



НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

Факультет: Энерго механический

КАФЕДРА: «Общая физика и основы электротехники»

Курс лекции по дисциплине «Электротехнические материалы»

Для бакалавров 2 курса, обучающихся по направлению
5520200 «электроэнергетика»

Составитель: _____ Носиров Б.Н.

Навоий-2010 йил

Курс лекции составлена в соответствии с рабочим учебным планом и учебной программой по дисциплине «Электротехнические материалы» и рассмотрена и рекомендована на заседании кафедры «Общая физика и основы электротехники»

Протокол № 1 от «___» _____ 2009 г.
Зав. Кафедрой: _____ доц. Асрорв Ш.А.

Курс лекции обсуждена и одобрена на
УМС Энерго – механического факультета.
Протокол №__ от «___» _____ 2010 г.

Председатель УМС: _____ доц. Мардонов Б.Т.

Курс лекций по дисциплине «Электротехнические материалы»

Содержание лекций

Тема 1. Введение. Общие сведения о строении вещества.

- 1. Виды связи.*
- 2. Классификация веществ по электрическим свойствам.*
- 3. Классификация веществ по магнитным свойствам.*

Тема 2. Поляризация диэлектриков.

- 1. Диэлектрик в электрическом поле.*
- 2. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость.*
- 3. Основные виды поляризации диэлектриков.*

Тема 3. Диэлектрические потери.

- 1. Основные понятия.*
- 2. Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах.*
- 3. Диэлектрические потери в газах.*
- 4. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках.*
- 5. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.*

Тема 4. Физико-химические и механические свойства диэлектриков

- 1. Влажностные свойства диэлектриков*
- 2. Влажность материалов*
- 3. Влагопроницаемость*
- 4. Механические свойства диэлектриков*

Тестовый контроль по разделу

Тема 5. Диэлектрические материалы.

- 1. Классификация*
- 2. Газообразные диэлектрики*
- 3. Нефтяные электроизоляционные масла*
- 4. Синтетические жидкие диэлектрики*

Тема 6. Керамические диэлектрические материалы.

- 1. Общие сведения.*
- 2. Фарфор.*
- 3. Изоляторы из фарфора.*
- 4. Различные керамические диэлектрики*

Тема 7. Проводниковые материалы

- 1. Природа проводимости и основные характеристики проводниковых*
- 2. Классификация проводниковых материалов*
- 3. Материалы высокой проводимости Сверхпроводники Высокотемпературные сверхпроводники Криопроводники*

Тема 8. Основные параметры полупроводников.

- 1. Определение и классификация полупроводниковых*
- 2. Основные параметры полупроводниковых материалов*
- 3. Собственные и примесные полупроводники, типы носителей заряда.*

Тема 9. Магнитные материалы.

- 1. Структура ф*
 - 2. ферромагнетиков*
 - 3. Электрические свойства магнитных материалов*
-
- 1. Магнитотвердые материалы. Магнитомягкие материалы*

Тестовый контроль по курсу

литература

ЛЕКЦИЯ 1

Введение. Общие сведения о строении вещества.

План:

4. Виды связи.
5. Классификация веществ по электрическим свойствам.
6. Классификация веществ по магнитным свойствам.

1. Виды связи

Основными элементарными частицами, из которых строятся все известные нам вещества, являются протоны, нейтроны и электроны.

Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра, электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра. Строение ядер атомов, периодичность заполнения оболочек электронами можно находить с помощью таблицы Д.И.Менделеева.

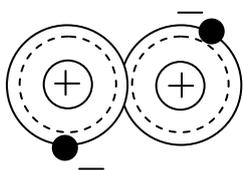


Рис 1. Схематическое изображение двухатомной молекулы с ковалентной связью.

Газы, жидкие и твердые тела могут состоять из атомов – порядка ангстрема, размеры положительных ионов, получившихся из атомов лишившихся части электронов, меньше, чем размеры атомов, а размеры отрицательных ионов, присоединивших дополнительные электроны, больше, чем размеры соответствующих атомов. Ионами могут быть и группы атомов, потерявших или присоединивших электроны.

