЦК		180	0,087	0,45
Магний	Mg	ГПУ	1,74	651	0,045	0,4
Марганец	Mn	Сложн. куб.	7,44	1244	1,85	0,1

Медь	Cu	ГЦК	8,92	1083	0,017	0,43
Молибден	Mo	ОЦК	10,2	2620	0,05	0,43
Натрий	Na	ОЦК		98	0,046	0,5
Никель	Ni	ГЦК	8,96	1453	0,068	0,67
Ниобий	Nb	ОЦК	8,57	2500	0,15	0,4
Олово	Sn	Сл.куб/Тетр	7,29	232	0,113	0,45
Осмий	Os	ГПУ	22,5	3000	0,095	0,42
Палладий	Pd	ГЦК	12,02	1550	0,108	0,36
Платина	Pt	ГЦК	21,45	1770	0,098	0,39
Рений	Re	ГПУ	21,02	3180	0,214	0,32
Родий	Rh	ГЦК	12,48	1970	0,043	0,43
Ртуть	Hg	Ромбич.	13,5	-39	0,958	0,1
Рутений	Ru	ГПУ	12,4	2250	0,075	0,45
Свинец	Pb	ГЦК	11,34	327	0,19	0,42
Серебро	Ag	ГЦК	10,49	961	0,015	0,4
Стронций	Sr	ГЦК	2,63	770	0,227	0,4
Тантал	Ta	ОЦК	16,6	3000	0,124	0,38
Титан	Ti	ГПУ/ОЦК	4,52	1670	0,47	0,55
Торий	Th	ГЦК/ОЦК		1850	0,186	0,23
Хром	Cr	ОЦК	7,19	1900	0,13	0,24
Цинк	Zn	ГПУ	7,14	419	0,059	0,41
Цирконий	Zr	ГПУ/ОЦК	6,5	1855	0,41	0,44

Влияние примесей и дефектов структуры на удельное сопротивление металлов

Примеси вносят наиболее существенный вклад в величину остаточного сопротивления. Атомы любого примесного элемента повышают ρ , даже если сама примесь обладает большей электропроводностью.

Рассеяние электронов проводимости на атомах примеси тем сильнее, чем больше разница в валентности примесного элемента и металла - растворителя ΔZ : $\rho_{ост} \sim \Delta Z^2$. Так что металлоидные примеси на снижение проводимости оказывают более сильное влияние, чем металлические элементы.

Дефекты структуры - вакансии, атомы в междоузлии, дислокации, границы зерен и субзерен, прочие несовершенства кристаллического строения вносят определенный вклад в $\rho_{ост}$. Например, увеличение точечных дефектов в меди на 1 ат.% увеличивает $\rho_{ост}$ в среднем на 0,01 мкОм·м. Чем выше плотность дефектов, тем больше удельное сопротивление.

На удельное сопротивление металлических материалов влияет **термообработка**. Так, при **закалке** стали образуется неравновесная структура с большими искажениями кристаллической решетки и внутренними напряжениями. Плотность дефектов по всему объему кристалла резко возрастает, что приводит к значительному росту удельного сопротивления. При **отжиге** металлов и сплавов создается термодинамически устойчивая равновесная структура, внутренние напряжения исчезают, плотность дефектов уменьшается до минимума (в 2 раза и более), поэтому $\rho_{ост}$ резко снижается.

Пластическая деформация вызывает увеличение плотности дефектов и снижение проводимости. Для чистых металлов это снижение составляет несколько процентов,

для них пластическую деформацию можно использовать как способ упрочнения без существенных потерь в электропроводности. Для металлических сплавов снижение электропроводности в результате наклепа может составлять до 25%. Для восстановления электропроводности после пластической деформации проводят рекристаллизационный отжиг.

Удельное сопротивление металлических сплавов

Электрическое сопротивление сплава всегда выше, чем сопротивление любого его компонента. Характер изменения электропроводности сплава зависит от фаз и структур в сплаве, что определяется диаграммой состояния.

В *сплавах со структурой твердых растворов* $\rho_{\text{ост}}$ может значительно превосходить тепловую составляющую $\rho_{\text{т}}$. Для большинства твердых растворов с неограниченной растворимостью (Au-Ag, Ag-Cu, Cu-Au и др.) изменение остаточного сопротивления в зависимости от состава сплава хорошо описывается параболической функцией в соответствии с законом Нордгейма (рис. 4):

$$\rho_{\text{ост}} = c \cdot x_A \cdot x_B = c \cdot x_A(1 - x_A), \quad (2.11)$$

где x_A, x_B - атомные доли компонентов в сплаве; c - постоянная, зависящая от природы сплава.

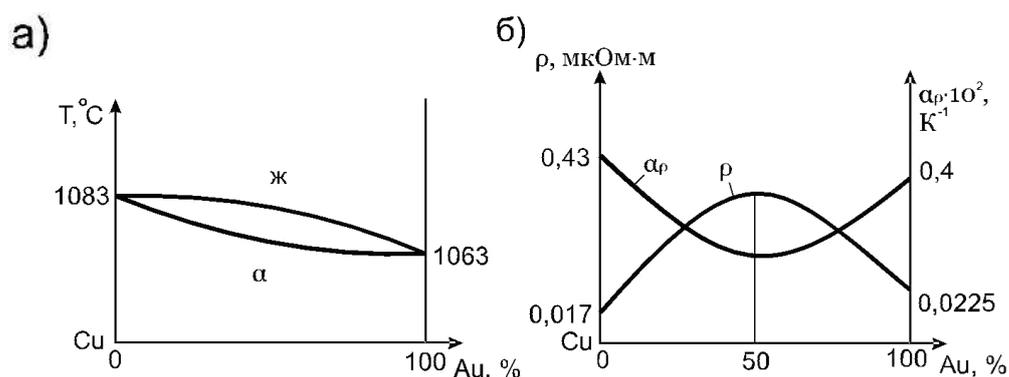


Рис. 4. Диаграмма состояния Cu-Au (а) и зависимости ρ и α_{ρ} от состава сплава (б)

Если ни один из компонентов не является переходным металлом, то ρ_{max} и $\alpha_{\rho \text{min}}$ соответствует 50%-ному соотношению компонентов $x_A = x_B = 0,5$ (рис. 4). Если один из компонентов относится к металлам переходных групп, как, например, в сплавах Cu-Ni, то характер изменения ρ и α_{ρ} имеет некоторые особенности (рис. 5):

- ρ_{max} существенно выше, чем в системе с непереходными металлами, что связано с переходом части валентных электронов на незаполненные уровни внутренней d -оболочки переходного

металла и уменьшением концентрации электронов проводимости;

- ρ_{\max} и $\alpha_{\rho\min}$ не соответствуют 50%-ному соотношению компонентов;
- α_{ρ} достигает в некоторых сплавах нулевых и даже отрицательных значений.

Сплавы со структурой твердых растворов используют как проводниковые материалы высокого удельного сопротивления для изготовления резисторов и нагревательных элементов.

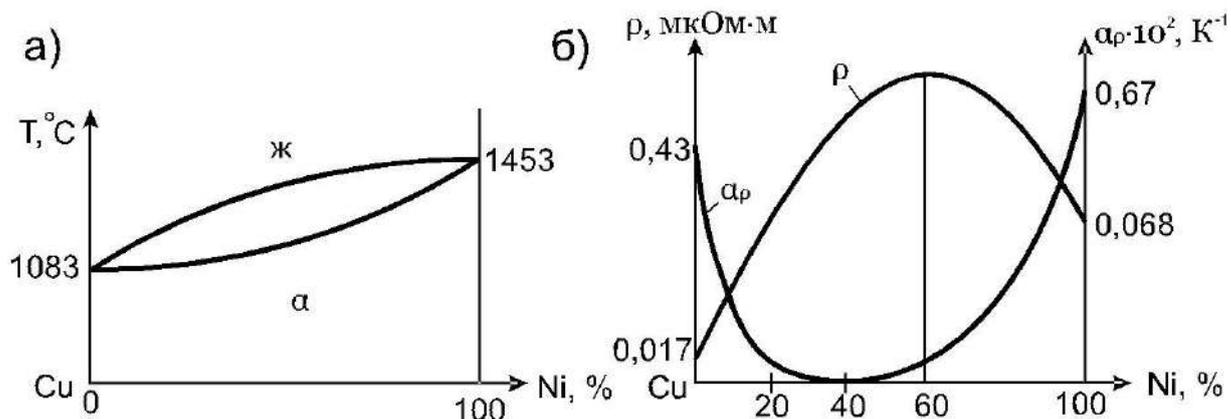


Рис. 5. Диаграмма состояния Cu-Ni (а) и зависимости ρ и α_{ρ} от состава сплава (б)

В *сплавах с гетерофазной структурой* - при образовании эвтектик, эвтектоидов, включений вторичных фаз удельное сопротивление, согласно правилу Н.С.Курнакова, в первом приближении линейно изменяется с изменением состава сплава. Такие сплавы сохраняют высокую электрическую проводимость, близкую к проводимости чистых металлов, но по сравнению с чистыми металлами могут обладать более высокими механическими и технологическими свойствами. Так, сплавы с выделениями дисперсных фаз имеют повышенную твердость, а эвтектические сплавы - высокую жидкотекучесть и литейные свойства. У многих сплавов часто наблюдаются отклонения от линейной зависимости ρ из-за структурной неоднородности.

При образовании в сплаве *промежуточных фаз* или *химических соединений* удельное сопротивление резко изменяется. Химические соединения с металлическим типом связи (интерметаллидные электронные соединения, фазы внедрения) достаточно электропроводны. При упорядоченном расположении атомов проводимость резко возрастает, так как восстанавливается периодичность кристаллической решетки и увеличивается длина свободного пробега электронов. В химических соединениях с ионной и ковалентной связью удельное сопротивление возрастает из-за дефектности структуры.

Электросопротивление тонких металлических пленок

Металлические пленки, наносимые на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, широко используются в микроэлектронике. По выполняемым функциям различают резистивные пленки (тонкопленочные

резисторы) и высокопроводящие пленки (контактные площадки, межэлементные соединения, обкладки конденсаторов).

Методы получения тонких пленок:

- термическое испарение металла с последующей конденсацией на подложку;
- испарение электронным лучом;
- катодное или ионно-плазменное осаждение;
- эпитаксиальное наращивание.

Современные технологии позволяют получать пленки толщиной от десятых долей микрометра до нескольких десятков нанометров. В зависимости от условий осаждения (конденсации) может сформироваться различная структура пленки от аморфного состояния до монокристаллического строения. Размерный и структурный факторы обуславливают существенные отличия электрических свойств тонких пленок от свойств объемных металлов. Особенно сильно проявляется размерный эффект в том случае, когда толщина пленки соизмерима с длиной свободного пробега электронов.

На рис. 6 показаны зависимости электрических характеристик от толщины пленки, где можно выделить три области:

I - Малой толщине пленки ($\delta = 10^{-3} \dots 10^{-2}$ мкм) соответствует высокое значение ρ и отрицательное значение α_ρ . Это объясняется тем, что на ранних стадиях конденсации пленка имеет островковую структуру, т.е. она не сплошная. Сопротивление такой пленки во многом определяется поверхностным сопротивлением участков диэлектрической подложки. Для таких пленок характерно понижение ρ с увеличением температуры ($\alpha_\rho < 0$), как у диэлектриков.

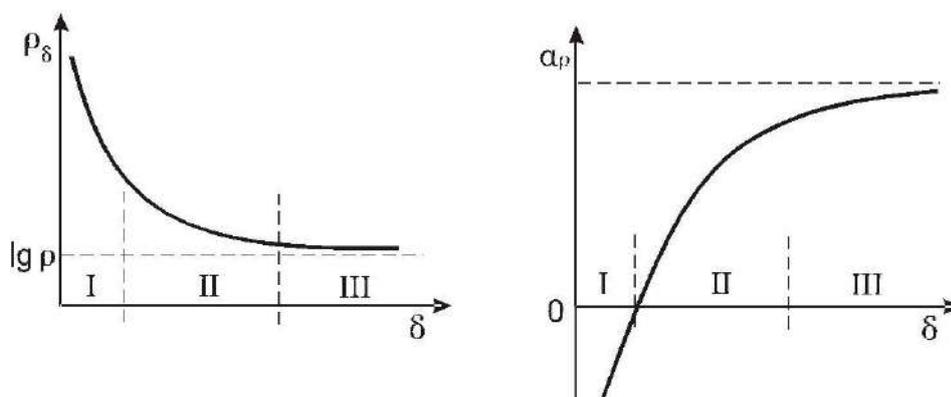


Рис. 6. Зависимости ρ и α_ρ от толщины тонкой металлической пленки

II - При толщине пленки $\delta = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ мкм диэлектрические промежутки между островками осажденного металла исчезают, пленка становится сплошной, а α_ρ уже выше нуля. Однако удельное электросопротивление пленки еще велико из-за высокой концентрации дефектов, образующихся в процессе роста пленки (вакансии, дислокации, границы зерен и примесные атомы), поглощаемых из газовой среды при конденсации металла.

III - При $\delta > 0,1$ мкм сопротивление пленки близко к сопротивлению массивного образца, структура пленки и размерный эффект уже не оказывают значительного влияния на электрические свойства.

Для оценки проводящих свойств тонких пленок пользуются параметром

удельного поверхностного сопротивления или *сопротивления квадрата* R , Ом.

$$R = \frac{\rho_s \Delta}{d}, \quad (2.12)$$

где ρ_s - удельное сопротивление пленки толщиной δ .

Сопротивление квадрата часто используют для определения сопротивления тонкопленочного резистора

$$R = R_{\square} \frac{l}{d}, \quad (2.13)$$

где l - длина резистора в направлении прохождения тока; d - ширина пленки.

Вопросы для самоконтроля:

1. От чего зависит электропроводность идеальных и реальных металлов?
2. Как определить удельное сопротивление металла при любой температуре?
3. В чем принципиальное отличие изменения ρ и α_p от состава сплавов Cu-Au и Cu-Ni?
4. Как зависит ρ и α_p от толщины тонкой металлической пленки? Что такое сопротивление квадрата?
5. Назовите основные материалы высокой проводимости и их применение.
6. Как влияют примеси на свойства меди и алюминия?
7. Перечислите основные благородные металлы, особенности их свойств и применение.
8. Назовите основные тугоплавкие металлы, особенности их свойств и применение.

Лекция 4. Материалы высокой проводимости – 2 часа

К проводниковым материалам высокой проводимости относят материалы с величиной удельного сопротивления $\rho < 0,1$ мкОм·м.

Они применяются для изготовления электрических проводов различного назначения, токоведущих деталей приборов, аппаратуры и электрических контактов.

Основные требования, предъявляемые к этим материалам:

- малое удельное сопротивление;
- достаточная прочность и пластичность;
- коррозионная стойкость в атмосферных условиях;
- способность подвергаться сварке и пайке.

Наиболее широко используются медь и ее сплавы, алюминий, используют также благородные и тугоплавкие металлы.

Проводниковая медь и ее сплавы

Медь (Cu) является основным материалом высокой проводимости. Медь вполне удовлетворяет вышеперечисленным требованиям, а по удельному сопротивлению (у чистой меди $\rho=0,017$ мкОм·м) уступает только серебру.

Электротехническую медь получают путем переработки сульфидных руд с последующей электролитической очисткой. Полученные катодные пластины протягивают в полуфабрикаты требуемого сечения (шины, полосы, прутки). Методом холодной протяжки получают твердую медь (МТ), после отжига - мягкую медь (ММ) (табл. 3).

Любая примесь уменьшает электропроводность меди (рис. 7). Бериллий, мышьяк, железо, кремний и фосфор, присутствующие в меди в долях процента, снижают ее удельную проводимость до 50% и более. Висмут и свинец в тысячных долях процента вызывают растрескивание при горячей обработке давлением (красноломкость) из-за образования легкоплавких эвтектик. Кислород с медью образует оксиды, что затрудняет пайку, лужение и повышает ρ . Водород вызывает хрупкость, образуя микротрещины.

Таблица 3

Свойства меди

Марка меди	σ_b , МПа	НВ	δ , %	ρ , мкОм·м
ММ	250...280	< 35	18...35	0,01754
МТ	340...450	65...120	0,5...2,5	0,0182

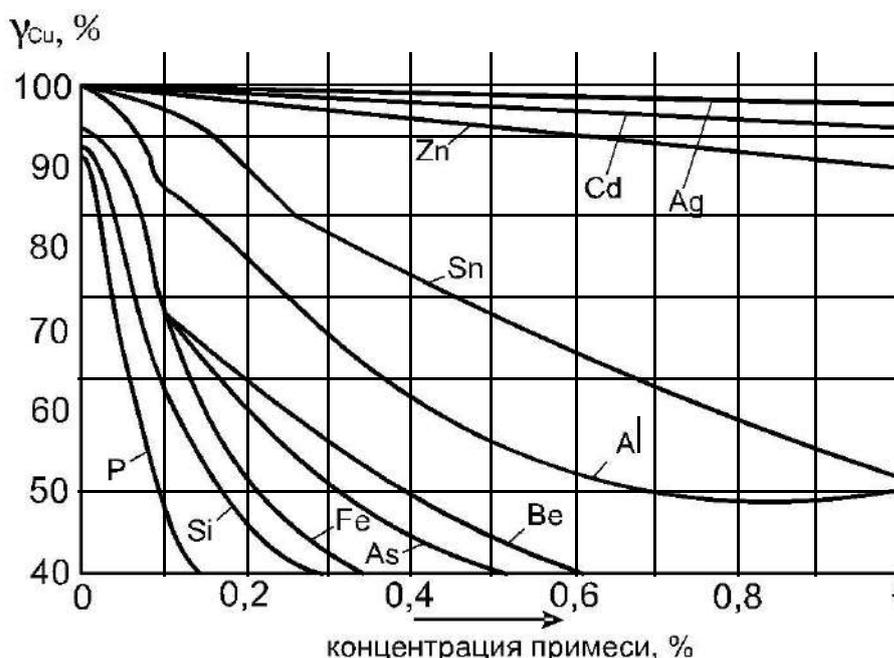


Рис. 7. Влияние примесей на удельную электропроводность меди

Для электротехнических целей используют бескислородную медь марки М00 (не более 0,01% примесей), которую получают из электролитической меди переплавом в вакууме, а также медь марок М0 (до 0,05% примесей) и М1 (0,1% примесей).

Мягкую отожженную медь применяют для проводов различного назначения, жил кабелей, шин распределительных устройств, обмоток трансформаторов, токоведущих деталей приборов, анодов в гальванопластике. Твердую медь используют, если необходимо обеспечить высокую прочность, твердость и износостойкость (неизолированные провода, коллекторные пластины электрических машин и др.). Из специальных электровакуумных сортов бескислородной меди изготавливают детали магнетронов, волноводов, резонаторов, приборов СВЧ. Медь применяют в микроэлектронике в виде тонких проводящих пленок.

Медь является дефицитным металлом, мало распространенным в природе ($4,7 \cdot 10^{-3} \%$). По возможности ее заменяют другими материалами.

Сплавы на основе меди. Наиболее распространенными медными сплавами являются латуни и бронзы, для которых характерно благоприятное сочетание механических свойств, коррозионной стойкости с достаточной электропроводностью (табл. 4).

Таблица 4

Свойства медных сплавов

Марка сплава	Хим. состав	σ_b , МПа*	δ , %*	ρ , мкОмм
Л96	Cu + 4%Zn	270/400	35/6	0,040
Л62	Cu + 38%Zn	300/600	50/0,5	0,072
ЛС59-1	Cu + 40%Zn + 1%Pb	350/440	25/5	0,080
ЛМц58-2	Cu + 40%Zn + 2%Mn	380/600	30/3	0,108
БрОФ7-0,2	Cu + 7%Sn + 0,2%P	250/400	30/15	0,140
БрКд1	Cu + 1%Cd	400/700	20/2	0,020
БрБ2	Cu + 2%Be	1350**	2**	0,065

* в числителе - значение параметра в отожженном состоянии, в знаменателе - в твердотяннутом;

** значения параметров после термообработки (закалка + старение).

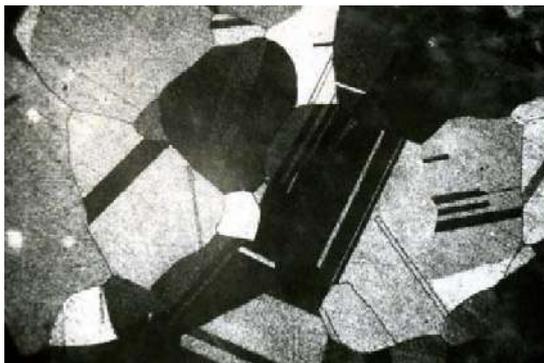
Латуни -это сплавы меди с цинком.Латуни прочнее и дешевле чистой меди, более устойчивы к атмосферной коррозии, высокотехнологичны.

Латуни применяют либо после холодной обработки давлением, в этом случае они обладают высокой твердостью и прочностью, либо в отожженном состоянии, которому свойственна высокая пластичность.

Структура и свойства латуней зависят от содержания цинка. Сплавы с концентрацией цинка менее 39% имеют однофазную структуру твердого раствора - α -латуни (рис. 8,а), они отличаются наиболее хорошей обрабатываемостью давлением в холодном состоянии. Латуни с содержанием цинка до 12% называют *томпака-ми*, например, Л90 (10%Zn), Л96 (4%Zn). Для них характерна повышенная электро- и теплопроводность по сравнению с другими латунями, их применяют для изготовления радиаторных трубок, α -латуни с содержанием 32-38% цинка наиболее пластичны, например, Л62 и Л68.

Из них изготавливают изделия глубокой вытяжкой или штамповкой: манометрические трубки, гильзы, волноводы, платы приборов, крепежные изделия, детали штепсельных разъемов, выключателей.

а)



б)



в)



Рис. 8. Структуры сплавов меди: а – однофазная латунь, б – двухфазная латунь, в - бронза

Сплавы с концентрацией цинка от 39% до 45% являются двухфазными - α + β -латуни. Их структура состоит из α -твердого раствора и интерметаллидной β -фазы CuZn (рис. 8,б). Двухфазные латуни более прочны по сравнению с

однофазными и лучше обрабатываются резанием, а давлением обрабатываются только в горячем состоянии.

Двухфазные латуни, содержащие дополнительные легирующие элементы, называют специальными. Так, латунь ЛС59-1 (автоматная латунь), содержащая кроме цинка 1% свинца, обладает антифрикционными свойствами, повышенной обрабатываемостью резанием благодаря ломкости стружки и высоким качеством поверхности. Ее применяют для изготовления точёных деталей приборов: шестеренок, втулок, подшипников.

Добавление в латуни 1-2% марганца способствует повышению стойкости сплава к дуговому разряду. Поэтому латуни ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1 применяют для штепсельных разъемов, зажимов, пружинящих контактов.

Бронзы - это сплавы меди с различными химическими элементами (оловом, алюминием, кремнием, кадмием, бериллием и т.д.).

Основные свойства бронз:

- высокие литейные свойства, жидкотекучесть;
- повышенная твердость и упругость;
- высокое сопротивление истиранию;
- антикоррозионные свойства: не требуют защитных мер от атмосферной коррозии;
- антифрикционные свойства.

Наиболее распространены **оловянные бронзы**, которые применяются, главным образом, в машиностроении. В качестве электротехнического материала для изготовления пружинных контактов, мембран применяют холоднодеформированную бронзу БрОФ7-0,2, содержащую 7% олова и 0,2% фосфора (рис. 8,в). Недостатком этого сплава является низкая электропроводность ($\gamma = 10...15\% \gamma_{Cu}$).

Наиболее высокой электропроводностью среди всех бронз обладает **кадмиевая бронза** БрКд1 ($\gamma = 95\% \gamma_{Cu}$). Она прочнее отожженной меди в 3 раза. Кадмий повышает температуру рекристаллизации меди, поэтому провода из твердотянутой бронзы не теряют своей прочности до 250°C. Кадмиевую бронзу применяют для коллекторных пластин быстроходных машин, пружинных контактов, проводов повышенной прочности.

Высокую электропроводность имеет **хромистая бронза** БрХ0,5 ($\gamma = 85\% \gamma_{Cu}$). Она обладает высокой износостойкостью и применяется для скользящих контактов.

Ценными свойствами обладает **бериллиевая бронза** БрБ2: высоким пределом упругости, твердостью, сопротивлением усталости и износу, высокой электропроводностью ($\gamma = 65\% \gamma_{Cu}$). Ее применяют после термообработки, состоящей из закалки с температур 770...780°C и старения при 350...370°C. При старении происходит распад пересыщенного α -твердого раствора с выделением метастабильной γ' -фазы - интерметаллида CuBe, что обеспечивает дисперсионное упрочнение и повышение предела прочности до 1300...1350 МПа. С помощью холодной прокатки прочность сплава может быть увеличена до 1750 МПа. Бериллиевую бронзу применяют для изделий ответственного назначения:

упругих элементов точных приборов, в том числе токоведущих (пружинных контактов, мембран), деталей, работающих в сложных условиях - при больших давлениях и температурах.

Проводниковый алюминий

Алюминий (Al) -второй по значимости металл высокой проводимости после меди. Его широкое применение в электротехнике обусловлено следующими особенностями:

- высокой электропроводностью ($\rho = 0,028$ мкОм·м);
- доступностью сырья (содержание Al в земной коре 7,5%), низкой стоимостью (примерно в 3 раза дешевле меди);
- малым удельным весом: плотность алюминия составляет 2,7 г/см³, что почти в 3,5 раза ниже, чем у меди;
- высокой коррозионной стойкостью в водяном паре, пресной и морской воде;
- высокой пластичностью, позволяющей изготавливать проволоку различного сечения и фольгу толщиной до 6...7 мкм. Технический алюминий получают путем электролиза глинозема,

а алюминий высокой чистоты - дополнительной электролитической рафинировкой. Примеси, образующие с алюминием твердые растворы (Cu, Ag, Mg, Mn, V, Ti), снижают его удельную проводимость (на 5-10% при содержании примеси 0,5% по массе). Менее заметно влияют на электропроводность Ni, Si, Fe, Zn.

Для электротехнических целей используют алюминий технической чистоты марки АЕ (0,5% примесей), алюминий высокой чистоты А97 (0,03% примесей) и алюминий особой чистоты А999 (0,001% примесей).

Проводниковый алюминий наиболее широко используется для обмоточных, монтажных, установочных проводов, линий электропередач, кабельных жил. Низкая плотность алюминия является его основным преимуществом: при одинаковом сопротивлении алюминиевый провод в два раза легче медного, хотя его сечение примерно в 1,6 раза больше. Алюминиевые провода можно применять неизолрованными, благодаря наличию на поверхности металла тонкой и прочной оксидной пленки Al₂O₃, защищающей от коррозии и обладающей значительным электрическим сопротивлением.

Алюминиевая оксидная изоляция получила применение в электролитических конденсаторах, а также в различных катушках без дополнительной межвитковой и межслойной изоляции (до 100...250 В).

Пленки алюминия особой чистоты широко используют в микроэлектронике в качестве межэлементных соединений и контактов. Преимущество алюминия как контактного материала заключается в том, что он легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию и пленочной изоляции из двуокиси кремния SiO₂.

Благодаря легкости, коррозионной стойкости и немагнитности технический алюминий идет на изготовление деталей радиоаппаратуры и приборов, корпусов, стрелок, циферблатов и т.д.

Основной недостаток алюминия - низкая механическая прочность.

Алюминиевая проволока, применяемая в отожженном состоянии, имеет предел прочности 80...90 МПа и относительное удлинение 25...33%.

Для деталей приборов и электротехнических изделий, испытывающих существенные механические нагрузки, применяют алюми-ниевые сплавы повышенной прочности. Например, для изготовления корпусов радиоаппаратуры и приборов широко используются **дуралюмины** -сплавы Al-Cu-Mg (Al+4,3%Cu+1,8%Mg+1%Mn). После упрочняющей термообработки (заковки с 500°C в воде и старения при 175°C) его механические характеристики составляют: σ_b до 480 МПа, $\delta = 15\%$. Для проводов воздушных линий электропередач применяют сплав Al-Mg-Si (Al+1%Mg+1%Si), который отличается повышенной пластичностью, прочностью до 350 МПа при хорошей электропроводности ($\rho = 0,032$ мкОм·м).

К числу недостатков алюминия относится его склонность к электрохимической коррозии в месте контакта алюминиевого провода с медью. Для защиты алюминий покрывают лаком.

Из-за оксидной пленки возникают трудности при пайке алюминия. Поэтому алюминиевые провода соединяют между собой холодной сваркой, либо пайкой с использованием особых припоев или ультразвука.

Благородные металлы

К благородным металлам относят серебро, золото, платину и металлы платиновой группы (платиноиды) - палладий, иридий, родий, осмий, рутений. Основное свойство благородных металлов - высокая коррозионная стойкость, обусловленная высоким значением электрохимического потенциала. Они практически не окисляются в атмосферных условиях при комнатной и повышенной температу-ре. Отличаются высокой пластичностью, но невысокой твердостью и прочностью (что можно повысить холодной пластической деформацией).

Благородные металлы встречаются в природе в виде самородков и в различных рудах, из которых путем переработки удается по-лучить чистые металлы с содержанием примесей до тысячных до-лей процента. Большинство благородных металлов образуют между собой твердые растворы.

Обладая высокой коррозионной стойкостью и низким переходным сопротивлением, благородные металлы широко используются в качестве материалов для электрических контактов. Некоторые свойства благородных металлов приведены в табл. 2.

Серебро (Ag) -металл с наиболее высокой тепло-и электропро-водностью из всех проводниковых материалов ($\rho = 0,015$ мкОм·м). Он является самым дешевым из благородных металлов, но дороже меди в 25 раз, его содержание в земной коре - $7 \cdot 10^{-6}\%$. Прочность и твердость отожженного серебра невысокие, $\sigma_b = 200$ МПа, $\delta = 50\%$. Хими-ческая стойкость серебра ниже, чем у других благородных метал-лов, коррозионная стойкость сохраняется до 200°C. Его высокаяпластичность позволяет получать тонкую фольгу и проволоку диа-

метром до 0,01 мм. Благодаря высокой электро- и теплопроводности серебро входит в состав многих контактных сплавов, от слабо-точных до высоконагруженных контактов. Но чистому серебру свойственны низкая дугостойкость, значительная эрозия и свариваемость. Недостатком серебра является взаимодействие с сероводородом во влажном воздухе с образованием непроводящих пленок сульфида серебра Ag_2S . Поэтому серебро не следует применять рядом с материалами, содержащими серу: резиной, эбонитом и др.

Серебро используют в качестве электродов при изготовлении керамических и слюдяных конденсаторов, для покрытия изделий из меди и латуни (серебрение) с целью защиты от окисления и повышения проводимости.

Золото (Au) обладает высокими тепло-,электропроводностью ($\rho=0,0225$ мкОм·м) и существенно более высокой коррозионной стойкостью, чем серебро, не окисляется и не образует сернистых пленок. Золото отличается высокой пластичностью ($\delta \approx 40\%$), что позволяет проводить многократную обработку давлением, но имеет очень низкую твердость и прочность ($\sigma_s \approx 150$ МПа).

Золото применяют для прецизионных контактов, работающих при малых нажатиях и низком напряжении, без дугового режима, резонаторов СВЧ, внутренних поверхностей волноводов. Тонкие пленки золота применяются в качестве полупрозрачных электродов в фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах, а также в качестве межсоединений и контактных площадок в пленочных микросхемах. Металл наносится на подложку вакуумным напылением на промежуточный адгезионный подслои хрома, меди.

Значительно повышаются механические свойства золота при образовании сплавов. Чаще всего используют сплавы золота с никелем, платиной, упрочняемые закалкой со старением и сохраняющие высокие антикоррозионные свойства.

Платина (Pt) обладает наибольшим удельным сопротивлением среди всех благородных металлов ($\rho = 0,098$ мкОм·м) и низкой теплопроводностью. Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкую проволоку и ленты. Тонкиспириты диаметром до 1 мкм используются для подвесов и струн в точных электроизмерительных приборах.

Для платины характерна очень высокая химическая стойкость: она не растворяется во многих кислотах, не образует сернистых пленок, что обеспечивает платиновым контактам стабильное переходное сопротивление. Окисление платины на воздухе начинается при температурах выше 540°C .

Платина часто используется в виде сплавов. Наиболее распространены сплавы платины с иридием (Pt+3...6%Ir) и родием (Pt+5...12%Rh), обладающие более высокой твердостью и стойкостью к окислению до температуры 1000°C . Им свойственна высокая дугостойкость (в 2 раза выше, чем у других благородных металлов), они менее подвержены электроэрозии и свариванию. Эти сплавы применяют для термопар и особо ответственных прецизионных контактов в электроизмерительных приборах и радиоаппаратуре.

Из других металлов платиновой группы наиболее широко применяется **палладий (Pd)**, который по свойствам близок к платине, но в 4-5 раз дешевле ее и

в два раза легче. Стойкость к окислению по сравнению с платиной ниже (металл тускнеет при температурах выше 350°C), обладает хорошими механическими свойствами:

$$\sigma_b = 200 \text{ МПа}, \delta = 40\%.$$

Особенностью палладия является способность интенсивно поглощать водород (в более чем 850-кратном объеме по отношению к собственному объему). При последующем нагреве в вакууме поглощенный водород вновь выделяется. Это свойство используется для заполнения водородом газоразрядных приборов.

Палладий и его сплавы с серебром, золотом, иридием, медью, никелем применяют для прецизионных разрывных и скользящих контактов.

Остальные металлы платиновой группы: *родий(Rh)*, *иридий(Ir)*, *рутений(Ru)* и *осмий(Os)* используют в качестве легирующих элементов в контактных сплавах для повышения твердости. Из-за высокой стоимости контакты на основе металлов платиновой группы применяют в виде тонких покрытий на серебряном подслое.

Тугоплавкие металлы

К тугоплавким относятся металлы с температурой плавления выше 1700°C: вольфрам, молибден, тантал, ниобий, хром, цирконий, рений. Чаще всего их получают методами порошковой металлургии с использованием электровакуумных технологий выплавки и очистки.

Применение тугоплавких металлов:

- изделия электровакуумной техники;
- нагревательные элементы;
- испарители в установках термического осаждения для получения тонких высокопроводящих и резистивных пленок;
- тонкопленочные резисторы;
- термопары для измерения высоких температур.

Все тугоплавкие металлы при нагревании на воздухе до температур выше 600°C интенсивно окисляются с образованием летучих оксидов. Поэтому в качестве нагревательных элементов они работают в вакууме или в защитной инертной среде, например в аргоне. Тугоплавкие металлы имеют ничтожно малое давление насыщенных паров - важное качество для материала испарителя при получении тонких пленок.

Вольфрам (W) -наиболее тугоплавкий из всех металлов($T_{пл} = 3400^\circ\text{C}$), имеет высокую твердость, хорошую проводимость ($\rho = 0,055 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$).

Вольфрам - один из важнейших материалов электровакуумной техники. Благодаря волокнистой структуре, приобретаемой в результате обработки ковкой и волочением, тонкая вольфрамовая проволока диаметром до 0,01мм обладает высокой гибкостью. Вольфрам - основной материал для изготовления нитей ламп накаливания. Однако проволока и спирали из чистого вольфрама при высоких температурах становятся хрупкими вследствие процессов рекристаллизации, сопровождающихся интенсивным ростом зерна до размеров поперечного сечения проволоки. Для улучшения свойств чистого вольфрама в него вводят различные

присадки. Оксид тория Th_2O_3 замедляет процесс рекристаллизации и препятствует росту зерна, добавки оксидов кремния SiO_2 и алюминия Al_2O_3 улучшают формоустойчивость вольфрамовой проволоки. В электровакуумном производстве применяют вольфрам марок ВА (с кремне-алюминиевой присадкой) и ВТ (с присадкой оксида тория).

Из вольфрама изготавливают катоды высокого напряжения мощных генераторных ламп, рентгеновских трубок с рабочей температурой 2200...2800 К. Вольфрамовые катоды обладают стабильной эмиссией электронов и способностью работать в высоком вакууме. Катоды из торированного вольфрама ВТ имеют более высокие эмиссионные свойства.

Вольфрам обладает наименьшим температурным коэффициентом линейного расширения среди всех чистых металлов ($\alpha_l = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Это свойство используется для изготовления термически стойких сплавов вольфрама с тугоплавкими стеклами.

Вольфрам и его сплавы с молибденом, иридием, рением используют также для нагревательных элементов, работающих при температурах выше 1200°C, и для высокотемпературных термодар. Благодаря высокой твердости, дугостойкости, электроэрозионной стойкости и низкой свариваемости вольфрам широко используется в высоконагруженных разрывных контактах.

Молибден (Mo) - аналог вольфрама, но несколько менее тугоплавкий ($T_{\text{пл}} = 2620^\circ\text{C}$) и менее твердый. Отожженный молибден с мелкозернистой структурой значительно пластичнее вольфрама, он широко используется для различных деталей сложной конфигурации. Среди всех тугоплавких металлов молибден обладает наименьшим удельным сопротивлением ($\rho = 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$).

Молибден используется для нагревательных элементов в высокотемпературных (до 1700°C) электрических печах, работающих в защитной атмосфере. Из молибдена изготавливают сетки и электроды электронных ламп и другие вспомогательные детали электровакуумных приборов (крючки, нити, подвески), работающие в напряженном тепловом режиме.

Большое практическое значение имеют **сплавы вольфрама молибденом**, которые образуют структуру твердого раствора во всем диапазоне концентраций. Сплавы, содержащие 45%Mo, обладают максимальным удельным сопротивлением и твердостью, высокой эрозионной стойкостью. Их применяют для высоконагруженных контактов в защитной среде. W-Mo-сплавы используют также для нитей накаливания электроламп и катодов подогрева, так как они имеют более высокие механические свойства, чем чистый вольфрам, хотя и более низкие допустимые рабочие температуры.

Рений (Re) - редкий и тяжелый металл с температурой плавления, близкой к температуре плавления вольфрама ($T_{\text{пл}} = 3180^\circ\text{C}$). Рений твердый и прочный, как вольфрам, и пластичный, как молибден, имеет высокое удельное сопротивление ($\rho = 0,214 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$), стоек к дуге постоянного тока. Рений часто применяют в сплавах для высоконагруженных разрывных контактов, например, сплавы W+15...20%Re отличаются повышенной износостойкостью.

Рений и его сплавы с вольфрамом применяют в производстве

электривакуумных приборов взамен вольфрама, так как он меньше испаряется в атмосфере водорода, отличается более длительным сроком службы. Re- и W-Re-сплавы используются для термопар до 2500...2800°C в защитной среде.

В радиоэлектронике рений применяют для защиты от коррозии и износа деталей из меди, вольфрама и молибдена. Тонкие пленки рения используются для прецизионных резисторов в интегральных схемах.

Тантал (Ta) по тугоплавкости несколько уступает вольфраму ($T_{пл} = 3000^\circ\text{C}$), но значительно превосходит его по пластичности, что позволяет изготавливать фасонные детали, проволоку и фольгу толщиной до 10 мкм. Тантал образует на поверхности плотную оксидную пленку Ta_2O_5 , устойчивую до температуры 1500°C. Это свойство используется при производстве электролитических и тонкопленочных конденсаторов высокой удельной емкости, получаемых путем анодного оксидирования.

Тантал широко используется в электривакуумной технике для ответственных деталей: анодов и сеток генераторных ламп, катодов накаливания. Благодаря своей способности поглощать газы в диапазоне температур 600...1200°C, тантал применяют в вакуумной аппаратуре в качестве стабилизатора высокого вакуума (геттера). Тантал используется также в тонкопленочных технологиях при производстве резисторов. На воздухе происходит активное растворение азота в танталовой пленке с образованием нитридной пленки Ta_2N , обладающей высокой стабильностью свойств.

Ниобий (Nb) -металл, близкий по свойствам к танталу, но более легкоплавкий ($T_{пл} = 2500^\circ\text{C}$), обладает высокой газопоглощающей способностью в температурном интервале 400...900°C. Поэтому в электривакуумных приборах детали из ниобия одновременно выполняют функции геттера. У ниобия среди всех тугоплавких металлов наименьшая работа выхода электронов, его применяют в качестве катодов накаливания в мощных генераторных лампах. Среди всех химических элементов ниобий обладает самой высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{св} = 9,2 \text{ K}$). Поэтому ниобий, как и тантал ($T_{св} = 4,5 \text{ K}$), применяют в криогенной технике.

Хром (Cr) обладает сравнительно невысокой температурой плавления ($T_{пл} = 1900^\circ\text{C}$) по сравнению с другими тугоплавкими металлами, но в противоположность остальным металлам этой группы является весьма распространенным в земной коре. Его отличительная особенность - высокая стойкость к окислению, поэтому хром используется для защитных покрытий изделий (хромирование), в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах.

Хром обладает хорошей адгезионной способностью к стеклу, керамике, ситаллам и хорошо совместим с другими проводящими материалами. Поэтому технология осаждения тонких пленок хрома на подложку широко используется в микроэлектронике при изготовлении резисторов, адгезионных подслоев для контактных площадок токопроводящих соединений.

Вопросы для самоконтроля:

1. От чего зависит электропроводность идеальных и реальных металлов?
2. Как определить удельное сопротивление металла при любой температуре?

3. В чем принципиальное отличие изменения ρ и α_p от состава сплавов Cu-Au и Cu-Ni?
4. Как зависит ρ и α_p от толщины тонкой металлической пленки? Что такое сопротивление квадрата?
5. Назовите основные материалы высокой проводимости и их применение.
6. Как влияют примеси на свойства меди и алюминия?
7. Перечислите основные благородные металлы, особенности их свойств и применение.
8. Назовите основные тугоплавкие металлы, особенности их свойств и применение.

Лекция 5. Сверхпроводящие металлы и сплавы – 2 часа

Сверхпроводимость - это состояние вещества, характеризуемое отсутствием электрического сопротивления. Сверхпроводимость наблюдается у ряда металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю. Температура перехода в сверхпроводящее состояние называется **критической температурой сверхпроводимости** - $T_{св}$.

При температуре ниже $T_{св}$ электрический ток, наведенный в сверхпроводящем контуре, будет циркулировать бесконечно долго, не убывая, при условии поддержания низкой температуры. Удельное сопротивление материала в сверхпроводящем состоянии составляет порядка 10^{-25} Ом·м, что в 10^{17} раз меньше, чем у меди.

Физическая природа сверхпроводимости. Впервые явление сверхпроводимости было обнаружено у ртути ($T_{св} = 4,2$ К) голландским физиком Камерлинком-Оннесом в 1911 г. Современная теория сверхпроводимости, основанная на квантовых представлениях, была предложена в 1957 г. американскими учеными Бардиным, Купером и Шриффером. Значительный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли работы советского академика Н.Н.Боголюбова.

В металле свободные электроны, движущиеся в среде положительно заряженных ионов, взаимодействуют с тепловыми колебаниями решетки, обмениваясь с ней квантами тепловой энергии - фононами, при этом электроны могут поглощать или отдавать энергию, т.е. изменять свой импульс. Обмен фононами между электронами при участии решетки происходит непрерывно. В результате обменного фононного взаимодействия пара электронов с разными импульсами и антипараллельными спинами испытывают взаимное притяжение и образуют так называемую **куперовскую пару**.