Молекулы газов содержат различное число атомов. Так, например, гелий, аргон, неон – одноатомные газы, водород, азот, кислород, окись углерода состоят из двухатомных молекул, углекислый газ, водяной пар – из трехатомных. Молекула аммиака построена из четырех атомов, а метана – из пяти. В зависимости от строения внешних электронных оболочек атомов могут образовываться различные виды связи.

Ковалентной называется связь атомов друг с другом, достигаемая за счет электронов, которые становятся общими, как это схематично показано для двухатомной молекулы на рис 1. Ковалентная связь наблюдается в молекулах, образованных металлоидными атомами, например, в молекуле хлора и др.

Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются нейтральными. Если же в отдельных молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются полярными или дипольными.

Полярная молекула характеризуется величиной дипольного момента, который определяется произведением заряда и расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов.

Ковалентная связь может быть как в молекулах (в трех агрегатных состояниях вещества), так и между атомами, образующими решетку кристалла. Примерами таких кристаллов служат алмаз, кремний и германий. Ковалентной связью могут

удерживаться не только одинаковые атомы (Cl-Cl, -C-C- и т.д.), но и различные -C-H, -Si-C- и другие.

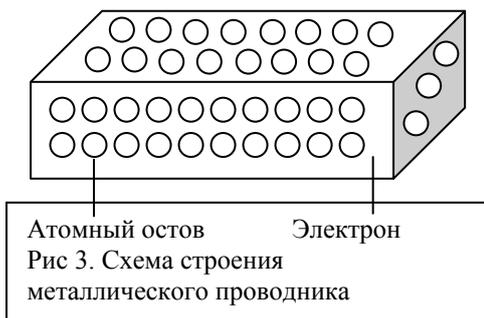


Рис 2. Структура и плотная упаковка хлористого натрия (а) и структура и неплотная упаковка ионов хлористого цезия (б)

Второй вид связи – ионная связь – определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Твердые тела ионной структуры характеризуются повышенной механической прочностью и относительно высокой температурой плавления. Типичными примерами ионных кристаллов являются галоидные соли щелочных металлов.

На рис 2 показаны структуры хлористого натрия и хлористого цезия. Из рисунка видны плотная упаковка ионов первого вещества и неплотная второго.

Третьим видом связи является металлическая связь, приводящая также к образованию твердых кристаллических тел. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из расположенных в узлах решетки положительно заряженных атомных остовов, находящихся в среде свободных электронов (рис 3)



Притяжение между положительными атомными остовами и электронами является причиной монолитности металла. Наличие свободных электронов приводит к высокой электропроводности и теплопроводности металла, а также является причиной блеска металлов. Ковкость металла объясняется перемещением и скольжением отдельных слоев атомных остовов.

Четвертым видом связи является молекулярная связь (связь Ван-дер-Вальса). Такая связь существует у ряда веществ между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Межмолекулярное притяжение в этом случае обуславливается согласованным движением валентных электронов и соседних молекулах (рис 4).

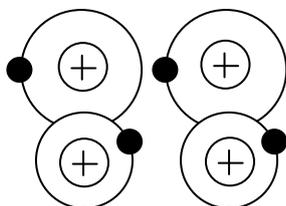


Рис 4. Схематическое изображение двух взаимодействующих молекул (связь Ван-дер-Вальса)

В любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам. При этом силы притяжения валентных электронов положительно заряженными остовами соседних молекул оказываются сильнее сил взаимного отталкивания электронов внешних орбит.

С наблюдается между молекулами некоторых веществ, имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической молекулярной решетки.

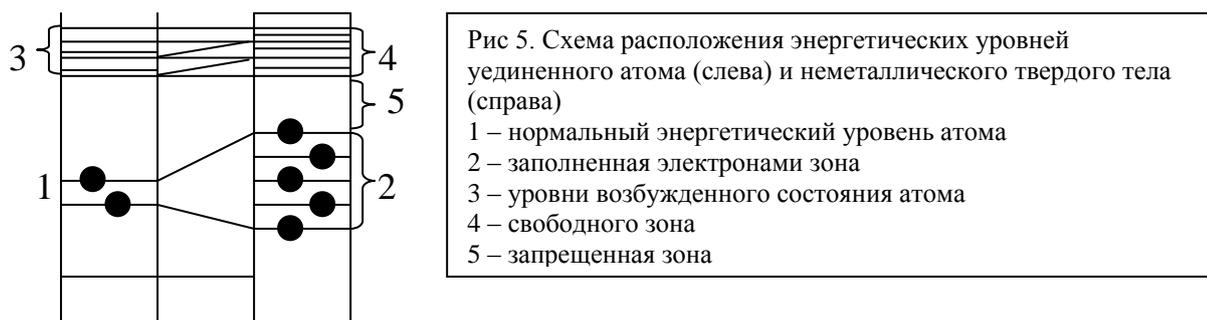
2. Классификация веществ по электрическим свойствам.

Все вещества в зависимости от их электрических свойств относят к диэлектрикам, проводником или полупроводником. Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Исследование спектров излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда атомы расположены друг от друга на больших расстояниях, показывает, что для атомов каждого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных электрических состояний (уровней) для разных атомов.

Часть этих уровней заполнены электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться только после того, как атом подвергается внешнему энергетическому воздействию, при этом он возбужден. Стремясь прийти к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в момент возвращения электронов на уровни, при которых энергия атома минимальна.

Сказанное можно характеризовать энергетической диаграммой атома, приведенной на рис 5.



При переходе газообразного вещества в жидкость, а затем образовании кристаллической решетки твердого тела все имеющиеся у данного типа атомов электронные уровни (как заполненные электронами, так и незаполненные) несколько смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. Таким образом, из отдельных энергетических уединенных атомов в твердом теле образуется целая полоса – зона энергетических уровней.

Рис 6 показывает различие в энергетических диаграммах диэлектриков, полупроводников и проводников.

Диэлектриками будут такие материалы, у которых запрещенная зона настолько велика, что электронной электропроводности в обычных условиях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

Проводниками будут материалы, у которых заполненная электронами зоны вплотную прилегают к зоне свободных энергетических уровней или даже перекрывается ею. Вследствие этого электроны в металле свободны, так как они могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны

под влиянием слабых напряженностей приложенного к проводнику электрического поля.

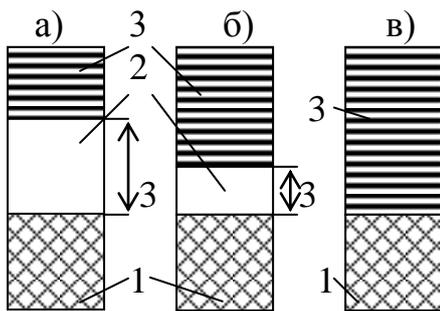


Рис 6. Энергетические диаграммы диэлектриков (а), полупроводников (б) и проводников (в) при абсолютном поле с точки зрения зонной теории твердого тела.

1 – заполненная электронами зона
2 – запрещенная зона
3 – зона свободных энергетических уровней

При отсутствии в полупроводнике свободных электронов (при нуле Кельвина) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет тока. Если извне будет подведена энергия, достаточная для переброса электронов через запрещенную зону, то, став свободными, электроны смогут перемещаться и под действием электрического поля, создавая электронную электропроводность полупроводника.

В заполненной зоне, откуда ушел электрон, образовывалась «электронная дырка», а потому в полупроводнике начнется другое «эстафетное» движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем под воздействием электрического поля дырка будет двигаться в направлении поля как эквивалентный положительный заряд.

Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т.е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе наступает равновесие, т.е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в заполненную зону.