Рассмотрим упрощенную схему (рис. 9). Электрон 1, движущийся между ионами, притягивает ближайшие ионы, создавая по траектории движения локальную зону повышенной плотности положительного заряда. Электрон 2, движущийся вслед за первым, притягивается этой зоной. В результате, косвенным образом, через решетку, между электронами возникают силы притяжения. Силы притяжения невелики, парные образования слабо локализованы в пространстве,

они постоянно распадаются и создаются, образуя электронный конденсат.

При низких температурах ($<T_{св}$) энергия тепловых колебаний решетки чрезвычайно мала и спаренные электроны не рассеиваются на дефектах структуры. Особенность куперовских пар - их импульсная упорядоченность. Электронные волны, описывающие движение пар, имеют одинаковую длину и фазу. Фактически движение всех электронных пар можно рассматривать как распространение одной электронной волны, которая не рассеивается решеткой, «обтекает» дефекты структуры.

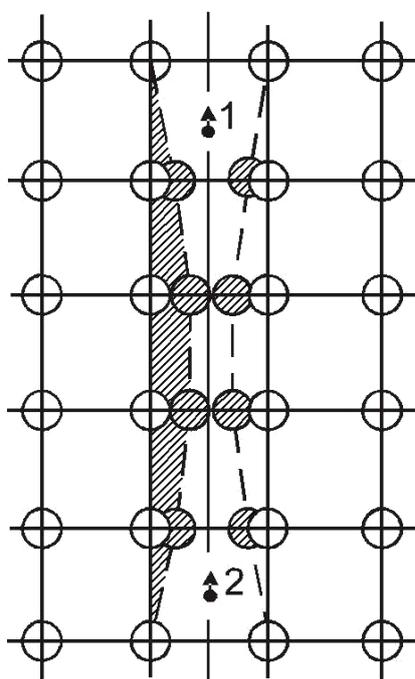


Рис. 9. Схема образования электронных пар в сверхпроводнике

При температуре абсолютного нуля все электроны, расположенные вблизи уровня Ферми, связаны в пары. При повышении температуры часть электронных пар распадается. Неспаренные электроны переходят с основных уровней на возбужденные, и их движение затрудняется рассеянием на дефектах структуры. При температуре $T_{св}$ происходит полный разрыв всех куперовских пар, и состояние сверхпроводимости исчезает.

Сверхпроводники обладают специфическими магнитными свойствами. Поскольку электроны с противоположно направленными спинами связаны в пары, результирующий спиновый момент пары равен нулю, и сверхпроводник становится идеальным диамагнетиком. Как всякие диамагнетики, сверхпроводники выталкиваются из магнитного поля. Внешнее магнитное поле совершенно не проникает в толщину образца, затухая в тончайшем поверхностном слое ($10^{-7} \dots 10^{-8}$ м). Эффект выталкивания выражен столь сильно, что с помощью магнитного поля можно удерживать постоянный магнит над кольцом из сверхпроводящего материала. Однако состояние сверхпроводимости

может быть разрушено, если напряженность магнитного поля превысит некоторое критическое значение $H_{св}$.

В настоящее время известно более 30 металлов, обладающих сверхпроводимостью при криогенных температурах, и более 1000 сверхпроводниковых сплавов и химических соединений различных элементов. Параметры некоторых сверхпроводниковых материалов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства сверхпроводниковых материалов

Сверхпроводники	Критическая температура $T_{св}$, К	Сверхпроводники	Критическая температура $T_{св}$, К
Элементарные:		Сплавы:	
Ir	0,14	35БТ	8,7
Al	1,2	65БТ	9,7
In	3,4	Химические соединения:	
Sn	3,7		
Hg	4,2	V_3Ga	14,8
Ta	4,5	V_3Si	17
V	5,3	Nb_3Sn	18,3
Pb	7,2	Nb_3Ga	20,3
Nb	9,4	Nb_3Ge	24,3

По характеру перехода материала из сверхпроводящего состояния в состояние обычной электропроводимости под действием магнитного поля различают сверхпроводники I и II рода. У *сверхпроводников I рода* этот переход происходит скачкообразно, как только напряженность поля достигнет критического значения. *Сверхпроводники II рода* переходят из одного состояния в другое постепенно. Большинство чистых металлов являются сверхпроводниками I рода с критическими температурами перехода ниже 4,2 К.

К сверхпроводникам II рода из чистых металлов можно отнести ниобий и ванадий. Из всех элементов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, самую высокую критическую температуру перехода имеет ниобий - 9,4 К. К сверхпроводникам II рода относятся все интерметаллидные соединения и сплавы. Наиболее высокими критическими параметрами (значениями температуры перехода, критической напряженности магнитного поля и допустимых токов) обладают сплавы и соединения ниобия. Например, по проволоке из станнида ниобия Nb_3Sn в полях с индукцией примерно 10 Тл можно пропускать ток с плотностью выше 10^9 А/м² (10^3 А/мм²). Практическое использование нашли сверхпроводящие сплавы с высоким содержанием ниобия: 65БТ (63...68%Nb + 22...26%Ti + 8,5...11,5%Zr) и 35БТ (60...64%Ti + 33,5...36,5%Nb + 1,7...4,3%Zr).

Например, сплав 65БТ имеет критическое значение плотности тока $2,8 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

В 1986 г. было обнаружено явление высокотемпературной сверхпроводимости, которой обладают некоторые виды керамики на основе редкоземельных металлов с характерным расположением атомов. Например, соединения лантана $\text{La}_{2-x}\text{MxCuO}_4$ (где $\text{M} = \text{Ba}, \text{Sr}$) переходят в сверхпроводящее состояние при температуре, близкой к температуре жидкого азота. В сплавах иттрия $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ переход в сверхпроводящее состояние происходит при температуре - 173°C и выше.

Разрабатываются новые материалы, обладающие большей плотностью тока и более высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Перспективными в этом отношении являются так называемые висмутовые системы с химической формулой $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_x$, температура перехода которых достигает -158°C.

Сверхпроводящие элементы и устройства находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Для достижения сверхпроводящего состояния в этих устройствах используется среда жидкого гелия или более дешевый хладагент - жидкий водород.

Одно из главных применений сверхпроводников связано с получением сверхсильных магнитных полей напряженностью свыше 10^7 А/м . Это позволяет изготавливать обмотки мощных генераторов, электрических машин и трансформаторов с малой массой, размерами и очень высоким КПД. В сверхпроводящих системах не требуется внешний источник питания. Они применяются также для кабелей мощных линий электропередач, волноводов с малым затуханием, устройств памяти и управления. Сверхпроводники используют для изготовления мощных магнитов (например, поезда на магнитной подушке), криогенных гироскопов, якорь которых «плавает» в магнитном поле (опоры без трения).

Неметаллические проводники

Материалы на основе графита

Из неметаллических проводников наибольшее применение находят материалы на основе графита. **Графит** представляет собой одну из полиморфных модификаций углерода с гексагональной слоистой кристаллической решеткой, что определяет сильную анизотропию физико-механических свойств и его невысокую прочность. **Основными свойствами** графита, определяющими его применение как электротехнического материала, являются:

- малое удельное сопротивление ($\rho = 0,05 \dots 1,2 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$);
- высокая теплопроводность;
- химическая стойкость во многих агрессивных средах;
- высокая нагревостойкость, обусловленная высокой температурой разложения ($T_{\text{пл}} = 3900^\circ\text{C}$);
- легкость механической обработки.

Для электротехнического применения используется как природный графит, так и синтезированные углеграфитные материалы. **Пиролитический графит** получают путем термического разложения паров углеводородов (например, метана) в вакууме или в среде инертного газа при температуре 900°C. Пленки пиролитического углерода широко используются для получения линейных резисторов поверхностного типа.

Электротехнический уголь -сырьем для его производства является графит, антрацит или сажа - мелкодисперсная разновидность углерода, получаемая как продукт неполного сгорания или термического разложения углеродосодержащих веществ. Для получения монолитного изделия измельченное в порошок углеродистое сырье смешивают со связующим (каменноугольной смолой или жидким стеклом), подвергают формованию и последующему обжигу при температурах 900...2500°C. При высоких температурах обжига (выше 2000°C) происходит графитизация - образование плотного поликристаллического графита. Изделия из электротехнического угля обладают достаточной прочностью, твердостью и допускают механическую обработку. Они могут эксплуатироваться в вакууме или в защитных средах при температурах до 2500°C. В зависимости от состава и технологии получения материалов их удельное сопротивление может изменяться в широких пределах (ρ от 0,05 до 60 мкОм·м).

Пиролитический графит и электротехнический уголь широко используются для изготовления электродов дуговых электрических печей и электролитических ванн, анодов гальванических элементов, нагревателей, экранов, лодочек, тиглей, кассет в полупроводниковой технологии и щеток электрических машин.

Контактолы

Контактолы -это маловязкие или пастообразные полимерные композиции, используемые в качестве токопроводящих клеев, красок, покрытий и эмалей. Токопроводящими наполнителями являются мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия, меди). В качестве связующего вещества используются синтетические смолы (эпоксидные, фенолформальдегидные, кремний-органические и др.). Необходимая вязкость контактолов перед их нанесением на поверхность обеспечивается введением растворителей (ацетона, спирта).

Контактолы используют в электротехнике и электронике для создания контактов между металлами, металлами и полупроводниками, металлами и диэлектриками:

- при формировании электродов (обкладок) в керамических конденсаторах;
- в качестве экранирующих покрытий на поверхности пластмасс;
- при приклеивании выводов к щеткам электрических машин;
- при создании токопроводящих коммуникаций на диэлектрической подложке и т.д.

Контактол вязкой консистенции наносится на склеиваемую поверхность, растворитель улетучивается и происходит процесс полимеризации связующего (отверждение). В зависимости от типа контактола температура

отвердения составляет от 20 до 200°C. В результате на поверхности образуется тонкая и плотная токопроводящая пленка, прочно связанная с материалом детали.

Серебросодержащие контактолы (К-8,К-12,К-13,К-17,К-20, К-21, К-22) обладают наиболее высокой электропроводностью (минимальное значение $\rho = 0,05$ мкОм·м), стабильностью свойств, высокой термостойкостью (до 250°C) и адгезионной прочностью (прочностью на отрыв) до $\sigma_{\text{вогр}} = 18...25$ МПа. Их применяют в микроэлектронике для склеивания поверхностей меди, серебра со стеклами и керамикой при создании коммутационных слоев и монтаже элементов гибридных схем.

Палладиевые контактолы (КП-1,КП-2)уступают серебросо-держачим по проводимости (ρ от 10 до 100 мкОм·м), но имеют пре-имущество по спектру склеиваемых материалов - металлов (Ag, Au, Pt, Pd, Cu, Ni, Al) со многими диэлектриками и некоторыми полупро-водниками.

Никелевые контактолы (КН-1,КН-6)отличаются высокой адгезионной прочностью ($\sigma_{\text{вогр}}$ до 50 МПа) и длительным сроком службы. Они применяются при монтаже микросхем, креплении кварцевых элементов в пьезодатчиках, создании экранирующих покрытий на пенопластах и т.д.

Медные контактолы (КМ-1,КМ-2)применяются как заменители дорогостоящих серебросодержащих контактолов.

Материалы для электрических контактов

Электрические контакты по условиям работы делятся на три типа: неподвижные, разрывные, скользящие.

Неподвижные контакты

Неподвижные контакты могут быть зажимными и цельнометаллическими.

Зажимные контакты представляют собой различного рода зажимы, клеммы, болтовые и винтовые соединения проводников, а также различные штепсельные разъемы типа вилка - розетка.

При соприкосновении контактов возникает переходное сопротивление, которое зависит от состояния контактирующих поверхностей, контактного давления и твердости материала.

Требования к зажимным контактам:

- малое и стабильное переходное сопротивление, что обеспечивается малым удельным сопротивлением материала и невысокой твердостью;
- коррозионная стойкость материала, не образующего на контактной поверхности оксидных пленок.

Основными материалами для зажимных контактов являются медь, латуни, цинк, стали. Контактные поверхности подвергают шлифованию и покрывают мягкими коррозионностойкими металлами: оловом, цинком, кадмием, серебром.

Цельнометаллические контакты -соединения проводниковпутем пайки

или сварки. **Припой**- специальные сплавы, используемые при пайке, для создания прочного, герметичного шва и электрического контакта с малым переходным сопротивлением.

Различают мягкие и твердые припои. В качестве мягких припоев с температурой плавления ниже 300°C используют сплавы на основе легкоплавких металлов - олова, свинца, цинка. Сплавы этих металлов образуют эвтектики, электросопротивление которых мало отличается от удельного сопротивления чистых металлов.

Оловянно-свинцовые припои (ПОС) имеют температуры плавления в диапазоне 183...250°C, удельное сопротивление $\rho = 0,14...0,21$ мкОм·м, они применяются для пайки тонких проводов из меди и медных сплавов. Эвтектический сплав состава 39%Pb + 61%Sn (ПОС-61) имеет наименьшую температуру плавления (183°C) и наилучшую жидкотекучесть, что обеспечивает высокую прочность и качество соединения.

Среди оловянно-цинковых припоев наилучшие свойства у эвтектического сплава, содержащего 90%Sn + 10%Zn (ПОЦ-90). Он имеет температуру плавления (199°C) и применяется для пайки алюминия.

При очень низких температурах пайки (<100°C) используют сплавы на основе висмута, например, сплав 50%Bi + 25%Pb + 12,5%Sn + 12,5%Cd с температурой плавления 68°C. Такая низкая температура плавления объясняется образованием тройных легкоплавких эвтектик.

Твердые или тугоплавкие припои предназначены для высокотемпературной пайки. Они обеспечивают большую прочность соединения за счет взаимной диффузии элементов основного металла и припоя, их удельное сопротивление ниже, чем у мягких припоев. Твердые припои применяются для пайки меди, сталей, латуней, бронз.

В качестве твердых припоев используют чистую медь, медно-цинковые, медно-фосфористые сплавы и сплавы, содержащие серебро. Cu-Zn-припои (ПМЦ) имеют малое удельное сопротивление ($\rho = 0,03...0,04$ мкОм·м) и температуры плавления от 825 до 880°C в зависимости от содержания меди. Вместо стандартных припоев для пайки можно применять латуни Л62 или Л68. Медно-фосфористые припои (ПМФ), содержащие 7...10%P, позволяют вести пайку меди без флюса.

Серебряные припои имеют высокие механические, технологические и антикоррозионные свойства, невысокое переходное сопротивление. Кроме серебра они содержат медь или медь с цинком, например, ПСр72 (72%Ag + 28%Cu). С увеличением содержания серебра в припоях падает удельное сопротивление с 0,065 мкОм·м до 0,022 мкОм·м, а температура плавления изменяется от 779 до 920°C. Серебряные припои пригодны для пайки любых разнородных черных и цветных металлов и сплавов.

Разрывные контакты

Разрывные контакты являются наиболее нагруженными элементами

электрической цепи. Они испытывают различные виды износа: электрический, химический и механический. **Электрический износ** связан с возникновением электрических разрядов (дуги), искрением, оплавлением, испарением и переносом металла с одного контакта на другой. Совокупность этих явлений называется **эрозией**. Электроэрозионное изнашивание выражается в изменении формы контактов, образовании кратера (впадины) на одном контакте и иглы (выступа) на другом, что может привести к свариванию и спеканию контактов. **Спекание** - соединение контактов металлическим мостиком при пробое оксидной пленки из-за недостаточных контактных давлений для ее разрушения.

Химический износ - это коррозионный износ в результате химического взаимодействия с окружающей средой. Коррозия сопровождается образованием непроводящих пленок на контактных поверхностях, что может вызвать частичное или полное нарушение проводимости контактов.

Механический износ контактов от механических воздействий проявляется в их истирании, деформации и растрескивании.

Требования к разрывным контактам:

- устойчивость против коррозии, для чего необходим высокий электродный потенциал, малое химическое сродство к компонентам среды, низкая прочность оксидных пленок;
- высокая дугостойкость, стойкость к свариванию и электрической эрозии, что обеспечивается высокой температурой плавления, высокой твердостью и износостойкостью;
- высокая электро- и теплопроводность.

В зависимости от электрической мощности различают слаботочные (малонагруженные), средне- и высоконагруженные контакты.

Слаботочные разрывные контакты используются в прецизионных реле систем автоматики, управления, связи, сигнализации, радиоэлектронной аппаратуре, контрольно-измерительных приборах и др. Они работают при слабых токах (до 1А) и низких контактных давлениях. Основные требования к ним: высокая коррозионная стойкость (недопустимо образование оксидных пленок на рабочих поверхностях контактов) и низкое переходное сопротивление.

Применяемые материалы: золото, серебро, платина, палладий и их сплавы (Ag-Au, Au-Pt, Ag-Pd, Pt-Ir, Pt-Ph, Pd-Ir, Au-Ni, Au-Ag-Ni, Au-Pd-Ni). Благородные металлы (кроме Ag) применяют обычно в виде тонких гальванических покрытий, нанесенных на медь, латунь, хром и др. Осажденные слои более стойки к электроэрозии и намного тверже соответствующих металлов. В сплавах Ag-Au, Ag-Pd при 50%-ном соотношении компонентов твердость максимальна, а эрозия минимальна.

Средненагруженные контакты работают в реле различного назначения, магнитных пускателях, стартерах, средненагруженных контакторах, преобразователях тока, сигнальной аппаратуре на ж/д транспорте, бытовых приборах.

Применяемые материалы: медь и ее сплавы, вольфрам, Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-Cu, Ag-Pd, Pd-Cu, Ag-Pd-Ni, Cu-Cd и др. Сплавы Ag-Cd, Cu-Cd отличаются высокой электропроводностью, повышенной твердостью, дугостойкостью, электроэрозионной стойкостью, сопротивлением свариванию и равномерным износом. Высокой стойкостью против сваривания и электроэрозии обладают сплавы Ag-Cu. Вольфрамовые контакты обладают наибольшей дугостойкостью и меньше всего подвержены электроэрозии, свариванию и износу.

Высоконагруженные контакты работают в особо тяжелых условиях: при больших токах, напряжениях и контактных нагрузках. Для них характерны интенсивный износ, оплавление и сваривание. Применяются тугоплавкие металлы (W, Mo) и их сплавы, либо металлокерамические композиции. Металлокерамические контакты изготавливают прессованием металлических порошков с последующим спеканием или пропиткой спрессованной тугоплавкой основы легко-плавкими компонентами. Используются композиции на основе вольфрамового или молибденового порошка, пропитанного жидким серебром или медью. Серебро и медь обеспечивают высокую электро- и теплопроводность, стойкость к окислению, а тугоплавкая фаза - стойкость к износу, электрической эрозии и свариванию. Кроме двойных металлических композиций используются тройные композиции: Ag-W-Ni, Cu-W-Ni, а также металлокерамические материалы, содержащие оксиды, карбиды или графит: Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-WC, Cu-C, Cu-W, Ag-C, Ag-Ni-C. Металлокерамические контакты обладают высокой износостойкостью и сопротивляемостью к свариванию в самых тяжелых условиях работы, что позволяет их использовать для переключателей, пускателей, реле, регуляторов напряжения, масляных выключателей большой мощности и т.д.

Скользящие контакты

К скользящим контактам относят подвижные контакты, в которых контактирующие элементы скользят друг по другу без отрыва: это контакты между кольцами, коллекторными пластинами и щетками в электрических машинах, потенциометрические обмотки и реохорды в элементах сопротивления, упругие токосъемные контакты.

Основное требование к ним - стойкость к истирающим нагрузкам при сухом трении. Износостойкость при трении связана со свойствами пары контактов: чтобы избежать заедания, один контакт должен быть тверже другого, причем мягкий контакт достаточно пластичным без склонности к наклепу. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют контактные пары металл-графит.

Подвижные части контакта - **коллекторные пластины, кольца** изготавливают из твердой меди, латуни (ЛС59-1, ЛМц58-2) или бронз (оловянно-цинковых, оловянно-фосфористых, бериллиевой БрБ2, кадмиевой БрКд1, хромистой БрХ0,5). Они отличаются высокой прочностью, стойкостью к истиранию, упругостью, антифрикционными свойствами и стойкостью к

атмосферной коррозии.

Щетки электрических машин - неподвижные части скользящих контактов. К ним предъявляют следующие требования:

- минимальное удельное сопротивление и переходное падение напряжения ($U_{пер}$) между контактной парой щетка - коллектор, щетка - контактное кольцо;
- высокая допустимая плотность тока j ;
- малый износ щетки и коллектора;
- низкий коэффициент трения и малое удельное давление прижатия щетки;
- высокая окружная скорость ($\omega = \pi n/30$, где n - число оборотов ротора);
- минимальное искрение.

Этим требованиям отвечают материалы на основе графита. По составу, структуре и технологии получения различают 4 группы щеток. Их основные характеристики представлены в табл. 6.

Таблица 6

Щетки для электрических машин

№	Тип щеток	Марка	ρ , мкОм м	$U_{пер}$, В
1	Углеграфитные	Г20, Г21, Г22	35-400	2-5
2	Графитные	611М, Г1, Г3	6-75	1-28
3	Электрографитные	ЭГ-2а, ЭГ4, ЭГ61	1-7	1-2
4	Металлографитные	М-1, М-3, МГ, МГС5	0,04-0,25	0,3-1,6

Углеграфитные щетки изготавливают из прессованной смеси антрацита, нефтяного кокса с графитом и связующим с последующим обжигом при 1350...1480°C. Щетки отличаются высокой твердостью, большим удельным сопротивлением, применяются в генераторах малой мощности и электродвигателях с облегченными условиями коммутации.

Графитные щетки получают из натурального графита безсвязующего (мягкие сорта) и со связующим (твердые сорта) путем прокаливания спрессованного порошка. Они отличаются мягкостью и создают незначительный шум. Такие щетки применяют в синхронных генераторах, однофазных электродвигателях, сварочных генераторах, электродвигателях постоянного тока средней мощности.

Электрографитные щетки изготавливают из антрацита, сажи или нефтяного кокса методом высокотемпературного обжига при 2000...2500°C, при котором происходит удаление примесей и графитизация. Щетки отличаются высокой механической прочностью, минимальным износом и обеспечивают хорошую коммутацию в быстроходных машинах, их применяют в средненагруженных и

высоко-нагруженных генераторах и электродвигателях.

Металлографитные щетки изготавливают из графитных масс добавками металлов (меди, бронзы). Они обладают пониженным удельным сопротивлением, малым переходным падением напряжения и допускают высокую плотность тока. Их применяют в машинах низкого напряжения, рассчитанных на большую силу тока (авиационных генераторах и электродвигателях).

Материалы высокого удельного сопротивления

К материалам высокого сопротивления относятся материалы, у которых ρ не менее $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Их применяют в электроизмерительных приборах, образцовых (прецизионных) резисторах, потенциометрах, реостатах и электронагревательных устройствах.

Основные требования, предъявляемые к материалам высокого удельного сопротивления:

- высокое удельное сопротивление ρ и малый температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ (близкий к нулю);
- малая термо-ЭДС в паре с медью, что особенно важно для электроизмерительных приборов;
- высокая жаростойкость, особенно для электронагревательных элементов;
- достаточная прочность и высокая пластичность, позволяющая изготавливать тонкую проволоку и ленту;
- способность длительно работать при повышенных температурах, сохраняя электрические характеристики.

Сплавы для образцовых резисторов и технических сопротивлений

Наиболее широкое применение нашли сплавы на основе меди со структурой твердых растворов (табл. 7).

Таблица 7

Сплавы высокого удельного сопротивления и их характеристики

Сплав	Хим. состав	ρ , мкОм м	$\alpha_\rho \cdot 10^6$, 1/К	σ_b , МПа	δ , %	$T_{\text{раб. max.}}$, °С
Манганин	Cu + 3% Ni	0,5	0	450...500	15...20	200
МНМц3-12	+ 12% Mn					
Радиоманганин	33% Cu +	1,8	0	-	-	200
ММц33-67	67% Mn					
Константан	Cu + 40% Ni	0,52	2	500...600	40...50	500
МНМц40-1,5	+ 1,5% Mn					
Нихром	20% Cr +	1,1	90	670	45	1100

X20H80	80%Ni					
X27Ю5	Fe + 27%Cr + 5%Al	2,1	36	680	16	1400

Примечание: значения ρ и α_p даны для 20°C

Манганин МНМц3-12 -классический сплав меди с никелем и марганцем для образцовых резисторов и электроизмерительных приборов высокого класса точности, $T_{пл} = 960^\circ\text{C}$. Благодаря наличию марганца термо-ЭДС манганина с медью составляет не более 1,0 мкВ/°С.

Сплав выпускается в виде проволоки диаметром 0,02...1,0 мм и ленты толщиной 0,01...1,0 мм, шириной 10...300 мм. Для получения стабильных значений ρ и α_p манганин подвергают рекристаллизационному отжигу при 400...500°C в вакууме с медленным охлаждением и длительной выдержкой при комнатной температуре. После изготовления образцовых резисторов их повторно нагревают до 250°C для снятия внутренних напряжений. На рис. 10 показаны температурные зависимости ρ и α_p манганина.

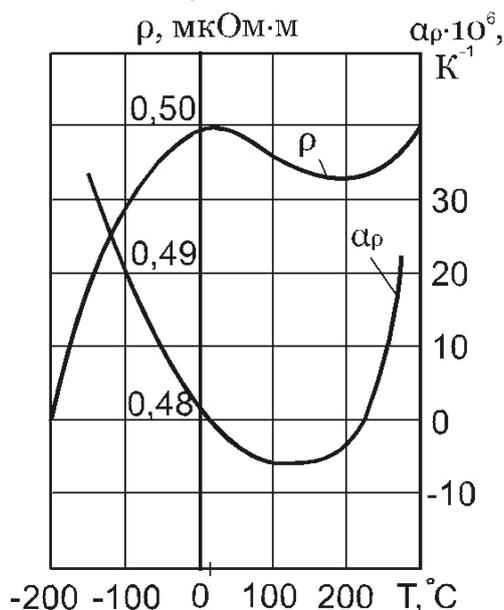


Рис. 10. Температурные зависимости ρ и α_p манганина

Радиоманганин ММц33-67 отличается более высоким содержанием марганца, благодаря чему значительно увеличивается ρ , а α_p становится равным нулю. Радиоманганин можно использовать для изготовления термокомпенсирующих и стабилизирующих элементов.

Константан МНМц40-1,5 -сплав меди с никелем. Отличается высокой прочностью и пластичностью в отожженном состоянии, $T_{пл} = 1270^\circ\text{C}$. Протягивается в проволоку диаметром до 0,004 мм, α_p близок к нулю. Имеет большую термо-ЭДС в паре с медью (40 мкВ/°С), поэтому его используют в основном для технических сопротивлений, реостатов, потенциометров, термопар и нагревательных элементов бытовых и лабораторных приборов до 500°C.

Основной недостаток сплавов на основе меди - их окисление с течением

времени, что недопустимо для точных потенциометров вычислительных машин, автопилотов и т.д. Для изготовления неокисляемых резистивных элементов применяются сплавы на основе благородных металлов:

Серебряный манганин ($\text{Ag}+10\%\text{Mn}+8\text{...}10\%\text{Sn}$) по структуре представляет собой твердый раствор марганца и олова в серебре. После 10-часового старения при 175°C его удельное сопротивление $\rho=0,5$ мкОм·м, термо-ЭДС в паре с медью $0,5$ мкВ/ $^\circ\text{C}$, $\alpha_p = 0$.

Сплав палладия с иридием PdИ18 ($\text{Pd}+18\%\text{Ir}$) имеет $\rho=0,4$ мкОм·м, $\alpha_p = 3 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Из микропроволок этих сплавов диаметром 3...20 мкм изготавливают микроминиатюрные резисторы высокой точности.

Материалы для нагревательных элементов

Для нагревательных элементов и технических сопротивлений (высоконагруженных реостатов), рабочая температура которых не превышает 1200°C , применяются хромоникелевые сплавы (нихромы) и сплавы на основе Fe-Cr с добавкой алюминия (табл. 7).

Нихромы (X20H80, X15H60) представляют собой твердые растворы на основе никеля с аустенитной структурой, обладают высокой прочностью и вязкостью. Они выпускаются в виде проволоки диаметром до 0,01 мм и ленты. Нихромы обладают высокой жаропрочностью, так как на их поверхности образуется плотная и прочная оксидная пленка, коэффициент α_p которой близок к α_p сплава. Однако при резких изменениях температуры пленка может растрескиваться, поэтому непрерывный режим работы нагревательного элемента обеспечивает большую долговечность, чем при многократном кратковременном включении. Срок службы нагревателя можно увеличить, если спираль заделать в твердую инертную среду типа глины-шамота. Применяют нихромы в средненагруженных устройствах (бытовых и лабораторных нагревательных приборах, па-яльниках, технических сопротивлениях и т.д.).

Сплавы системы Fe-Cr-Al имеют структуру твердых растворов хрома и алюминия в α -железе. По сравнению с нихромами они более дешевы, так как не содержат дорогостоящего никеля, но более тверды, хрупки и менее технологичны. Дополнительное легирование алюминием для повышения жаростойкости сильно ухудшает пластичность. Их применяют для высоконагруженных реостатов и нагревательных элементов в мощных электронагревательных установках и промышленных печах.

При температурах выше 1200°C для нагревательных элементов электрических печей в вакууме или среде аргона используются **тугоплавкие металлы** (W, Mo, Ta) и их сплавы.

Для трубчатых нагревателей при $T_{\text{раб}} > 1500^\circ\text{C}$ применяются **керамические** или **металлокерамические материалы** на основе карбидов и силицидов тугоплавких металлов. Особенности этих материалов являются инертность к кислотам и щелочам, а также высокая температура плавления (табл. 8).

Температуры плавления некоторых тугоплавких карбидов

Карбид	HfC	TaC	NbC	ZrC	SiC
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	3890	3880	3760	3530	2600

Рабочие температуры этих материалов достигают 3000°C . Например, нагреватели из карбида ниобия (NbC) с длиной стержня до 600 мм диаметром $d = 13...18$ мм и толщиной стенки 2...3 мм работают в вакууме до температуры 2500°C , а в аргоне - до 3000°C . Нагреватели из дисилицида молибдена (MoSi_2) могут работать в окис-лительной среде до 1700°C (ρ до 1000 мкОм·м). Силитовые стержни для нагревателей из SiC работают до 1800°C .

Сплавы для термопар

Термопара -термоэлемент для измерения температуры, состоящий из двух разных металлов и образующих замкнутую цепь (рис. 11).

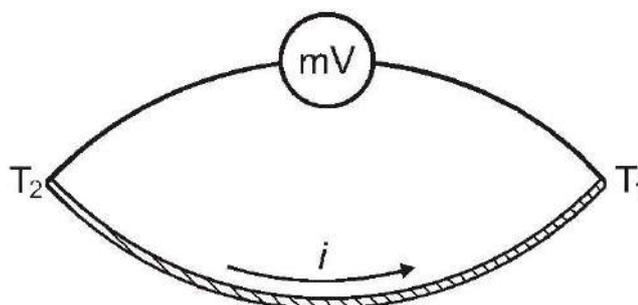


Рис. 11. Схема термопары

Из-за разной энергии Ферми при контакте двух разных металлов возникает контактная разность потенциалов (от долей вольта до нескольких вольт). Это явление открыл в 1797 г. итальянский физик А.Вольта.

При различной температуре контактов (спаев) на концах разомкнутой цепи появляется разность потенциалов - термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС). Величина термо-ЭДС пропорциональна разности температур горячего и холодного спаев

$$U \approx \alpha_t(T_2 - T_1),$$

где α_t - удельная термо-ЭДС термопары, мкВ/К, зависящая от природы проводников термопары и диапазона измеряемых температур.

подавляющее большинство термопар изготавливают из металлических компонентов. Наиболее часто применяют следующие сплавы: копель (56%Cu+44%Ni), алюмель (95%Ni+Al+Si+Mn), хромель (90%Ni+10%Cr), платинородий (90%Pt+10%Ph) (табл. 9).

Сплавы для термопар

Измеряемая температура $T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Термопара	Измеряемая температура $T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Термопара
350	медь-копель	1000	хромель-алюмель
	медь-константан	1600	платинородий - Pt
600	Fe-константан	2000*	W-Mo
	Fe-копель	2100*	W-Ir
	хромель-копель	2800*	W-Re

* работают в вакууме или в инертной среде.

Большинство термопар устойчиво работают лишь в окислительной среде. В процессе длительной эксплуатации удельная термо-ЭДС термопары может постепенно уменьшаться в результате загрязнения примесями из окружающей среды, летучести компонентов, окисления проводов и деформации. Наиболее высокой точностью, стабильностью и воспроизводимостью характеристик обладают платинородиевые термопары. Эти качества объясняются химической инертностью материала и возможностью получать его с высокой степенью чистоты.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие материалы применяются для неподвижных контактов?
2. Какие материалы используют для слаботочных разрывных контактов?
3. Какие материалы применяют для высоконагруженных разрывных контактов?
4. Из какого материала изготавливают коллекторные пластины электрических машин?
5. Какие электрические щетки лучше всего применять для мощного электродвигателя низкого напряжения; маломощного электродвигателя и быстроходных электрических машин?
6. Расшифруйте сплавы МНМц3-12 и МНМц40-1,5, укажите их свойства и применение.
7. Какие материалы применяются для электронагревательных элементов?
8. Перечислите методы получения тонких резистивных пленок. Какие материалы используются в качестве испарителя и почему?
9. Какие основные материалы применяются для тонкопленочных резисторов? Как определить сопротивление тонкопленочного резистора?
10. Что такое контактолы? С какой целью они используются?

Глава 2. Диэлектрики

Лекция 6. Общие сведения о диэлектриках – 2 часа

Диэлектрики - вещества, способные поляризоваться и сохранять электростатическое поле. Это широкий класс электротехнических материалов: газообразных, жидких и твердых, природных и синтетических, органических, неорганических и элементоорганических. По выполняемым функциям они делятся на пассивные и активные. **Пассивные** диэлектрики применяются в качестве электроизоляционных материалов. В **активных** диэлектриках (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.), электрические свойства зависят от управляющих сигналов, способных изменять характеристики электротехнических устройств и приборов.

По электрическому строению молекул различают неполярные и полярные диэлектрики. Неполярные диэлектрики состоят из неполярных (симметричных) молекул, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают. Полярные диэлектрики состоят из несимметричных молекул (диполей). Дипольная молекула характеризуется дипольным моментом - p (рис. 12).

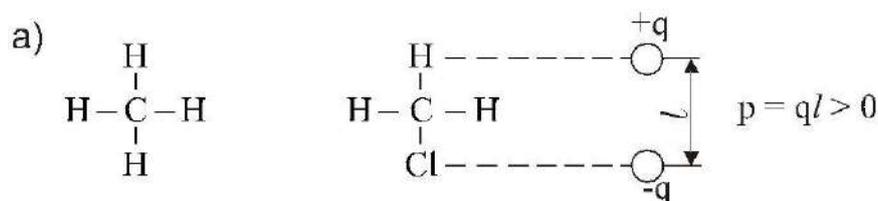


Рис. 12. Примеры электрического строения молекул диэлектриков:
а - неполярная (симметричная) молекула неполярного диэлектрика (метана); б - дипольная молекула полярного диэлектрика (хлорированного метила), дипольный момент $p > 0$

$$p = q \cdot l,$$

где заряд $q \approx 2 \cdot 10^{-19}$ Кл, расстояние между зарядами $l = (1 \dots 3) \cdot 10^{-10}$ м,
 $p = 5 \cdot 10^{-29} \dots 10^{-30}$ Клм.

В процессе работы электротехнических устройств диэлектрик нагревается, так как часть электрической энергии в нем рассеивается в виде тепла. Диэлектрические потери сильно зависят от частоты тока, особенно у полярных диэлектриков, поэтому они являются **низкочастотными**. В качестве **высокочастотных** используются неполярные диэлектрики.

Основные электрические свойства диэлектриков

Основные электрические свойства диэлектриков и их характеристики приведены в табл. 12.

Электрические свойства диэлектриков и их характеристики

№	Свойство	Характеристика	Обозначение
1	Поляризация	Относительная диэлектрическая проницаемость	ε
2	Электропроводность	Удельное электрическое сопротивление	ρ , Ом м
3	Диэлектрические потери	Тангенс угла диэлектрических потерь	$\operatorname{tg}\delta$
4	Электрическая прочность	Пробивная напряженность	$E_{\text{пр}}$, МВ/м

Поляризация диэлектриков

Поляризация -это упругое смещение связанных зарядов или ориентация молекул диэлектрика в электрическом поле. Поляризация сопровождается появлением на поверхности диэлектрика связанных электрических зарядов.

Способность диэлектрика к поляризации характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (3.1)$$

где C - емкость конденсатора с диэлектриком; C_0 - емкость конденсатора без диэлектрика (в вакууме).

Различают следующие виды поляризации:

- **электронная поляризация** -упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов под действием внешнего поля (рис. 13,а). Она свойственна всем веществам, но играет определяющую роль в неполярных диэлектриках (газообразных, жидких и твердых). Такая поляризация протекает почти мгновенно ($\tau = 10^{-15}$ с), без потерь энергии, ее величина не зависит от частоты поля;

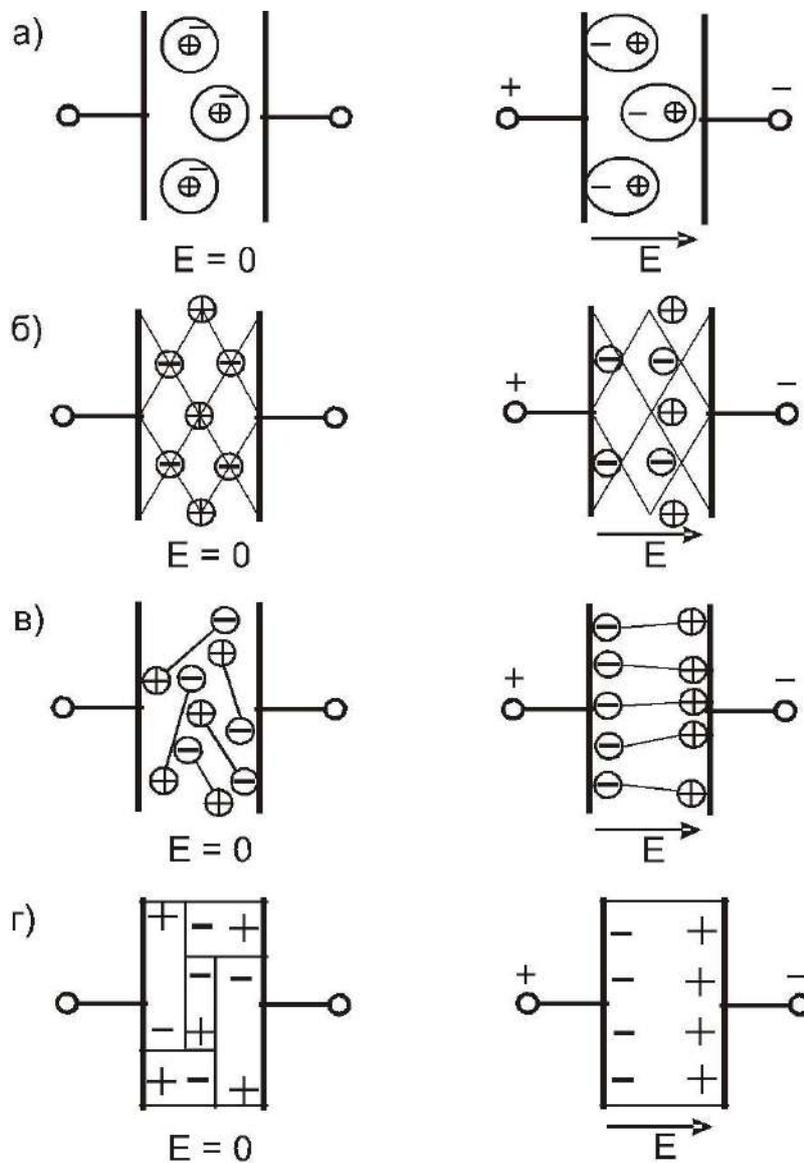


Рис. 13. Схема возникновения поляризации: а - электронной, б - ионной, в - дипольно-релаксационной, г - спонтанной (самопроизвольной)

- **ионная поляризация** обусловлена смещением упруго связанных ионов в пределах межатомного расстояния (рис. 13,б). Она характерна для веществ с ионным строением, время поляризации невелико ($\tau = 10^{-13}$ с), происходит практически без потерь энергии;
- **дипольно-релаксационная поляризация** заключается в ориентации дипольных молекул под действием сил поля (рис. 13,в).

Она присуща полярным диэлектрикам, протекает во времени ($\tau = 10^{-2}$ с) и сопровождается потерями энергии;

- **самопроизвольная (спонтанная) поляризация** наблюдается у сегнетоэлектриков. Это вещества, состоящие из наэлектризованных областей - доменов, обладающих электрическим моментом. В отсутствие внешнего поля домены расположены произвольно, и суммарный момент равен нулю. Во внешнем поле происходит переориентация доменов и создается эффект сильной поляризации (рис. 13,г): относительная диэлектрическая проницаемость достигает $\epsilon = 10^5$.

Влияние температуры на поляризацию диэлектриков

Изменение относительной диэлектрической проницаемости при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} . \quad (3.2)$$

При электронной поляризации относительная диэлектрическая проницаемость несколько уменьшается с повышением температуры вследствие уменьшения плотности вещества ($\alpha_\varepsilon < 0$) (кривая 1 на рис. 14). При ионной поляризации ε с увеличением температуры несколько повышается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении ($\alpha_\varepsilon > 0$) (кривая 2 на рис. 14). Дипольно-релаксационная поляризация сильно зависит от температуры среды. С увеличением температуры силы межмолекулярного взаимодействия ослабевают, и дипольные молекулы легче ориентируются во внешнем поле - ε растет. При дальнейшем повышении температуры интенсивное тепловое движение молекул ослабляет ориентирующее влияние поля - ε уменьшается (кривая 3 на рис. 14). При самопроизвольной поляризации ее величина растет до определенной температуры (T_k - точка Кюри), выше которой сегнетоэлектрик теряет свои специфические свойства (кривая 4 на рис. 14).

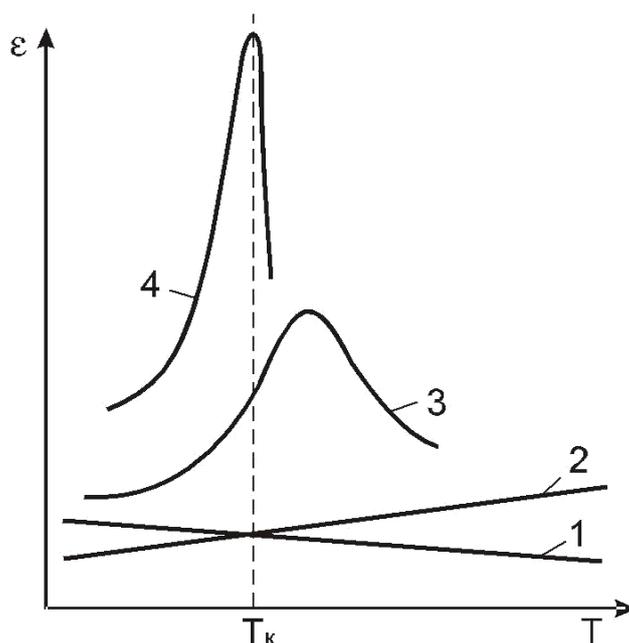


Рис. 14. Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости при поляризации: 1 - электронной, 2 - ионной, 3 - дипольно-релаксационной, 4 - спонтанной

Влияние напряженности электрического поля на поляризацию диэлектриков

По влиянию напряженности электрического поля на относительную диэлектрическую проницаемость различают диэлектрики линейные и нелинейные. Емкость конденсатора с **линейным** диэлектриком зависит только от его

геометрических размеров, и ϵ не зависит от напряженности внешнего поля (рис. 15,а).

К линейным диэлектрикам относится подавляющее число диэлектриков:

- неполярные диэлектрики с электронной поляризацией - газы, жидкости, твердые вещества кристаллические и аморфные (бензол, парафин, сера, полиэтилен и др.);
- полярные диэлектрики с дипольно-релаксационной и электронной поляризацией - органические жидкие и твердые вещества (хлорированные углеводороды, большинство органических со-единений на основе полимеров и др.);
- неорганические ионные соединения с ионной и электронной поляризацией - кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов (кварц, слюда, корунд - Al_2O_3 , рутил - TiO_2 и др.);
- неорганические соединения с ионной, электронной и релаксационной поляризацией - вещества с неплотной упаковкой (стек-ла, многие виды керамики).

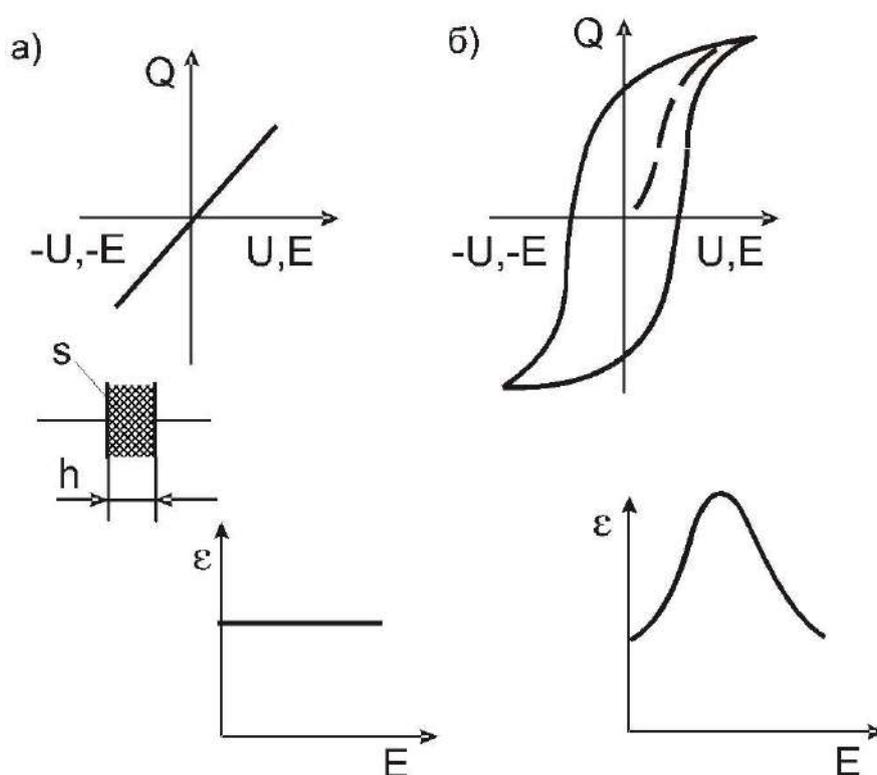


Рис. 15. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости и заряда конденсатора от напряженности (напряжения) у линейных (а) и нелинейных диэлектриков (б)

Для **нелинейных** диэлектриков (сегнетоэлектрики и др.) зависимость величины заряда от напряжения принимает форму петли гистерезиса (рис. 15,б).

Электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в диэлектрике до момента установления равновесного состояния происходят во времени, создавая **поляризационные токи** или **токи смещения**.

При дипольно-релаксационной поляризации токи смещения называют еще **абсорбционными токами** $j_{абс}$. При постоянном напряжении абсорбционные токи

возникают только в моменты включения и выключения напряжения. Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине **токов сквозной проводимости** $j_{ск}$. Таким образом, полный ток в диэлектрике, называемый **током утечки**, складывается из абсорбционного и сквозного (рис. 16).

$$j_{ут} = j_{абс} + j_{ск}. \quad (3.3)$$

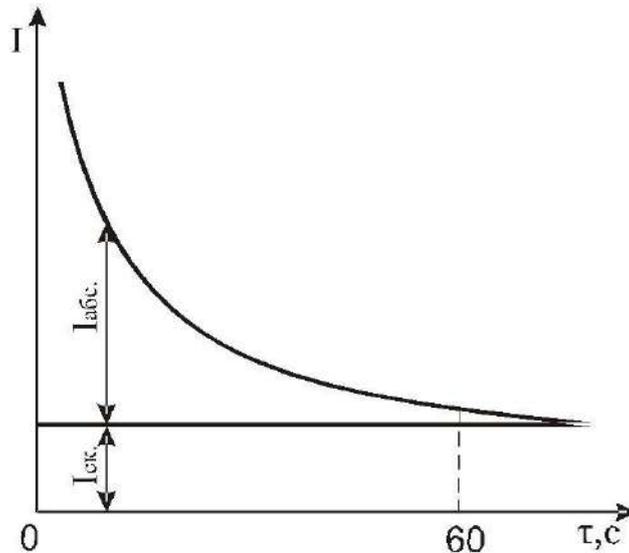


Рис. 16. Изменение тока утечки в твердом диэлектрике

Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется величиной сквозного тока. При переменном напряжении проводимость определяется сквозным током и абсорбционными токами замедленных механизмов поляризации. В большинстве случаев электропроводность в диэлектриках ионная, реже - электронная.

У твердых диэлектриков различают объемную и поверхностную электропроводность, которую оценивают, соответственно, удельным объемным сопротивлением (ρ , Ом·м) и удельным поверхностным сопротивлением (ρ_s , Ом).

Удельное объемное сопротивление численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, если ток проходит через две противоположные грани. В случае плоского образца в однородном поле

$$\rho = R \frac{S}{h}, \quad (3.4)$$

где R - объемное сопротивление образца, Ом; S - площадь электрода, м²; h - толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротивлению квадрата любых размеров, если ток проходит через две противоположные стороны

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}, \quad (3.5)$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца между параллельно стоящими

электродами шириной d , находящимися друг от друга на расстоянии l (рис. 17).

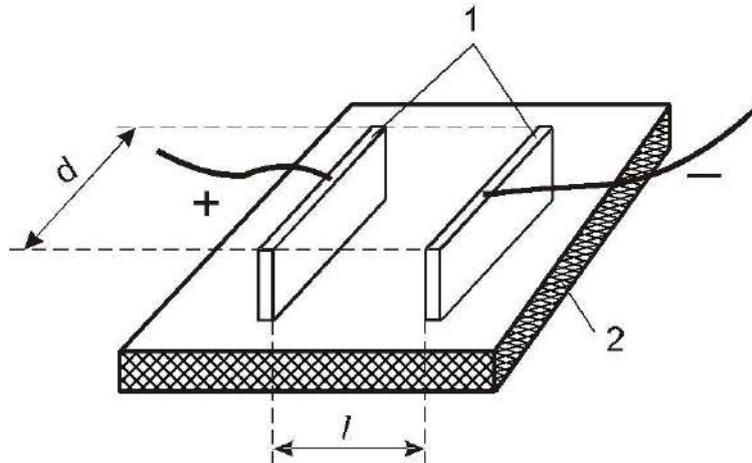


Рис. 17. Схема определения удельного поверхностного сопротивления ρ_s твердого диэлектрика: 1 – электроды, 2 - диэлектрик

Полная проводимость диэлектрика, соответствующая сопротивлению изоляции $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей.

Произведение сопротивления изоляции диэлектрика конденсатора на его емкость называется **постоянной времени конденсатора**

$$\tau_o = R_{из} \cdot C = 0,884 \cdot 10^{-11} \cdot \rho \cdot \epsilon \quad (3.6)$$

Электропроводность диэлектриков зависит от концентрации свободных носителей заряда, температуры и влажности среды. Примеси являются дополнительными источниками ионов и увеличивают электропроводность.

С повышением температуры растут подвижность носителей заряда и их количество, поэтому электропроводность диэлектриков возрастает, а сопротивление падает (рис. 18)

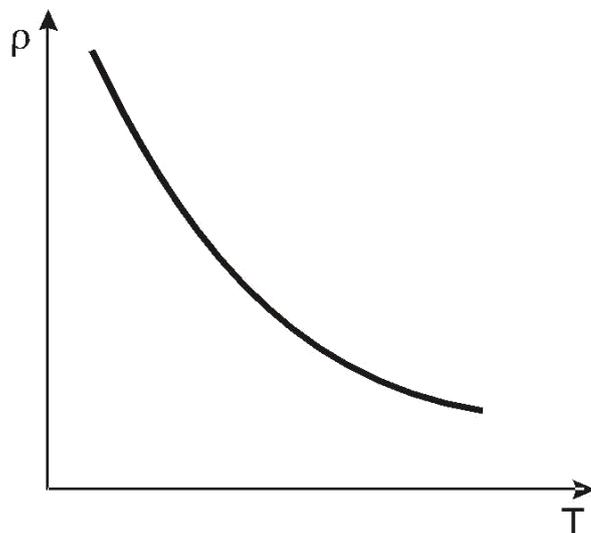


Рис. 18. Температурная зависимость удельного сопротивления диэлектриков

Увеличение влажности среды практически не оказывает влияния на проводимость неполярных диэлектриков, так как они не смачиваются водой. Полярные диэлектрики смачиваются водой, а вода является источником ионов. Кроме того, при наличии влаги может происходить частичная диссоциация молекул диэлектрика и примесей, что приводит к возрастанию электропроводности.

Диэлектрические потери

Диэлектрические потери - это мощность электрического тока, рассеиваемая в диэлектрике в виде тепла. Численно диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, где δ - угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между векторами тока и напряжения в цепи с емкостью ($\delta = 90^\circ - \varphi$).

При приложении переменного напряжения к конденсатору с идеальным диэлектриком угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi = 90^\circ$ (рис. 19,а), $\delta = 0$, тепловых потерь нет.

Для расчета потерь мощности в реальном диэлектрике при воздействии переменного напряжения используют эквивалентную схему, заменив конденсатор с реальным диэлектриком на идеальный конденсатор с параллельно (или последовательно) включенным активным сопротивлением (рис. 19,б). Потери мощности P_a (Вт) вызывает активная составляющая тока

$$P_a = U \cdot I_a \tag{3.7}$$

Учитывая, что $I_a = I_c \cdot \text{tg}\delta$, а $I_c = U \cdot \omega \cdot C$, получаем

$$P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta, \tag{3.8}$$

где U - напряжение, В; ω - круговая частота тока, с^{-1} .

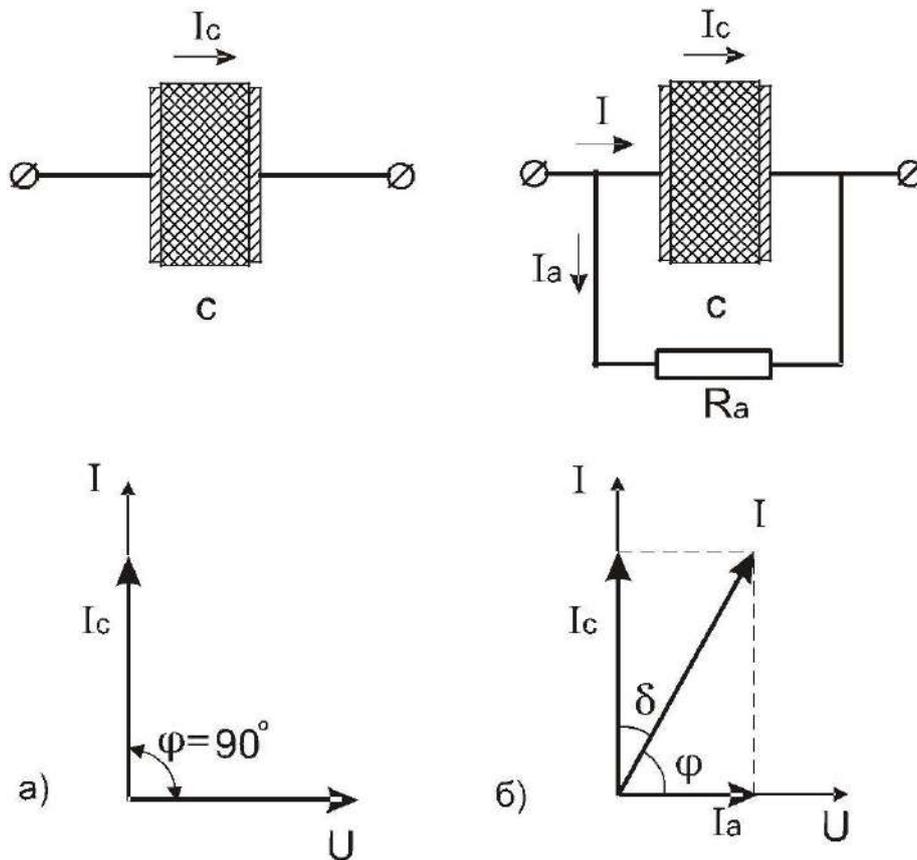


Рис. 19. Схема определения диэлектрических потерь: а - конденсатор с идеальным диэлектриком ($\text{tg}\delta = 0$); б - параллельная эквивалентная электрическая схема конденсатора с реальным диэлектриком ($\text{tg}\delta > 0$)

Виды диэлектрических потерь:

- потери от сквозной проводимости (на электропроводность);
- релаксационные;
- ионизационные;
- резонансные.

Потери на электропроводность (от сквозной проводимости)

- основные потери для неполярных диэлектриков. Они не зависят от частоты приложенного напряжения ($P_a = \text{const}$), $\text{tg}\delta$ уменьшается с частотой поля f по гиперболическому закону (рис. 20,а)

$$\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho}, \quad (3.9)$$

где ρ - сопротивление, измеренное на постоянном токе; ε - относительная диэлектрическая проницаемость на данной частоте.

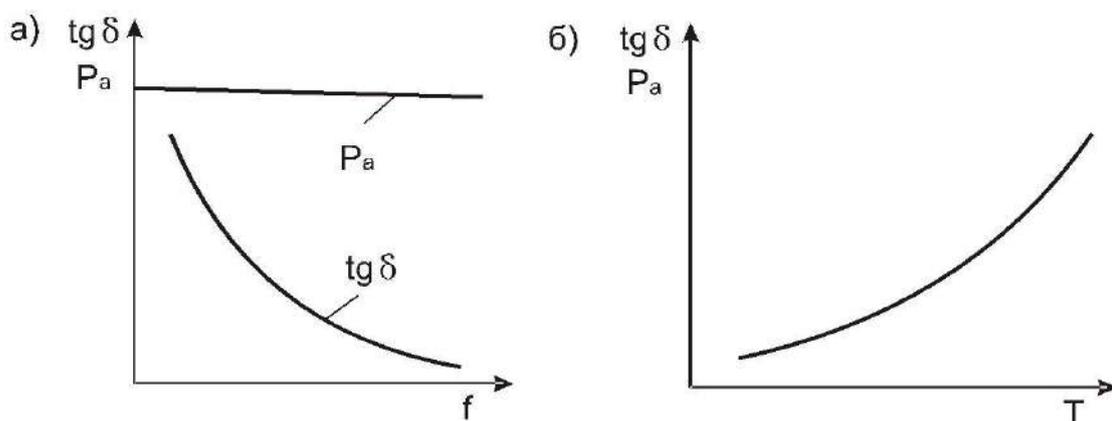


Рис. 20. Зависимости диэлектрических потерь от частоты тока (а) и температуры (б)

Потери сквозной проводимости возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону (рис. 20,б).

$$P_{\text{ст}} = A \cdot \exp(-b T), \quad / \quad (3.10)$$

где A, b - постоянные материала.

Релаксационные потери характерны для диэлектриков с замедленными видами поляризации. Они наблюдаются в полярных жидкостях с дипольно-релаксационной поляризацией, а также у линейных диэлектриков с ионно-релаксационным и электронно-релаксационным механизмами поляризации (неорганические стекла, полимеры, керамика, кристаллические вещества, с неплотной упаковкой атомов и др.).

Релаксационные потери сильно зависят от температуры и частоты поля. При низких температурах время релаксации поляризации велико ($\tau_0 \gg 1/\omega$), $\text{tg } \delta$ мал (рис. 21). С повышением температуры степень поляризации молекул увеличивается, и $\text{tg } \delta$ возрастает. При температуре, соответствующей наибольшему развитию дипольно-релаксационной поляризации (время релаксации приближается к периоду изменения поля $\tau_0 \approx 1/\omega$), $\text{tg } \delta$ достигает максимального значения. При дальнейшем повышении температуры время релаксации становится меньше времени периода изменения поля, ориентирующее влияние поля ослабевает, релаксационные потери уменьшаются, однако с учетом потерь на электропроводность общие потери возрастают (кривая 2 на рис. 21).

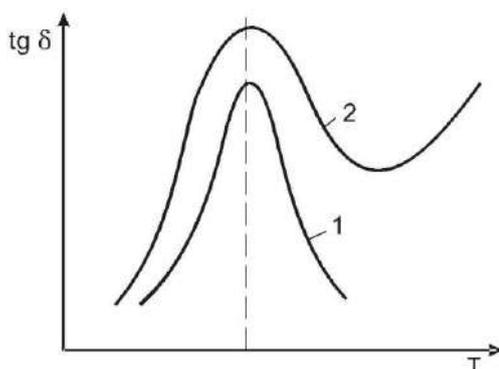


Рис. 21. Температурные зависимости релаксационных потерь (1) и общих потерь

с учетом потерь на электропроводность (2)

С ростом частоты поля релаксационные потери увеличиваются (рис. 22), так как возрастает отставание поляризации от изменения поля. Когда же частота настолько велика, что $\tau_0 \gg 1/\omega$, поляризованность диэлектрика становится незначительной, мало и значение $\text{tg} \delta$. Однако на высоких частотах велико число циклов поляризации в единицу времени, и активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике, остается практически постоянной, несмотря на уменьшение $\text{tg} \delta$ с ростом частоты, что находится в соответствии с формулой (3.8).

Ионизационные потери в диэлектрике обусловлены процессами ионизации под действием электрического поля. Они свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии и проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа.

Резонансные потери - это интенсивное поглощение энергии электромагнитного поля газом при определенной частоте. В твердых телах они проявляются, когда частота собственных колебаний частиц тела совпадает с частотой вынужденных колебаний внешнего электромагнитного поля.

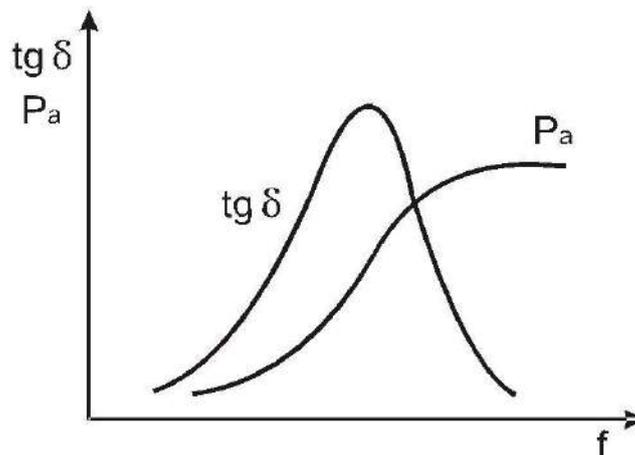


Рис. 22. Частотные зависимости $\text{tg} \delta$ и активной мощности P_a для диэлектриков с дипольно-релаксационной поляризацией

Пробой диэлектриков

Пробой - возникновение в диэлектрике канала высокой проводимости. При пробое твердый диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства. Способность диэлектрика противостоять пробую оценивается электрической прочностью.

Электрическая прочность E_{np} , МВ/м - минимальная напряженность однородного электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (3.11)$$

где U_{np} - пробивное напряжение, В; h - расстояние между электродами или толщина диэлектрика, м.

Виды пробоя диэлектриков:

- **электрический пробой** обусловлен явлениями ударной ионизации и фотоионизации (рис. 23). Он характерен для газов, но может происходить и в неполярных жидких и твердых диэлектриках. Пробивная напряженность при электрическом пробое зависит от плотности диэлектрика и степени однородности электрического поля. В однородном поле пробой газа наступает при более высоком значении $E_{пр}$, чем в неоднородном поле;
- **тепловой пробой** обусловлен чрезмерным выделением тепла из-за больших диэлектрических потерь. При этом в диэлектрике происходят необратимые процессы термического разрушения материала (обугливание, растрескивание, оплавление и т.д.), в результате чего растет ток сквозной проводимости. Для теплового пробоя характерна сильная зависимость $E_{пр}$ от температуры, частоты тока, размеров детали и условий ее охлаждения;
- **электрохимический пробой** обусловлен развитием в диэлектрике химических процессов, ведущих к образованию подвижных ионов. Эта форма пробоя характерна для жидких диэлектриков, содержащих небольшие количества примесей электролита. В твердых диэлектриках электрохимический пробой может быть при наличии поверхностных загрязнений, адсорбированной влаги.

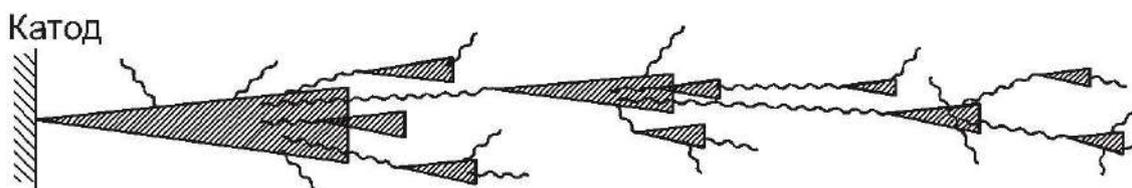


Рис. 23. Схема электрического пробоя газов

Повышение температуры и влажности среды, наличие примесей, неоднородность структуры снижают электрическую прочность диэлектриков.

Вопросы для самоконтроля:

1. Перечислите основные электрические свойства диэлектриков. Как влияет температура на ϵ диэлектриков?
2. Как влияет напряженность поля на ϵ линейных и нелинейных диэлектриков?
3. Чем вызвана электропроводность диэлектриков?
4. Перечислите основные виды диэлектрических потерь и укажите, каким диэлектрикам они присущи.
5. Как влияет температура и частота поля на диэлектрические потери сквозной проводимости?
6. Как влияет температура и частота поля на релаксационные потери диэлектриков?

7. Что такое электрическая прочность и пробой диэлектриков? Какие факторы влияют на $E_{пр}$ воздуха?

Лекция 7. Виды диэлектриков–2 часа

К газообразным диэлектрикам относятся практически все газы. В первую очередь, это воздух, который является естественным изолятором, окружая все электрические установки. Кроме воздуха широко используют в качестве электрической изоляции неполярные газы - азот, водород, углекислый газ, инертные газы, а также полярные газы - фреоны, элегаз и др.

Электропроводность газов. В идеальном газе свободных носителей заряда нет. В реальных газах всегда имеется некоторое количество свободных электронов и ионов, как результат процесса ионизации молекул газа при воздействии космических и солнечных излучений, земной радиации и т.д. Одновременно с ионизацией в газах протекает процесс рекомбинации нейтральных молекул из электронов и ионов. Поэтому в нормальных условиях удельное электрическое сопротивление газов чрезвычайно велико (ρ до 10^{18} Ом·м). Высокие электроизоляционные свойства газов сохраняются в электрическом поле до критической напряженности $E_{кр}$, после чего начинается процесс ударной ионизации - лавинообразное увеличение электронов и ионов, что приводит к пробое газового промежутка. Полностью ионизированный газ - это особая равновесная высокопроводящая среда, называемая плазмой. Для воздуха в нормальных условиях критическая напряженность электрического поля $E_{кр} = 10^6$ В/м.

Поляризация газов. Основное значение для всех газов имеет электронная поляризация. Газы обладают малой плотностью, расстояние между молекулами велико, поэтому относительная диэлектрическая проницаемость для всех газов близка к единице ($\epsilon = 1,0002 \dots 1,002$). Для воздуха $\epsilon = 1,0006$.

С увеличением температуры относительная диэлектрическая проницаемость уменьшается, а с увеличением давления ϵ растет, так, для воздуха при $p = 20$ атм. $\epsilon = 1,01$. При влажности воздуха 100% $\epsilon = 1,0007$, а при 0% влажности $\epsilon = 1,0005$.

Диэлектрические потери в газах связаны с потерями на электропроводность. Для полярных молекул ориентация диполей происходит без потерь энергии. Поэтому при отсутствии ионизации диэлектрические потери в газах весьма незначительны ($\text{tg}\delta < 4 \cdot 10^{-8}$).

Электрическая прочность газов значительно меньше, чем у жидких и твердых диэлектриков. Для воздуха $E_{пр} = 3,2$ МВ/м. Основная причина пробоя газов - ударная ионизация.

Электрическая прочность газов сильно зависит от давления, степени однородности электрического поля, расстояния между электродами и частоты поля.

При малых давлениях $E_{пр}$ велико (рис. 24) вследствие малого числа частиц в единице объема и низкой вероятности их столкновения, при повышении давления $E_{пр}$ понижается. При больших давлениях уменьшается длина свободного пробега частиц, они не приобретают необходимой кинетической энергии для ионизации, и электрическая прочность увеличивается.

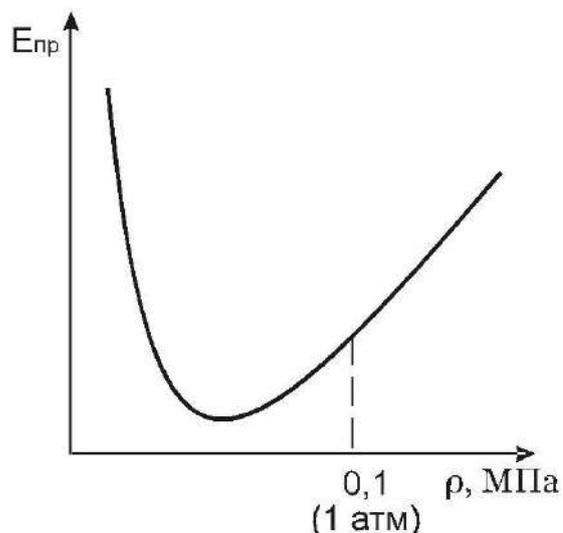


Рис. 24. Зависимость электрической прочности воздуха от давления

В неоднородном поле (игла-игла, игла-плоскость и т.д.) электрическая прочность оказывается ниже, чем в однородном. С увеличением расстояния между электродами $E_{пр}$ снижается, так как повышается фактор неоднородности поля (рис. 25).

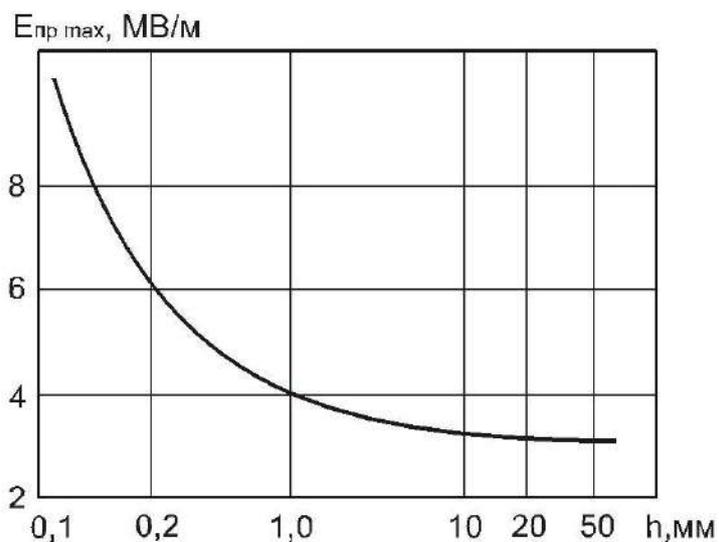


Рис. 25. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле

С увеличением частоты поля напряжение пробоя снижается, что связано с образованием объемных зарядов из-за различной подвижности электронов и ионов. В области высоких частот (>5 МГц) продолжительность полупериода изменения поля становится соизмеримой со временем формирования электронных лавин, и пробивное напряжение резко возрастает (рис. 26).

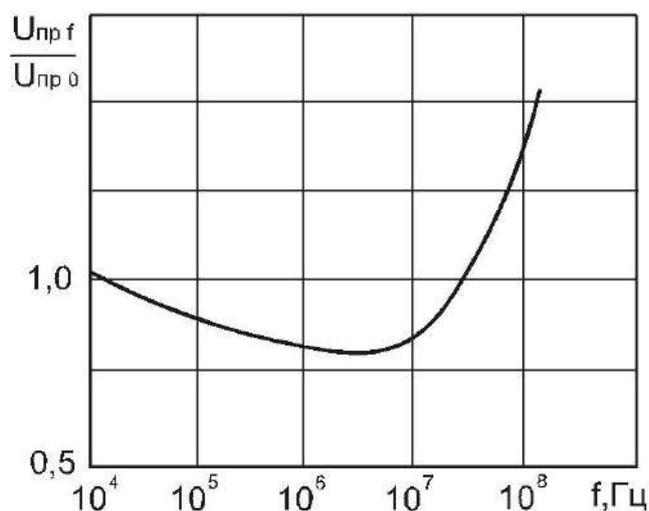


Рис. 26. Зависимость пробивного напряжения воздуха от частоты поля $U_{пр f} : \frac{U_{пр f}}{U_{пр 0}}$
 $U_{пр f}$ -пробивное напряжение на данной частоте, $U_{пр 0}$ -пробивное напряжение на постоянном токе

Применение газообразных диэлектриков

Воздух является естественным изолятором в электроаппаратах и устройствах (воздушных высоковольтных выключателях, воздушных конденсаторах, в т.ч. эталонных), он одновременно обеспечивает отвод тепла.

Азот служит в качестве заменителя воздуха в тех случаях, когда недопустимо окисление.

Водород используется в качестве электроизоляционной охлаждающей среды в мощных генераторах, обладает высокой теплоемкостью.

Азот (N_2), водород (H_2), углекислый газ (CO_2) входят в состав защитных сред многих производств.

Инертные газы (аргон, неон, криптон, ксенон, гелий) применяются для заполнения электровакуумных приборов, радиоламп, газосветных трубок различного цвета свечения.

Фреоны - производные метана CH_4 или этана C_2H_6 , в которых атомы водорода замещены атомами фтора или хлора. Например, дихлорфторметан CCl_2F_2 (фреон-12) применяется в холодильной технике.

Элегаз (SF_6) обладает высокой химической стойкостью, нетоксичен, в 5 раз тяжелее воздуха, применяется для заполнения высоковольтных высокочастотных конденсаторов, рентгеновских трубок, мощных трансформаторов.

Фреоны и элегаз - тяжелые газы с большим молекулярным весом. Их электрическая прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха и составляет 7,5 МВ/м.

Жидкие диэлектрики

По химической природе жидкие диэлектрики разделяют на нефтяные масла и синтетические жидкости.

Нефтяные масла

Нефтяные масла представляют собой смесь углеводородов, их получают фракционной перегонкой нефти. По применению различают трансформаторное, конденсаторное и кабельное масла, отличающиеся степенью очистки.

Трансформаторное масло применяют для заливки силовых трансформаторов с целью повышения электрической прочности за счет заполнения пор волокнистой изоляции и промежутков между ее слоями, для заливки высоковольтных выключателей, где масло оказывает дугогасящее действие.

Конденсаторное масло используют для пропитки бумажной изоляции конденсаторов с целью увеличения их удельного сопротивления и электрической прочности, что позволяет увеличить емкость и уменьшить габариты конденсаторов. Его получают путем дополнительной очистки трансформаторного масла.

Кабельное масло используют для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей.

Нефтяные масла - неполярные диэлектрики с электронной поляризацией и ионной проводимостью. В неполярных жидкостях диссоциация молекул незначительна, число носителей заряда невелико и проводимость мала. Источниками ионов могут быть различные примеси и влага. Диэлектрические потери в нефтяных маслах невелики, они обусловлены током сквозной проводимости. Диэлектрические жидкости дополнительно характеризуются температурой вспышки $T_{всп}$ и температурой застывания T_3 .

Электрофизические характеристики трансформаторного масла:

- $\varepsilon = 2,1 \dots 2,5$;
- $\rho = 10^{11} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\text{tg}\delta = 20 \cdot 10^{-4}$;
- $E_{пр} = 20 \dots 25 \text{ МВ/м}$;
- $T_{всп} = 135^\circ\text{C}$;
- $T_3 = -45^\circ\text{C}$.

Конденсаторное и кабельное масла имеют более низкие диэлектрические потери $\text{tg}\delta = (3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$ и более высокую электрическую прочность $E_{пр} = 25 \dots 30 \text{ МВ/м}$.

Свойства масел зависят от температуры. При повышении температуры уменьшается их вязкость и плотность, возрастают подвижность ионов, диссоциация молекул примеси и ионная проводимость. В результате $\text{tg}\delta$ увеличивается, а ε , ρ и $E_{пр}$ уменьшаются.

К **достоинствам** нефтяных масел относятся высокие электроизоляционные свойства, доступность и невысокая стоимость.

Недостатки нефтяных масел:

- легкая воспламеняемость,
- сильная зависимость вязкости от температуры: при понижении температуры от 100°C до -35°C вязкость увеличивается в 1800 раз,
- сильная зависимость электрической прочности от содержания примесей и влаги,
- склонность к старению.

Старение масел заключается в разложении углеводородов и их окислении. При

этом образуются полярные продукты, разрушающие изоляцию, увеличивается вязкость, ухудшаются диэлектрические свойства, понижается температура вспышки. Старение ускоряется от кислорода воздуха, света, тепла, электрических полей. Для повышения устойчивости к старению в масло добавляют ингибиторы, замедляющие старение (антиоксиданты). Применяют также герметизацию электрооборудования.

Синтетические жидкие диэлектрики

К синтетическим жидким диэлектрикам относятся хлорированные ароматические углеводороды (совол, совтол), кремнийорганические и фторорганические жидкости. Эти диэлектрики обладают рядом преимуществ по сравнению с нефтяными маслами и применяются в условиях повышенных тепловых нагрузок, напряженности электрического поля, в пожаро- и взрывоопасных средах.

Хлорированные углеводороды -это продукты хлорирования дифенила ($C_{12}H_{10}$). Применяются полихлордифенил $C_{12}H_5Cl_5$ -**совол**, а также раствор совола в трихлорбензоле- **совтол**.

Хлорированные углеводороды относятся к полярным диэлектрикам, наряду с молекулами примесей могут диссоциировать и их собственные молекулы, что приводит к большей электропроводности ($\rho = 10^9 \dots 10^{11}$ Ом·м).

Поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется одновременно электронной и дипольно-релаксационной составляющими. Поэтому для них диэлектрическая проницаемость имеет более высокие значения ($\epsilon \approx 5,0$), чем у нефтяных масел.

Кремнийорганические жидкости -это полимеры, линейные молекулы которых содержат силоксанную группу -Si-O-Si-, где атомы кремния связаны с органическими радикалами: -CH₃ (метил), - C₂H₅ (этил) и др. По своим диэлектрическим характеристикам поли-силоксановые жидкости близки к неполярным диэлектрикам:

- $\epsilon = 2,4 \dots 2,5$;
- $\text{tg}\delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$;
- $\rho = 10^{11} \dots 10^{12}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 18 \dots 20$ МВ/м.

Они отличаются повышенной нагревостойкостью ($T_{\text{всп}} > 300^\circ\text{C}$), низкой температурой застывания ($T_z = -60^\circ\text{C}$), низкой гигроскопичностью, нетоксичностью, высокой стабильностью свойств при изменении температуры. Эти жидкости используются в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, радиоэлектронной аппаратуре.

Фторорганические жидкости представляют собой молекулярные соединения фтора с углеродом (например, C_8F_{16}). Это неполярные диэлектрики:

- $\epsilon = 1,9 \dots 2,0$;
- $\text{tg}\delta = (1 \dots 2) \cdot 10^{-4}$;
- $\rho = 10^{12} \dots 10^{14}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 14 \dots 18$ МВ/м.

Их основными особенностями являются негорючесть, высокая нагревостойкость (до 500°C) и дугостойкость, малая гигроскопичность, низкие диэлектрические потери и стабильность свойств, в том числе вязкости, до высоких температур. Фторорганические жидкости применяются для заполнения электрической

аппаратуры при высоких рабочих температурах. Обладая высокой теплопроводностью, они обеспечивают интенсивное охлаждение в силовых трансформаторах.

Некоторые виды фторорганических жидкостей токсичны, взаимодействуют с резинами, медью.

Неорганические твердые диэлектрики

Большинство неорганических твердых диэлектриков имеют ионно-кристаллическое строение, отличаются высокой нагревостойкостью и электрической прочностью.

Слюда

Слюда -минерал ионно-кристаллического строения,обладающий способностью расщепляться на пластины. По химическому составу слюда представляет собой водные алюмосиликаты. Основные диэлектрические характеристики слюды:

- $\varepsilon = 5...7$;
- $\text{tg}\delta = (5...50)\cdot 10^{-4}$;
- $\rho = 10^{13}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 12\text{МВ/м}$.

Слюда относится к электроизоляционным материалам высшего класса нагревостойкости: температура начала резкого ухудшения свойств составляет 700...900°C. Слюда применяется для конденсаторов, штампованных деталей электронных и осветительных ламп, для изоляции коллекторных пластин электрических машин.

Стекла

Стекла -материалы аморфного строения,состоящие из оксидов различных элементов. В качестве стеклообразующих оксидов используются SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , P_2O_5 . Наибольшее распространение получили силикатные стекла на основе двуокиси кремния SiO_2 , благодаря химической стойкости, дешевизне и доступности сырья.

При охлаждении расплава имеются две характерные точки: температура текучести T_T , выше которой стекло проявляет текучесть, и температура стеклования T_c , ниже которой проявляется хрупкость стекла. Для большинства силикатных стекол $T_T = 900...700$ °C, $T_c = 600...400$ °C.Интервал температур между T_T и T_c называют интер-валом размягчения, когда стекло обладает пластичными свойствами. Чем шире интервал размягчения, тем технологичнее стекло.

Формовку изделий осуществляют путем выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, прокатки, отливки и т.д. Изготовленные изделия подвергают отжигу для снятия внутренних напряжений. При отжиге изделие нагревают до 300...400°C и медленно охлаждают.

Их электрические свойства зависят от состава и меняются в следующих пределах:

- $\varepsilon = 3,8...16$;
- $\text{tg}\delta = (1...100)\cdot 10^{-4}$;
- $\rho = 10^6...10^{16}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 30...150\text{МВ/м}$.

Наилучшими характеристиками обладает *кварцевое стекло* - материал на основе чистой двуокиси кремния SiO_2 . Его получают при температуре выше 1700°C . Стекломасса обладает очень узким интервалом размягчения и даже при температурах выше 1700°C имеет высокую вязкость. Основу микроструктуры кварцевого стекла составляют кремний-кислородные тетраэдры $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (рис. 27), которые, соединяясь друг с другом через кислородные ионы, образуют сплошные трехмерные сетки. В принципе, кварцевое стекло можно рассматривать как неорганический пространственный полимер.

Применение стекол:

Электровакуумное стекло применяется для изготовления баллонов и других деталей электровакуумных приборов. По химическому составу электровакуумные стекла относятся к группе боро-силикатных ($\text{B}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$) или алюмосиликатных ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$) с добавками щелочных оксидов. Для них важное значение имеет температурный коэффициент линейного расширения, который должен быть близок к α_l соответствующего металла. Электровакуумные стекла подразделяются на:

- платиновые - $\alpha_l = (8,5 \dots 9,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- молибденовые - $\alpha_l = (4,6 \dots 5,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; вольфрамовые - $\alpha_l = (3,5 \dots 4,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Изоляторные стекла используются для герметизации вводов в металлических корпусах различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов, и др.). Для таких проходных изоляторов в полупроводниковых приборах применяют щелочное силикатное стекло.

Цветные стекла - обычные силикатные стекла с добавками, придающими стеклам соответствующую окраску: CaO - синюю, Cr_2O_3 - зеленую, MnO_2 - фиолетовую и коричневую, UO_3 - желтую, что используется при изготовлении светофильтров, эмалей и глазурей.

Лазерные стекла применяются в качестве рабочего тела твердых лазерах. Центрами излучения являются активные ионы, равномерно распределенные в диэлектрической, прозрачной матрице. Наиболее часто применяют баритовый крон ($\text{BaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$), активированный ионами неодима Nd^{3+} . Преимущество лазерных стекол перед монокристаллами - оптическая однородность, изотропность свойств, высокая технологичность, низкая теплопроводность, что важно для генерации импульсов высокой мощности.

Стекловолокно получают из расплавленной стекломассы вытяжкой через фильеру с быстрой намоткой на вращающийся барабан ($d = 4 \dots 7$ мкм). Из стекловолокна методом текстильной технологии ткнут ткани, ленты, делают шланги. Преимущества стекловолокнистой изоляции состоят в высокой нагревостойкости, значительной прочности, малой гигроскопичности и хороших электроизоляционных свойствах.

Световоды используются в оптоэлектронике для передачи различной информации от источника к приемнику с помощью тончайших волокон. Отдельные волокна соединяются в световые кабели (жгуты) с внутренними межволоконными светоизолирующими покрытиями. Чтобы предотвратить прохождение света из одного волокна в другое их покрывают светоизолирующей оболочкой из стекла с меньшим показателем преломления, чем у сердцевины. Тогда световой луч, падая из среды, оптически более плотной (сердцевина), на поверхность раздела со средой, оптически

менее плотной (оболочка) под углом больше предельного, будет испытывать многократное полное внутреннее отражение и пойдет вдоль волокна практически без потерь энергии.

Специальные технологические приемы (осаждение пленок на подложку, ионное легирование, ионный обмен) позволяют изготавливать плоские световоды, которые являются основой оптических интегральных схем.

Ситаллы

Ситаллы -это стеклокристаллические материалы,получаемые путем стимулированной кристаллизации стекол. В качестве катализаторов кристаллизации в стекломассу вводятся соединения с ограниченной растворимостью или легко кристаллизующиеся из расплава. К ним относятся TiO_2 , FeS , B_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , фториды и фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов.

Технология получения ситаллов включает:

1. Получение изделия из стекломассы теми же способами, что из обычного стекла.
2. Отжиг при $500...700^{\circ}C$ для образования зародышей кристаллической фазы.
3. Отжиг при $900...1000^{\circ}C$ для роста кристаллической фазы.

По способу формирования центров кристаллизации различают термоситаллы и фотоситаллы. В **термоситаллах** формирование кристаллической фазы происходит в результате двойного отжига. В **фотоситаллах** для образования центров кристаллизации используют добавки Au , Ag , Pt или Cu . Кристаллизация инициируется под действием ультрафиолетового облучения.

Структура ситаллов представляет собой смесь мелких ($0,1...1\mu m$) беспорядочно ориентированных кристаллов ($60...95\%$ кристаллической фазы) в окружении остаточного стекла ($5...40\%$ аморфной фазы). По строению ситаллы занимают промежуточное положение между стеклами и керамикой. Ситаллы отличаются от стекол тем, что имеют в основном кристаллическое строение, а от керамики - значительно меньшим размером кристаллов.