С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля – убывает вплоть до нуля. Таким образом, электропроводность веществ при различных температурах может быть существенно различной.

Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования дырки, могут доставить не только тепловое движение, но и другие источники энергии, например свет, поток электронов и ядерных частиц, электрические и магнитные поля, механические воздействия и т.д.

Электрические свойства определяются условиями взаимодействия атомов вещества и не являются непременной особенностью данного атома. Например, углерод в виде алмаза является диэлектриком, а в виде графита обладает большой проводимостью.

Примеси и дефекты кристаллической решетки сильно влияют на электрические свойства твердых тел.

3. Классификация веществ по магнитным свойствам.

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные и сильномагнитные. К первым относятся диамагнетики и парамагнетики. Ко вторым –

магнитные материалы, нашедшие себе наибольшее применение в технике в зависимости от особенностей их магнитных свойств.

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью $\mu < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и ряд металлов: медь, цинк, серебро, золото, ртуть, а также висмут, галлий, сурьма.

К парамагнетикам относятся вещества с магнитной проницаемостью $\mu > 1$, также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. В их число входят окись азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У магнитных металлов $\mu \gg 1$ и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

ЛЕКЦИЯ 2.

Поляризация диэлектриков.

План:

4. Диэлектрик в электрическом поле.
5. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость.
6. Основные виды поляризации диэлектриков.

1. Диэлектрик в электрическом поле.

Основным, характерным для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него электрического напряжения, является поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

О явлениях, обусловленных поляризацией диэлектрика, можно судить по значению диэлектрической проницаемости, а также угла диэлектрических потерь, если поляризация диэлектрика сопровождается рассеянием энергии, вызывающим нагрев диэлектрика. В нагреве технического диэлектрика могут участвовать содержащиеся в нем немногочисленные свободные заряды, обуславливающие возникновение под воздействием электрического напряжения малого сквозного тока, проходящего через толщу диэлектрика и по его поверхности. Наличие сквозного тока говорит о явлении электропроводности технического диэлектрика, численно характеризуем значениями удельной объемной электрической проводимости и удельной поверхностной электрической проводимости, являющиеся обратными соответствующим значениям удельных объемного и поверхностного электрических сопротивлений.

Любой диэлектрик может быть использован только при напряжениях, не превышающих предельных значений, характерных для него определенных условиях. При напряжениях выше этих предельных значений наступает пробой диэлектрика – полная потеря им электроизоляционных свойств.

Значения напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности внешнего однородного электрического поля – электрической прочностью диэлектрика.

2. Поляризация и диэлектрическая проницаемость.

Под действием электрического поля электрические заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля. В полярных диэлектриках, содержащих дипольные молекулы, воздействие электрического поля вызывает еще и ориентацию диполей в направлении поля, при отсутствии поля диполи дезориентируются в следствие теплового движения.

Большинство диэлектриков характеризуется линейной зависимости электрического смещения от напряженности электрического поля, созданного в диэлектрике. Особую группу составляют диэлектрики, в которых с изменением напряженности поля смещение меняется нелинейно, обнаруживая насыщение при некотором значении напряженности поля. Такие диэлектрики называются

сегнетоэлектриками. Наименование «сегнетоэлектрик» связано с тем, что нелинейность поляризации впервые была обнаружена у сегнетовой соли.

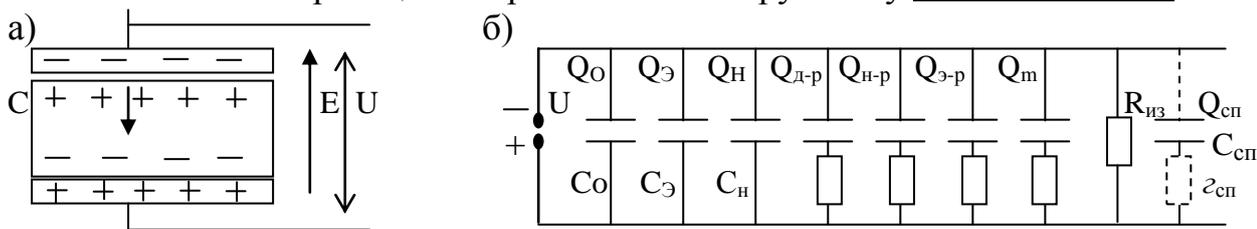


Рис 1-1. Диэлектрик сложного состава с различными механизмами поляризации в электрическом поле (а) и его эквивалентная схема (б)

U – источник напряжения, C_0 и Q_0 – емкость и заряд в вакууме,

C и Q – соответственно емкости и заряды от электронной, ионной, дипольно-релакционной, ионно-релакционной, электронно-релакционной, нитраионной и спонтанной поляризации,

z с соответствующими индексами – сопротивления, эквивалентные потерям энергии при этих механизмах поляризации,

$R_{из}$ – сопротивление изоляции сквозному току через диэлектрик.

Любой диэлектрик с нанесенными на него электродами включенный в электрическую цепь, может рассматриваться как конденсатор определенной емкости (рис 1-1а).

Заряд всякого конденсатора, равен:

$$Q = CU \quad (1-1)$$

Где C – емкость конденсатора, U – приложенное к нему напряжение.

Количество электричества Q при заданном значении приложенного напряжения складывается из двух составляющих: Q_0 , которое присутствовало бы на электродах, если бы их разделял вакуум, и Q_Δ , которое обусловлено поляризацией диэлектрика, фактического разделяющего электроды:

$$Q = Q_0 + Q_\Delta \quad (1-2)$$

Одной из важнейших характеристик диэлектрика, имеющей особое значение для техники, является его относительная диэлектрическая проницаемость ε .

Эта величина представляет собой отношение заряда Q , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду Q_0 , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_\Delta}{Q_0} = 1 + \frac{Q_\Delta}{Q_0} \quad (1-3)$$

Из выражений (1-3) следует, что относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице в случае вакуума.

Значение относительной диэлектрической проницаемости всякого вещества не зависит от выбора системы единиц. В дальнейшем для характеристики качества диэлектриков используется именно это значение диэлектрической проницаемости, причем слово «относительная» для краткости опускается.

Соотношение (1-1), приведенное выше, может быть представлено в виде:

$$Q = Q_0\varepsilon = CU = C_0U\varepsilon \quad (1-4)$$

где C_0 – емкость, которую имел бы данный конденсатор, если бы его электроды разделял вакуум.

Из формулы (1-4) видно, что диэлектрическая проницаемость вещества ϵ можно определить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум.

3. Основные виды поляризации диэлектриков.

Поляризация диэлектриков в связи с агрегатным состоянием и структурой диэлектриков, следует различать два основных вида поляризации.

К первому виду относится поляризация, совершающаяся в диэлектрике под воздействием электрического поля практически мгновенно, вполне упруго, без рассеяния энергии, т.е. без выделения тепла.

Второй вид поляризации не совершается мгновенно, а нарастает и убывает замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют релакционной поляризацией.

К первому виду поляризации относятся электронная и ионная, остальные механизмы принадлежат к релакционной поляризации. Особым механизмом поляризации является резонансная, наблюдаемая в диэлектриках при световых частотах, а потому малосущественная для практической электротехники.

Емкость конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обуславливаются суммой различных механизмов поляризации. Они могут наблюдаться у разных диэлектриков, несколько механизмов одновременно может быть у одного и того же материала.