По внешнему виду ситаллы могут быть от белого и светло-бежевого до коричневого цвета. Они отличаются повышенной механической прочностью, которая мало изменяется при нагреве до $700...900^{\circ}C$. Диэлектрические потери в ситаллах во многом определяются свойствами остаточной фазы. Диэлектрические свойства ситаллов:

- $\epsilon = 5...7$;
- $tg\delta = (10...800)\cdot 10^{-4}$ (при $f = 10^6$ Гц);
- $\rho = 10^8...10^{12}$ Ом·м;
- $E_{пр} = 25...75$ МВ/м.

Ситаллы имеют температуру текучести $T_T = 1300^{\circ}C$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l = (1,2...12)\cdot 10^{-6}$ K^{-1} . Многие ситаллы обладают высокой химической стойкостью в сильных кислотах (кроме HF) и щелочах. Доступность сырья и простая технология обеспечивают невысокую стоимость изделий. Ситаллы применяются для подложек гибридных интегральных схем, тонкопленочных резисторов, деталей электровакуумных приборов, работающих в условиях глубокого

вакуума, деталей СВЧ-приборов, конденсаторов.

Керамика

Слово «керамика» произошло от греческого «керамос» (горшечная глина). В настоящее время **керамика** объединяет не только глиносодержащие, но и другие материалы, сходные по своим свойствам и технологическому процессу их получения.

Технологический цикл получения керамики включает следующие основные операции:

1. Тонкий размол и тщательное смешивание исходных компонентов.
2. Пластификация массы и образование формовочного полуфабриката. В качестве пластификатора чаще всего используют поливиниловый спирт и парафин.
3. Формовка изделия.
4. Спекание - высокотемпературный обжиг (1300...1400°C). В зависимости от состава шихты усадка после обжига составляет от 2 до 20%.

По структуре керамический материал состоит из кристаллической фазы, участки которой сцементированы аморфной стеклофазой. В керамике также присутствует газовая фаза (пористость), что способствует повышенной гигроскопичности. Для обеспечения влагонепроницаемости керамические изделия подвергают глазуровке.

По применению различают керамику установочную и конденсаторную, по величине диэлектрических потерь - низкочастотную и высокочастотную.

Изоляторный фарфор (электрофарфор) - это керамический материал на основе глины, кварцевого песка, полевого шпата, низкочастотный диэлектрик:

- $\epsilon = 8,5$;
- $\text{tg}\delta = 10^{-2}$;
- $\rho = 10^{10}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 20$ МВ/м.

После обжига основной кристаллической фазой является муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Промежутки между кристаллическими зёрнами заполнены стекловидной фазой полевого шпата.

Ультрафарфор - высокочастотная установочная керамика, содержит более 80% Al_2O_3 + бариевое стекло ($\text{SiO}_2 + \text{BaO}$). Ультрафарфор сочетает низкие диэлектрические потери ($\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-4}$) с высокой механической прочностью. Бариевое стекло улучшает электрические свойства и ускоряет спекание, образуя жидкую фазу в процессе обжига, в результате получается плотная керамика.

Конденсаторная керамика должна обладать:

- высокой относительной диэлектрической проницаемостью для обеспечения наибольшей емкости конденсатора при минимальных размерах;
- слабой зависимостью ϵ от температуры (температурный коэффициент диэлектрической проницаемости α_ϵ должен быть близок к нулю);
- малыми диэлектрическими потерями;
- минимальной зависимостью ϵ и $\text{tg}\delta$ от напряженности электрического поля;
- высокими значениями ρ , ρ_s , $E_{\text{пр}}$.

Титановая керамика (тиконды) - керамика на основе рутила TiO_2 ($\epsilon = 114$, $\alpha_\epsilon = -850 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), титаната стронция SrTiO_3 и перовски-та CaTiO_3 . Для

этих материалов главную роль играют электронная и ионная поляризация: $\varepsilon = 10 \dots 230$, $\operatorname{tg} \delta = 6 \cdot 10^{-4}$. Титанды используются для высокочастотных конденсаторов, от которых не требуется стабильности емкости при изменении температуры. Их недостатками являются пониженная электрическая прочность $E_{\text{пр}} = 8 \dots 12$ МВ/м, подверженность электрохимическому старению при длительной выдержке под постоянным напряжением, высокое отрицательное значение $\alpha_{\varepsilon} = -(1500 \dots 3000) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Используется также **титано-циркониевая керамика** ($\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$), ($\text{CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$), **лантановая керамика** ($\text{LaAlO}_3\text{-CaTiO}_3$), **станнатная керамика** ($\text{CaSnO}_3\text{-CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$).

Все перечисленные виды конденсаторной керамики по структуре являются твердыми растворами. Изменяя состав твердых растворов, можно получить незначительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости как с положительным, так и с отрицательным знаком - такая керамика используется для изготовления высокочастотных термостабильных конденсаторов.

Основные области применения сегнетоэлектриков:

- малогабаритные низкочастотные конденсаторы с большой удельной емкостью;
- диэлектрические усилители, модуляторы и другие управляемые устройства;
- счетно-вычислительная техника (ячейки памяти);
- модуляция и преобразование лазерного излучения;
- пьезоэлектрические и пирозэлектрические преобразователи;
- нелинейные диэлектрические элементы разнообразных радио-технических устройств.

Вопросы для самоконтроля:

1. Перечислите преимущества и недостатки нефтяных масел.
2. В чем преимущества оксидной изоляции и где она применяется?
3. Укажите особые свойства кварцевого стекла и его применение.
4. Чем отличаются ситаллы от стекол и керамики?
5. Каковы основные материалы высокочастотной и низкочастотной установочной керамики и как они используются в электронной технике?

Лекция 8. Органические твердые диэлектрики на основе полимеров - 2 часа

Полимеры -высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев, соединенных химическими связями. Многие полимеры называют смолами, по аналогии с природными смолами за их способность проявлять клейкость при нагреве.

Полимеры получают из простых веществ путем **полимеризации** или **поликонденсации**. Основа строения полимера - **макромолекула**, в которой различают главную цепь и боковые группы. Макромолекула состоит из одинаковых звеньев, повторяющихся n раз, где n - степень полимеризации. При полимеризации увеличивается **молекулярный вес** полимера, достигая значений от 6000 до 10^7 .

Строение и свойства полимеров

По химическому составу различают органические и элементоорганические полимеры. В **органических полимерах** главная цепь состоит из углерода или комбинации углерода с кислородом, азотом, серой, фосфором, которые образуют с углеродом органические соединения. В **элементоорганических полимерах** главная цепь образована неорганическими соединениями с органическими боковыми группами. Наиболее распространены полисилоксаны, главную цепь которых составляет силоксанная группа $(-\text{Si}-\text{O}-)_n$. Все элементоорганические полимеры синтетические.

По строению макромолекул различают линейные и пространственные полимеры.

В **линейных полимерах** отношение длины макромолекулы к поперечнику очень велико (1000 и более). Например, длина макромолекулы полиэтилена - $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, а поперечное сечение - $1,5 \cdot 10^{-9}$ м, у молекул каучука и целлюлозы длина составляет $(4 \dots 8) \cdot 10^{-7}$ м, сечение - $(3 \dots 7) \cdot 10^{-10}$ м. Отдельные участки макромолекул, называемые сегментами, могут совершать тепловые движения. Сегмент обычно состоит из нескольких звеньев. Чем меньше размер сегментов, способных к самостоятельному перемещению, тем больше гибкость макромолекул. Сегментная подвижность является одной из причин релаксационных диэлектрических потерь в полимерах.

В зависимости от **степени упорядоченности расположения макромолекул** в полимере различают аморфную и кристаллическую фазы. **Аморфная фаза** характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении макромолекул, **кристаллическая фаза** - упорядоченным расположением макромолекул. Чаще всего в полимере существуют одновременно обе фазы: кристаллическая фаза размещена в аморфной в виде отдельных упорядоченных микро-блоков.

Линейные полимеры - термопластичные материалы, их свойства с изменением температуры обратимы. В зависимости от температуры они могут находиться **в трех физических состояниях**:

- **в стеклообразном состоянии** тепловое движение ограничено колебаниями атомов и боковых групп. Под нагрузкой полимер ведет себя как упругое тело, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$ МПа. При нагревании степень свободы элементов макромолекулы полимера возрастает, и полимер переходит в высокоэластичное состояние, при охлаждении - из высокоэластичного состояния в стеклообразное. Температура перехода называется температурой стеклования - $T_{ст}$;
- **в высокоэластичном состоянии** полимер легко меняет свою форму за счет движения звеньев главной и боковых цепей. Ему свойственны большие обратимые высокоэластичные деформации. При снятии нагрузки молекулы постепенно восстанавливают свою равновесную форму. Модуль упругости высокоэластичного состояния $E \approx 10$ МПа;
- **в вязкотекучем состоянии** полимер «течет» под нагрузкой. Линейные молекулы легко скользят относительно друг друга. В этом состоянии при небольших нагрузках полимер проявляет необратимую пластическую деформацию, что используется для его технологической обработки.

Линейные полимеры из-за слабого межмолекулярного взаимодействия образуют с

некоторыми растворителями вязкие растворы, из которых получают прочные пленки и волокна.

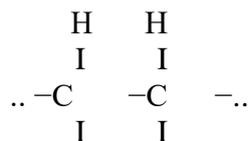
В пространственных полимерах макромолекулы связаны в общую пространственную сетку, при этом молекулярный вес резко возрастает. Пространственные полимеры обладают повышенной прочностью, твердостью, высокой температурой плавления. Пространственные полимеры являются термореактивными материалами. Их свойства мало зависят от температуры. Однако при высоких температурах (до $T_{пл.}$) происходят необратимые структурные изменения (растрескивание, обугливание и т.п.) с потерей электроизоляционных свойств. Например, фенолформальдегидная смола в стадии бакелита С, имея высокую механическую прочность, обугливается при воздействии поверхностных электрических разрядов.

Термореактивные полимеры широко используются при производстве композиционных пластмасс.

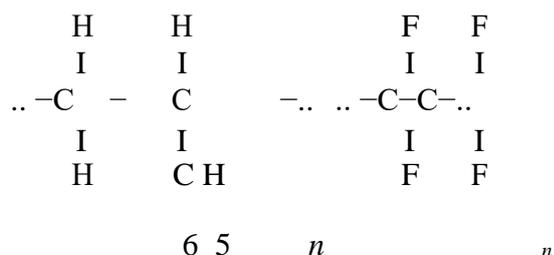
Высокочастотные линейные полимеры

К высокочастотным диэлектрикам относятся неполярные линейные полимеры с электронной поляризацией: полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт-4):

полиэтилен



полистирол фторопласт-4



Они обладают низкими диэлектрическими потерями, высоким удельным сопротивлением (табл. 13), слабой зависимостью свойств от температуры и частоты тока.

Таблица 13

Основные свойства неполярных полимеров

Характеристики	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
ρ , Ом м	15 10	16 10	16 10
ϵ	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	2...5	2...4	2...3
$E_{\text{пр}}$, МВ/м, (*для пленки)	40...150*	20...110*	40...250*
Нагревостойкость, °С	105...130	75...80	~300

Полиэтилен -продукт полимеризации этилена($\text{CH}_2=\text{CH}_2$).Обычно применяют полиэтилен низкого давления, его синтезируют при $p = 0,5$ МПа и $T = 80^\circ\text{C}$. У полученного материала степень кристалличности составляет 80...90%, его механические свойства: $\sigma_{\epsilon}=30$ МПа, $\delta = 50\%$. Полиэтилен обладает высокой стойкостью к ки-слотам и щелочам, его применяют в виде пленки, литых деталей, прессованных панелей для изоляции высокочастотных кабелей, деталей электро- и радиоаппаратуры.

Полистирол ($-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-$)более прочен,чем полиэтилен($\sigma_{\epsilon}=60$ МПа), склонен к образованию тончайших трещин. Путем ори-ентированной полимеризации кристаллического полистирола с использованием специальных ионных катализаторов удастся повысить его температуру плавления (от 100°C до 250°C) и механическую прочность. Полистирол имеет высокую прозрачность (95%) и высокий коэффициент

преломления ($n = 1,6$), что позволяет его использовать в качестве оптических стекол. Полистирол применяют для изготовления деталей высокочастотной аппаратуры, пленок, лаков и т.д.

Фторопласт Ф-4 ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$) имеет высокую энергию связи С-Ф (450 кДж/моль), в связи с чем обладает исключительной стойкостью к действию химических реагентов - концентрированных растворов всех известных кислот и щелочей. В этом отношении он превосходит все известные пластмассы и благородные металлы. Фторопласт не горюч, не смачивается водой. Диапазон рабочих температур для изделий из фторопласта составляет от -270°C до 300°C .

Фторопласт имеет линейную структуру ($M = 10^6 \dots 10^7$), отличающуюся высокой степенью кристалличности (93...97%). При температуре 327°C Ф-4 переходит в аморфное состояние, которое может быть зафиксировано быстрым охлаждением. Аморфный Ф-4 более пластичен. Детали из фторопласта изготавливают, главным образом, путем спекания прессованных порошковых заготовок. Ф-4 выпускается также в виде рулонной ленты и пленок. Фторопластовое волокно - полифен, фторлон применяют для изготовления химических и нагревостойких фильтровальных тканей.

Низкочастотные линейные полимеры (полярные термопласты)

К полярным термопластам относятся поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полиметилметакрилат, полиамидные смолы. Для них характерна дипольно-релаксационная поляризация, поэтому они обладают пониженными электроизоляционными свойствами и применяются на низких частотах:

- $\varepsilon = 4 \dots 7$;
- $\rho = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,1$ (при $f = 10^6 \text{ Гц}$);
- $E_{\text{пр}} = 15 \dots 50 \text{ МВ/м}$.

Поливинилхлорид (ПВХ) $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$ -продукт полимеризации газообразного винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$. Он обладает высокой химической стойкостью в воде, кислотах и щелочах, бензине, керосине, спирте, озоне, но растворим в дихлорэтаноле, хлорбензоле, частично в ацетоне, бензоле. Для него характерна невысокая морозостойкость и нагревостойкость от -25°C до 70°C . Непластифицированный полихлорвинил обладает высокой жесткостью и идет на изготовление путем литья под давлением аккумуляторных баков, изоляционных втулок, труб и других деталей. Из него изготавливают изделия, способные работать в химически агрессивных средах.

Поливинилхлорид часто применяют с различными пластификаторами, что позволяет получать пластифицированный хлорвинил (винипласт) различной степени эластичности (от жестких до резино-подобных). Винипласт применяют для изоляции проводов и кабелей низкого напряжения, защитных шлангов, трубок для дополнительной изоляции, липких изоляционных лент, листового и пленочного пластика. Пластифицированный поливинилхлорид получил широкое применение в производстве монтажных проводов.

Хлорированный полихлорвинил (перхлорвинил) отличается более легкой растворимостью и применяется для изоляционных химически стойких лаков и антикоррозионных покрытий.

Полиэтилентерефталат (лавсан) -это термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и глифталевой кислоты $C_6H_4(COOH)_2$. Он обладает значительной механической прочностью. При повышенных температурах лавсан быстро окисляется на воздухе, так что обработку размягченного материала проводят в атмосфере азота. Лавсан применяют в виде волокон, пленок. Пленки из лавсана используют в качестве несущей основы для магнитной ленты. Тонкие пленки используются для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов, дросселей и подобных изделий, рассчитанных на рабочую температуру от $-60^{\circ}C$ до $150^{\circ}C$. Применяют пленки также в конденсаторах.

Полиамидные смолы (капрон,нейлон и др.)отличаются высокой прочностью и эластичностью. Полиамиды, как многие полимеры, стареют при длительном воздействии света, влаги и температуры. Их применяют в виде волокон, пленок и в качестве связующего при производстве пластмасс. Капрон, благодаря хорошим термопластичным свойствам и высокой механической прочности, используют в радиоаппаратуре (корпуса приборов, ручки и кнопки управления, каркасы катушек индуктивности и др.). На основе полиамидов изготавливают эмальлаки, создающие на металлических проводах прочные, эластичные диэлектрические покрытия.

Полиметилметакрилат (органическое стекло)используется,в основном, как декоративный материал в электро- и радиоаппаратуре.

Пластмассы

Пластмассы -это композиционные материалы на основе полимеров, изделия из которых получают пластическим деформированием или литьем под давлением.

Основные компоненты пластмасс: наполнитель и связующее.

Наполнители:

- *порошковые*: каолин, слюда, кварцевый песок, асбестовая мука, древесная мука, тальк и др.;
- *волокнистые*: хлопковое волокно, стекловолокно, углеволокно, асболокно;
- *слоистые*: бумага, хлопчатобумажная ткань, стеклоткань, ас-боткань.

В качестве *связующего* используются линейные или пространственные полимеры - смолы.

Для электротехнических изделий широкое применение нашли *слоистые пластики*:

- *гетинакс* -смола+бумага,
- *текстолит* -смола+х/б ткань,
- *стеклотекстолит* -смола+стеклоткань.

Из смол используют чаще всего фенолформальдегидную, эпоксидную.

Для производства гетинакса используется прочная и нагрево-стойкая бумага. Ее пропитывают водной суспензией фенолформальдегидной смолы, сушат, собирают в пакеты и прессуют на гидравлических прессах при температуре $160^{\circ}C$ под давлением 10...12МПа. Во время прессования смола сначала размягчается, заполняет поры между листами и волокнами, а затем затвердевает, переходя в неплавкую стадию (бакелит С). В результате получается прочный монолитный материал. Текстолит и стеклотекстолит

производят аналогичным образом из пропитанных смолой хлопчатобумажной ткани или стеклоткани.

Электрические характеристики слоистых пластиков вдоль волокон значительно ниже, чем поперек. Усредненные электрические характеристики гетинакса, текстолита и стеклотекстолита таковы:

- $\varepsilon = 6...8$;
- $\rho = 10^8...10^{11}$ Ом·м;
- $\text{tg}\delta = 0,02...0,2$;
- $E_{\text{пр}} = 10...20$ МВ/м.

Фольгированный гетинакс используют для изготовления печатных схем низкочастотных цепей радиоаппаратуры. Для этой цели гетинакс облицовывают медной фольгой толщиной 0,035...0,05 мм. Требуемый рисунок получают путем избирательного травления.

Пресспорошки широко применяют в радиоэлектронике. Из них изготавливают корпуса радиоприемников, телевизоров, измерительных приборов, наушники, ламповые панели, штепсельные разъемы, рукоятки, кнопки и др.

Электроизоляционные компаунды. Лаки

Компаунды - смеси полимеров: смол, битумов, эфиров целлюлозы, иногда с добавлением минеральных наполнителей (кварцевой или слюдяной муки, стекловолокна) для повышения прочности и нагревостойкости. Кроме смолы и отвердителя в состав компаундов входят пластификаторы, наполнители и др. Компаундами в жидком или полужидком состоянии пропитывают, обмазывают, заливают элементы радиоэлектронной аппаратуры, после чего они отвердевают. Компаунды защищают элементы аппаратуры от атмосферной влаги, повышают электрическую и механическую прочность, т.е. обеспечивают высокую надежность. Компаунды могут быть термопластичные и термореактивные.

Термопластичные компаунды - смеси на основе линейных (аморфных) смол: полиамидных, полиуретановых, полиэфирных и др., а также битумные компаунды. **Битумы** - нефтяные аморфные, термопластичные смеси углеводородов. Термопластичные компаунды при нагревании размягчаются до вязкотекучего состояния (для пропитки или заливки), а при охлаждении - отвердевают. Их применяют для заливки катушек трансформаторов высокого напряжения, отклоняющих и фокусирующих устройств, полупроводниковых выпрямителей и других деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Термореактивные компаунды - материалы на основе эпоксидных, фенолформальдегидных и кремнийорганических смол. Термореактивные компаунды после заливки необратимо отвердевают, при повторном нагреве уже не размягчаются, возможность ремонта детали или прибора исключается.

Наиболее широкое распространение в электронной технике получили эпоксидные компаунды, отличающиеся низкой усадкой, влагонепроницаемостью и водостойкостью, высокой прочностью, нагревостойкостью до 200°C и хорошими

электроизоляционными свойствами. Например, компаунд К-168 холодного отверждения ($T_{\text{отв}} < 60^\circ\text{C}$) и К-293 горячего отверждения ($T_{\text{отв}} = 80 \dots 160^\circ\text{C}$).

Высокой нагревостойкостью (до 370°C) отличаются компаунды на основе кремнийорганических смол, например К-43. Их применяют для пропитки подвижных частей электрических машин, работающих в условиях повышенной температуры и влажности.

Лаки -растворы полимеров в летучих растворителях. При сушке растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние, образуя пленку.

Лаки применяют в качестве пропиточных, покровных и клеящих электроизоляционных материалов. Их электрические свойства:

- $\varepsilon = 2,5 \dots 4$;
- $\rho = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\text{tg}\delta = (10 \dots 100) \cdot 10^{-4}$;
- $E_{\text{пр}} = 10 \dots 20 \text{ МВ/м}$.

В зависимости от материала пленкообразователя различают лаки масляные, смоляные, нитроцеллюлозные (нитролаки).

В основе **масляных лаков** содержатся высыхающие масла (льняное, тунговое и др.), в качестве растворителей используются скипидар и лаковый керосин (уайт-спирит). Эти лаки применяют для пропитки обмоток электрических машин, покрытия листов магнито-проводов.

Смоляные лаки -это растворы синтетических смол(бакелитовой, глифталевой, перхлорвиниловой, полистирольной, кремнийор-ганической и др.) в растворителях - толуоле, ксилоле, дихлорэтано. Глифталевые лаки обладают высокой клеящей способностью. Кремнийорганические лаки образуют нагрево- и влагостойкие пленки. Перхлорвиниловые лаки весьма стойки к действию бензина, масла и других химически активных веществ. Они применяются как покровные лаки для защиты изоляции. Полистирольный лак образует пленку с высокими электроизоляционными свойствами, используется в высокочастотной аппаратуре.

В **нитроцеллюлозных лаках** основой служат растворы нитроцеллюлозы, растворители - ацетон, этилацетат, бутилацетат. Это лаки холодной сушки. Пленки нитролаков механически прочны, влагонепроницаемы, однако плохо прилипают к металлам. Нитролаки применяют для пропитки хлопчатобумажной изоляции, для защиты резины от влияния озона, масла, бензина.

Резина

Резина -это вулканизированный каучук. Каучуки и материалы на их основе за способность к большим высокоэластичным деформациям называют **эластомерами**.

Каучук -линейный полимер, высокомолекулярный непердельный углеводород C_5H_8 . Он обладает низкой прочностью, но высокой эластичностью, растворяется в органических жидкостях, как конструкционный материал не пригоден. Каучук получают синтетическим путем - полимеризацией бутадиена и его производных: изопрена, хлорпрена или смеси бутадиена со стиролом, изобутиленом и другими соединениями.

Вулканизация каучука проводится при температуре $120 \dots 150^\circ\text{C}$ и давлении 5,0

МПа. Время выдержки - от нескольких минут до нескольких часов (в зависимости от размеров изделия). Процесс вулканизации заключается в присоединении к каучуку атомов серы в местах двойных связей молекулы каучука. В результате вулканизации линейная молекула каучука приобретает пространственную структуру с редкими поперечными связями в виде серных мостиков. По количеству введенной серы различают:

- мягкую резину (1...3%S) с небольшой прочностью, но высокой эластичностью: $\sigma_s = 5...20$ МПа, δ до 1000%,
- твердую резину - эбонит (30...35%S) с более высокой прочностью и низкой пластичностью: $\sigma_s = 60...80$ МПа, $\delta = 5...6\%$.

При хорошей прочности, водо- и газонепроницаемости, резина сохраняет высокую эластичность каучука. Резина из хлорпренового, тиокольного, бутадиеннитрильного и фторкаучуков отличается по-вышенной керосино-, бензо-, маслостойкостью. Теплостойкие резины изготавливаются на основе кремнийорганического, фторорганического и бутилкаучука. Морозостойкие резины изготавливают на основе бутадиенстирольного кремнийорганического и бутилкаучука.

Для придания резине заданных свойств и снижения стоимости в нее добавляют наполнители - сажу, каолин, кварцевый песок, тальк, мел и вспомогательные вещества - стабилизаторы, пластификаторы, красители.

Существенный недостаток резины, как и многих пластмасс - склонность к старению. В процессе старения происходит деструкция макромолекул и окисление резины. Свойства падают вплоть до полной потери прочности, эластичности и электроизоляционных свойств. Процесс старения усиливается за счет воздействия тепла и света, особенно ультрафиолетовых лучей. Деформация также способствует старению. Для сохранения структуры и свойств в состав резины вводят **стабилизаторы**- органические вещества, замедляющие старение. Например, парафин и воск, введенные в резину легко мигрируют на поверхность и образуют пленку, которая препятствует проникновению кислорода внутрь изделия. Защита резины от прямого действия солнечного света достигается увеличением отражательной способности введением в ее состав алюминиевой пудры или наполнителей белого цвета.

Резина - низкочастотный диэлектрик:

- $\epsilon = 3...7$;
- $\text{tg}\delta = 0,01...0,1$;
- $\rho = 10^{12}...10^{14}$ Ом·м;
- $E_{\text{пр}} = 20...40$ МВ/м.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие требования предъявляют к конденсаторной керамике какая керамика применяется для обычных конденсаторов?
2. Назовите особенности сегнетокерамики и материалы, используемые для нелинейных конденсаторов (варикондов)?
3. Назовите основные этапы получения керамики.
4. Какой из высокочастотных органических твердых диэлектриков применим при

криогенных температурах?

5. Какие пластмассы находят наиболее широкое применение в электрорадиотехнике?
6. С какой целью применяются компаунды? От чего зависит их допустимая рабочая температура?

Глава 3. Полупроводниковые материалы

Лекция 9. Общие сведения о полупроводниковых материалах – 2 часа

Полупроводники - это материалы с электронной проводимостью, электрические свойства которых сильно зависят от содержания примесей, дефектов структуры и внешних воздействий (температуры, освещения, электромагнитного поля и т.д.). Условно к полупроводникам относят материалы с шириной запрещенной зоны $\Delta\mathcal{E} < 3$ эВ.

Собственная проводимость полупроводников

Механизм собственной проводимости можно показать на модели кристаллической решетки кремния - элемента IV группы периодической системы Менделеева, имеющего сложную кубическую решетку типа алмаза (рис. 28). Четыре валентных электрона атома кремния образуют ковалентные связи с четырьмя соседними атомами. Состояниям связанных электронов соответствуют энергетические уровни в валентной зоне.

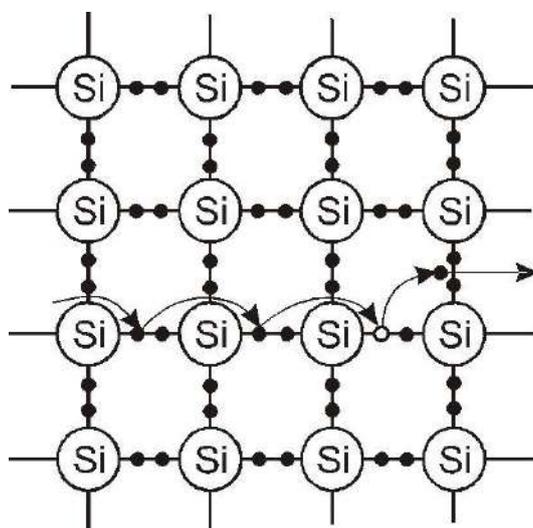


Рис. 28. Механизм собственной проводимости кремния

При температуре абсолютного нуля валентная зона (ВЗ) полностью заполнена электронами, а зона проводимости (ЗП) полностью свободна. Свободные носители заряда отсутствуют, и полупроводник ведет себя как диэлектрик.

При температурах выше абсолютного нуля некоторые валентные электроны за счет тепловых флуктуаций преодолевают запрещенную зону и переходят в зону проводимости (рис. 29,а). Энергия, необходимая для разрыва связи и освобождения электрона, количественно равна ширине запрещенной зоны $\Delta\mathcal{E}$. Электрон, ото-

единице: $F_n(\mathcal{E}) + F_p(\mathcal{E}) = 1$. Веро-

ятность заполнения энергетических уровней электронами определяется функцией Ферми (2.4), функция вероятности для дырок аналогична. Различие состоит в том, что для дырок энергия возрастает при движении вниз от уровня Ферми, т.е. чем «глубже» дырка, тем больше ее энергия. Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится примерно посередине запрещенной зоны (рис. 29,б).

$$\mathcal{E}_F \approx (\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v) / 2, \quad (4.2)$$

где \mathcal{E}_c - энергетический уровень дна зоны проводимости; \mathcal{E}_v - энергетический уровень потолка валентной зоны.

Учитывая, что в полупроводниках электроны и дырки имеют энергию, значительно отличающуюся от энергии Ферми, а разность $\mathcal{E} - \mathcal{E}_F$ в несколько раз превышает kT , в знаменателе выражения (2.4) единицей можно пренебречь. Тогда вероятность заполнения энергетических уровней электронами и дырками в собственном полупроводнике определится по формулам

$$F_n(\mathcal{E}) \approx \exp^{-\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{kT}}; \quad F_p(\mathcal{E}) \approx \exp^{-\frac{\mathcal{E}_F - \mathcal{E}}{kT}}. \quad (4.3)$$

Равновесная концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике определяется путем интегрирования по всем заполненным энергетическим состояниям в зоне проводимости для электронов и валентной зоне для дырок

$$n = N_c \exp^{-\frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_F}{kT}}; \quad p = N_v \exp^{-\frac{\mathcal{E}_F - \mathcal{E}_v}{kT}}, \quad (4.4)$$

где N_c - плотность состояний в зоне проводимости с энергией \mathcal{E}_c ; N_v - плотность состояний в валентной зоне с энергией \mathcal{E}_v .

С учетом (4.1) и (4.4) в окончательном виде выражение для собственной концентрации носителей заряда в полупроводнике имеет вид

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} \exp^{-\frac{\mathcal{E}}{2kT}}, \quad (4.5)$$

где $\mathcal{E} \cong \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v$ - ширина запрещенной зоны.

Для графического изображения выражение (4.5) удобно представить в виде

$$\ln n_i = \ln N_c \sqrt{N_v} - \frac{\mathcal{E}}{2kT}.$$

Произведение $N_c N_v$ слабо зависит от температуры, поэтому

температурная зависимость

$$n_i = f \frac{1}{T} \text{ близка к линейной (рис. 30).}$$

Угол наклона этой кривой характеризует ширину запрещенной зоны полупроводника.

Энергия $\Delta\mathcal{E}$, необходимая для разрыва химической связи в собственном полупроводнике, довольно значительна, поэтому полу-проводниковые приборы работают в основном на примесной проводимости. Появление собственной проводимости в большинстве случаев недопустимо, так как ведет к нарушению нормальной работы приборов. Ширина запрещенной зоны определяет температуру возникновения собственной проводимости, поэтому, чем больше $\Delta\mathcal{E}$, тем выше допустимая рабочая температура примесного полупроводника.

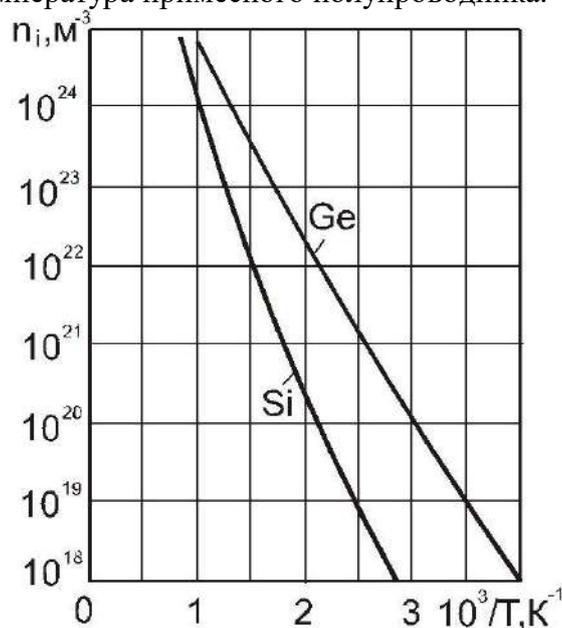


Рис. 30. Температурная зависимость концентрации собственных носителей заряда в германии и кремнии

Примесная проводимость полупроводников

Примесная проводимость обеспечивается зарядами примесей. Примеси создают мелкие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Благодаря малой величине энергии ионизации примеси ($\Delta\mathcal{E}_{\text{пр}} = 0,01 \dots 0,1$ эВ), в полупроводнике могут возникать значительные токи при слабых энергетических воздействиях. Роль примесей выполняют не только легирующие элементы, специально вводимые в полупроводник, но и различные дефекты структуры, прежде всего, вакансии и межузельные атомы. Различают два типа примесей: донорные и акцепторные.

Донорные примеси поставляют электроны в зону проводимости полупроводника. Энергетические уровни донорной примеси расположены в запрещенной зоне полупроводника вблизи дна зоны проводимости (рис. 31,а). При внешнем энергетическом воздействии валентные электроны примеси легко переходят в зону проводимости полупроводника, создавая проводимость n -типа.

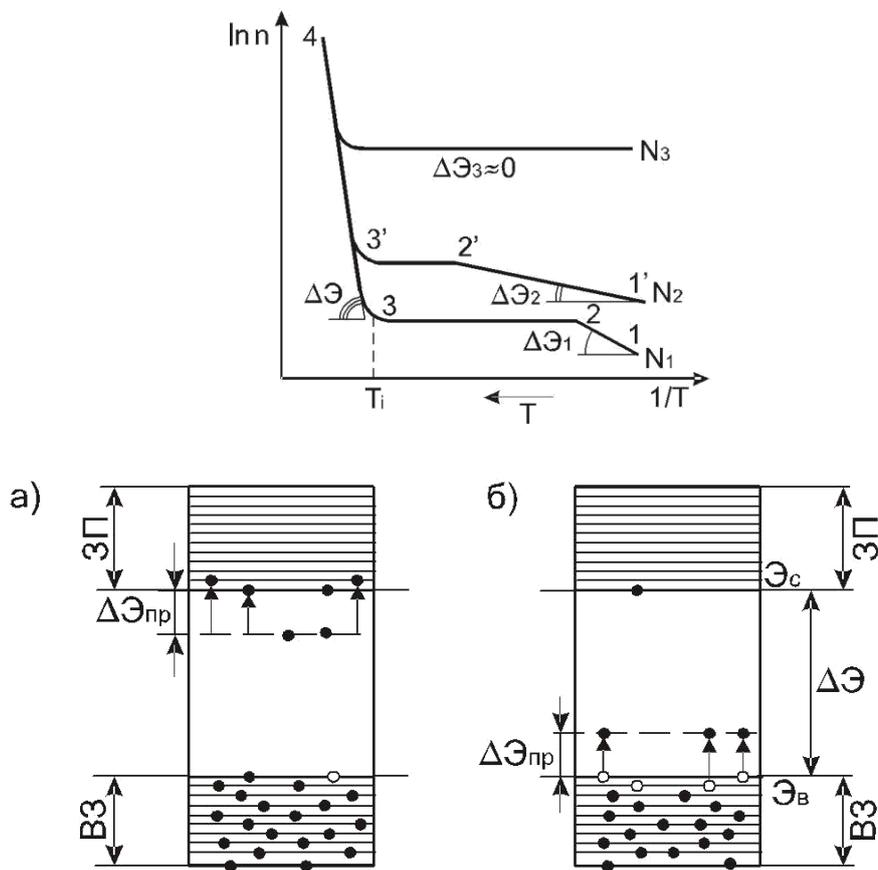


Рис. 31. Энергетические диаграммы полупроводника с донорной (а) и акцепторной (б) примесями

Для элементов IV группы (германия и кремния) донорами являются элементы V группы - мышьяк (As), сурьма (Sb), фосфор (P) и др.

Акцепторные примеси захватывают валентные электроны полупроводника. Акцепторы имеют незаполненные энергетические уровни, располагающиеся в запрещенной зоне полупроводника вблизи потолка валентной зоны (рис. 31,б). При внешнем энергетическом воздействии часть валентных электронов полупроводника переходит на свободные уровни акцепторной примеси, и в его валентной зоне происходит эстафетное перемещение валентных электронов от атома к атому, от дырки к дырке.

Акцепторы обеспечивают проводимость p-типа. Для германия и кремния акцепторами являются элементы 3-й группы - бор (B), алюминий (Al), галлий (Ga), индий (In).

Основные и неосновные носители заряда. В примесном полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны, но имеется и некоторая концентрация дырок, которые являются неосновными носителями заряда. В полупроводнике p-типа дырки - основные носители заряда, а электроны - неосновные.

В невырожденном полупроводнике при любой температуре в условиях термодинамического равновесия произведение концентрации основных и неосновных носителей заряда (равновесных электронов n_0 и дырок p_0) есть величина постоянная, не зависящая от содержания примесей

$$n \cdot p = n_i^2, \quad (4.7)$$

где n_i - собственная концентрация носителей заряда при данной температуре.

Это выражение называют *соотношением действующих масс* для носителей заряда.

Подвижность носителей заряда

Подвижность носителей заряда - это отношение средней скорости направленного движения (скорости дрейфа v) к напряженности электрического поля E

$$\mu = v/E, \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}. \quad (4.8)$$

В полупроводниках различают подвижность электронов μ_n и подвижность дырок - μ_p .

Подвижность носителей заряда в полупроводниках может быть значительно выше, чем в металлах, т.е. в плохо проводящих кристаллах электроны могут двигаться более свободно. У некоторых чистых полупроводников подвижность составляет $10 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и более. Это свидетельствует о большой длине свободного пробега и энергии электронной волны. Эквивалентная длина электронной волны в невырожденном полупроводнике, согласно формуле (1.3), равна $5 \dots 7 \text{ нм}$ (в металлах $\lambda = 0,3 \dots 0,5 \text{ нм}$). Поэтому в невырожденном полупроводнике дефекты атомных размеров мало влияют на рассеяние электронов.

Основные причины рассеяния носителей заряда в полупроводниках, приводящие к уменьшению их подвижности, являются:

- тепловые колебания атомов или ионов кристаллической решетки;
- ионизированные примесные атомы.

Таким образом, подвижность носителей заряда зависит от температуры и концентрации примеси (рис. 33).

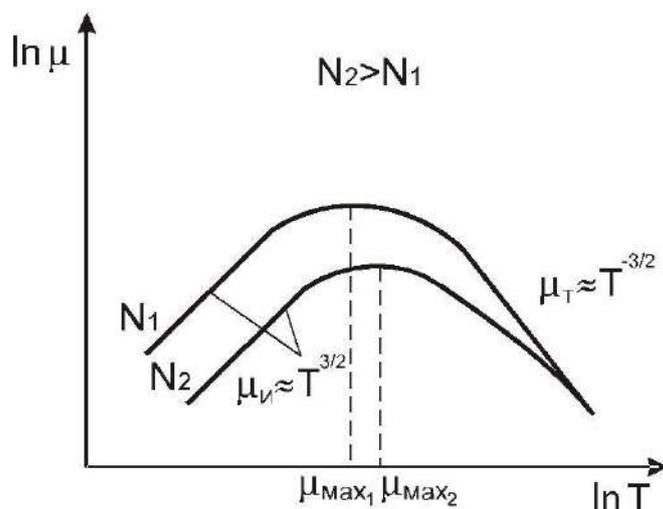


Рис. 33. Температурная зависимость подвижности носителей заряда при раз-ной концентрации примеси

В области низких температур преобладает рассеяние на ионизированных атомах примеси: каждый ионизированный атом примеси создает вокруг себя кулоновское поле, искривляющее траекторию движения носителя заряда. Существенное влияние

оказывает концентрация ионизированных примесей

$$\mu_i \approx T^{3/2} N_i, \quad (4.9)$$

где N_i - концентрация ионизированных атомов примеси.

Рассеяние на ионизированных примесях с ростом температуры уменьшается, т.е. μ_i возрастает.

Рассеяние на тепловых колебаниях решетки играет доминирующую роль при повышенных температурах, подвижность уменьшается пропорционально $\mu_t \approx T^{-3/2}$. Результирующая подвижность определяется из соотношения:

$$1/\mu = 1/\mu_t + 1/\mu_i. \quad (4.10)$$

Таким образом, температурная зависимость μ выражается кривой с отчетливо выраженным максимумом. С увеличением концентрации примеси максимальное значение μ уменьшается и смещается в сторону более высоких температур.

Подвижность носителей заряда в ионных кристаллах более низкая, так как рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях ионов гораздо интенсивнее, чем в решетке с нейтральными атомами.

Удельная проводимость полупроводников

Плотность тока, возникающего в полупроводнике,

$$j = e n_0 \mu_n E + e p_0 \mu_p E, \quad (4.11)$$

где e - заряд электрона.

Таким образом, в соответствии с законом Ома (1.1) удельная проводимость полупроводников определяется концентрацией носителей заряда и их подвижностью

$$\gamma = e n_0 \mu_n + e p_0 \mu_p. \quad (4.12)$$

В примесных полупроводниках обычно учитываются только основные носители заряда, тогда

- для полупроводников n -типа

$$\gamma = e n_0 \mu_n, \quad (4.13a)$$

- для полупроводников p -типа

$$\gamma = e p_0 \mu_p. \quad (4.13b)$$

Температурная зависимость удельной проводимости

Для невырожденного полупроводника в диапазоне температур, соответствующих области истощения примесей, концентрация основных носителей заряда остается практически постоянной, и характер изменения удельной проводимости определяется температурной зависимостью подвижности носителей заряда (рис. 34).

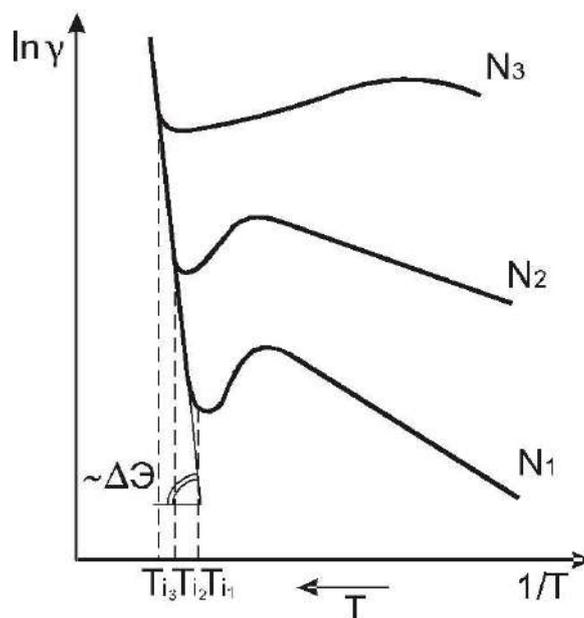


Рис. 34. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводника при $N_1 < N_2 < N_3$

Резкое возрастание удельной проводимости при повышенных температурах соответствует области собственной проводимости. Для этой области $\gamma = e \cdot n_i (\mu_n + \mu_p)$. Угол наклона прямой на участке собственной проводимости определяет ширину запрещенной зоны полупроводника.

Чем больше концентрация примеси, тем больше электронов поставляется в зону проводимости, тем выше удельная проводимость. С увеличением концентрации примеси повышается и температура перехода к собственной проводимости полупроводника T_i .

У вырожденного полупроводника N_3 концентрация носителей заряда не зависит от температуры, и зависимость $\gamma = f(T)$ в области примесной проводимости качественно подобна температурному изменению удельной проводимости металлов.

Влияние напряженности поля на проводимость полупроводников. Для полупроводников в области слабых полей проводимость не зависит от напряженности поля, и сохраняется справедливость закона Ома. Критерием слабого поля является выполнение условия: скорость дрейфа электронов значительно меньше скорости теплового движения $v \ll u$ (рис. 35, I).