Эквивалентная схема диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, содержит ряд емкостей, включенных параллельно источнику напряжения U , как это показано на рис 1-1б. Емкость C_0 и заряд Q_0 соответствуют собственному полю электродов, если между ними нет диэлектрика (вакуум). Величины C_3 и Q_3 соответствуют электронной поляризации.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с). Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света n . Смещение и деформация электронных орбит атомов и ионов не зависит от температуры, однако электронная поляризация вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

Ионная поляризация (C_u, Q_u на рис 1-1б) характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упруго связанных ионов. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении, и в большинстве случаев температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ионных диэлектриков оказывается положительным. Время установления ионной поляризации – порядка 10^{-13} с.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{д-р}, Q_{д-р}, \epsilon_{д-р}$), для краткости называемая дипольной, отличается от электронной и ионной тем, что она связана с

тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Дипольная поляризация свойственна полярным газам и жидкостям. Этот вид поляризации может наблюдаться также и в твердых полярных органических веществах, но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся в ней радикалов по отношению к молекуле. Такой вид поляризации называют также дипольно-радикальной поляризацией. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп ОН.

Ионно-релакционная поляризация (C_{u-p} , Q_{u-p} , ε_{u-p}) наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов (рис 2б). В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля.

После слияния электрического поля смещение ионов постепенно ослабевает по экспоненциальному закону. С повышением температуры ионно-релакционная поляризация заметно усиливается.

Электронно-релакционная поляризация ($C_{э-р}$, $Q_{э-р}$, $\varepsilon_{э-р}$) отличается от электронной и ионной и возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Электронно-релакционная поляризация характерна главным образом для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем и электропроводностью: двуокиси титана, загрязненной примесями Nb^{+5} , Ca^{+2} , Ba^{+2} ; двуокиси титана с аплонными вакансиями и примесью ионов Ti^{+3} ; ряда соединений на основе окислов металлов переменной валентности – титана, ниобия, висмута.

Обращает на себя внимание высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может иметь место при электронно-релакционной поляризации, а также наличия максимума в температурной зависимости ε . Диэлектрическая проницаемость титаносодержащей керамики с электронно-релакционной поляризацией в соответствии с теоретическими положениями, уменьшается с возрастанием частоты.

Миграционная поляризация (C_m , Q_m , ε_m) понимается как дополнительный механизм поляризации, проявляющийся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т.д.

ЛЕКЦИЯ 3. Диэлектрические потери.

План:

6. Основные понятия.
7. Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах.
8. Диэлектрические потери в газах.
9. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках.
10. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.

1. Основные понятия.

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызываемую нагрев диэлектрика.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материалах обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется, как указывалось выше, значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной электропроводности возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике.

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале можно характеризовать рассеиваемой мощностью, отнесенной к единице объема, или удельными потерями; чаще для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между токами напряжением в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика вектор тока в этой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол σ будет равен нулю, чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь σ и его функция $\operatorname{tg}\sigma$.

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

При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно изобразить это явление в виде кривых, представляющих зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения (рис 3-1). При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения (рис 3-1а) и такой диэлектрик называется линейным. Если в линейном диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид эллипса (рис 3-1б).

Площадь этого эллипса пропорциональна количеству энергии, которая поглощается диэлектриком за один период изменения напряжения.

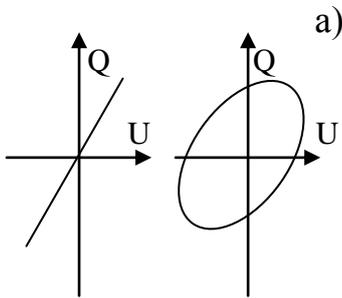


Рис 3-1. Зависимость заряда от напряжения для линейного диэлектрика без потерь (а), с потерями (б)

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями, находящемуся в цепи переменного напряжения. Эта схема должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе. Поставленная задача может быть решена заменой конденсатора с потерями идеальным конденсатором с последовательно включенным активным сопротивлением (последовательная схема) или идеальным конденсатором шунтированным активным сопротивлением (параллельная схема).

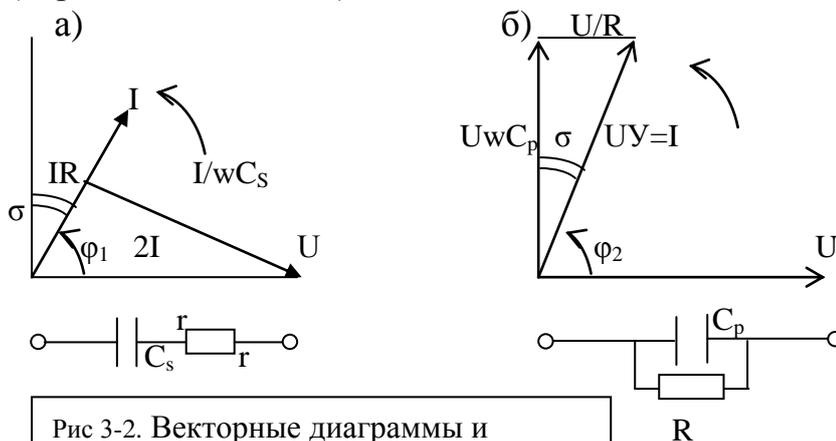


Рис 3-2. Векторные диаграммы и эквивалентные схемы диэлектрика с потерями а – последовательная, б – параллельная

Последовательная и параллельная схемы представлены на рис 3-2, а и б. Там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1=z_2$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока относительно напряжения φ равны и значения активной мощности одинаковы.

$$\text{Известно, что активная мощность } P_a = UI \cos \varphi \quad (3-1)$$

Выразим мощности для последовательной и параллельной схем через емкости C_s и C_p и угол σ , который является дополнением угла φ до 90° .

Для последовательной схемы, используя выражение (3-1) и соответствующую векторную диаграмму, имеем:

$$P_s = \frac{U}{z} \frac{Uz}{z} = \frac{U^2 z}{x^2 z^2} = \frac{U^2 z}{x^2 (1 + z^2/x^2)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (3-2)$$

и $\operatorname{tg} \sigma = \omega C_s z \quad (3-3)$

Для параллельной схемы:

$$P_a = \frac{U U y g}{y} = U^2 g = U^2 \omega \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (3-4)$$

и $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R} \quad (3-5)$

Приравнивая друг другу выражения (3-2) и (3-4), а также (3-3) и (3-5) находим соотношения между C_p и C_s и между z и R :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (3-6) \quad R = z \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right) \quad (3-7)$$

Для доброкачественных диэлектриков можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2 \sigma$ по сравнению с единицей в формуле (3-6) и считать $C_p \approx C_s \approx C$. Выражения мощности рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут одинаковы для обеих схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (3-8)$$

где P_a измеряется в ваттах, U – в вольтах, ω – в с^{-1} , C – в фарадах.

Сопротивление K в параллельной схеме, как следует из выражения (3-7), во много раз больше сопротивления z .

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т.е. мощность рассеиваемой в единице объема диэлектрика, имеет вид:

$$\rho = \frac{P}{V} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1.8 \cdot 10^{10}} E^2 = \gamma_a E^2 \quad (3-9)$$

где ρ – удельные потери Вт/м^3 ; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, с^{-1} ; E – напряженность электрического поля, В/м .

Действительно, емкость между противоположными гранями куба со стороной 1 м будет $C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon$, реактивная составляющая удельной проводимости:

$$\gamma_c = \omega C_1 = \frac{\varepsilon f}{1.8 \cdot 10^{10}} \quad (3-10)$$

а активная составляющая $\gamma_a = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1.8 \cdot 10^{10}} \quad (3-11)$

Следует отметить, что емкость диэлектрика с большими потерями становится совершенно условной величиной, зависящей от выбора той или иной схемы.