В сильных электрических полях, когда v становится соизмеримой с u , справедливость закона Ома нарушается. В этой области удельная проводимость полупроводников с увеличением напряженности поля сильно возрастает (рис. 35, II),

что объясняется, прежде всего, резким возрастанием концентрации носителей заряда.

При $T = 300\text{K}$, $E_{\text{кр}} \approx 1 \text{ МВ/м}$.

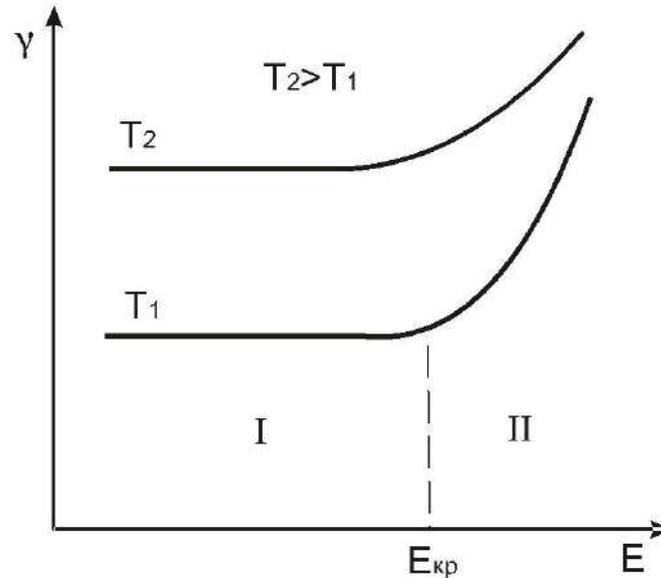


Рис. 35. Зависимость удельной проводимости полупроводника от напряженности электрического поля

Что касается подвижности носителей заряда, то в области сильных полей характер ее изменения зависит от характера рассеяния. При рассеянии на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки подвижность носителей заряда с увеличением напряженности поля снижается, а при рассеянии на ионизированных атомах примеси - возрастает.

Вопросы для самоконтроля:

1. Чем обеспечивается собственная электропроводность полу-проводников?
2. Как расположены энергетические уровни донорной и акцеп-торной примеси в запрещенной зоне полупроводника? Почему энер-гия ионизации примеси в германии меньше, чем в кремнии?
3. Таким соотношением связаны концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике?
4. Объясните температурную зависимость концентрации носи-телей заряда в полупроводнике. Какой полупроводник называется «вырожденным»?

Лекция 10. Фотопроводимость полупроводников. Люминесценция – 1 час

Фотопроводимость (фоторезистивный эффект) -это изменение электрической проводимости под действием электромагнит-ного излучения.

Фотопроводимость может проявляться только при поглощении полупроводником фотонов. Удельная проводимость под действием фотоэффекта определяется как разность проводимостей полупро-водника на свету γ_c и в темноте γ_t

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_t = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p, \quad (4.18)$$

где n и p - концентрации неравновесных носителей заряда, возникших вследствие

оптической генерации.

После прекращения светового воздействия концентрация неравновесных носителей заряда и проводимость уменьшаются до своего исходного значения. Для полупроводников характерна релаксация фотопроводимости, т.е. процесс нарастания и уменьшения фотопроводимости во времени. При возбуждении полупроводника прямоугольным импульсом света интенсивностью J время нарастания и спада фотопроводимости связано с временем жизни неравновесных носителей заряда (рис. 37). Накопление или убыль неравновесных носителей заряда определяются разностью скоростей генерации и рекомбинации носителей:

$$d(n) dt = q_0 - n \tau, \quad / \quad (4.19)$$

где τ - время жизни неравновесных носителей заряда; $q_0 = \eta_0 \cdot \alpha \cdot J$ - скорость оптической генерации носителей заряда, которая определяется интенсивностью падающего света J , показателем поглощения α и квантовым выходом внутреннего фотоэффекта η_0 .

поверхностном слое, где образуется основное количество неравновесных носителей заряда. Вследствие высокой поверхностной рекомбинации количество неравновесных носителей заряда, проникающих внутрь полупроводника, мало, и фотопроводимость падает. Чем больше скорость поверхностной рекомбинации, тем острее спектральный максимум собственной фотопроводимости. При больших λ энергии фотона становится недостаточно для создания внутреннего фотоэффекта. Положение спектрального максимума собственной фотопроводимости определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Максимум примесной проводимости находится в более длинноволновом диапазоне.

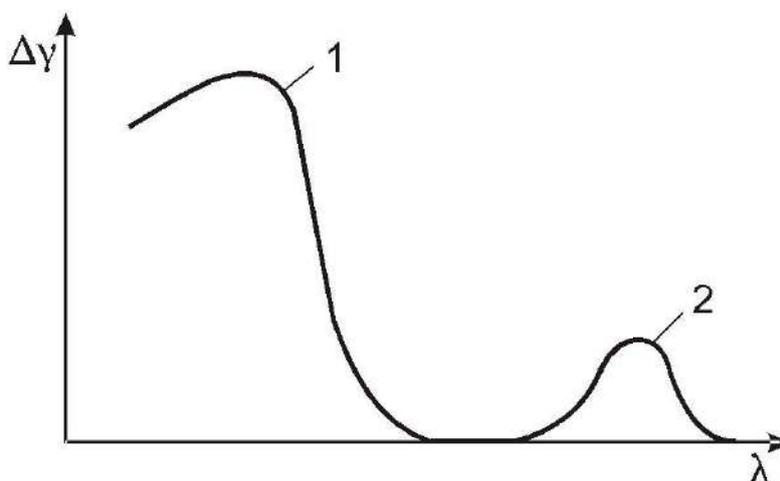


Рис. 38. Спектральная зависимость фотопроводимости полупроводника: 1 - собственная, 2 - примесная

Люминесценция - нетепловое электромагнитное излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Люминесценция - явление неравновесное, оно наблюдается при возбуждении вещества.

В зависимости от источника возбуждения различают:

- **фотолюминесценцию** -возбуждение светом;
- **электролюминесценцию** -возбуждение электрическим полем;
- **катодолюминесценцию** -возбуждение электронным лучом.

При люминесценции акты возбуждения и излучения света разделены во времени.

Вещества, способные люминесцировать, называются **люминофорами**. Люминесцентные свойства твердых тел во многом определяются концентрацией примесей и дефектами структуры. При-месные атомы, образующие локальные уровни в запрещенной зоне полупроводника и вызывающие свечение материала, называют **ак-тиваторами люминесценции**. Все процессы поглощения энергии и излучения фотонов происходят внутри ионов-активаторов, а кристаллическая решетка играет роль матрицы.

В большинстве случаев в полупроводниках люминесценция обусловлена рекомбинацией неравновесных носителей заряда (излучательной рекомбинацией). Генерация видимого излучения возможна в полупроводниках с шириной запрещенной зоны $E > 1,7$ эВ.

Излучение может быть спонтанным и вынужденным. Спонтанные излучения происходят независимо друг от друга в разные моменты времени, поэтому спонтанное излучение - некогерентное. Вынужденное излучение происходит под действием внешнего электромагнитного поля. Излучаемые фотоны имеют ту же частоту, поляризацию и фазу, что и фотоны возбуждающего электромагнитного поля, совпадают и направления распространения фотонов. Поэтому вынужденное излучение является **когерентным**.

Наибольший практический интерес вызывает электролюминесценция. Инжекционная электролюминесценция наблюдается при включении *p-n*-перехода в прямом направлении. На её основе работают светодиоды, полупроводниковые лазеры и другие приборы оптоэлектроники.

Вопросы для самоконтроля:

1. Каковы причины рассеяния носителей заряда в полупроводнике?
2. Может ли проводимость в полупроводнике уменьшаться при повышении температуры?
3. Каковы причины возникновения неравновесных носителей заряда в полупроводнике?
4. В чем отличие ловушек захвата от рекомбинационных ловушек?
5. Какие факторы влияют на время жизни и диффузионную длину неравновесных носителей заряда?
6. Что понимают под фоторезистивным эффектом?
7. Почему примесная фотопроводимость смещается в сторону более длинных волн?

Лекция 11. Элементарные полупроводники – 1 час

Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические

полупроводники. По составу их классифицируют на элементарные полупроводники и химические соединения. Полупроводниковые свойства проявляют 12 химических элементов (табл. 14), из них в виде самостоятельных полупроводников применяются германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), а остальные используются в виде легирующих примесей. Электрофизические характеристики основных элементарных полупроводников - *германия* и *кремния* - представлены в табл. 15.

Таблица 14

Элементарные полупроводники

Элемент	Ширина запрещенной зоны ΔE , эВ*	Элемент	Ширина запрещенной зоны ΔE , эВ*
Бор (B)	1,1	Мышьяк (As)	1,2
Углерод (алмаз) (C)	5,6	Сурьма (Sb)	0,12
Германий (Ge)	0,665	Сера (S)	2,5
Кремний (Si)	1,12	Селен (Se)	1,8
Олово (Sn_{α})	0,08	Теллур (Te)	0,36
Фосфор (P)	1,5	Иод (I)	1,25

* ширина запрещенной зоны дана при 20°C.

Таблица 15

Электрофизические характеристики германия и кремния

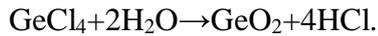
Характеристика	Германий	Кремний
Период решетки, нм	0,566	0,542
Плотность при 20°C, г/см ³	5,3	2,3
Температура плавления, °C	936	1414
Собственное удельное сопротивление ρ , Ом·м	0,47	$2 \cdot 10^3$
Собственная концентрация носителей N_0 , м ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{16}$
Ширина запрещенной зоны при 20°C ΔE , эВ	0,665	1,12
Подвижность носителей заряда, м ² /В·с:		
• электронов μ_n	0,39	0,14
• дырок μ_p	0,19	0,05
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	16	12

Германий

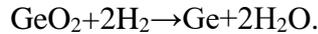
Германий исторически является первым освоенным полупроводниковым материалом, так как он относительно легко поддается очистке. Это элемент IV группы с алмазоподобной кубической решеткой. **Особенности свойств** германия: химическая стойкость к кислотам, высокая твердость и хрупкость.

Получение полупроводникового германия. Германий слабо распространен в земной коре (<0,001%), он не образует собственных руд. Сырьем для получения полупроводникового Ge являются медно-цинковые и свинцово-цинковые руды, побочные продукты металлургического производства. Основные этапы производства:

1. Получение германиевого концентрата.
2. Получение жидкого тетрахлорида германия GeCl_4 химическим путем.
3. Получение двуокиси германия методом гидролиза:



4. Получение порошкового Ge путем его восстановления из дву-окиси водородом при $650 \dots 700^\circ\text{C}$:



5. Выплавка слитка поликристаллического Ge из порошка.
6. Очистка поликристалла Ge от примесей методом зонной плавки.
7. Получение монокристалла Ge методом вытягивания из расплава. При этом в расплав вводят легирующие примеси в строго дозированном количестве для получения *Ge_n*- или *p*-типа.

Формирование проводимости в германии. Применяют германий с примесной проводимостью. В качестве **донорных** примесей используются элементы V группы: сурьма (Sb), мышьяк (As), фосфор (P), в качестве **акцепторных** - элементы III группы: бор (B), алюминий (Al), галлий (Ga). Эти примеси создают мелкие энергетические уровни в запрещенной зоне, их энергия ионизации примерно одинакова и составляет в среднем 0,01 эВ. Основными примесями являются **сурьма** - для получения *Ge_n*-типа и **галлий** - для получения *Ge_p*-типа.

Медь и золото (элементы I группы) образуют глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне и являются эффективными рекомбинационными ловушками, снижающими время жизни неравновесных носителей заряда, что повышает быстродействие приборов.

Влияние концентрации примеси N_{np} на электрические свойства германия. Легирующие примеси в германии при температурах выше $90 \dots 100$ К полностью ионизированы, т.е. концентрация носителей заряда равна концентрации примеси, $n = N$.

Базовая рабочая концентрация легирующей примеси в германии составляет $N = 10^{21} \dots 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Собственная проводимость при комнатной температуре ($T_i = 20 \dots 25^\circ\text{C}$) может возникнуть лишь при очень малой концентрации примеси ($N < 10^{19} \text{ м}^{-3}$). С увеличением концентрации примеси температура начала собственной проводимости возрастает. При базовой концентрации примеси $T_i > 100^\circ\text{C}$.

Таким образом, при $N \leq 10^{19} \text{ м}^{-3}$ удельное электрическое сопротивление германия ρ определяется собственной проводимостью. В слаболегированном полупроводнике ($N < 10^{21} \text{ м}^{-3}$) ρ возрастает за счет рассеяния на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки. При базовой концентрации примеси удельное сопротивление обратно пропорционально N

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{en\mu} = \frac{1}{eN\mu}, \quad (4.23)$$

т.е. с увеличением концентрации примеси ρ уменьшается, но отклоняется от прямолинейной зависимости (пунктирной линии «а» на рис. 39) из-за снижения подвижности заряда на ионизированных атомах примеси (рис. 40,а). Удельное сопротивление германия *p*-типа выше, чем германия *n*-типа, так как подвижность

дырок ниже подвижности электронов.

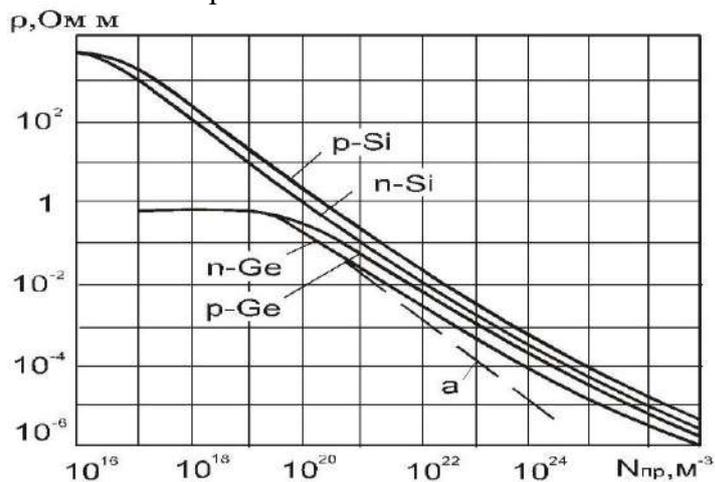


Рис. 39. Зависимость удельного электросопротивления германия и кремния от концентрации примеси при 20°C

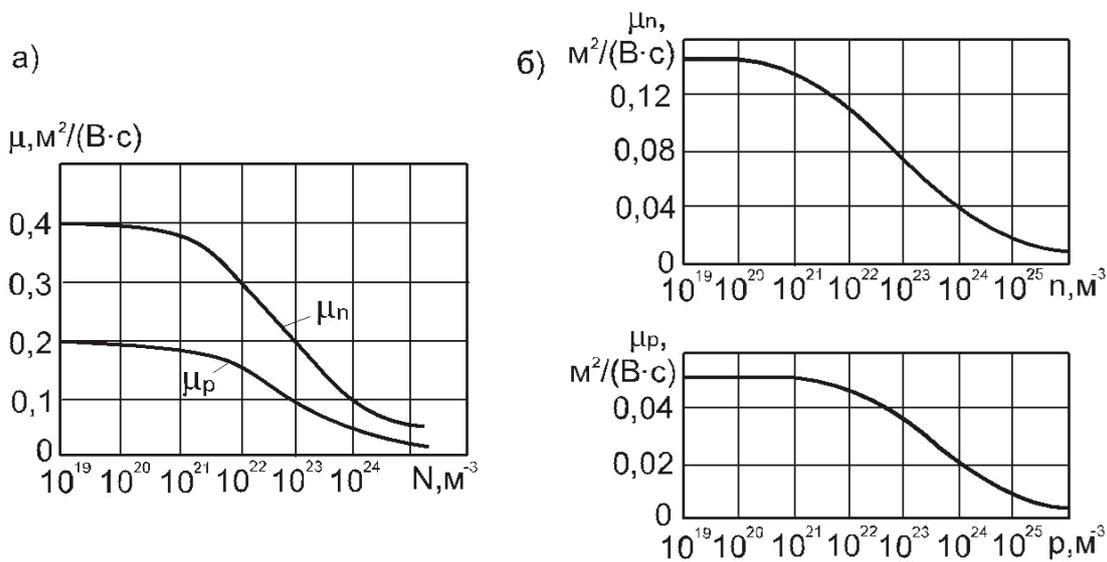


Рис. 40. Зависимости подвижности носителей заряда от концентрации примеси в германии (а) и кремнии (б)

При $N > 10^{24} \text{ м}^{-3}$ полупроводниковый германий становится вырожденным.

Маркировка полупроводникового германия:

Пример 1. ГЭС1,0/0,5 -германий(Г)электронного типа проводимости (Э), легированный сурьмой (С), удельное сопротивление при 300 К $\rho = 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, диффузионная длина $L = 0,5 \text{ мм}$.

Пример 2. ГДГ5,0/1,0 -германий(Г)дырочного типа проводимости (Д), легированный галлием (Г), удельное сопротивление при 300 К $\rho = 5,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, диффузионная длина $L = 1,0 \text{ мм}$.

Кремний

Кремний, как и германий, -элемент IV группы со сложной кубической кристаллической решеткой типа алмаза, отличается от германия более сильной химической связью. Поэтому он обладает более высокой температурой плавления, большей шириной запрещенной зоны, меньшей подвижностью носителей заряда и более низкой собственной электропроводностью (табл. 15). **Специфические свойства** кремния:

- химическая стойкость;
- нагревостойкость до 900°C ;
- высокая активность в расплавленном состоянии к материалам, из которых изготавливают тигли и реакторы для получения монокристаллов (кварц, графит), что затрудняет получение чистого Si.

Вопросы для самоконтроля

1. На чем основан метод кристаллизационной очистки германия и кремния? Какой метод получил широкое применение для выращивания крупных монокристаллов?
2. Как и почему изменяется подвижность носителей заряда в Ge и Si при увеличении концентрации легирующей примеси?
3. Какие преимущества кремния обеспечивают ему широкое применение при изготовлении планарных транзисторов и интегральных микросхем?
4. Какие материалы используются для инжекционных лазеров
5. светодиодов?
6. Какие материалы применяются для солнечных батарей?
7. При каком содержании примесей Ge будет иметь собственное сопротивление при комнатной температуре?

Глава 4. Магнитные материалы

Лекция 12. Общие сведения о магнитных материалах – 2 часа

Материалы, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются.

Намагниченность - магнитный момент единицы объема вещества. Она связана с напряженностью внешнего магнитного поля соотношением

$$I_m = K_m H, \quad (5.1)$$

где I_m - намагниченность материала, А/м; H - напряженность внешнего магнитного поля, А/м; K_m - магнитная восприимчивость, характеризующая способность материала намагничиваться.

Под действием внешнего магнитного поля в материале возникает собственное поле, которое параллельно или антипараллельно внешнему. Результирующее магнитное поле в материале равно алгебраической сумме внешнего и собственного магнитных полей.

$$B = B_o + B_i = \mu_o H + \mu_o I_m = \mu_o H(1 + K_m) = \mu_o \mu H, \quad (5.2)$$

где B - магнитная индукция в материале, Тл; B_o - магнитная индукция внешнего магнитного поля (в вакууме), Тл; B_i - магнитная индукция собственного поля в материале, Тл; μ_o - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума) в системе СИ, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ - относительная магнитная проницаемость материала. Она показывает, во сколько раз магнитная индукция в материале больше, чем в вакууме:

$$\mu = B/B_o. \quad (5.3)$$

Первопричиной магнитных свойств материалов являются электронные круговые токи, создаваемые вращением электронов вокруг собственных осей (электронные спины).

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного порядка (магнитной восприимчивости) все вещества в природе делятся на: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

Диамагнетики обладают малой магнитной восприимчивостью $K_m = - (10^{-6} \dots 10^{-7})$. Диамагнетизм свойственен веществам, у которых собственный магнитный момент атомов равен нулю, т.е. спиновые магнитные моменты попарно скомпенсированы. К диамагнетикам относятся: инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и др.), ряд металлов (медь, серебро, золото, ртуть, цинк, галлий и др.), большинство полупроводников (германий, кремний, соединения $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, неорганические стекла и др. Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля, μ чуть меньше единицы.

Парамагнетики имеют $K_m = 10^{-3} \dots 10^{-6}$. К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные и редкоземельные металлы и др.

Атомы парамагнетиков обладают элементарным магнитным моментом, но из-за теплового движения они хаотичны, так что в целом намагниченность вещества равна нулю. Внешнее магнитное поле вызывает ориентацию магнитных моментов в одном направлении, но тепловая энергия противодействует упорядоченности. Магнитная проницаемость близка к единице.

Парамагнетики, помещенные в неоднородное магнитное поле, слабо втягиваются в него.

Ферромагнетики имеют большую положительную магнитную восприимчивость K_m - до 10^6 , которая сильно зависит от намагничивающей напряженности и температуры. Ферромагнетикам присуща внутренняя магнитная упорядоченность, выражающаяся в существовании макроскопических областей с параллельно ориентированными магнитными моментами атомов. Ферромагнетики способны намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, некоторые редкоземельные металлы и химические соединения.

Антиферромагнетики - это вещества с антипараллельной ориентацией элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. Для них характерна малая положительная магнитная восприимчивость $K_m = 10^{-3} \dots 10^{-5}$, которая сильно зависит от температуры. При нагревании антиферромагнетик при некоторой температуре (точка Нееля) переходит в парамагнитное состояние. К антиферромагнетикам относятся хром, марганец, ряд редкоземельных металлов (Ce, Nd, Sm и др.), химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, галогенидов, сульфидов и т.д. У антиферромагнетиков суммарная намагниченность при отсутствии внешнего магнитного поля равна нулю.

Ферримагнетики - это вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. К ферримагнетикам относятся различные оксидные соединения, в том числе ферриты.

К сильномагнитным материалам относятся:

- ферромагнетики (железо, кобальт, никель и сплавы на их основе);
- ферримагнетики (ферриты).

Они используются в качестве основных магнитных материалов.

Процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков

Кривая намагничивания представляет собой зависимость магнитной индукции ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля. Типичная кривая намагничивания $B(H)$ поликристаллического ферромагнетика показана на рис. 45. Возрастание индукции от намагничивающей напряженности обусловлено двумя основными процессами: смещением границ доменов и поворотом их магнитных моментов.

Этапы намагничивания

I - Слабое поле. На этом этапе происходит обратимое(упругое)смещение доменных границ. Увеличиваются домены векторы, намагниченности которых близко ориентированы в направлении намагничивающей напряженности за счет уменьшения доменов с неблагоприятной ориентировкой. При снятии внешнего поля доменные границы возвращаются в исходное положение. Остаточной намаг-ниченности нет.

II - Более сильное поле. Происходит необратимое смещение границ доменов, индукция интенсивно возрастает, кривая намагничивания имеет максимальную крутизну, домены с неблагоприятной ориентировкой вектора намагниченности исчезают.

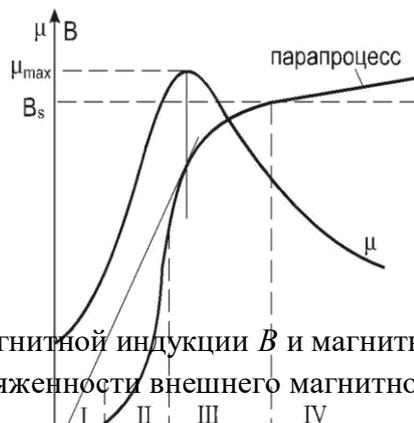


Рис. 45. Зависимость магнитной индукции B и магнитной проницаемости μ от напряженности внешнего магнитного поля

III - Сильное поле. Действует второй механизм намагничивания - **механизм вращения**, т.е. векторы намагниченности доменов из направления легкого намагничивания поворачиваются в направлении поля и при полной их ориентации вдоль поля наступает **техническое насыщение**, которому соответствует индукция B_s и напряженность H_s . Основные стадии технического намагничивания схематично показаны на рис. 46.

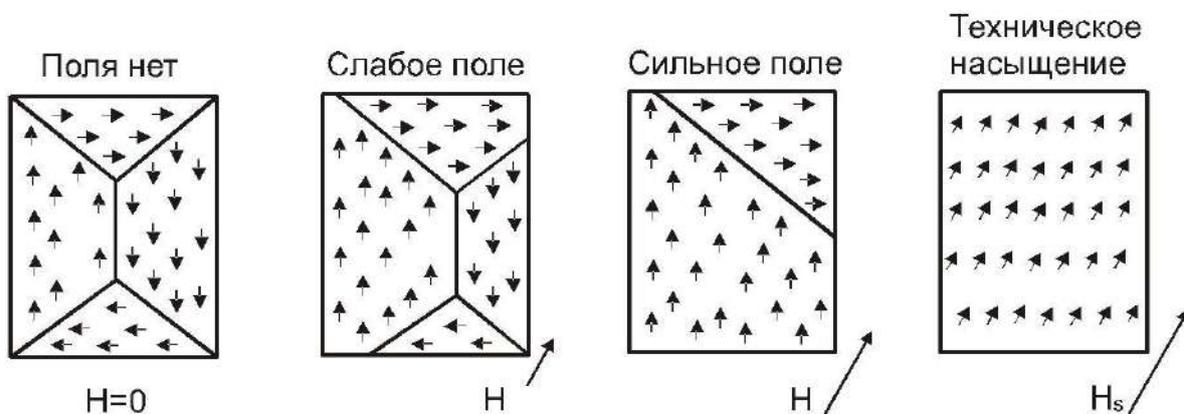


Рис. 46. Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

IV - $H > H_s$ -область парапроцесса, когда происходит приращение намагниченности доменов путем дополнительной ориентации спиновых моментов атомов, несколько разориентированных тепловым движением.

В отличие от технического намагничивания, намагничивание с парапроцессом

называется **истинным намагничиванием**.

Следует отметить, что у подавляющего большинства ферро-магнитных материалов в области парапроцесса намагниченность практически не меняется (рис. 45, IV, пунктирная линия). Однако у некоторых сплавов системы Fe-Ni (сплавы инварного типа) намагниченность в области парапроцесса увеличивается (рис. 45, IV, сплошная линия). В сплавах инварного типа парапроцесс сопровождается большой объемной магнитострикцией, которая искажает форму и изменяет линейные размеры доменов. Это наблюдается как при воздействии внешнего поля при $H > H_s$, так и при самопроизвольной намагниченности доменов (внешнее поле отсутствует), при температурах ниже точки Кюри T_k .

Магнитная проницаемость, определяемая по формуле (5.3) $\mu = B/B_0 = B/\mu_0 H$, называется **статической магнитной проницаемостью**. Она пропорциональна тангенсу угла наклона секущей, проведенной из начала координат через соответствующую точку на основной кривой намагничивания. Зависимость $\mu(H)$ показана на рис. 45. Восходящий участок этой кривой обусловлен сильными изменениями намагниченности при небольшом увеличении H за счет необратимых процессов намагничивания ферромагнетика. В области сильных магнитных полей уменьшение μ связано с насыщением намагниченности.

Начальная магнитная проницаемость μ_n характеризует способность ферромагнетика намагничиваться в слабых полях. Её определяют при напряженности порядка 0,1 А/м.

Максимальная магнитная проницаемость μ_{max} соответствует тангенсу угла касательной, проведенной из начала координат к основной кривой намагничивания. Температурная зависимость магнитной проницаемости $\mu(T)$, измеренная при разных значениях напряженности поля $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$, показана на рис. 47. Характер этой зависимости в слабых и сильных полях неодинаков. Начальная магнитная проницаемость μ_n ($H_1 = 0,1$ А/м) имеет явно выраженный максимум при температуре чуть ниже точки Кюри. В сильных полях (области насыщения) кривые $\mu(T)$ пологие (H_3, H_4). Возрастание μ_n при повышении температуры связано с уменьшением констант кристаллографической магнитной анизотропии и магнитострикции (ослабляются силы, препятствующие смещению доменных границ и повороту магнитных моментов доменов).

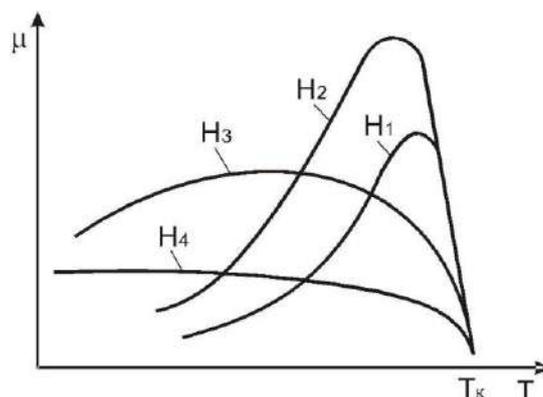


Рис. 47. Температурная зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика при разной напряженности магнитного поля: $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$

Точка Кюри - температура перехода ферромагнитного состояния в парамагнитное, для железа $T_k = 768^\circ\text{C}$. Но при 700°C намагниченность насыщения I_M составляет еще порядка 50% от истинной намагниченности, тогда как константа магнитной анизотропии практически равна нулю. Самая высокая точка Кюри у кобальта $T_k = 1130^\circ\text{C}$, самая низкая - у никеля $T_k = 358^\circ\text{C}$.

Магнитный гистерезис заключается в отставании магнитной индукции от напряженности внешнего поля. Если проводить цикл перемагничивания ферромагнетика, то получим замкнутую кривую, называемую **петлей гистерезиса** или петлей гистерезисного цикла (рис. 48). Таких петель можно получить множество в зависимости от значения максимальной индукции, достигаемой при перемагничивании.

Если при перемагничивании значение максимальной индукции достигает индукции насыщения $B_{\max} = B_s$, то получим предельную петлю гистерезиса. Кроме B_s , предельная петля гистерезиса характеризуется остаточной индукцией и коэрцитивной силой.

Остаточная индукция B_r - это значение индукции при отсутствии внешнего поля ($H = 0$) в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения.

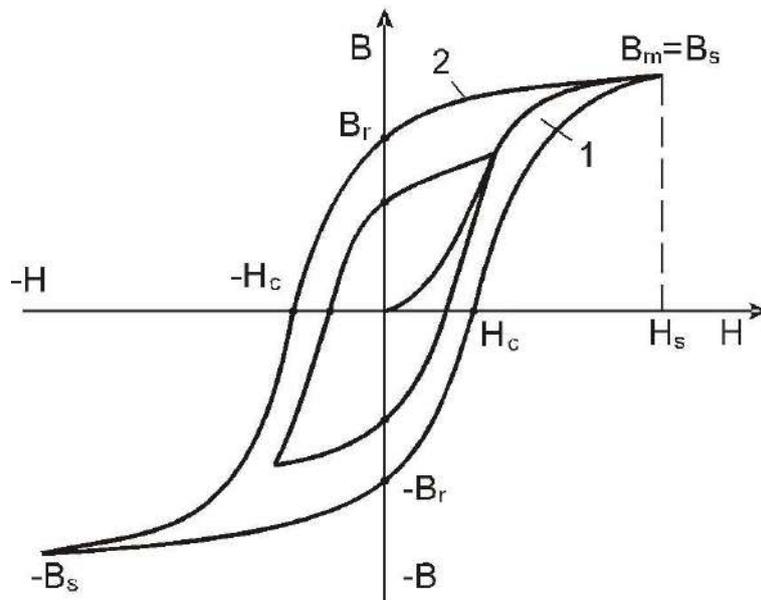


Рис. 48. Петля гистерезиса при различных B_{\max} . Основная кривая намагничивания (1) и предельная петля гистерезиса при $B_m = B_s$ (2)

Коэрцитивная сила H_c - напряженность размагничивающего поля, при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в ноль.

Магнитные потери

Перемагничивание ферромагнетика в переменных полях сопровождается потерями энергии, вызывающими нагрев материала.

Потери на перемагничивание - это мощность электрического тока, рассеиваемая

в ферромагнетике при перемагничивании. Потери обычно относятся к 1 кг массы ферромагнетика (удельные потери). Они складываются в основном из потерь на гистерезис и на вихревые токи: $P = P_{\Gamma} + P_{\text{в}}$, Вт/кг.

Потери на гистерезис обусловлены необратимыми процессами перемагничивания. Они пропорциональны частоте тока и максимальной индукции, достигаемой при перемагничивании.

$$P = \eta \cdot f \cdot B_m^n \quad (5.6)$$

где η - постоянный коэффициент, зависящий от материала; n - показатель степени, $n = 1,6 \dots 2,0$ в зависимости от B_m ; B_m - максимальная индукция, Тл; f - частота тока, Гц.

Потери на гистерезис за один цикл перемагничивания прямо пропорциональны площади петли гистерезиса.

Потери на вихревые токи связаны с возникновением в массе сердечника, находящегося в переменном магнитном поле, ЭДС индукции и вихревых токов. Вихревые токи всегда возникают в плоско-сти, расположенной перпендикулярно магнитному полю (рис. 49). Потери на вихревые токи для сердечника из листового материала могут быть определены по эмпирической формуле

$$P_{\text{в}} = 1,64 \frac{B_m^2 \cdot f^2 \cdot h^2}{d \cdot \rho} \quad (5.7)$$

где h - толщина листа; d - плотность материала; ρ - удельное электрическое сопротивление материала сердечника.

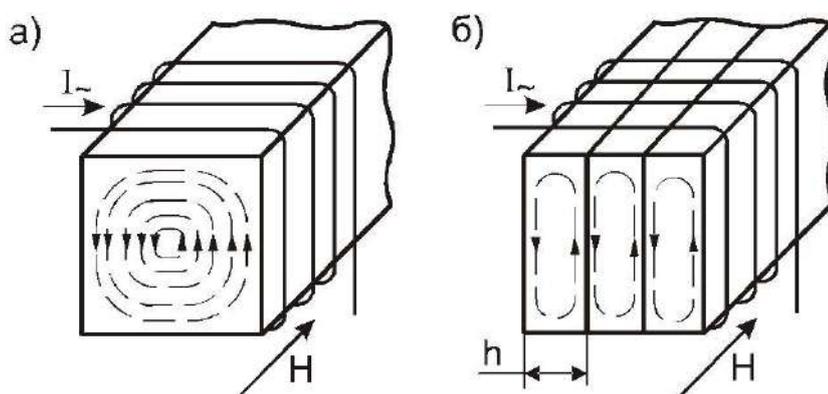


Рис. 49. Схема вихревых токов в поперечном сечении сплошного (а) и сборного (б) ферромагнитного сердечника

Потери на гистерезис прямо пропорциональны частоте тока в первой степени, а потери на вихревые токи - квадрату частоты. Поэтому на высоких частотах основную долю потерь (80-90%) составляют потери на вихревые токи. Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо применять материал с повышенным удельным электрическим сопротивлением и собирать сердечник из тонких листов,

изолированных друг от друга. Потери на перемагничивание для различных материалов приводятся в справочниках при определенных значениях магнитной индукции и частоты тока. Например: $P_{1,0/400} = 0,1 \text{ Вт/кг}$. Это значит, что потери при $B_m = 1,0 \text{ Тл}$ и $f = 400 \text{ Гц}$ составляют $0,1 \text{ Вт/кг}$.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какова природа ферромагнетизма?
2. Перечислите главные особенности ферромагнитных материалов.
3. Какие процессы происходят при намагничивании ферромагнетика?
4. Как влияет кремний на свойства электротехнической стали?
5. Назовите причины появления магнитных потерь при циклическом перемагничивании ферромагнетика. Как уменьшить магнитные потери?

Лекция 13. Классификация магнитных материалов – 2 часа

Применяемые в технике магнитные материалы делятся на две основные группы: магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие - это материалы с малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью. Условно к магнитомягким относят материалы, у которых $H_c < 800 \text{ А/м}$.

Магнитомягкие материалы намагничиваются до насыщения в слабых магнитных полях, имеют узкую петлю гистерезиса, малые потери на перемагничивание. Магнитомягкие материалы используются для изготовления магнитопроводов электрических машин, сердечников трансформаторов, дросселей, электромагнитов, магнитных экранов. Они широко применяются в системах автоматики, вычислительной технике и электроизмерительных приборах.

По магнитным потерям в зависимости от частоты тока магнито-мягкие материалы делятся на низкочастотные и высокочастотные. У **низкочастотных** материалов с увеличением частоты тока магнитные потери резко возрастают, вследствие малого удельного электрического сопротивления $\rho = 0,1 \dots 0,5 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, применяют на низких и средних частотах.

Высокочастотные магнитомягкие материалы имеют большое удельное электрическое сопротивление $\rho = 10^2 \dots 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, малые магнитные потери, незначительно возрастающие с увеличением частоты тока. Поэтому они применяются в высокочастотных электрических устройствах.

Магнитотвердые - это материалы с большой коэрцитивной силой $H_c > 4 \text{ кА/м}$. Они трудно размагничиваются, имеют широкую и пологую петлю гистерезиса. Магнитотвердые материалы используются для изготовления постоянных магнитов различного назначения и магнитной записи информации.

Лучшие материалы: магнитомягкие - $H_c < 0,1 \text{ А/м}$; магнитотвердые - $H_c > 1000 \text{ кА/м}$.

Магнитомягкие материалы

Основные характеристики магнитомягких материалов

Основными характеристиками магнитомягких материалов являются:

- начальная магнитная проницаемость μ_n ;
- максимальная магнитная проницаемость μ_{max} ;
- магнитная индукция насыщения B_s ;
- коэрцитивная сила H_c ;
- потери на перемагничивание P ;
- удельное электрическое сопротивление ρ .

Для магнитомягких материалов важно иметь большое значение магнитной проницаемости, индукции насыщения, удельного электрического сопротивления и наименьшее значение коэрцитивной силы и магнитных потерь.

Примеси и дефекты кристаллического строения, искажая кристаллическую решетку, способствуют снижению μ и возрастанию H_c . Особенно сильно влияют примеси внедрения в виде мелкодисперсных включений. Наилучшей структурой для магнитомягких материалов является однофазный твердый раствор замещения. Чем крупнее зерно, тем выше μ , B_s , ниже H_c и магнитные потери.

Напряженно-деформированное состояние способствует росту плотности дефектов и искажению решетки, измельчению зерна, что приводит к резкому падению μ и возрастанию H_c .

В связи с этим наилучшей термообработкой для магнитомягких материалов является *отжиг*. При отжиге снимаются напряжения, уменьшается плотность дефектов, образуется равновесная крупнозернистая структура. В результате улучшаются магнитные свойства: возрастают μ , B_s и снижается H_c .

Из всех магнитных характеристик наибольшим изменениям в эксплуатации подвержены магнитная проницаемость (особенно в слабых полях μ_n) и коэрцитивная сила H_c .

Низкочастотные магнитомягкие материалы

К низкочастотным магнитомягким материалам относятся:

- железо (техническое, электролитическое, карбонильное);
- электротехническая сталь (нелегированная и легированная);
- пермаллои (сплавы Fe-Ni);
- альсифер (сплав Al-Si-Fe).

Железо и электротехническая сталь относятся к материалам с высокой индукцией насыщения, а пермаллои и альсифер - к высокопроницаемым материалам.

Значения основных характеристик низкочастотных магнитомягких материалов представлены в табл. 22.

Таблица 22

Основные характеристики низкочастотных магнитомягких материалов

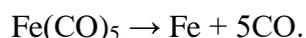
Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	$H_c, A/m$	$B_m, Tл$	$\rho, мкОм\cdot м$
Техническое железо	400	4000	50...100	2,2	0,1
Электролитическое железо	600	15000	30	2,2	0,1

Карбонильное железо	3000	20000	6,4	2,2	0,1
Монокристалл чистого железа	20000	1,4·10 ⁶	0,8	-	0,1
Электротехническая сталь	200...600	3000...8000	10...65	2,0	0,25...0,6
Низконикелевые пермаллои	4000	(15...60)·10 ³	5...30	1,0...1,6	0,45...0,9
Высоконикелевые пермаллои	7·10 ³ ...10 ⁵	10 ⁴ ...3·10 ⁵	0,65...5	0,65...1,05	0,16...0,85
Супермаллой: 79НМ: 79%Ni, 5%Mo, 15%Fe, 0,5%Mn	100000	1,5·10 ⁶	0,3	0,8	0,6
Альсифер: 5,6%Al, 9,5%Si Fe ост.	35400	117000	1,8		0,8

Железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. Из простых магнитомягких материалов железо обладает наибольшей индукцией насыщения. Магнитные свойства железа существенно зависят от содержания примесей. Наибольшей магнитной проницаемостью обладает электролитическое и карбонильное железо, содержащее не более 0,05% примесей. В техническом железе примесей до 0,1%.

Электролитическое железо получают путем электролизасернокислового или хлористого железа.

Карбонильное железо получают в виде тонкого порошка путем термического разложения пентакарбонила железа:



Сердечники изготовляют прессованием.

Кремнистая электротехническая сталь является магнито-мягким материалом массового применения. Основной легирующий элемент - кремний. Кремний повышает удельное электрическое сопротивление стали, что приводит к снижению потерь на вихревые токи. Кроме того, кремний способствует укрупнению зерна, увеличению μ и снижению H_c . Положительное влияние кремния на магнитную проницаемость стали обусловлено также уменьшением констант магнитной анизотропии и магнитострикции. Различают нелегированную и легированную электротехническую сталь. В нелегированных электротехнических сталях $\text{Si} < 0,4\%$.

В легированных электротехнических сталях Si до 5%. Она изготавливается в виде листов и лент толщиной до 1 мм.

Кремнистая сталь обладает магнитной анизотропией подобно чистому железу:

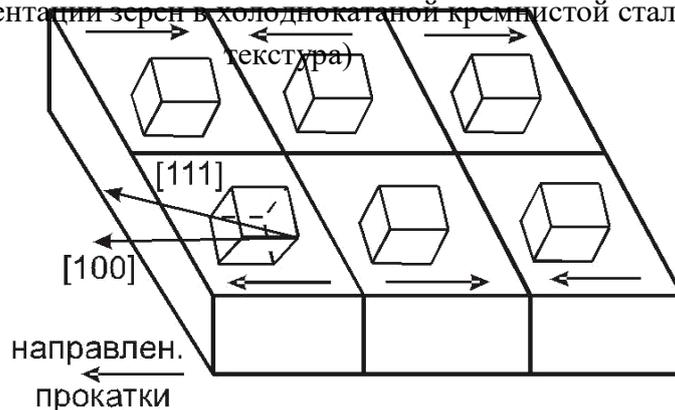
направление легкого намагничивания (100), а трудного - (111).

Свойства стали значительно улучшаются за счет образования магнитной текстуры при холодной прокатке и последующего отжига в водороде. При прокатке получают преимущественную ориентацию зерен (текстуру деформации), а при последующем отжиге (900...1000°C) в процессе рекристаллизации - крупнозернистую структуру с ориентировкой зерен осями легкого намагничивания в направлении прокатки. Получается так называемая ребровая текстура (рис. 50).

Текстурированная сталь анизотропна. Вдоль направления прокатки у стали более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис. Применение текстурированной стали позволяет снизить массу и габариты сердечников силовых трансформаторов на 20...25%, а радиотрансформаторов до 40%.

Пермаллой -это сплав железа с никелем. Различают низконикелевые (Ni до 50%) и высоконикелевые пермаллои. На рис. 51 показаны зависимости μ , H_c и ρ от содержания никеля.

Рис. 50. Схема ориентации зерен в холоднокатаной кремнистой стали (ребровая



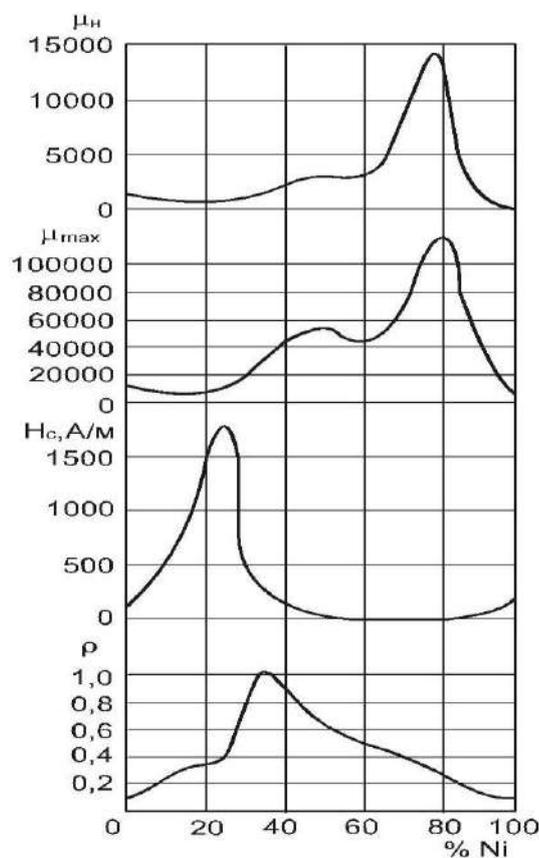


Рис. 51. Зависимость магнитных свойств пермаллоев от содержания никеля

Маркировка пермаллоев: 45Н, 50Н, 42НС, 50НХС, 76НХС, 79НМ, 50НП, 65НП и т.д. Цифры показывают содержание никеля в процентах. Буквенные обозначения: Н - никель, Х - хром(1-3%), С - кремний(1-2%), Д - медь (5-14%), М - молибден(3-5%); П - с прямо-угольной петлей гистерезиса.

Высокочастотные магнитомягкие материалы

К высокочастотным магнитомягким материалам относятся **магнитодиэлектрики и ферриты**. На высоких частотах магнитные потери обусловлены, главным образом, релаксационными и резонансными явлениями. Для оценки допустимого частотного диапазона материала вводят понятие **критической частоты** $f_{кр}$, при которой $\text{tg}\delta = 0,1$.

Частотные диапазоны:

- низкие радиочастоты - НЧ ($f_{кр} = 0,1 \dots 20$ МГц);
- высокие радиочастоты - ВЧ ($f_{кр} = 30 \dots 300$ МГц);
- высокие (< 800 МГц) и сверхвысокие (≥ 800 МГц) частоты.

В диапазоне звуковых и ультразвуковых частот в средних и сильных полях и $\mu_n = 400 \dots 2000$ применяют рулонные холоднокатные кремнистые стали ($h = 25 \dots 30$ мкм) и пермаллои ($h = 2 \dots 3$ мкм).

Магнитодиэлектрики -это композиции из порошков высокопроницаемого магнитного материала (альсифера, карбонильного железа, пермаллоя) с диэлектрической связкой (фенолформальдегидной смолой, полистиролом, стеклом и т.д.).

Ферриты -это оксидные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Наиболее

широкое применение нашли ферриты со структурой природного минерала шпинели. Общая формула ферритов



где Me - 2-валентный металл (Ni, Mg, Zn, Mn и др.).

Электропроводность ферритов обусловлена процессами электронного обмена между ионами переменной валентности. В ферритах-шпинелях кроме ионов 3-валентного железа Fe^{3+} всегда имеются ионы 2-валентного Fe^{2+} . Концентрация ионов 2-валентного железа - основной фактор, влияющий на электропроводность ферритов. В феррите железа Fe_3O_4 концентрация Fe^{2+} максимальна, $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. В феррогранатах концентрация Fe^{2+} ничтожно мала, $\rho = 10^{10}$ Ом·м. Чем больше в феррите Fe^{2+} , тем ниже ρ . Концентрация электронов в феррите неизменна, но с ростом температуры растет интенсивность теплового движения ионов, электроны Fe^{2+} чаще перескакивают к Fe^{3+} , понижая их валентность, концентрация Fe^{2+} возрастает, ρ уменьшается по экспоненте

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp[\Delta_0/kT],$$

где ρ_0 - постоянная величина для данного феррита; $\Delta_0 = 0,1 \dots 0,5$ эВ - энергия активации электропроводности.

Снижение ρ ослабляет магнестриксию и анизотропию, что способствует увеличению μ_n , поэтому ферриты с высокой μ_n имеют более низкие значения ρ . У ферритов одной группы (по составу) с повышением μ_n снижается точка Кюри T_k (рис. 54).

Особенности ферритов:

- по электрическим свойствам ферриты являются диэлектриками или полупроводниками p -типа ($\rho = 0,1 \dots 10^{10}$ Ом·м);
- малые магнитные потери;
- радиопрозрачны;
- по механическим свойствам - это керамика, обладающая высокой твердостью и хрупкостью;
- для ферритов характерна сильная зависимость свойств от состава, дисперсности, режима спекания, температуры эксплуатации и др.

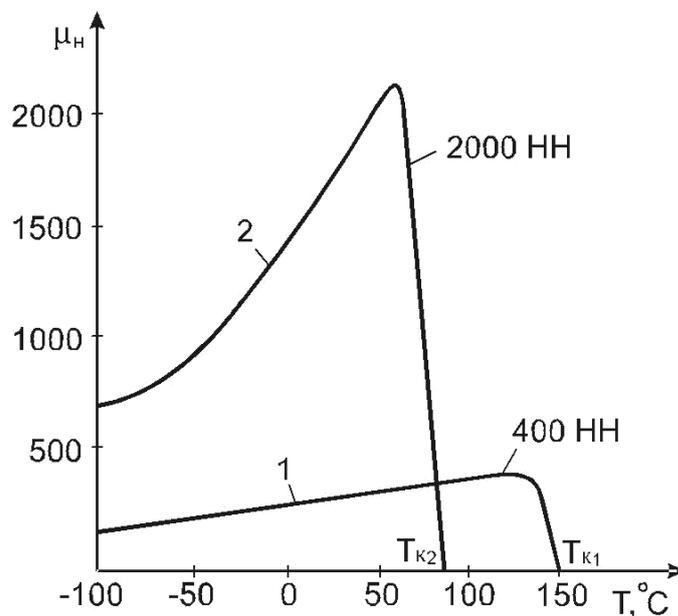


Рис. 54. Температурная зависимость начальной магнитной проницаемости μ_n никель-цинковых ферритов

Ферриты получают в виде поликристаллической керамики и монокристаллов. Для получения ферритов с заданными магнитными свойствами предъявляются жесткие требования к химической чистоте и дисперсности исходного сырья. В отличие от электрокерамики ферритовая керамика не содержит стекловидной фазы; все процессы массопереноса при синтезе соединений и спекания изделия происходят путем диффузии в твердой фазе. Формирование изделий осуществляется либо прессованием (предварительная пластификация водным раствором поливинилового спирта), либо литьем под давлением (пластификатор и связующее - парафин).

Изделия подвергают спеканию при температуре 1200...1400°C в контролируемой газовой среде. В процессе спекания завершаются химические реакции в твердой фазе, материал приобретает определенную структуру и магнитные свойства.

Вопросы для самоконтроля:

1. Как добиться высоких магнитных свойств в электротехнической стали?
2. Какие магнитомягкие материалы имеют высокую магнитную проницаемость в слабых полях?
3. В чем различие свойств высоконикелевых и низконикелевых пермаллоев?
4. Какая термообработка обеспечивает высокую магнитную проницаемость пермаллоя 79НМ?
5. Какую структуру имеют магнетодиэлектрики и где они используются?
6. В чем состоит физическая сущность магнетизма ферритов?
7. Какие ферриты применяются на радиочастотах?
8. На каких физических эффектах основано применение ферритов СВЧ-диапазона?

Лекция 14. Магнитные материалы специального назначения – 1 час

Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) находят широкое применение в устройствах автоматики, вычислительной технике, в аппаратуре телеграфной связи.

Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, соответствующих различным направлениям остаточной магнитной индукции. Именно благодаря этой особенности их можно использовать в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации. Запись и считывание информации осуществляются переключением сердечника из одного магнитного состояния в другое с помощью импульсов тока, создающих требуемую напряженность магнитного поля.

Двоичные элементы на магнитных сердечниках с ППГ характеризуются высокой надежностью, малыми габаритами, низкой стоимостью, стабильностью характеристик. Они обладают практически неограниченным сроком службы, сохраняют записанную информацию при отключенных источниках питания. Они имеют коэффициент прямоугольности $\alpha = V_r/V_m = 0,9$ и высокое быстродействие.

Наибольшее применение получили магний-марганцевые и литиевые ферриты. Наилучшие характеристики у ферритов состава $MgO \cdot 3MnO \cdot 3Fe_2O_3$, а также у полиферритов, содержащих дополнительно оксиды цинка, кальция, лития. Ферритам свойственна спонтанная прямоугольная петля гистерезиса. Магнитная текстура формируется непосредственно при охлаждении после спекания в результате магнитострикционных явлений.

Устройства вычислительной техники из ферритов изготавливают в виде тонких пленок и слоистых матриц, что обеспечивает их малые размеры и высокое быстродействие.

Маркировка ферритов и их применение. Ферриты 10ВТ, 30 ВТ, 56 ВТ применяются в переключающих устройствах, $T_k = 115 \dots 160^\circ C$. Ферриты 100 ВТ, 140 ВТ, 180 ВТ - в запоминающих устройствах $T_k = 160 \dots 230^\circ C$. Расшифровка: цифры показывают значение коэрцитивной силы, А/м; а буквы ВТ - вычислительная техника.

Магнитострикционные материалы. Применение магнитострикционных материалов основано на явлении магнитострикции и магнитоупругом эффекте, т.е. изменении размеров тела в магнитном поле и магнитных свойств материала при механических воздействиях.

Для магнитострикционных материалов важно иметь высокие значения магнитных характеристик: константы магнитострикции λ_s , индукции насыщения B_s , коэрцитивной силы H_c , температуры Кюри T_k (чем выше T_k , тем выше стабильность характеристик). Добротность магнитострикционного материала характеризует магнитострикционная постоянная $a = \sigma/B$, σ - напряжение, Па; B - индукция, Тл, соответствующая этому напряжению.

Значение магнитострикционной постоянной α определяют в процессе намагничивания сердечника при его фиксированной деформации (сердечник предварительно упруго сжат). Чем выше характеристики, тем лучше материал.

Лекция 15. Магнитотвердые материалы – 2 часа

Основные характеристики магнитотвердых материалов

Основными характеристиками магнитотвердых материалов являются:

- максимальная магнитная энергия \mathcal{E}_{\max} , кДж/м³;
- коэрцитивная сила H_c , кА/м;
- остаточная индукция B_r , Тл;
- коэффициент выпуклости η_v , характеризующий форму кривой размагничивания ($\eta_v < 1$).

Чем больше H_c , B_r и ближе η_v к единице, тем выше максимальная энергия магнита.

Чтобы получить высокую коэрцитивную силу H_c , необходимо затруднить процесс размагничивания. Наиболее эффективный способ - создать в сплаве после термообработки структуру с однодоменными неравноосными удлиненными частицами ($l_1/l_2 \geq 20$) сильно-магнитной фазы в слабомагнитной матрице. В таких сплавах размагничивание путем вращения векторов намагниченности ферро-магнитных включений затруднено.

Магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т.е. иметь рабочий воздушный зазор. Магнитный поток в зазоре возникает после предварительного намагничивания материала в сильном магнитном поле. Свойства магнитотвердых материалов характеризуются кривой размагничивания, которая является участком предельной гистерезисной петли (рис. 59). При наличии зазора за счет свободных полюсов создается внутреннее размагничивающее поле H , которое уменьшает индукцию внутри магнита до значения B . Положение рабочей точки, характеризующей состояние магнитного материала, зависит от величины зазора.

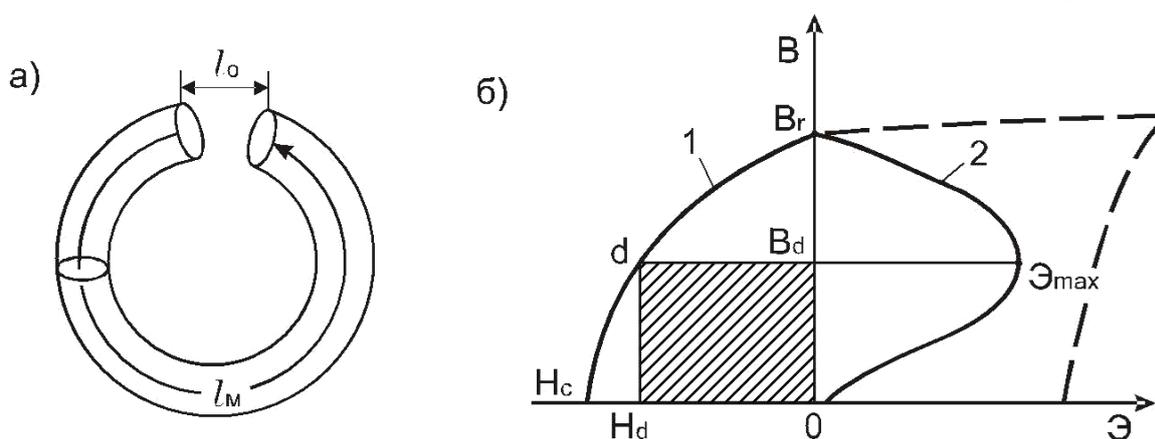


Рис. 59. Схема постоянного магнита (а), кривые размагничивания (1) и магнитной энергии (2) в воздушном зазоре постоянного магнита (б)

При отсутствии внешнего магнитного поля микроскопические токи отсутствуют. В соответствии с законом полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = 0.$$

Это справедливо для любого контура интегрирования, в частности, вдоль пути по всей оси магнита. Отсюда следует, что

$$H \cdot l_M - H_0 \cdot l_0 = 0,$$

где l_M и l_0 - длины магнита и воздушного зазора соответственно; H_0 - напряженность магнитного поля в зазоре.

Важнейшее требование к постоянному магниту - наличие максимальной удельной энергии \mathcal{E}_0 в рабочем зазоре:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{B_0 \cdot H_0}{2}$$

Пренебрегая потоком рассеяния и учитывая, что магнитная индукция непрерывна, запишем

$$B \cdot S_M = B_0 \cdot S_0.$$

Следовательно,

$$\mathcal{E} = \frac{B \cdot H}{2}.$$

Чем меньше длина магнита и относительно больше зазор, тем больше размагничивающее поле полюсов и меньше B .

На рис. 59 представлена кривая, выражающая зависимость удельной энергии \mathcal{E} от значения индукции B .

При замкнутом магните $B = B_r$, энергия равна нулю, так как $H = 0$. Если зазор между полюсами очень велик, то индукция $B = 0$, $H = H_c$ и энергия также равна нулю.

Кривая магнитной энергии в зазоре имеет явно выраженный максимум, соответствующий точке «d» на рабочем участке кривой размагничивания. Эта точка определяет оптимальный зазор, обеспечивающий \mathcal{E}_{\max} .

$$\mathcal{E} = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{2} \tag{5.10}$$

Графически энергию \mathcal{E}_{\max} в определенном масштабе можно представить площадью прямоугольника со сторонами B_d и H_d .

$$\eta_g = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{B_r \cdot H_c}$$

С увеличением прямоугольности петли гистерезиса η_g приближается к единице.

Основные группы магнитотвердых материалов

К основным группам магнитотвердых материалов относятся:

- литые высококоэрцитивные сплавы;

- магниты из порошков;
- магнитотвердые ферриты;
- деформируемые магнитотвердые сплавы;
- магнитотвердые сплавы на основе редкоземельных металлов (РЗМ).

Литые высококоэрцитивные сплавы - это системы Fe - Ni - Al - Co (Ni - до 35%, Al - до 16%, Co - до 40%), модифицированные различными добавками (4...8%Cu, 5...8%Ti). Они используются во многих приборах и имеют хорошее сочетание свойств и стоимости. Высококоэрцитивное состояние этих сплавов обусловлено дисперсионным распадом при термической обработке.

Их подвергают высокотемпературной закалке с 1200...1280°C для получения пересыщенного твердого раствора с последующим отпуском при температуре 600...650°C. В результате твердый раствор претерпевает дисперсионный распад на две фазы: одна из фаз по составу близка к чистому железу и является сильномагнитной; её выделения имеют форму пластинок или стержней однодоменной толщины, другая фаза, состоящая из Ni и Al - слабомагнитная. Таким образом, получается структура из слабомагнитной матрицы и однодоменных магнитных включений. Намагничивание такой структуры происходит за счет поворота магнитных моментов доменов. Легирующие добавки Cu, Ti, Nb не только улучшают магнитные свойства, но и обеспечивают лучшую повторяемость характеристик. Магнитные свойства сплавов значительно улучшаются, если создать кристаллическую и магнитную текстуру.

Кристаллическая текстура создается кристаллизацией сплава, залитого в форму, с направленным теплоотводом в магнитном поле. При этом образуется т.н. столбчатая структура, длина таких кристаллов достигает 300 мм. Ось кристалла совпадает с направлением легкого намагничивания.

Магнитная текстура создается термомагнитной обработкой-охлаждением сплава при термообработке в сильном магнитном поле с напряженностью $H > 1200$ кА/м. При этом достигается упорядоченное расположение пластинчатых выделений сильномагнитной фазы, которые своими осями легкого намагничивания ориентируются в направлении поля. Текстурированный материал магнитно анизотропен. Для создания магнитной текстуры содержание кобальта в сплаве должно быть не менее 24%.

Создание кристаллической и магнитной текстур приводит к улучшению всех характеристик H_c , B_r , \mathcal{E}_{\max} , коэффициент выпуклости η_v . В табл. 25 даны характеристики некоторых литых сплавов.

Очень высокими магнитными свойствами обладают монокристаллические материалы ЮНДК35Т5АА, ЮНДК40Т8АА (символ АА означает монокристаллическую структуру).

К недостаткам литых сплавов относятся их повышенная хрупкость и высокая твердость, что исключает все виды обработки кроме шлифования. Этим недостаткам лишены порошковые сплавы системы Fe-Ni-Al.

Таблица 25

Основные характеристики магнитотвердых литых сплавов

Сплав	Δ_{\max} , 3 кДж/м	H_c , кА/м	B_r , Тл	Особенности структуры
ЮНДК18	9,7	55	0,9	магнитоизотропен
ЮНДК35Т5Б	16	96	0,9	магнитная текстура
ЮНДК35Т5БА*	36...40	110	1,02	магнитная и кристаллическая текстуры
ЮНДК40Т8		>145		магнитная текстура

* символ А в конце маркировки означает - столбчатая структура, у всех остальных - равноосная. Сплав ЮНДК40Т8 применяется при повышенном воздушном зазоре.

Магниты из порошков получают путем спекания порошковисходных металлов Fe, Ni, Al при 1300°C в атмосфере аргона. Порошки используют мелкодисперсные и желательнo с неравноосными частицами. После прессования проводится термообработка такая же, как для литых сплавов. Из порошков изготавливают мелкие и точные по размеру магниты. По магнитным свойствам они уступают литым (табл. 26).

Таблица 26

Основные характеристики магнитов из порошков

Сплав	Δ_{\max} , кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл	Магнитная анизотропия
ММК6	5	44	0,65	нет
ММК7	10,5	44	0,95	есть
ММК11	16	118	0,7	есть

Магнитотвердые ферриты получают спеканием окислов Fe₂O₃, BaO, CoO. По магнитным свойствам (табл. 27) они уступают литым сплавам, но как диэлектрики (по высокому удельному сопротивлению), могут использоваться в качестве постоянных магнитов в высокочастотных электромагнитных полях без тепловых потерь. Значение H_c у ферритов выше, чем у литых сплавов из-за наличия в структуре однодоменных неравноосных частиц оксида и большой константы кристаллографической анизотропии.

Таблица 27

Магнитные свойства бариевых и кобальтовых ферритов

Сплав	Химическая формула	Эта _х , 3 кДж/м	H _с , кА/м	B _r , Тл
1БИ	BaO·6Fe ₂ O ₃	3,2	128	0,2
3БА		12,4	168	0,4
3БА2		10,4	240	0,35
2КА	CoO·6Fe ₂ O ₃	7,2	130	0,3

В маркировке: И - изотропный; А - анизотропный. Магнитная текстура у анизотропных ферритов создается путем прессования порошков в сильном магнитном поле с $H > 800$ кА/м.

Бариевые ферриты имеют высокую структурную и магнитную стабильность. Кобальтовые ферриты уступают бариевым по основным свойствам. Достоинство кобальтовых ферритов - высокая температурная стабильность свойств.

Деформируемые магнитотвердые сплавы - сплавы на основе Fe, Co, Cr, Cu. Основные свойства сплавов представлены в табл. 28. Магниты изготавливают в виде проволоки и тонких лент. Хорошие магнитные свойства получают после термообработки, состоящей из закалки и старения, в результате образуются мелкодисперсные ферромагнитные фазы в слабомагнитной матрице.

Таблица 28

Свойства магнитотвердых деформируемых сплавов

Сплав	Эта _х , 3 кДж/м	H _с , кА/м	B _r , Тл	Магнитная анизотропия
Хромко (30ХК25) 30%Cr, 25%Co, Fe-ост.	7,7	56	0,8	нет
	16,3	62	0,9	есть
Викаллой (52КФА) 52%Co, 14%V, Fe-ост.	8,8	28	0,8	есть
Кунифе 60%Cu, 20%Ni, 20%Fe	6,7	47	0,55	есть
Платинакс (ПлК78) 78%Pt, 22%Co	40	320	0,8	-

В процессе пластической деформации возможно формирование кристаллической текстуры, что дополнительно улучшает магнитные свойства. Платинакс обладает наиболее высокими магнитными

свойствами, из него изготавливают микроминиатюрные магниты для высокоточной ответственной аппаратуры.

Магнитотвердые сплавы на основе редкоземельных металлов

Магнитотвердые материалы этой группы весьма перспективны. Редкоземельные металлы образуют с металлами переходных групп бинарные соединения, из которых наибольший интерес представляют соединения типа RCO_5 и R_2Co_{17} , где R - редкоземельный элемент. Указанные соединения имеют гексагональную структуру. Им присуща сильная кристаллографическая магнитная анизотропия, высокая точка Кюри. Константа анизотропии K на два порядка выше, чем у железа. Из редкоземельных металлов используют самарий (Sm), празеодим (Pr), иттрий (Y), неодим (Nd). Свойства некоторых промышленных сплавов на основе РМЗ представлены в табл. 29.

Таблица 29

Магнитные свойства промышленных сплавов на основе РЗМ

Сплав	Состав, %	$\mathcal{E}_{\max}, \text{кДж/м}^3$	$H_c, \text{кА/м}$	$B_r, \text{Тл}$
КС37	37 Sm, 63 Co	55	1300	0,77
КС37А		65	1000	0,82
КСП37	37 (Sm+Pr), 63 Co	65	800	0,85
КСП37А		80	640	0,9

А - анизотропный.

Технология изготовления магнитов сложная, но это единственный путь достижения исключительно высоких значений магнитной энергии и коэрцитивной силы. Магниты изготавливают из порошков тонкого размла, частицы которых - это монокристаллы с размерами, близкими к размерам домена ($\sim 3 \dots 10$ мкм). Прессование порошков проводится в магнитном поле для получения магнитной и кристаллической текстуры. Последующее спекание в вакууме или инертной среде, для повышения прочности, плотности, формирования структуры и магнитных свойств.

Например, технология производства порошка из сплава $Nd_2Fe_{14}B$ с использованием скоростной закалки расплава ($v_{охл} = 10^6$ °C/c) позволила получить частицы удлиненной формы до 200 мкм, повысить плотность и получить кристаллическую текстуру. Изготовленные по этой технологии магниты имеют: $\mathcal{E}_{\max} = 400$ кДж/м³; $H_c = 800 \dots 1000$ кА/м; $B_r = 1,05 \dots 1,35$ Тл.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы имеют прямоугольную петлю гистерезиса их применение?
2. Какие материалы обладают сильно выраженной магнитострикцией и где они используются?
3. Назовите основные характеристики магнитотвердых материалов.

4. Перечислите основные группы магнитотвердых материалов.
5. Каким образом можно получить высокие значения основных характеристик магнитотвердых материалов?

Лабораторно – практические занятия (ЛПЗ) – 10 часов

Лабораторная работа № 1. Испытание воздуха на пробой при различной форме электродов – 2 часа

Цель работы: исследовать зависимость разрядных напряжений от формы электродов и расстояния между ними; определить влияние полярности на величину разрядного напряжения несимметричных электродов.

Общие сведения

К внешней изоляции установок высокого напряжения относят изоляционные промежутки между электродами (проводами линий, шинами распределительных устройств и т. д.), в которых роль основного диэлектрика выполняет воздух.

Целесообразность использования диэлектрических свойств воздуха в энергетических установках разных классов напряжения объясняется меньшей стоимостью и сравнительной простотой создания изоляции. Но электрическая прочность воздуха при нормальных условиях относительно невелика: при расстояниях между электродами более 1 см она не превосходит 25÷30 кВ/см, т. е. в 10÷30 раз меньше, чем у твердых диэлектриков.

Пробой газообразных диэлектриков всегда начинается с ударной ионизации. Для начала ударной ионизации необходимо, чтобы кинетическая энергия электронов, разгоняемых электрическим полем, стала больше энергии ионизации. Ударную ионизацию начинают электроны как более подвижные и имеющие большую длину свободного пробега, чем ионы. Электроны начинают ионизировать молекулы газа при достижении скорости свыше 1000 км/с. При достаточной напряженности электрического поля ударную ионизацию могут производить и ионы. Для завершения пробоя воздуха, проявляющегося внешне в виде искры, проскакивающей между электродами, необходимо, чтобы процесс увеличения количества свободных зарядов в данном искровом промежутке привел к достаточной плотности свободных зарядов. Это достигается благодаря некоторым вторичным явлениям, сопутствующим ударной ионизации, например, вследствие выхода дополнительных свободных электронов из катода под действием фотонов, излучаемых атомами газа, возбужденными под влиянием соударений с электронами (излучение из начальной лавины). Имеет место также фотоионизация молекул газа.

Электрическая прочность газов зависит от их плотности (рис. 3.1).

В правой части графика рост электрической прочности объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов, а в левой части – уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа.

Второй закономерностью механизма ударной ионизации является зависимость электрической прочности газа от расстояния между электродами (рис. 3.2).

При малых расстояниях ударная ионизация затрудняется вследствие малой общей длины пробега свободных зарядов. Это сказывается более сильно при особо малых расстояниях, сопоставимых с длиной свободного пробега, среднее значение которого при нормальных барометрических условиях составляет 10^{-5} см. При достаточно больших расстояниях между электродами (от 1 см и выше) влияние расстояния сильно снижается.

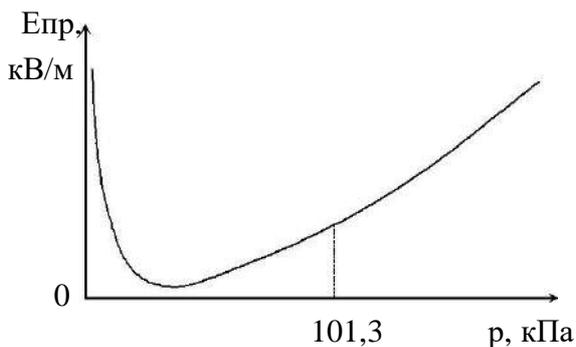


Рис. 3.1. Зависимость электрической прочности воздуха от давления

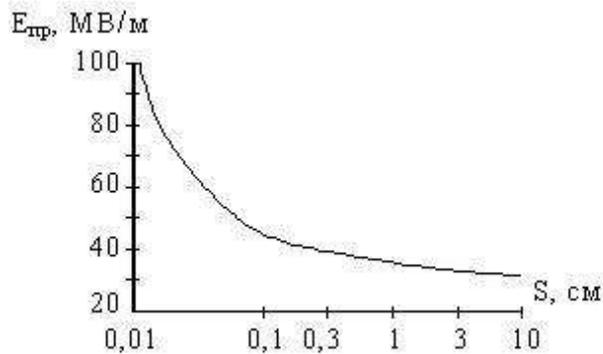


Рис. 3.2. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле

Одновременное влияние на пробой газов плотности p и расстояния между электродами S привело к установлению зависимости пробивного напряжения от произведения этих величин (закон Пашена). Согласно этому закону, для газов существует определенное минимальное пробивное напряжение (для воздуха оно составляет около 300 В).

В реальных условиях изоляционные расстояния по воздуху в установках высокого и сверхвысокого напряжения получаются большими, достигая нескольких метров. Размеры же электродов (провода, шины и др.), выбранных по плотности тока, механической прочности и другим критериям, оказываются сравнительно небольшими, и радиусы кривизны их поверхностей составляют не более единиц сантиметров. При таких соотношениях размеров электродов и межэлектродных расстояний электрические поля во внешней изоляции получаются резко неоднородными. В неоднородных полях имеются места с повышенной напряженностью, где и начинается ударная ионизация при сравнительно небольшом напряжении на электродах.

Создание внешней изоляции в таких условиях сильно затрудняется. Во-первых, при резко неоднородных полях во внешней изоляции возможен коронный разряд, сопровождающийся большими потерями энергии в воздушных линиях напряжением 110 кВ и выше. Во-вторых, электрическая прочность воздуха в таких полях значительно ниже. Поэтому с ростом номинального напряжения габариты и стоимость внешней изоляции возрастают настолько, что сооружение установок с внешней изоляцией на напряжение выше некоторого предельного становится экономически нецелесообразным.

Таким образом, увеличения номинального напряжения электроустановок при неизменности их габаритов можно достичь следующими путями:

- уменьшением степени неоднородности электрических полей (увеличение радиуса кривизны поверхностей электродов; применение полупроводящих покрытий);
- увеличением электрической прочности газового промежутка (повышенные и пониженные давления; разделение газового промежутка толщиной S на n соединенных последовательно промежутков толщиной S/n).

3.2. Описание испытательной установки

Исследование разрядных напряжений воздушных промежутков производится с помощью стенда, схема которого показана на рис. 3.3.

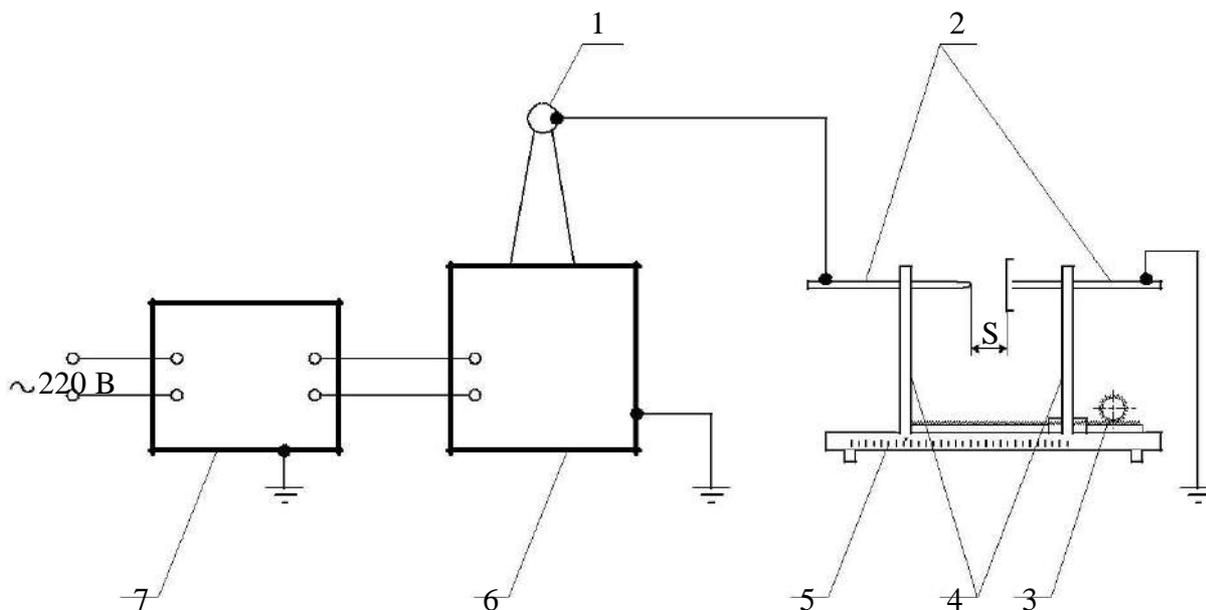


Рис. 3.3. Схема стенда для определения разрядных напряжений воздушных промежутков: 1 – высоковольтный вывод; 2 – электрод; 3 – шестерня; 4 – стойки; 5 – мерная линейка; 6 – источник испытательного напряжения; 7 – пульт управления

К высоковольтному выводу 1 источника испытательного напряжения 6 присоединяется один из электродов 2, изготовленных из нержавеющей стали и закрепленных в стойках 4 из диэлектрического материала; другой электрод заземляется. Расстояние между электродами определяется с помощью мерной линейки 5 и изменяется вращением шестерни 3 посредством изолирующего стержня. Включение и отключение испытательного напряжения, а также регулирование его величины производится с помощью пульта управления 7, установленного снаружи огражденной зоны испытаний.

В качестве источника испытательного напряжения применяется аппарат АИД-70, предназначенный для испытания изоляции выпрямленным электрическим напряжением величиной до 70 кВ, а также синусоидальным напряжением частотой 50 или 60 Гц величиной до 50 кВ.

Порядок выполнения работы

1. Получить зависимость разрядного напряжения от длины разрядного промежутка при напряжении промышленной частоты, изменяя длину разрядного промежутка S (рис. 3.3) в следующих пределах:

- для электродов типа «плоскость–плоскость» $S=1\div 4$ см (8÷9 точек через 0,5 см);
- для электродов типа «игла–плоскость» $S=1\div 5$ см (10÷12 точек через 1 см);
- для электродов типа «игла–игла» $S=1\div 6$ см (10÷12 точек через 1 см);
- для шаровых электродов при одинаковом диаметре шаров $S=1\div 4$ см (6÷8 точек через 0,5 см).

Эксперимент производится в следующем порядке:

а) вставить электроды 2 (рис. 3.3) в изолированные стойки 4, при помощи мерной линейки 5 установить необходимое расстояние между ними и закрепить их в этом положении;

б) закрыть двери высоковольтной камеры; в) вставить спецключ от аппарата в

переключатель 1 пульты управления (см. рис. 1.2) и включить необходимый вид испытательного напряжения, при этом должен загореться зеленый сигнал 5; при работе на выпрямленном напряжении, во избежание выхода из строя источника, а также для правильного измерения величины испытательного напряжения, установить тумблер 10 в положение «х. ход»;

г) вращая ручку регулятора 9 испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора;

д) включить испытательное напряжение кнопкой 7, при этом должен загореться красный сигнал 6;

е) приступить к эксперименту, плавно повышая напряжение со скоростью не более 1÷2 кВ/с; в момент пробоя воздушного промежутка и по-сле пробоя заметить показания киловольтметра 3;

ж) не дожидаясь отключения аппарата под действием защиты, выключить испытательное напряжение кнопкой 8, затем, вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора;

и) для каждого расстояния опыт повторяется три раза и разрядное напряжение определяется как среднеарифметическое результата трех измерений;

к) после окончания цикла испытаний и выполнения требований п. ж) отключить аппарат от сети спецключом, установив его в положение «0»; контроль за снятием остаточного емкостного заряда с испытуемого объекта необходимо осуществлять, наблюдая за показанием киловольтметра аппарата – стрелка киловольтметра должна стоять на числовой от-метке шкалы «0»;

л) необходимо визуально убедиться в том, что замыкатель источника касается высоковольтного вывода, затем, открыв дверь высоковольтной камеры, заземляющей штангой коснуться электродов, после чего можно производить замену электродов.

Полученные значения разрядных напряжений $U'_{\text{ПР}}$, кВ, привести к нормальным атмосферным условиям (давление 760 мм рт.ст., температура 20⁰С) по формуле

$$U_{\text{ПР}} = \frac{U'_{\text{ПР}}}{\sqrt{\delta}}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – разрядное напряжение при нормальных условиях, кВ; $U'_{\text{ПР}}$ – разрядное напряжение в условиях опыта, кВ; δ – относительная плотность воздуха, определяемая по формуле

$$\delta = \frac{0,386 p}{t + 273}, \quad (3.2)$$

где p – барометрическое давление в условиях опыта, мм рт.ст.; t – температура воздуха в условиях опыта, ⁰С.

Далее рассчитываются средние значения разрядных напряженностей, кВ/см, по формуле

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{S}, \quad (3.3)$$

где S – расстояние между электродами, см.

Результаты измерений и расчетов сводятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	Тип электрода	S, см	U' _{пр} , кВ _{эф}				U _{пр} , кВ _{мах}	E _{пр} , кВ/см
			1	2	3	Сред- нее		

По результатам измерений для всех исследованных типов электродов строятся графики зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами $U_{пр}=f(S)$ на одном чертеже, и график зависимости напряженности от расстояния между электродами $E_{пр}=f(S)$ – на другом чертеже.

2. Исследовать влияние полярности при электродах типа «игла– плоскость» и получить зависимость $U_{пр}$, $E_{пр}$ от длины разрядного промежутка для электродов этого типа при постоянном напряжении, изменяя расстояние между электродами в пределах $S = 1 \div 5$ см ($5 \div 6$ точек через 0,5 см).

Эксперимент производится в соответствии с п. 1 настоящего подраздела. Результаты измерений и вычислений сводятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	Игла отрицательная				S, см	Плоскость отрицательная				E _{пр} , кВ/см	
	U' _{пр} , кВ					U' _{пр} , кВ					
	1	2	3	Среднее		1	2	3	Среднее		

По полученным данным строятся графики $U'_{пр}=f(S)$ и $E_{пр}=f(S)$ на двух чертежах.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- принципиальную электрическую схему аппарата АИД-70;
- основные расчетные формулы;
- таблицы результатов измерений и вычислений, графики;
- выводы о влиянии расстояния между электродами, формы электродов и их полярности на величину разрядного напряжения.

Контрольные вопросы

- Какая форма электродов и при каких условиях дает максимальную стабильность электрической прочности воздуха?
- При каком расположении шаровых разрядников относительно земли пробивное напряжение воздуха будет иметь наибольшее значение и почему?
- Как влияет на пробивное напряжение воздуха влага на поверхности шаровых разрядников и почему?
- Как сказывается наличие пыли в воздухе на его электрическую прочность?
- Как можно повысить электрическую прочность воздуха?
- Нарисуйте кривую Пашена для газов.
- Что означает выражение (3.2)?
- Как может быть выражена объемная ионизация частиц газа?

9. При какой полярности электродов «игла–плоскость» пробивное напряжение воздуха максимально и минимально?

10. Объясните влияние барьера на разрядные напряжения между стержнем и плоскостью при положительной и отрицательной полярности стержня.

Лабораторная работа № 2 Измерение емкости и диэлектрических потерь высоковольтной изоляции– 2 часа

Цель работы: изучить один из методов контроля состояния высоковольтной изоляции посредством измерения диэлектрических потерь мостом переменного тока типа «Тангенс-2000»; схемы подключения и конструкции измерителя «Тангенс-2000»; приобрести навыки производства измерений; определить зависимости тангенса угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости и удельных потерь энергии в диэлектрике для образцов изолирующих материалов и изоляционных конструкций высокого напряжения.

Общие сведения

Экономические показатели работы энергосистем во многом зависят от надежности изоляции оборудования. Чтобы существенно снизить вероятность аварийных повреждений изоляции, используется система контроля качества изоляционных конструкций путем различных испытаний.

Применяемые при всех видах испытаний методы можно классифицировать следующим образом:

- испытания повышенным напряжением с пробоем дефектной изоляции;
- испытания при рабочем или повышенном напряжении с малой вероятностью пробоя – измерения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и характеристик частотных разрядов при напряжениях, близких к рабочему;
- неразрушающие методы: измерения $tg\delta$, сопротивления утечки емкостных характеристик при низких напряжениях; неэлектрические методы контроля.

Общий недостаток испытаний повышенным напряжением состоит в том, что дефектная изоляция необратимо разрушается и ее, как правило, уже нельзя отремонтировать. Поэтому для контроля изоляции дорогих и сложных устройств электроснабжения часто применяются электрические методы неразрушающих испытаний, которые базируются на двух основных явлениях, возникающих в диэлектриках под действием слабых электрических полей: электропроводности и электрической поляризации. Контроль изоляции по $tg\delta$ является одним из наиболее распространенных. Как показывает опыт, по значению $tg\delta$ можно установить наличие в изоляции различных по характеру дефектов, таких как увлажнение, воздушные (газовые) включения с процессом ионизации, неоднородности и загрязнения. Однако дефекты одного и того же типа, но разных размеров неодинаково влияют на результаты измерения $tg\delta$ изоляции и поэтому обнаруживаются с различной точностью. Объясняется это тем, что измеряемый $tg\delta$ изоляции, состоящей из нескольких различных материалов, представляет собой средневзвешенную величину. Для простейшей модели изоляции в виде плоского конденсатора с дефектным участком (рис. 4.1) выражение для измеряемой тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta_{изм}$ определится как

$$tg\delta_{изм} = \frac{\epsilon_H V_H tg\delta_H + \epsilon_D V_D tg\delta_D}{\epsilon_H V_H + \epsilon_D V_D}, \quad (4.1)$$

где ϵ_n, ϵ_d — диэлектрические проницаемости нормального и дефектного участков изоляции соответственно; V_n, V_d — объемы участков с нормальной и дефектной изоляцией; $\operatorname{tg}\delta_n, \operatorname{tg}\delta_d$ — значения тангенса угла потерь для нормальной и дефектной изоляции.

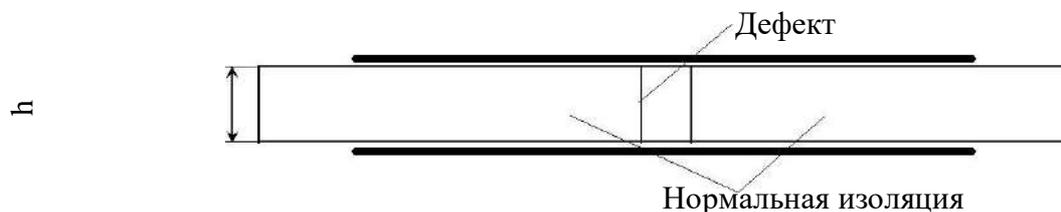


Рис. 4.1. Изоляция с дефектным участком

Во многих случаях с появлением дефекта диэлектрическая проницаемость изоляции изменяется мало и можно считать $\epsilon_n \approx \epsilon_d$.

При испытаниях некоторых видов оборудования $\operatorname{tg}\delta$ изоляции измеряют при нескольких напряжениях в интервале $(0,5 \div 1,5)U_{\text{раб}}$, и строят зависимость $\operatorname{tg}\delta = f(U)$, по которой иногда можно судить не только о наличии, но и о характере дефектов в изоляции (рис. 4.2).

4.2. Описание испытательной установки

В качестве испытательной установки в лабораторной работе используется измеритель тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) и емкости высоковольтной изоляции (С) Тангенс-2000. Технические данные измерителя, его описание и руководство по эксплуатации приведены в п. 1.2.1.

Измерения производятся по «прямой схеме», показанной на рис. 4.3. Испытательное напряжение с выхода генератора, расположенного в блоке управления 8 подается через повышающий трансформатор 7 на блок преобразователя 6 и объект измерения. В качестве объекта измерения служит образец диэлектрика 3, помещенный между электродами 2 и 4. Нижний электрод 4 закреплен на изоляторе 5. Результаты измерения передаются с блока преобразователя в блок управления с помощью радиомодема 1, где преобразовываются в форму, доступную для отображения на дисплее.

Для работы блока преобразователя в полевых условиях применяется встроенный блок питания на аккумуляторах; в лабораторных условиях для этой цели используется внешний блок питания с напряжением 10,6 В.

1

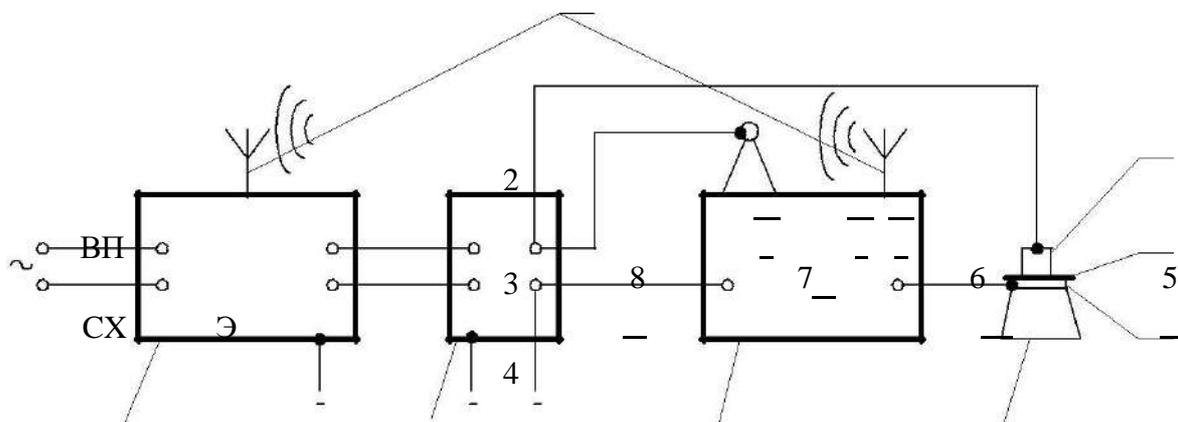


Рис. 4.3. Схема испытательной установки: 1 – радиомодем; 2, 4 – электроды; 3 – образец диэлектрика; 5 – изолятор; 6 – блок преобразователя; 7 – повышающий трансформатор; 8 – блок управления

Порядок выполнения работы

Наложить временное защитное заземление на высоковольтный вывод повышающего трансформатора (в лабораторных условиях для этого следует использовать заземляющую штангу), присоединить испытуемый образец к измерителю по «прямой» схеме (рис. 4.3). При сборке схемы испытаний обязательным является требование исключения касания соединительных кабелей, которые будут находиться под испытательным напряжением при включении схемы, заземленных предметов.

Снять защитное заземление с высоковольтного вывода повышающего трансформатора. С момента снятия временного заземления измерительная схема считается находящейся под напряжением и приближение к ее высоковольтной части запрещено.

Установить выключатель питания БП в положение «I», закрыть дверь высоковольтной камеры. При этом индикатор «ВКЛ» блока преобразователя начинает работать в прерывистом режиме (мигать).

Установить выключатель питания 1 (см. рис. 1.8) БУ в положение «I». При этом на дисплей 3 блока управления выводится текст заставки

```
Тангенс 2000
Зав. №: XXXXXXXXX
```

где XXXXXXXX – заводской номер данного экземпляра измерителя. Дождаться включения светодиода «ПРЕОБР» 4. Если в течение более десяти секунд светодиод не загорится, необходимо проверить качество подключения внешней антенны к блоку управления и взаимную ориентацию антенны и блока преобразователя.

Проконтролировать напряжение батареи внутреннего источника напряжения БП, для чего кратковременно нажать на клавишу «Убат» 13.

На дисплее появится текст

```
Убат=XX.X V
```

где XX.X – напряжение, В. Для нормальной работы БП это значение должно быть не менее 8,0 В.

Значение напряжения батареи удерживается на дисплее в течение трех секунд, после чего на дисплей блока управления выводится текст заставки.

Измерение может производиться как без ввода сопутствующих параметров (п. 1.5.1), так и с их вводом для создания в последующем протокола испытаний. Для выполнения измерения без ввода сопутствующих параметров нажать клавишу «ИЗМЕРЕНИЕ» 15, при этом БУ переходит в режим подготовки к измерению, на дисплее появляется текст

```
Введите Uисп (V)
<=10000: XXXXX
```

где XXXXX – предыдущее значение $U_{исп}$.

При необходимости задания величины $U_{исп}$, отличающейся от предыдущего значения, индицируемого на дисплее, нажатием цифровых клавиш «0» – «9» ввести необходимое

```
Cx=XX.XXXX нФ
tg=XXX.XXX %
```

значение испытательного на-пряжения. Нажатие клавиши «ОТМЕНА»*10* прекращает редактирование с сохранением предыдущего значения.

При задании величины $U_{исп}$ необходимо учитывать ограничения, при-веденные в таблице на лицевой панели блока управления (см. рис. 1.8). При контроле объекта с неизвестными параметрами необходимо выпол-нить оценочное измерение при $U_{исп}= 1000$ В.

При завершении ввода нового значения $U_{исп}$ нажать клавишу «ИЗ-МЕРЕНИЕ», на дисплее появится текст

```
Включить Uисп?
(Д/Н)
```

Для выхода из режима измерения и возврата в меню нажать клавишу «НЕТ» *10*. Для подтверждения начала измерения нажать клавишу «ДА». При этом загорается индикатор « $U_{вых}$ »*8*, индикатор «СОСТОЯНИЕ»*2* начинает мигать, на дисплее появляется текст

```
Подготовка к
измерению 1
```

Далее измерение выполняется автоматически и не требует участия оператора. Ход процесса автоматического измерения можно наблюдать по состоянию органов индикации блока управления.

По окончании цикла измерения и автоматического уменьшения $U_{исп}$ до нуля индикаторы « $U_{вых}$ » и «СОСТОЯНИЕ» гаснут, измеритель переходит в состояние индикации результата, на дисплей выводится результат измерения.

Если сохранение полученного результата не требуется, то следует вернуться в исходное состояние нажатием клавиши «ВВОД»*10*.

Для сохранения полученного результата измерений в памяти результатов, по окончании измерения нажать клавишу «ПАМЯТЬ»*12*, на дис-плее появится текст

```
Сохранить рез-т
в памяти? (Д/Н)
```

Для записи результата измерения в память результатов нажать клавишу «ДА». При этом результат заносится в очередную свободную страницу памяти результатов; если свободные страницы в памяти результа-тов исчерпаны, то очередной результат записывается на место самого старого результата. Измеритель по окончании записи в память переходит к исходному состоянию. Просмотр содержимого памяти результатов осуществляется из меню. При нажатии на клавишу «ПАМЯТЬ» на дис-плее выводится дата последнего сохраненного результата измерения

```
ДД. ЧС/МС/20ГГ
ЧЧ:ММ:СС 0
```

Память результатов организована в виде пронумерованных (от 0 до 599) страниц, на каждую из которых записывается один результат измерения. Каждый результат содержит семь пронумерованных (от 0 до 6) записей. Для просмотра записей на одной странице используются клавиши «0»-«6»: «0» – дата и время; «1» – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь; «2» – испытательное напряжение и температура объ-екта; «3» – тип и заводской номер объекта; «4» – схема измерения и зо-на контроля; «5» – личный номер оператора; «6» – номер страницы. Для перемещения по памяти результатов к предыдущей или следующей странице используются

клавиши «<>» и «>>».

После окончания измерений следует: выключить питание блока управления кнопкой 1 (см. рис. 1.8); открыть дверь высоковольтной камеры; выключить питание блока преобразователя, установив переключатель 3 (см. рис. 1.10) в положение «0»; наложить временное защитное заземление на высоковольтный вывод повышающего трансформатора. После этого можно производить замену образца диэлектрика.

где C_x – емкость образца диэлектрика, пФ; h – толщина образца, см; S – площадь верхнего электрода (рис. 4.3), см² (диаметр электрода $d = 4,7$ см).

Удельные потери $P_{уд}$ в единице объема диэлектрика, Вт/см³, определяются по формуле

$$P_{уд} = \frac{P}{V} = \frac{U^2 \text{ ИСП } \omega C_x \text{tg} \delta}{h S}, \quad (4.4)$$

где P – потери в диэлектрике, Вт; V – объем образца диэлектрика, см³; $U_{исп}$ – напряжение, при котором производилось измерение, В; ω – угловая частота тока, рад/с; $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, в абсолютной величине; C_x – ёмкость образца диэлектрика, Ф.

Угловая частота тока, рад/с, определяется по формуле

$$\Omega = 2 \pi * f, \quad (4.5)$$

где $f = 50$ Гц – частота тока питающей сети.

Данные измерений и вычислений заносятся в табл. 4.1.

По данным табл. 4.1 построить зависимости: $\text{tg} \delta = f(U)$; $C_x = f(U)$; $\epsilon = f(U)$; $P_{уд} = f(U)$.

Таблица 4.1

Данные измерений и вычислений

Номер измерения	Наименование образца диэлектрика	Опытные данные				Расчетные данные	
		h , см	$U_{исп}$, В	C_x , пФ	$\text{tg} \delta$	ϵ	$P_{уд}$, Вт/см ³

Содержание отчета

Отчет должен содержать :

- описание цели работы;
- схемы подключения измерителя «Тангенс-2000»;
- расчетные формулы;
- таблицу измеренных и вычисленных величин;
- графики;
- заключение о качестве испытанных материалов и конструкций.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют основные виды потерь в диэлектрике и зависимость их от внешних факторов?
2. Какими показателями оценивают величину диэлектрических потерь

в изоляции?

3. Почему у полярных диэлектриков в зависимости $\text{tg}\delta=f(t^0\text{C})$ наблюдается максимум?
4. Как влияет напряжение, подводимое к изоляции, на точность измерений?
5. В каком диапазоне температур рекомендуется производить измерение $\text{tg}\delta$ и почему?
6. Перечислите достоинства метода измерения $\text{tg}\delta$ под рабочим напряжением.
7. Каковы преимущества измерения $\text{tg}\delta$, а не самих потерь?

Лабораторная работа № 3. Испытание трансформаторного масла – 2 часа

Цель работы: изучить методы определения вязкости и температуры вспышки минерального трансформаторного масла; исследовать зависимости вязкости масла от температуры; изучить методики определения электрической прочности масла по ГОСТ 982–80.

Общие сведения

Основные области применения нефтяных электроизоляционных масел следующие:

- маслonaполненные трансформаторы;
- масляные выключатели;
- высоковольтные силовые кабели;
- бумажно-масляные конденсаторы;
- высоковольтные изоляторы (вводы).

В трансформаторах, выключателях и конденсаторах масло является средой, пропитывающей волокнистую изоляцию и заполняющей пространство между отдельными конструктивными элементами, создающими масляные промежутки, разделенные слоями твердого материала (масляно-барьерная изоляция). В кабелях масло играет в основном роль пропитывающего материала. В трансформаторах, по сравнению с другими областями применения, особенно велика охлаждающая роль масла. В масляных выключателях масло является средой, в которой при разрыве цепи погашается электрическая дуга. Вследствие теплового воздействия дуги происходит интенсивное разложение масла с образованием большого количества газообразных продуктов, в частности, водорода.

По своему происхождению нефтяные электроизоляционные масла разного назначения принципиально не отличаются друг от друга, но удовлетворение специфических требований работы в том или ином изделии заставляет прибегать к разным режимам технологии получения масел, а иногда и отбирать масла, изготовленные из нефти определенного месторождения.

Нормативные значения показателей качества, объемы и периодичность испытаний электроизоляционных масел регламентируются положениями действующих ПТЭ [2], ПУЭ [3] и Норм испытания электрооборудования [4], а также приводятся в инструкциях заводоизготовителей

электрических аппаратов и в методических указаниях по эксплуатации трансформаторных масел: РД 34.43.105-89. Значения основных показателей качества трансформаторных масел приведены в приложении Б.

Определение состояния качества жидких диэлектриков выполняется в подавляющем большинстве случаев с применением стандартизированных методик:

- ГОСТ 6433.5–84. Диэлектрики жидкие. Отбор проб;
- ГОСТ 2517–85. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб;
- ГОСТ 6581–75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний;
- ГОСТ 5985–79. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа;
- ГОСТ 7822–75. Масла нефтяные. Метод определения растворенной воды;

- ГОСТ 1547–84. Масла и смазки. Метод определения наличия воды;
- ГОСТ 981–75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления;
- ГОСТ 20287–92. Нефтепродукты. Метод определения температуры застывания;
- ГОСТ 6356–75. Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле;
- ГОСТ 33–82. Нефтепродукты. Метод определения кинематической
- расчет динамической вязкости;
 - ГОСТ 6307–75. Нефтепродукты. Метод определения наличия водорастворимых кислот и щелочей;
 - ГОСТ 2917–76. Масла и присадки. Метод определения коррозионного воздействия на металлы;
 - ГОСТ 3900–85. Нефтепродукты. Метод определения плотности;
 - ГОСТ 6370–83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей;
 - ГОСТ 17216–71. Промышленная чистота, классы чистоты жидкостей;
 - ГОСТ 10121–76. Масло трансформаторное селективной очистки. Технические условия;
 - ГОСТ 982–80. Масла трансформаторные. Технические условия.

Помимо отечественных стандартов рекомендуется при проведении контроля за состоянием качества электроизоляционных жидкостей применять международные стандарты и публикации международной технической комиссии (МЭК):

- МЭК 296. Спецификация на нефтяные изоляционные масла для трансформаторов и выключателей;
- МЭК 422. Руководство по эксплуатации нефтяных изоляционных масел в электрооборудовании;
- МЭК 474. Метод определения стабильности против окисления ингибированных нефтяных изоляционных масел;
- МЭК 475. Методы отбора проб жидких диэлектриков;
- МЭК 814. Определение воды в электроизоляционных жидкостях автоматическим кулонометрическим титрованием методом Карла Фишера;
- МЭК 970. Методы определения содержания частиц в электроизоляционных жидкостях;
- МЭК 1125. Углеводородные электроизоляционные жидкости. Метод определения стабильности против окисления.

На основании результатов испытаний по приведенным выше методам делается вывод о пригодности использования масел в электроустановках, либо о необходимости замены, очистки или регенерации электроизоляционной жидкости:

- значение пробивного напряжения является критерием надежности работы масла по обеспечению требуемой изоляции в электрических аппаратах;
- значение кислотного числа является критерием степени старения масла и служит для оценки предполагаемого срока службы, а также является основным критерием замены адсорбента в термосифонных фильтрах трансформаторов или эффективности регенерации масла с помощью специального оборудования;
- значение влагосодержания является критерием подготовленности масла к заливу в электрооборудование, а также служит для определения причин ухудшения диэлектрических свойств эксплуатационных масел и (или) характеристик твердой изоляции электрооборудования;
- значение $tg\delta$ является основным критерием оценки диэлектрических свойств и совместимости масел при смешении, а также служит для определения степени старения и наличия в жидких диэлектриках различных химических загрязнений (продуктов разложения и старения конструкционных материалов и др.);
- значение стабильности против окисления масел является критерием оценки

предполагаемого срока их службы и устойчивости к старению;

- значение температуры застывания масла является основным критерием его низкотемпературных свойств;
- значение температуры вспышки является критерием фракционного состава масла, а также служит для обнаружения в оборудовании процессов разложения масла (термического или электрического);
- значение кинематической вязкости при разных температурах является критерием подвижности масла и служит для оценки эффективности его работы в качестве охлаждающей среды в электрических аппаратах;
- значение содержания водорастворимых кислот (ВРК) в масле является критерием степени его старения;
- значение содержания антиокислительной присадки в масле является критерием степени его старения, а также служит для оценки предполагаемого срока службы масла;
- наличие осадков или растворенного шлама в масле является основным критерием необходимости его замены или регенерации;
- наличие механических примесей в масле является критерием определения причин ухудшения диэлектрических свойств и необходимости его очистки.

Описание испытательных установок

Универсальный вискозиметр типа ВУ (вискозиметр Энглера)

Вискозиметр типа ВУ (рис. 5.1) состоит из латунного резервуара 11 со сферическим дном и алюминиевой ванны 10. В резервуар заливается испытываемая жидкость 7, в ванну – масло или вода 5 для более равномерного нагрева испытываемого масла.

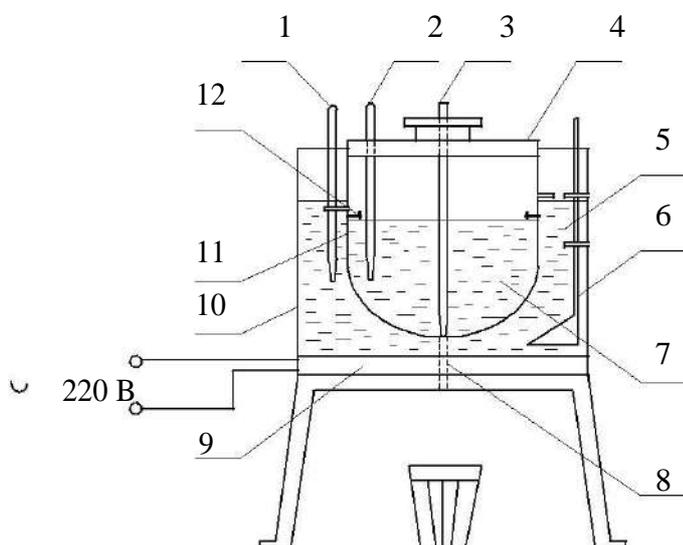


Рис. 5.1. Схема вискозиметра типа ВУ: 1, 2 – термометры; 3 – стержень; 4 – латунная крышка; 5 – масло или вода; 6 – мешалка; 7 – испытываемая жидкость; 8 – сточная трубка; 9 – нагревательный элемент; 10 – алюминиевая ванна; 11 – латунный резервуар; 12 – штифт

Ко дну резервуара припаяна калиброванная сточная трубка 8 из нержавеющей стали с отполированной внутренней поверхностью.

Резервуар закрывается пустотелой латунной крышкой 4 с двумя сквозными отверстиями: боковое служит для установки термометра 2 для измерения температуры испытуемой жидкости; центральное – для стержня 3, закрывающего отверстие сточной трубки.

На внутренней стороне резервуара 11 укреплены три штифта 12, служащие указателем продольного уровня жидкости и позволяющие проверить горизонтальность установки прибора.

Алюминиевая ванна 10 снабжена зажимом для крепления термометра 1, служащего для измерения температуры в ванне, и кронштейном для мешалки 6, служащей для перемешивания заливаемой в ванну тер-мостатной жидкости.

Объем испытуемой жидкости, вытекающей через сточную трубку, измеряется мерной колбой. Прибор имеет электрический подогрев (нагревательный элемент) 9.

*Прибор для определения температуры вспышки
масла типа ПВНЗ*

Прибор ПВНЗ (рис. 5.2) состоит из латунного стакана 4, заполняемого испытуемым маслом до отметки на внутренней поверхности стакана. Стакан закрыт крышкой 3.

Через крышку стакана проходит термометр 1, на крышке укреплен рычаг 2; при повороте его головки в крышке открывается отверстие, куда автоматически спускается горелка 8, ее пламя соприкасается с парами масла.

Для равномерного нагрева масла латунный стакан находится в воздушной бане (7), а внутри стакана имеется мешалка 6.

Прибор имеет электрический подогрев 5. Регулирование температуры производится с помощью лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР.

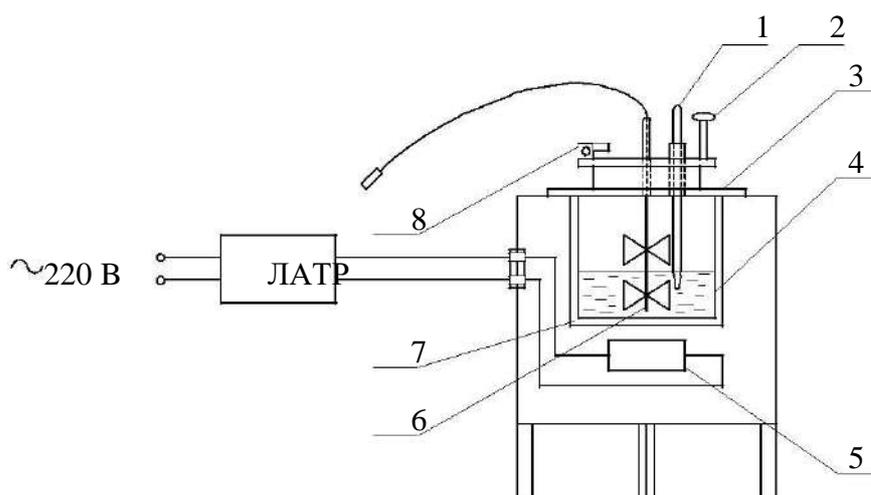


Рис. 5.2. Схема прибора ПВНЗ: 1 – термометр; 2 – рычаг; 3 – крышка; 4 – латунный стакан; 5 – электрический подогрев; 6 – мешалка; 7 – воздушная баня; 8 – горелка

Испытание масла производят в фарфоровом сосуде емкостью 500 см³, в стакане которого вмонтированы латунные электроды (рис. 5.3). Электроды выполнены в виде двух дисков диаметром 25 мм с закругленными краями. Расстояние между электродами (2,5 мм) следует проверять с помощью шаблона не реже одного раза в месяц. Поверхность электродов полирована, и ее состояние в процессе эксплуатации разрядника должно периодически проверяться.

Уровень масла в разряднике должен быть не менее чем на 15 мм выше краев электродов.

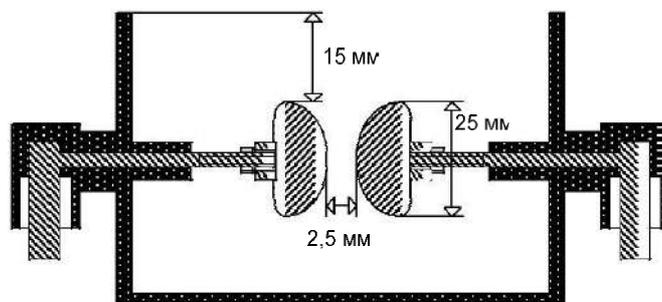


Рис. 5.3. Схема стандартного разрядника

5.3. Порядок выполнения работы

5.3.1. Определение вязкости масла при температуре 20 и 50 °С

Перед заливкой испытуемого масла резервуар прибора 11 (см. рис 5.1) и мерная колба должны быть промыты сухим чистым маслом.

В калиброванное отверстие вставить стержень и заполнить резервуар испытуемым маслом. Прибор установить так, чтобы уровень масла совпадал с тремя отверстиями штифтов.

После этого закрыть крышку резервуара и вставить термометр. Далее при необходимости включить электроподогрев, отрегулировать степень нагрева автотрансформатором типа ЛАТР.

Масло в резервуаре следует перемешивать термометром, осторожно вращая его вокруг стержня крышки резервуара. Термостатную жидкость 5 в емкости 10 следует перемешивать мешалкой 6 (рис. 5.2).

При температуре 17÷18⁰С подогрев выключить и выждать 2–3 мин, в течение которых температура испытуемой жидкости поднимается за счет тепла, отдаваемого термостатной жидкостью.

Установив температуру масла 20⁰С и выдержав ее в течение 2–3 мин, вынуть стержень и одновременно запустить секундомер.

Когда уровень масла в колбе достигнет отметки 200 мл (ободок стакана), остановить секундомер и закрыть стержнем отверстие трубки. Отсчет ведется по нижнему краю мениска, при этом пена в расчет не принимается, луч зрения должен быть перпендикулярен оси колбы.

Измерения производятся для значений температуры 20 и 50⁰С. В целях получения более точных результатов масло из колбы следует перелить в резервуар и повторить измерение еще два раза, после чего вычислить среднее арифметическое времени истечения при указанных температурах. Для построения графика зависимости вязкости масла от температуры производится также однократное измерение вязкости при температуре масла 30÷35⁰С.

Далее, зная водное число прибора – время истечения 200 мл дис-тиллированной воды при 20⁰С в секундах, следует определить вязкость масла ν_{τ} при данной

температуре, условные градусы Энглера, по формуле

$$VY = \frac{\tau_t}{t \cdot V}, \quad (5.1)$$

где τ – время истечения испытуемого масла при заданной температуре, с; $t_v = 50,9$ с – водное число прибора (берется из паспорта прибора).

Для сравнения полученных значений с нормированными значениями кинематической вязкости делается пересчет условных градусов Энглера по формуле

$$1 \text{ град Энглера} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (5.2)$$

Значения кинематической вязкости приведены в приложении Б.

Результаты измерений и расчетов заносятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений и расчетов вязкости масла

Номер опыта	t, °C	□, с				VY _t	
		1	2	3	среднее	град. Энглера	м ² /с

По данным табл. 5.1 построить график зависимости $VY_t = f(t^{\circ}C)$.

Определение температуры вспышки масла

Залить испытуемое масло в стакан прибора, вставить в крышку стакана термометр и включить электронагреватель, подавая на него напряжение не более 120 В. После этого по термометру следует наблюдать за повышением температуры масла, непрерывно перемешивая масло мешалкой.

Начиная с температуры 120⁰С, нагрев ведется со скоростью 4⁰С в минуту; регулирование температуры производится при помощи автотрансформатора при тщательном перемешивании масла. Пробы на вспышку производятся через каждые 2⁰С; начиная с температуры на 5⁰С ниже ожидаемой температуры вспышки, пробы производятся через каждые 1⁰С. В момент вспышки над отверстием крышки при опускании горелки возникает слабое синеватое пламя.

Наименьшая температура, при которой происходит вспышка смесей паров масла с воздухом, называется температурой вспышки масла.

Определение электрической прочности трансформаторного масла

Перед испытанием необходимо обеспечить отсутствие загрязнений и влаги в разряднике, а также систематически проверять состояние поверхности его электродов и расстояние между ними с помощью шаблона.

Чистый и сухой разрядник перед началом испытаний промывается 2–3 раза испытуемым маслом. При промывке струю масла направляют на электроды таким образом, чтобы смыть с них остатки масла и угля после предыдущего испытания. После промывки сосуд наполняют

испы-туемым маслом. Лить масло следует осторожно, небольшой струей, направляя ее на стенку сосуда, чтобы в масле образовалось минимальное количество пузырьков воздуха.

После заливки маслу дают отстояться 10÷15 мин для того, чтобы удалить пузырьки воздуха.

Определение пробивного напряжения и электрической прочности масла (а также других жидких диэлектриков) производится на аппарате типа АИМ-90. Порядок выполнения испытаний следующий:

а) открыть крышку аппарата, установить ячейку с жидким диэлектриком и закрыть крышку;

б) включить кнопку сети «~»; при этом должна загореться подсветка зеленого сигнала, а стрелка измерительного прибора может находиться в одном из следующих положений:

- стрелка измерительного прибора стоит на нуле, горит подсветка желтого сигнала;
- стрелка измерительного прибора находится в движении к нулю (включена кнопка «0»); ● стрелка измерительного прибора стоит не на нуле.

в) включить кнопку «0←») для возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение (если при включении сети она стояла не на нуле); при этом должна загореться подсветка желтого сигнала;

г) включить кнопку «0») для подготовки автоматического возврата стрелки измерительного прибора;

д) по истечении 10 мин после заполнения ячейки жидким диэлектриком включить кнопку высокого напряжения «~», при этом должна загореться подсветка красного сигнала и погаснуть – желтого; измерительный прибор в момент пробоя показывает величину пробивного напряжения диэлектрика;

е) дождаться возврата стрелки измерительного прибора в нулевое положение (после пробоя диэлектрика), при этом должна загореться подсветка желтого сигнала; для последующих испытаний высокое напряжение включать следует не ранее, чем через 5 минут после исчезновения случайно образовавшихся пузырьков воздуха. Для одной пробы жидкого диэлектрика должно быть проведено шесть опытов.

Обработка результатов испытаний производится в соответствии с требованиями ГОСТ 6581–75. Вычисляется среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{пр}$, электрической прочности $\bar{E}_{пр}$, оценивается достоверность результатов по нормированному значению ко-эффициента вариации σ_U .

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения, кВ, определяется по формуле

$$\bar{U}_{пр} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{прi}, \quad (5.3)$$

где $U_{прi}$ – величина пробивного напряжения в i -ом опыте, кВ; n – число опытов.

Среднее арифметическое значение электрической прочности, кВ/мм, определяется по формуле

$$\bar{E}_{пр} = \frac{\bar{U}_{пр}}{S}, \quad (5.4)$$

где $S = 2,5$ мм – расстояние между электродами.

Значение ко-эффициента вариации σ_U определяется по формуле

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{пр i} - \bar{U}_{пр})^2}{n(n-1)}} \quad (5.5)$$

Если значение коэффициента превышает 20 % (при большом разбросе значений пробивного напряжения), то проводится дополнительное испытание с заполнением измерительной ячейки новой порцией масла, взятого из той же пробы. Для последующего расчета коэффициента вариации число пробоев берется равным 12.

Результаты измерения электрической прочности трансформаторного масла считаются удовлетворительными, если коэффициент вариации не превышает 20 % от величины.

После подсчета среднего значения пробивного напряжения на основании предельных допустимых значений показателей качества трансформаторного масла (приложение Б), сделать вывод о пригодности масла для использования в электроустановках различных классов на-пряжения.

Результаты испытания масла заносятся в табл. 5.2

Таблица 5.2

Результаты испытания масла

Номер опыта	$U_{пр},$ кВ	$\bar{U}_{пр},$ кВ	$\bar{E}_{пр},$ кВ/мм

5.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- эскизы использованных в работе приборов и приспособлений;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- график зависимости $V_{Y_t} = f(t^0C)$;
- заключение о пригодности масла для использования в высоко-вольтных установках.

Контрольные вопросы

1. Что такое кислотное число и для чего определяются водное число прибора и температура вспышки масла?
2. При каких электродах пробивное напряжение трансформаторного масла будет выше: двух полусферах диаметром 25 мм с расстоянием между ними 2,5 мм или двух плоских электродах диаметром 25 мм с закругленными краями (радиус закругления 2 мм) с расстоянием между ними 2,5 мм?
3. Как отражается скорость подъема испытательного напряжения на пробивном напряжении трансформаторного масла?
4. Как влияет температура на пробивное напряжение трансформаторного масла?
5. Как влияет характер примесей и степень очистки жидких диэлектриков на их электрическую прочность?
6. Каковы объем и нормы испытаний для изоляционного масла?
7. Как производится очистка и сушка масла?
8. Как производится регенерация масел?

Лабораторная работа № 4. Исследование электрической прочности твердых диэлектриков и явлений разряда по поверхности – 2 часа

Цель работы: ознакомиться с методикой определения электрической прочности твердых диэлектриков; исследовать зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от толщины диэлектрика (или расстояния между электродами) и временем приложения напряжения; изучить явления образования и развития разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика в воздухе.

Общие сведения

Потеря диэлектриком его электроизоляционных свойств с образованием канала высокой проводимости, приводящего к короткому замыканию, называется пробоем.

Для твердых диэлектриков характерны следующие виды пробоев:

- электротепловой (тепловой);
- электрический;
- электрохимический;
- ионизационный;
- перекрытие или поверхностный разряд.

Механизм электротеплового пробоя твердого диэлектрика заключается в его разрушении под влиянием нагревания диэлектрическими потерями, удельное значение которых, Вт/м³, описывается формулой

$$P_{уд} = E f \frac{\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^6}, \quad (6.1)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м; f – частота, Гц; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Твердые диэлектрики являются плохими проводниками тепла. Диэлектрические потери в них, как правило, сильно возрастают с ростом температуры. Если при данном приложении напряжения во внутренних объемах диэлектрика не может установиться тепловое равновесие, то

при достаточно длительном воздействии напряжения произойдет его разрушение: он обуглится или расплавится, что приведет к короткому замыканию электродов – пробую.

Основной физической сущностью электрического пробоя является образование в диэлектрике достаточно сильной электронной лавины из небольшого числа начальных электронов под действием большой напряженности электрического поля. По сравнению с тепловым, электрический пробой развивается за очень короткий промежуток времени ($10^{-7} \div 10^{-8}$ с), необходимо лишь достижение определенной напряженности электрического поля.

Для начала ударной ионизации электронами в диэлектрике необходимо, чтобы электроны при разбеге в электрическом поле приобретали кинетическую энергию, Вт·с, достаточную для разрушения кристаллической решетки

$$w = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2}{2m} E^2 \tau^2, \quad (6.2)$$

где m – масса электрона, кг; v – скорость электрона, м/с; q – заряд электрона, Кл; τ – время, в течение которого электрон проходит путь свободного пробега, с.

Для механизма ударной ионизации характерна зависимость электрической прочности от толщины диэлектрика. При этом чем больше толщина, тем слабее влияет ее увеличение на электрическую прочность. Из-за малой длины свободного пробега электронов в твердых

телах рост электрической прочности с уменьшением толщины может быть замечен только при очень малых толщинах. При сравнительно больших толщинах, характерных для производственных условий применения диэлектриков (сотые доли миллиметра и выше), электрическая прочность при электрическом пробое может практически не зависеть от толщины.

При наличии в структуре диэлектрика газовых (воздушных) включений и при повышении напряжения до пробоя самого твердого диэлектрика начинается ионизация этих включений, в которых напряженность электрического поля всегда будет больше, чем в твердой части. Газы в нормальных условиях имеют электрическую прочность, как правило, меньшую, чем твердые вещества, даже при малых толщинах включений. Ионизация внутренних воздушных пор приводит к увеличению диэлектрических потерь, увеличивая опасность теплового пробоя.

Очаги внутренней ионизации в порах действуют разрушающим образом на твердый (основной) компонент изоляции за счет бомбардировки ионами и электронами, вызывающими эрозию, за счет теплового воздействия и воздействия озона и окислов азота.

Повысить напряженность начала ионизации у пористых материалов можно пропиткой – замещением воздуха другим диэлектриком, например, жидким. Однако жидкость в порах остается электрически более слабым местом: первая стадия пробоя начинается с ионизации в этих порах. Ионизация жидкости, хотя и медленнее, чем воздуха, но все же действует разрушающе.

Перекрытие, или поверхностный разряд, есть пробой окружающей среды по ее границе с твердым диэлектриком, он определяется, в первую очередь, закономерностями пробоя окружающей среды.

На напряжение перекрытия большое влияние оказывает характер распределения потенциала по поверхности электроизоляционной конструкции. Чем равномернее распределяется поверхностная напряженность электрического поля, тем больше при прочих равных условиях напряжение перекрытия. При местной поверхностной электрической перегрузке наступает поверхностная корона, приводящая к еще большей неравномерности распределения потенциала. Большое значение имеет и состояние поверхности твердого диэлектрика. Наличие грязи, влаги на ней приводит к искажению поверхностного распределения потенциала, что снижает напряжение перекрытия. В результате напряженность электрического поля, вызывающего перекрытие, обычно бывает меньше электрической прочности среды между теми же электродами.

Напряжение перекрытия твердых диэлектриков уменьшается с усилением влажности окружающего воздуха вследствие образования на поверхности пленок воды, искажающих распределение потенциала по поверхности, приводящих к местным поверхностным электрическим перегрузкам. В этом отношении не спасает и несмачиваемость поверхности диэлектрика водой.

Напряжение перекрытия увеличивается с увеличением пути поверхностного разряда. С этой целью поверхности изоляционных конструкций, например изоляторов, часто делают ребристыми. На изоляторах наружной установки предусматривают такие ребра, чтобы они хотя бы частично оставались сухими во время дождя. Этим достигается сохранение определенных поверхностного сопротивления и мокроразрядного напряжения (напряжения перекрытия под дождем).

Изделия из неорганических диэлектриков, имеющих достаточную механическую прочность (например, керамические изоляторы), перекрыти-ем в форме искрового разряда не повреждаются, но могут оплавиться или растрескаться при мощном дуговом разряде. В органических диэлектриках при поверхностном разряде может произойти местное обугливание материала, перерастающее при повторных воздействиях в про-водящий след.

Описание испытательной установки

В качестве испытательной установки в лабораторной работе используется аппарат АИД-70. Описание аппарата, принцип его работы и принципиальная электрическая схема представлены в подразд. 1.1.

Схемы подключения оборудования для проведения лабораторной работы показаны на рис. 6.1, 6.2.

Высокое напряжение с высоковольтного вывода 2 источника испытательного напряжения 5 аппарата АИД-70 (принципиальная электрическая схема приведена на рис. 1.3) подается на электрод 3. Между верхним и заземленным нижним электродами 4 помещается образец диэлектрика 7. Управление источником испытательного напряжения осуществляется с пульта управления 6. Пробой образца диэлектрика происходит при малых значениях напряжения, поэтому в схему включен лабораторный вольтметр 1, по которому определяется момент пробоя и пробивное напряжение. Вольтметр включен параллельно первичной обмотке повышающего трансформатора, а напряжение на его зажимах пропорционально напряжению на высоковольтном выводе источника. Зная коэффициент трансформации трансформатора и первичное напряжение, можно определить значение напряжения на испытуемом объекте. Принципиальная схема включения вольтметра показана на рис. 1.4.

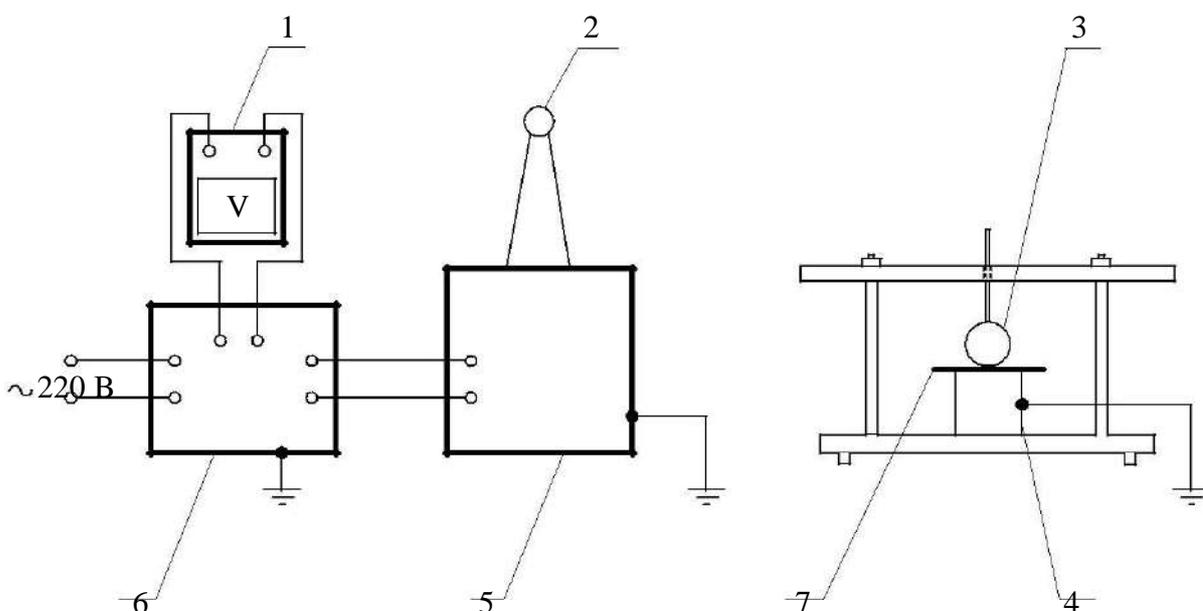


Рис . 6.1. Схема стенда для определения зависимости электрической прочно-сти твердого диэлектрика от его толщины:1– вольтметр;2– высоковольтный вывод;3,4– электроды;5– источник испытательного напряжения;6– пульт управления;7– образец диэлектрика

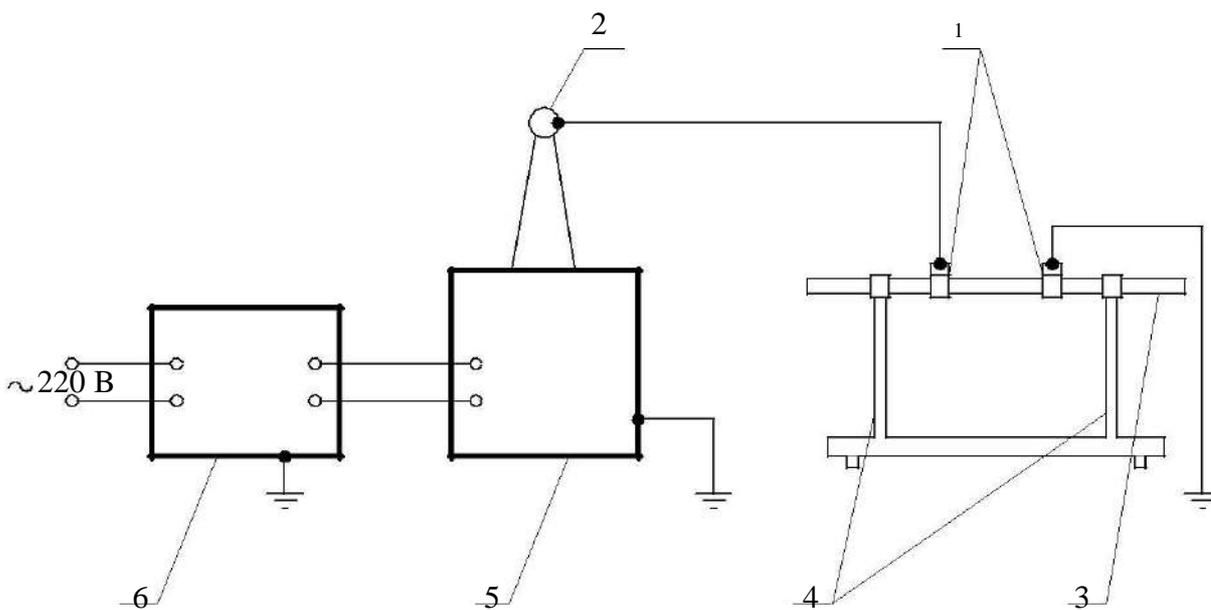


Рис. 6.2. Схема стенда для определения зависимости разрядного напряжения от длины разрядного пути:1– электроды;2– высоковольтный вывод;3– стек-лянная трубка;4– изолирующие стойки;5– источник;6– пульт управления

При определении разрядных напряжений по поверхности твердого диэлектрика (рис. 6.2) напряжение с высоковольтного вывода 2 источни-ка 5 подается на один из электродов 1, расположенных на стеклянной трубке 3, которая закреплена в изолирующих стойках 4. Другой электрод

заземляется. Так как напряжения при этом опыте значительно выше, во избежание выхода из строя лабораторного вольтметра, подключенного к пульту управления 6, его следует отключить кнопкой.

Порядок выполнения работы

1. Определить зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от его толщины.

Испытуемым твердым диэлектриком служит бумага, пропитанная трансформаторным маслом, и сухая бумага (непропитанная). Число листов (толщина) испытуемого диэлектрика задается преподавателем.

Перед испытанием на пробой у каждого образца измеряется толщина не менее, чем в трех точках, и вычисляется среднее ее значение.

Эксперимент производится в следующем порядке:

а) убедиться в том, что к высоковольтному выводу испытательного трансформатора не подключены проводники и оборудование;

б) закрыть двери высоковольтной камеры; в) вставить спецключ от аппарата в переключатель 1 пульта управления (см. рис. 1.2) и включить переменное испытательное напряжение, при этом должен загореться зеленый сигнал 5;

г) вращая ручку регулятора 9 испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора;

д) включить испытательное напряжение кнопкой 7, при этом должен загореться красный сигнал 6;

е) плавно повышая напряжение со скоростью не более 1÷2 кВ/с, установить его по показаниям киловольтметра 3 в пределах 20÷30 кВ; определить коэффициент трансформации испытательного трансформатора по формуле

$$k_T = \frac{U_2}{U_1}, \quad (6.3)$$

где U_2 – показания киловольтметра аппарата АИД-70, В; U_1 – показания контрольного вольтметра, В;

ж) после окончания измерения необходимо ручку регулятора испытательного напряжения, вращая ее против движения часовой стрелки, установить в исходное положение до упора;

и) кнопкой 8 отключить испытательное напряжение и только после этого отключить аппарат от сети спецключом, установив его в положение «0»; контроль за снятием остаточного емкостного заряда необходимо осуществлять, наблюдая за показанием киловольтметра аппарата – стрелка киловольтметра должна стоять на числовой отметке шкалы «0»;

к) необходимо визуально убедиться в том, что замыкатель источника касается высоковольтного вывода, затем, открыв дверь высоковольтной камеры, коснуться его заземляющей штангой;

л) вставить испытуемый образец диэлектрика между электродами после сборки схемы (см. рис. 6.1);

м) далее эксперимент осуществляется в порядке, описанном в п. б÷к. В момент пробоя образца следует заметить показания контрольного вольтметра. Момент пробоя фиксируется по резкому отклонению стрелки контрольного вольтметра в сторону уменьшения напряжения.

Величина пробивного напряжения $U'_{пр}$ определяется по показаниям контрольного

вольтметра, включенного в цепь первичной обмотки высоковольтного трансформатора

$$U_{\text{ПР}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_1}{1000} \quad (6.4)$$

Полученные значения разрядных напряжений $U'_{\text{ПР}}$, кВ, привести к нормальным атмосферным условиям (давление 760 мм рт.ст., температура 20°C) по формуле

$$U_{\text{ПР}} = \frac{U'_{\text{ПР}}}{\delta} \quad (6.5)$$

где $U_{\text{ПР}}$ – разрядное напряжение при нормальных условиях, кВ; $U'_{\text{ПР}}$ – разрядное напряжение в условиях опыта, кВ; δ – относительная плотность воздуха, определяемая по формуле

$$0,386 p$$

$$\delta = \frac{p}{t * 273} \quad (6.6)$$

где p – барометрическое давление в условиях опыта, мм рт.ст.; t – температура воздуха в условиях опыта, °C.

Далее рассчитываются значения пробивной напряженности электрического поля, кВ/мм,

$$E = \frac{U_{\text{ПР}}}{h_{\text{ПР}}} \quad (6.7)$$

где h – средняя толщина n листов используемой бумаги. Данные измерений и вычислений заносятся в табл. 6.1.

По данным табл. 6.1 строятся графики зависимостей $U_{\text{пр}}=f(h)$, $E_{\text{пр}}=f(h)$ в одних осях координат для пропитанной и непропитанной бумаги, на основании которых производится анализ результатов опыта.

Таблица 6.1

Результаты измерений и вычислений

Наименование диэлектрика	Число листов	Средняя толщина h , мм	$U'_{\text{пр}}$ кВmax	$U_{\text{пр}}$, кВmax	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм
Бумага пропитанная	2,4,6				
Бумага непропитанная	2,4,6				

2. Определить зависимость пробивного напряжения от времени его приложения.

Для заданного руководителем образца по данным предыдущего опыта (табл. 6.1) находится значение пробивного напряжения при плавном подъеме напряжений. Затем данный образец выдерживается до пробоя при напряжении, равном $0,9U_{\text{пр}}$, $0,8U_{\text{пр}}$, $0,7U_{\text{пр}}$, и время от начала приложения напряжения до пробоя измеряется секундомером.

Если при каком-то напряжении в течение 5 мин пробоя не произойдет, то испытание прекращают; значение напряжения, соответствующее выдержке времени 5 мин, записывают с отметкой «образец не пробился», а на графике $U_{\text{пр}}=f(t)$ кривую проводят немного выше этой точки.

Эксперимент производится в соответствии с п. 1 (а÷м).

Полученные данные заносятся в табл. 6.2, по которым строится график $U_{пр} = f(t)$.

Таблица 6.2

Результаты измерений и вычислений

Наименование диэлектрика	Средняя толщина на h , мм	$U'_{пр}$, кВ/мм	$U_{пр}$, кВ/мм	Время выдержки t , с

3. Определить зависимость разрядного напряжения от длины разрядного пути в неравномерном поле при диэлектрике с цилиндрической поверхностью.

Определение зависимости разрядного напряжения от разрядного пути производится по стеклянной трубке с электродами (рис. 6.2), расположенными в соответствии с рис. 6.3. Расстояние между электродами следует брать в пределах 1÷6 см (3÷4 точки).

Эксперимент производится в соответствии с п.1 (а÷м). Результаты испытаний, приведенные к нормальным атмосферным условиям по формулам (6.4), (6.5), заносятся в табл. 6.3. При этом исключить пункт е.

Величину разрядного напряжения U_p определяют по формуле

$$U_p \approx 2 U_2, \quad (6.8)$$

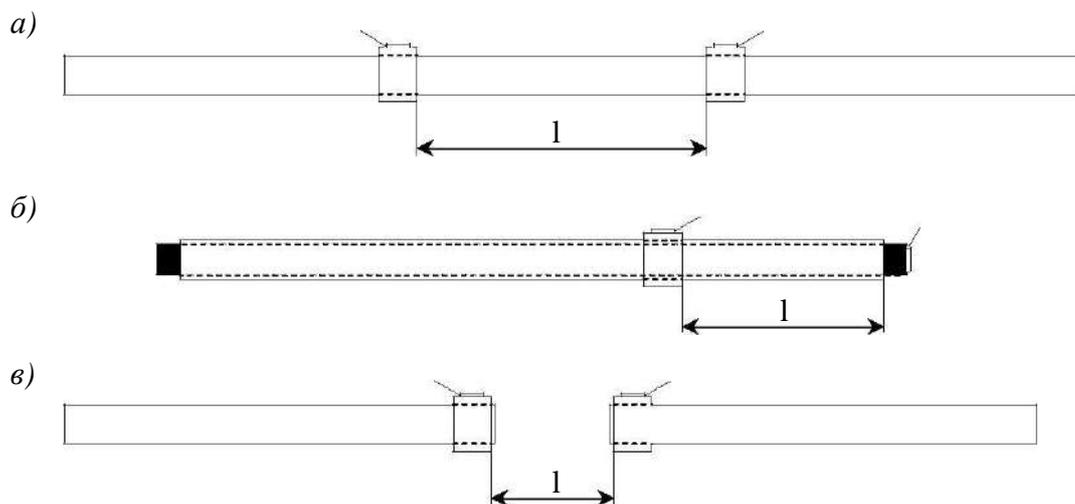


Рис. 6.3. Варианты схем расположения электродов

Результаты измерений и вычислений

Способ расположения электродов на трубке	l , см	$U'P$ max, кВ	UP max, кВ
По рис. 6.3,а			
По рис. 6.3,б			
По рис. 6.3,в			

По данным табл. 6.3 построить на одном чертеже в одном масштабе кривые $U_p = f(l)$ для способов расположения электродов на трубке по рис. 6.3а,б,в и сравнить графики между собой.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- принципиальную электрическую схему аппарата АИД-70;
- основные расчетные формулы;
- таблицы результатов измерений и вычислений, графики;
- заключение о зависимости электрической прочности диэлектрика от его толщины и времени приложения напряжения; разрядного напряжения от длины разрядного пути в неравномерном поле.

Контрольные вопросы

1. Назовите виды пробоев твердых диэлектриков и их характеристики.
2. Как влияют относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ на пробивное напряжение твердого диэлектрика?
3. Объясните влияние толщины твердого диэлектрика на его электрическую прочность.
4. Объясните влияние времени приложения напряжения к диэлектрику на его электрическую прочность.
5. Для чего осуществляют пропитку пористых изоляционных материалов жидкими диэлектриками?
6. Почему напряженность электрического поля, вызывающего перекрытие по поверхности диэлектрика, меньше электрической прочности среды между теми же электродами?

Лабораторная работа № 5. Определение основных характеристик магнитных материалов – 2 часа

Цель работы: ознакомиться с осциллографическим способом снятия характеристик магнитных материалов; определить основные параметры магнитных материалов; выяснить влияние частоты питающего напряжения на величину потерь мощности в магнитных материалах при перемагничивании.

7.1. Общие сведения

Материалы по магнитным свойствам делятся на три группы:

- диамагнетики – это вещества с магнитной проницаемостью меньше единицы. Величина магнитной проницаемости не зависит от напряженности внешнего магнитного поля;
- парамагнетики – это вещества с магнитной проницаемостью больше единицы, также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля;

– магнетики – это вещества, у которых магнитная проницаемость на-
много больше единицы и зависит от величины напряженности внешнего магнитного поля.

Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри материала областей, называемых доменами, у которых магнитные моменты электронов в этой области ориентированы взаимно параллельно. Явление образования доменов без приложения напряженности внешнего поля носит название самопроизвольной (спонтанной) намагниченности.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитный поток такого тела равен нулю, так как отдельные домены в теле ориентированы в различных направлениях.

При воздействии внешнего магнитного поля процесс намагничивания сводится к следующему:

- росту доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением внешнего поля;
- повороту векторов магнитных моментов доменов в направлении сил внешнего поля (процесс ориентации).

При завершении ориентации всех доменов в направлении сил внешнего поля в материале наступает магнитное насыщение. Процесс намагничивания ферромагнитных материалов можно графически охарактеризовать зависимостью

$$B=f(H), \quad (7.1)$$

где B – магнитная индукция, Гс (Тл); H – напряженность магнитного поля, Э (А/м).

Для всех ферромагнетиков эта зависимость имеет сходный характер (рис. 7.1).

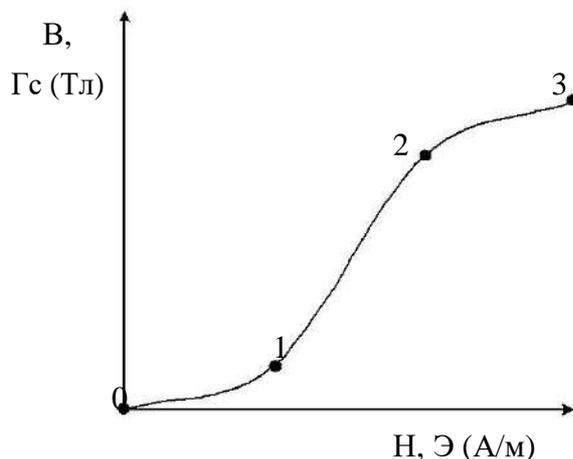
Участок 0 –1 определяется ростом доменов и смещением границ (начальное намагничивание). Участок 1–2 определяется поворотом доменов под воздействием внешнего магнитного поля. Участок 2–3 – магнитное насыщение.

Другой характеристикой магнитных свойств материалов служит магнитная проницаемость, которая определяется по формуле

$$\mu = \frac{B}{H\mu_0} \quad (7.2)$$

Беря отношение для различных точек основной кривой (рис. 7.1), можно получить графическую зависимость $\mu=f(H)$ (рис. 7.2).

Рис. 7.1. График зависимости $B=f(H)$



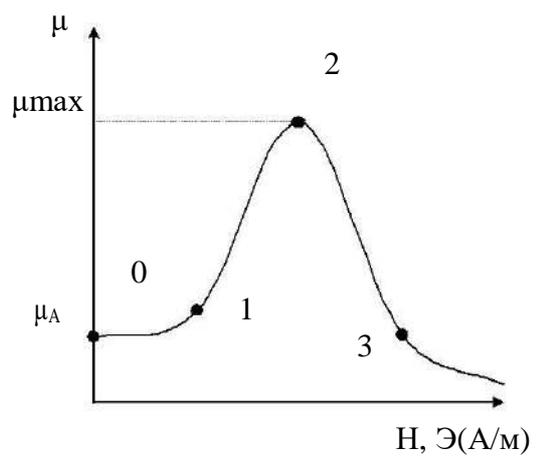


Рис. 7.2. График зависимости $\mu=f(H)$

В лабораторной работе студентам необходимо по величинам H_c , B_{oc} , B_{max} , H_{max} определить тип материала.

Если напряженность магнитного поля изменить от $+H$ до $-H$ и от $-H$ до $+H$, то можно получить семейство петель гистерезиса (рис. 7.4). Соединив вершины петель гистерезиса, можно получить основную кривую намагничивания $0-1-2-3$.

Подобным образом следует строить основные кривые намагничивания в лабораторной работе.

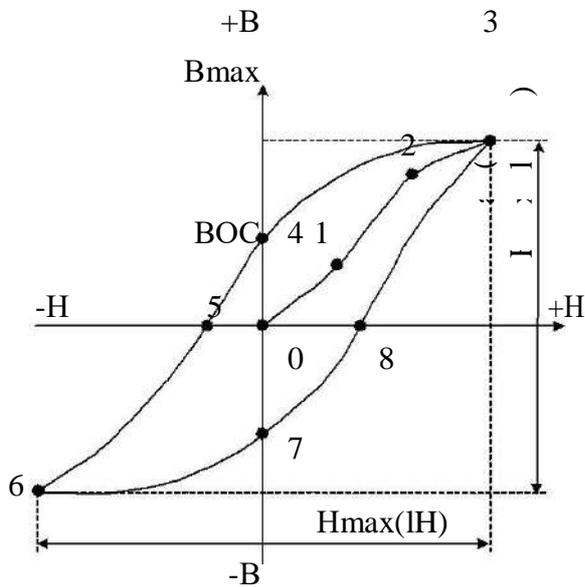


Рис. 7.3. График гистерезисного цикла перемангничивания

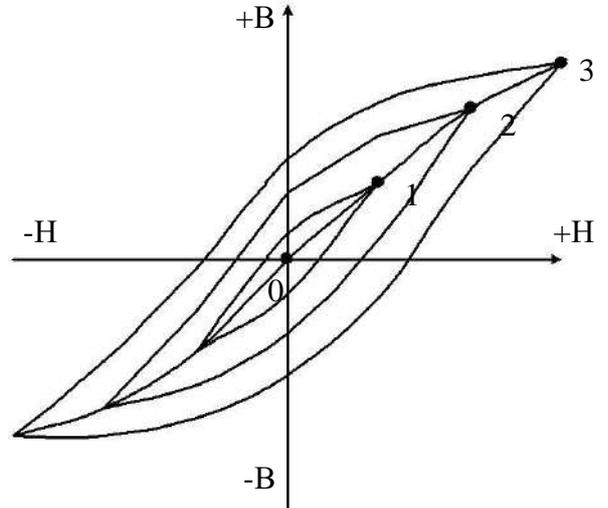


Рис. 7.4. График гистерезисного цикла перемангничивания при различных значениях величин напряженности внешнего магнитного поля

При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются потери энергии в форме тепла. Они обусловлены гистерезисом и динамическими потерями (потерями на вихревые токи). Величина потерь определяется площадью, ограниченной предельной петлей гистерезисного цикла перемагничивания. Удельные потери мощности, Вт/кг, определяются по формуле

$$P_{2B} = \frac{S m_B m_H f \cdot 10^3}{\gamma}, \quad (7.4)$$

где S – площадь предельной петли (определяется с помощью планиметра или подсчетом площади на миллиметровке), мм²; m_B, m_H – мас-штаб по осям «В» и «Н», Тл/мм, (А/м)/мм; γ – плотность испытуемого образца, Гс/см³; f – частота тока, Гц.

7.2. Описание установки

Благодаря своей простоте и наглядности значительное распространение получил осциллографический метод снятия основных характеристик магнитных материалов в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц.

В данной лабораторной работе исследуемый образец подключается по схеме (рис. 7.5) с использованием электронного осциллографа С1-1.

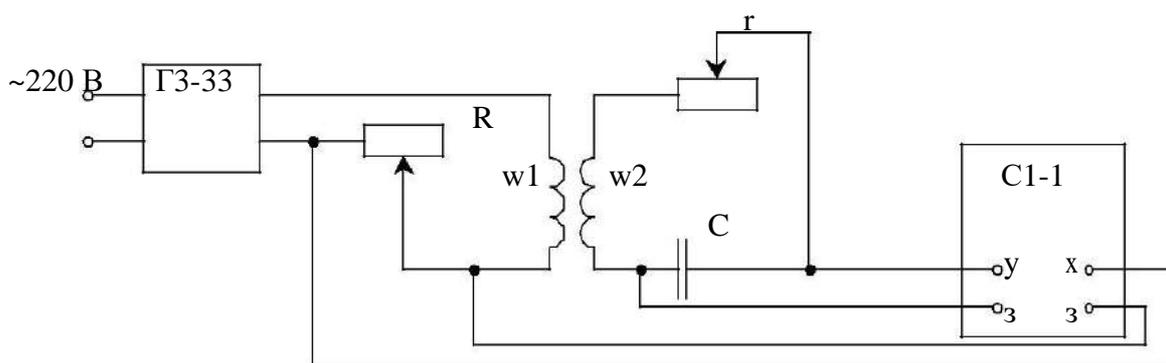


Рис. 7.5. Схема включения приборов

На схеме включения приборов (рис. 7.5) показаны следующие элементы:

- ГЗ-33 – звуковой генератор, с помощью которого подается переменное напряжение с частотой f на намагничивающую обмотку w_1 ;
- R – активное сопротивление, с которого снимается падение напряжения на вход осциллографа «х» (тип сопротивления КМС-6 или Р33, величина $10 \div 100$ Ом);
- r – активное сопротивление (тип сопротивления МСР-60, величина $1 \div 10$ кОм);
- C – емкость, с которой сигнал подается на вход «у» осциллографа (его величина – несколько микрофард);

- С1-1 – электронный осциллограф с двумя входами «х» и «у».

В качестве образца служат ферромагнитные материалы с двумя обмотками с числом витков w_1 и w_2 . Два образца имеют тороидальную форму, один образец прямоугольной формы. Образцы укреплены на плате, концы их обмоток выведены на клеммы. Число витков обмоток, длина средней магнитной силовой линии l , сечение материала образцов S приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Данные для снятия основных характеристик магнитных материалов

Номер образца	Число витков		S, м ²	l, см
	w1	w2		
1	250	555	$1,04 \cdot 10^{-5}$	5,65
2	67	153	$2,5 \cdot 10^{-5}$	4,94
3	600	2000	$1,92 \cdot 10^{-5}$	11,5

Амплитудное значение напряженности поля образца с равномерно навитой намагничивающей обмоткой, А/м, может быть определено по формуле

$$H_m = \frac{w_1 I_m}{l}, \quad (7.5)$$

где I_m – амплитудное значение тока, протекающего по намагничивающей обмотке, А; l – длина средней магнитной силовой линии в образце, м.

Выражение амплитудного значения тока, А, имеет вид

$$I_m = \frac{U_{mR}}{R}, \quad (7.6)$$

где U_{mR} – амплитудное значение падения напряжения на сопротивлении R (рис. 7.5), которое замеряется ламповым вольтметром типа ВЗ-13, В; R – значение этого сопротивления, Ом.

После подстановки формулы (7.6) в выражение (7.5) значение H_m , А/м, можно определить по формуле

$$H_m = \frac{w_1 U_{mR}}{Rl}. \quad (7.7)$$

где w_2 – число витков измерительной обмотки (рис. 7.5); S – сечение исследуемого образца, м²; B – мгновенное значение магнитной индукции в испытуемом образце, (В·с)/м²; i_2 – мгновенное значение тока в измерительной обмотке, А; r – активное сопротивление, Ом; L – индуктивность вторичной обмотки, Гн; C – емкость конденсатора, Ф.

Если принять, что индуктивность вторичной обмотки значительно меньше емкости цепи, то при большой величине C слагаемые

$$L \frac{di_2}{dt} \quad \text{и} \quad \frac{1}{C} \int di_2 dt$$

можно принять равными нулю. Тогда выражение (7.8) будет иметь вид

$$i_2 r = w_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (7.9)$$

7.3. Порядок выполнения работы

Собрать схему, изображенную на рис. 7.5.

Установить значения C , R и $г$ в пределах, указанных в табл. 7.2 для данного образца.

Таблица 7.2

Значения элементов для испытания образцов

Номер образца	C , мкФ	R , Ом	$г$, Ом
1	15÷20	400÷600	10÷20
2	10÷15	30÷60	2÷3
3	1÷5	50÷100	50÷90

Так как в лабораторной работе используются приборы, работа которых связана с прогреванием катода в течение 10 минут, необходимо проверить, в каком положении находятся ручки управления звукового генератора ГЗ-33, осциллографа С1-1, и включить приборы для прогре-ва. Следует обратить внимание на ручки «рег . выхода» генератора и «яркость» осциллографа – они должны быть в левом крайнем положении. При этом выходное напряжение генератора равно нулю.

Ручки звукового генератора перед включением:

- ручка «сеть» в положении «выкл.»;
- рукоятка «пределы шкалы» в положении «3÷30»;
- рукоятка «ослабление» в положении «АТТ»;
- «внутренний нагрев» в положении «выкл.»;
- «множитель» в положении «х1»;
- «частота Н» установить на частоту 50 Гц;
- «регулировка выхода» установить в крайнее левое положение;
- «расстройка в %» установить в нулевое положение;
- «шкала приборов» установить в положение «вольтх1». Положение

ручек осциллографа перед включением:

- рукоятку «сеть» установить в нижнее положение;
- «ослабление» установить в положение «1:10»;
- «яркость» установить в крайнее левое положение;
- «фокус» установить в среднее положение;
- «ось» и «осьх» установить в среднее положение;
- «диапазон частот» установить в положение «выкл.»;
- «усиление по осих» и «усиление по осiu» установить в крайнее левое положение.

Для прогрева приборов необходимо включить автомат щитка стенда, рукоятку «сеть» на панели звукового генератора установить в положение «вкл.», а на панели осциллографа– в верхнее положение. О включении приборов сигнализируют сигнальные лампы на панелях приборов.

После десятиминутного прогрева установить на выходе звукового генератора напряжение $U_{\text{вых}}=2$ В вращением ручки «регулировка выхода». Установить частоту генератора f в соответствии с табл. 7.3.

Таблица 7.3

Значения частот генератора для испытания образцов

Номер образца	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц
1	30	40	60	80
2	250	400	600	800
3	40	60	80	100

Регулировкой ручек осциллографа «усиление по оси х» и «усиление по оси у», «ослабление» (в положениях 1:1%, 1:10%, 1:100%) добиться на экране изображения, подобного по форме показанному на рис. 7.3.

Путем наложения кальки на экран зарисовать предельную петлю гистерезиса. Затем, не перемещая кальку, поставить рукоятку осциллографа «усиление по оси х» в нулевое положение, нанести на бумагу ось у и отметить I_B (см. рис. 7.3). Затем рукоятку «усиление по оси х» вернуть в первоначальное положение и поставить «усиление по оси у» в нулевое положение, отметить I_H и нанести ось х. После этого рукоятку «усиление по оси у» вернуть в первоначальное положение и добиться совпадения петли гистерезиса на кальке с изображением на экране осциллографа.

Значения I_B и I_H , соответствующие B_{max} табл. 7.4.

образца, занести в

Таблица 7.4

Результаты измерений

Номер образца	C, Ф	г, кОм	R, Ом	I_H , мм	I_B , мм	U_R , В	U_C , мВ	H_{max} , А/м	B_{max} , Тл	m_H , (А/м)/мм	m_B , Тл/мм
1											
2											
3											

Не отнимая кальку от экрана осциллографа, плавно снизить напряжение на выходе генератора до нуля вращением ручки «регулировка выхода»; снять основную кривую намагничивания, отмечая вершины петель гистерезиса, как показано на рис. 7.3 и 7.4, затем ручку «регулировка выхода» генератора вернуть в исходное положение.

Подключить ламповый вольтметр ВЗ-13 параллельно сопротивлению R (рис. 7.5) на вход «х» осциллографа и измерить U_R . Переключатель пределов измерений вольтметра должен находиться в положении «3 В». Подключая вольтметр к конденсатору C (на вход «у» осциллографа), измерить U_C . Переключатель пределов измерений вольтметра установить в положение 300 мВ или 100 мВ. После замера необходимо переключатель пределов измерений переставить в положение «3 В». Результаты измерений умножить на $\sqrt{2}$.

Изменяя частоту ручкой «частота Н» генератора, зарисовать на этой же кальке предельные петли гистерезиса для указанных в табл. 7.3 частот.

При частотах свыше 200 Гц установить переключатель «множитель» в положение «10». Значение частоты для каждой петли указать на кальке. Для всех образцов порядок распределения основных характеристик одинаков.

Определить значение максимальной напряженности поля образца по формуле (7.7).

Определить амплитудное значение индукции по формуле (7.12) (величины подставлять в единицах системы СИ).

Определить динамическую магнитную проницаемость по формуле

$$B_m$$

$$\mu = \frac{B_m}{H_m \mu_0} \quad (7.13)$$

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

Результаты расчетов записать в табл. 7.5.

Перенести предельные петли гистерезиса и основную кривую намагничивания на миллиметровку. Разметку осей сделать в единицах В, Гн, и Н (Тл, А/м).

Задавая значения Н (шесть точек), по основной кривой намагничивания найти соответствующее значение В. По формуле

$$\mu = \frac{B}{H \mu_0} \quad (7.14)$$

определить значение μ и занести в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Результаты вычислений

Величина, ед. изм.	Номер точки					
	1	2	3	4	5	6
В, Тл						
Н, А/м						
μ						

По полученным данным построить зависимость $\mu=f(H)$ для всех указанных преподавателем образцов в одних осях и одинаковом масштабе.

Определить по формуле (7.3) величину удельных потерь энергии при $\gamma=7,4$ г/см³ для всех указанных в табл. 7.3 частот. Данные расчетов занести в табл. 7.6 и построить зависимость $P=f(f)$.

Таблица 7.6

Результаты вычислений

f, Гц
S, мм²
P, Вт/кг

Содержание отчета

Отчет должен содержать :

- описание цели работы;
- схему включения приборов;
- основные расчетные формулы;
- таблицы результатов измерений и вычислений, графики;
- выводы по результатам эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Чем объяснить явление ферромагнетизма у магнитных материалов?
2. Какие вещества относятся к парамагнетикам?
3. От чего зависит величина μ_0 ?
4. Почему магнитная проницаемость вещества при достижении μ_{\max} уменьшается при увеличении H ?
5. С чем связано появление петли гистерезиса?
6. Что такое H_C и от чего зависит его величина?
7. Как будет выглядеть кривая намагничивания при медленном изменении знака H ?
8. От каких факторов зависит площадь петли гистерезиса?
9. Как влияет частота перемагничивания f на величину потерь мощности?
10. Чем отличаются магнитомягкие материалы от магнитотвердых?
11. Какие существуют методы, уменьшающие потери мощности от вихревых токов?

Глоссарий

Азотирование - химико-термическая обработка поверхностным насыщением стали азотом путем длительной выдержки ее при нагреве до 600...650°C в атмосфере аммиака NH_3 . Азотированные стали обладают очень высокой твердостью (азот образует различные соединения с Fe, Al, Cr и другими элементами, обладающие большей твердостью, чем карбиды) и повышенной сопротивляемостью коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др.

Вакансия – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки.

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации и температуры.

Дислокация – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Простейшие виды дислокаций – краевые и винтовые.

Дислоцированный атом – это атом, вышедший из узла решетки и занявший место в междоузлии.

Диффузионная металлизация – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др.

Диэлектрики – материалы с широкой запрещенной зоной, не позволяющая покидать валентную зону, что и определяется наличием примесей с энергетическими уровнями внутри запрещенной зоны.

Жила - в общем случае отдельный проводник.

Провода - изделия, содержащие одну или более изолированных жил либо скрученных проволок, поверх которых имеется легкая защитная оболочка (например, металлическая обмотка, обмотка или оплетка из волокнистых материалов).

Установочный провод - провод для электрических распределительных сетей низкого напряжения.

Электрический шнур - провод сечением до 1,5 мм² с изолированными жилами повышенной гибкости. Служит для подсоединения подвижных устройств. Жилы в данном случае обязательно многопроволочные. Кроме того, они соединены между собой скруткой или общей оплеткой.

Кабель - это несколько изолированных проводов, заключенных в одну или несколько защитных оболочек.

Закаливаемость – способность стали приобретать высокую твердость при закалке. Закаливаемость определяется содержанием углерода. Стали с содержанием углерода менее 0,20 % не закаливаются.

Закалка - нагрев стали до заданной температуры, выдержка при достигнутой температуре до полного прогрева металла и последующее очень быстрое его охлаждение (в воде, масле, солевых растворах).

К **химическим свойствам** металлов следует отнести их способность сопротивляться химическому или электрохимическому воздействию различных сред (коррозии) при нормальных и высоких температурах.

Композиционные материалы - материалы, состоящие из нескольких компонент, выполняющих разные функции, причем между компонентами существуют границы раздела.

Коррозией называют разрушение металла под воздействием окружающей среды .

Красноломкость – повышение хрупкости при высоких температурах.

Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1% и выше).

Магнитной проницаемостью называют способность металлов намагничиваться под действием магнитного поля.

Манганин– светло-оранжевый сплав на основе меди, содержащий 2-3% никеля и 12-13% марганца.

Материаловедение - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д., а также при сочетании этих воздействий.

Металлургия -область технологии металлов, которая занимается изучением способов производства металлов и сплавов.

Механическими свойствами металлов называется совокупность свойств, характеризующих способность металлических материалов сопротивляться воздействию внешних усилий (нагрузок).

Нитроцементация (цианирование) - химико-термическая обработка с одновременным поверхностным насыщением изделий азотом и углеродом при повышенных температурах с последующими закалкой и отпуском для повышения износо- и коррозионной устойчивости, а также усталостной прочности.

Нормализация- вид термической обработки стали, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке и охлаждении на спокойном воздухе.

Отжиг – нагрев стали до заданной температуры, выдержка при такой температуре до полного прогрева металла и последующее очень медленное охлаждение (вместе с охлаждаемой печью).

Отношение массы тела к его объему является постоянной величиной для данного вещества и называется **плотностью**.

Отпуск- термическая обработка, включающая нагрев закаленной стали до температуры ниже критических точек, выдержка при этой температуре и охлаждение.

Пластмассы (пластики)—материалы на основе полимеров, находящиеся в период формирования изделий в вязкотекучем или высокоэластическом состоянии, а при эксплуатации—в стеклообразном или кристаллическом.

Полимером называется органическое вещество, длинные молекулы которого построены из одинаковых многократно повторяющихся звеньев — мономеров.

Полупроводники— это материалы с узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена электронами за счёт внешних энергетических воздействий (температура, электрического поля, электромагнитного излучения).

Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл.

Припой — это специальные сплавы, применяемые при пайке металлических частей в качестве связующего вещества.

Проводниками являются материалы, у которых валентная и зона проводимости перекрываются, что обеспечивает высокую электропроводность.

Прокаливаемость — способность получать закаленный слой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину.

Псевдосплав — спеченная смесь двух порошков, один из которых является более тугоплавким.

Слюда является основой большой группы электроизоляционных изделий. Главное достоинство слюды - высокая термостойкость наряду с достаточно высокими электроизоляционными характеристиками.

Слюдиниты - листовые материалы, изготовленные из слюдяной бумаги на основе мусковита.

Сплавы— это сложные металлы, представляющие сочетание какого-либо простого металла (основы сплава) с другими металлами или неметаллами.

Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется **аллотропией** или **полиморфизмом**.

Сталь— железуглеродистый сплав, в котором углерода содержится до 2%.

Стеклами называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава различного химического состава, приобретающие механические свойства твердых тел.

Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств.

Технологические свойства металлов и сплавов характеризуют их способность поддаваться различным методам горячей и холодной обработки. К технологическим свойствам металлов и сплавов относятся литейные свойства, ковкость, свариваемость, обрабатываемость режущими инструментами, прокаливаемость.

Углеродистая сталь — сплав в который кроме железа и углерода (до 2%) входят также кремний, марганец, сера и фосфор.

Физические свойства металлов и сплавов определяются цветом, удельным весом, плотностью, температурой плавления, тепловым расширением, тепло- и электропроводностью, а также магнитными свойствами.

Химико-термическая обработка (ХТО) стали - совокупность операций термической обработки с насыщением поверхности изделия различными элементами (С, N, Al, Si, Cr и др.) при высоких температурах.

Химическая коррозия может происходить за счет взаимодействия металла с газовой средой при отсутствии влаги.

Цементация – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 °С.

Чугун— железоуглеродистый сплав с содержанием углерода свыше 2%. В технике наибольшее применение получили чугуны, имеющие от 2,4 до 3,8% углерода.

Чугун - сплав железа с углеродом, содержащий свыше 2,3% углерода (практически от 2,5 до 4,5%). Углерод в нем может находиться в химически связанном состоянии в виде карбида железа (цементита) и в свободном состоянии - в виде графита.

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

Электропроводность называется способность металлов проводить электрический ток.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.

Электротехническое материаловедение - это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования.

Электрохимическая коррозия имеет место в водных растворах, а так же в обыкновенной атмосфере, где имеется влага.

Контрольная работа – 2 часа

Контрольная работа №1

1. Заряды в электрическом поле ускоряются за счет:

- 1) поляризации;
- 2) силы Кориолиса;
- 3) коэрцитивной силы;
- 4) кулоновской силы.

2. Пределы изменения значений диэлектрической проницаемости:

- 1) от 10^{-24} до ∞ ;
- 2) от 1 до нескольких тысяч ;
- 3) от 5-10 до ∞ ;
- 4) от 10 до 100.

3. Какие величины характеризуют поле в веществе, если известны напряженность поля и удельная электропроводность?

- 1) электрическая индукция;
- 2) плотность тока;
- 3) магнитная индукция;
- 4) магнитная проницаемость.

4. Значение магнитной проницаемости диамагнетика обусловлено

- 1) индуктированными внешним полем токами;
- 2) беспорядочными магнитными моментами атомов;
- 3) упорядоченными и полностью скомпенсированными магнитными моментами атомов;
- 4) упорядоченными и нескомпенсированными магнитными моментами атомов.

5. Нижние пределы значений удельной электропроводности в См/м

- 1) 10^{-24} ;
- 2) 0;
- 3) 1;
- 4) 10^{24} .

6. Если напряженность поля остается постоянной, какие характеристики поля в веществе изменяются и в какую сторону при увеличении удельной электропроводности ?

- 1) увеличивается электростатическая индукция;
- 2) уменьшается магнитная индукция;
- 3) увеличивается смещение;

- 4) увеличивается плотность тока.

7. Нагреватель изолирован от окружающей среды двумя пластинами из разных материалов одинаковой толщины. Перепад температур будет больше на той пластине, материал которой имеет меньшую

- 1) теплоемкость;
- 2) теплопроводность;
- 3) диэлектрическая проницаемость;
- 4) плотность.

8. Значение удельной электропроводности обусловлено

- 1) видом поляризации;
- 2) числом и подвижностью носителей заряда;
- 3) напряженностью поля;
- 4) давлением.

9. Диэлектрические потери при постоянном напряжении зависят от

- 1) емкости конструкции;
- 2) веса конструкции;
- 3) сопротивления конструкции;
- 4) частоты приложенного напряжения.

10. С ростом температуры электрическая прочность твердого диэлектрика уменьшилась. Это указывает на

- 1) роль микропор в процессе пробоя;
- 2) ударную ионизацию;
- 3) электротепловой пробой;
- 4) низкое качество диэлектрика.

11. При электрическом пробое газа развитие физических явлений идет в следующем порядке:

- 1) свободный электрон, ударная ионизация, лавина;
- 2) проращение стримера, лавина электронов;
- 3) лидер, стример ;
- 4) лидер, ударная ионизация.

12. С ростом температуры электропроводность материала уменьшилась. Это указывает на

- 1) электротепловой пробой;
- 2) ударную ионизацию;

- 3) уменьшение подвижности носителей заряда;
- 4) увеличение концентрации дырок.

Итоговая контрольная работа № 2

1. Поляризация – это смещение противоположно заряженных частиц молекул или атомов диэлектрика под действием:
 - a) - электрического поля;
 - b) - магнитного поля;
 - c) - температуры.
2. Обратим ли процесс поляризации (при снятии воздействующего фактора возвращается ли диэлектрик из поляризованного состояния в обычное, неполяризованное состояние)?
 - a) - возвращается;
 - b) - не возвращается.
3. Относительная диэлектрическая проницаемость (диэлектрическая проницаемость) - это отношение заряда на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду на конденсаторе при том же напряжении, если бы между электродами находился:
 - a) - материал из меди;
 - b) - вакуум;
 - c) - материал из стали.
4. Чему равна диэлектрическая проницаемость любого вещества?
 - a) - 1;
 - b) - >1 ;
 - c) - <1 .
5. Каково значение диэлектрической проницаемости электрокартона?
 - a) - 1,0 - 1,5;
 - b) - 1,8 - 2,5;
 - c) - 150 - 200.
6. Каково значение диэлектрической проницаемости дистиллированной воды?
 - a) - 4;
 - b) - 80;
 - c) - 150.
7. Какая поляризация происходит без рассеяния энергии?
 - a) - упругая;
 - b) - релаксационная.
8. Каково время установления электронной поляризации?
 - a) - 0,1 – 0,01 мс;
 - b) - 1 – 0,01 нс;
 - c) - 0,001 – 0,0001 пс.
9. Какой вид поляризации проявляется в твердых телах неоднородной структуры?
 - a) - миграционная;
 - b) - дипольная;
 - c) - спонтанная.
10. Абсорбция – это поглощение заряда или влаги?

- a) - объемное;
 - b) - поверхностное.
11. Чему равен полный ток в диэлектрике после включения постоянного напряжения?
- a) - току утечки (сквозному току);
 - b) - току абсорбции;
 - c) - сумме токов утечки и абсорбции.
12. По какому закону изменяется ток абсорбции диэлектрика после приложения постоянного напряжения?
- a) - возрастающей экспоненты;
 - b) - параболы;
 - c) - затухающей экспоненты.
13. Каким током определяется истинное сопротивление диэлектрика?
- a) - полным;
 - b) - утечки (сквозным током);
 - c) - абсорбции.
14. Явление какой поляризации используется при контроле степени увлажнения изоляции?
- миграционной;
 - дипольной;
 - ионной.
15. Контроль степени увлажнения производится путем измерения на разных частотах какого параметра изоляции?
- a) - емкости;
 - b) - сопротивления;
 - c) - проводимости.
16. Какими приборами измеряется степень объемного увлажнения изоляции?
- a) - мегаомметром;
 - b) - мостом постоянного тока;
 - c) - ПКВ.
17. Контроль объемного увлажнения изоляции производят путем измерения емкости на каких частотах?
- a) - 1 Гц и 25 Гц;
 - b) - 2 Гц и 50 Гц;
 - c) - 50 Гц и 100 Гц.
18. При каком отношении измеренных емкостей на разных частотах изоляция недопустимо увлажнена?
- a) - $> 1,1$;
 - b) - $> 1,3$;
 - c) - $> 1,5$.
19. Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него:
- a) - электрического поля;
 - b) - магнитного поля.
20. При каком напряжении в диэлектриках наблюдаются диэлектрические потери?
- a) - постоянном;

- b) - переменном;
 - c) - как при постоянном, так и переменном.
21. Какой проводимостью вызываются диэлектрические потери при постоянном напряжении?
- a) - объемной;
 - b) - поверхностной;
 - c) - сквозной, объемной и поверхностной.
22. Какой проводимостью вызываются диэлектрические потери при переменном напряжении?
- a) - сквозной;
 - b) - проводимостью потерь на поляризацию;
 - c) - сквозной и проводимостью потерь на поляризацию.
23. Диэлектрические потери при переменном напряжении пропорциональны составляющей тока:
- a) - активной;
 - b) - реактивной.
24. Активная составляющая тока выражается через:
- a) - синус угла диэлектрических потерь;
 - b) - косинус угла диэлектрических потерь;
 - c) - тангенс угла диэлектрических потерь.
25. При увеличении частоты приложенного напряжения диэлектрические потери:
- a) - остаются неизменными;
 - b) - снижаются пропорционально частоте;
 - c) - возрастают пропорционально частоте.
26. По какому закону изменяется тангенс угла диэлектрических потерь с температурой у большинства изоляционных материалов?
- a) - прямой линии;
 - b) - экспоненты;
 - c) - параболы.
27. Сильномагнитные материалы имеют значение магнитной проницаемости:
- a) - 1;
 - b) - < 1 ;
 - c) - $\gg 1$.
28. Кривая намагничивания – это зависимость магнитной индукции от:
- a) - напряженности магнитного поля;
 - b) - напряженности электрического поля.
29. Коэрцитивная сила – это направленная по отношению к намагничиваемому направлению напряженность магнитного поля, необходимая для размагничивания материала (снижения индукции до нуля):
- a) прямо;
 - b) обратно.
30. Магнитомягкие – материалы:
- a) - с малым значением коэрцитивной силы и большой магнитной проницаемостью;
 - b) - с большой коэрцитивной силой и малой магнитной проницаемостью, имеющие большую остаточную индукцию.

ОЦЕНОЧНЫЙ ЛИСТ
Дисциплина (модуль) «Электротехнические материалы»

Тип проверочного испытания Результаты обучения/ Критерии оценки	Тест	ДПЗ	Задание	Курсовой проект	Производственное обучение				
Результат обучения 1	иметь представление о физических явлениях, определяющих свойства и особенности диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов								
Критерии оценки Знать виды связей и строение вещества; структуру кристаллических веществ; аморфные, аморфно-кристаллические вещества; строение проводниковых материалов; маркировку алюминия и его сплавов; сплавы меди и железа.	√								
Критерии оценки соблюдение правил техники безопасности при работах	√								
Критерии оценки - различать марки проводов и кабелей	√								
Критерии оценки - различать разновидности диэлектриков	√	√							
Критерии оценки - выбирать в электромонтажной работе диэлектрические материалы	√	√							
Результат обучения 2	знать о количественных параметрах, используемых при выборе материалов электрического оборудования ЭПС; видах диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, применяемых в конструкциях электрических аппаратов и машин, об особенностях и областях применения этих материалов.								
Критерии оценки выбирать жидкие, газообразные									

и твердые диэлектрики		√						
Критерии оценки выбирать провода и кабели разными методами	√	√						
Критерии оценки монтаж приборов и электрических схем различных систем автоматики	√							
Критерии оценки - применять полупроводниковые материалы	√							
Критерии оценки применить государственные и межгосударственные системы	√							

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

- 1.Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
- 2.Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы. – М.: ГОУ УМЦ, 2008. – 371 с.
- 3.Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые и магнитные материалы. – М.: РГОТУПС, 2006. – 140 с.

Дополнительная литература:

- 1.Алиев И.И. Электротехнические материалы и изделия: справочник. – М.: ИП Радио Софт, 2005. – 351 с.
- 2.Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
- 3.Справочник по электротехническим материалам. Под редакцией Ю.В.Корицкого. – М.: Энергоатомиздат, 1988.