Определив каким-либо методом при некоторой частоте параметры эквивалентной схемы исследуемого диэлектрика (C_p и R или C_s и z), в общем случае нельзя считать полученные значения емкости и сопротивления присущими данному конденсатору и пользоваться этими данными для расчета угла потерь при другой частоте. Такой расчет может быть сделан только в том случае, если эквивалентная схема имеет определенное физическое обоснование. Так, например, если известно для данного диэлектрика, что потери в нем определяются только потерями от

сквозной электропроводности в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для любой частоты, лежащей в этом диапазоне, по формуле:

$$\operatorname{tg}\sigma = 1/\omega CR \quad (3-12)$$

где C и R – постоянное, измерения при данной частоте.

Потери в таком конденсаторе, как легко видеть, не зависят от частоты и определяются выражением $P = U^2/R$ (3-13)

Наоборот, если потери в конденсаторе обуславливаются главным образом сопротивлением проводящих проводов, а также сопротивлением самих электродов, то рассеиваемая мощность в таком конденсаторе будет возрастать с частотой пропорциональной квадрату ее:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg}\sigma = U^2 \omega C \omega C_z = U^2 \omega^2 C^2 z \quad (3-14)$$

Из последнего выражения можно сделать весьма важный практический вывод: конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое сопротивление обкладок, так и соединительных проводов и переходных контактов.

2. Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах.

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

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери сквозной электропроводности;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структур.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это нарушение приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика.

К диэлектрическим потерям, обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.

Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\operatorname{tg}\sigma$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Тангенс угла диэлектрических потерь в этом случае может быть вычислен по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho} \quad (3-15)$$

где f – в Гц; и ρ – в Ом м

Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля; $\operatorname{tg} \sigma$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону:

$$P_T = A \exp(-\vartheta/T) \quad (3-16)$$

где A , ϑ – постоянные материалы, или в соответствии с приближенным выражением

$$P_t = P_0 \exp \alpha t \quad (3-17)$$

где P_t – потери при температуре t °С, P_0 – потери при температуре 0°С, α – постоянная материала, $\operatorname{tg} \sigma$ в зависимости от температуры изменяется по тому же закону, который использован для аппроксимации температурной зависимости P , так как температурным изменением емкости можно пренебречь.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа.

Ионизационные потери могут быть вычислены по формуле:

$$P_{\text{И}} = A_1 f (U - U_0)^3 \quad (3-18)$$

где A_1 – постоянный коэффициент, f – частота поля, U – приложенное напряжение, U_0 – напряжение, соответствующее числу ионизации.

Формула справедлива при $U > U_0$ и линейной зависимости $\operatorname{tg} \sigma$ от E . Ионизационное напряжение U_0 зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега носителей заряда. С увеличением давления газа величина напряжения начала ионизации возрастает.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, у которых наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды - миканитах, микалексе и т.д.

Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и особенностей содержащихся в них компонентов не существует общей формулы расчета диэлектрических потерь в этом случае.

3. Диэлектрические потери в газах.

В неполярных жидкостях диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью, если жидкость не содержит примесей с дипольными молекулами.

Полярные жидкости в зависимости от условий (температура, частота) могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релакционной поляризацией, помимо потерь, обусловленных электропроводностью.

Применяемые в технике жидкие диэлектрики часто представляют собой смесь неполярных и полярных веществ (например, масляно-канифольные компакиды) или являются полярными жидкостями (совол).

У жидких диэлектриков с полярными молекулами заметно проявляется зависимость диэлектрических потерь от вязкости. Удельная проводимость таких жидкостей при комнатной температуре $10^{-10} - 10^{-11}$ Сим м⁻¹. Диэлектрические потери, наблюдаемые в полярных вязких жидкостях при переменном напряжении, значительно превосходят потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери называют дипольно-релакционными потерями. Объяснение природы потерь в полярных вязких жидкостях можно дать, основываясь на представлениях о механизме дипольно-релакционной поляризации.

Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением тепла. Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля и дипольная поляризация практически исчезает; диэлектрические потери при этом будут малы. Дипольные потери будут также малы, если вязкость жидкости мала и ориентация молекул происходит без трения. При средней вязкости дипольные потери могут быть существенны и при некотором значении вязкости имеют максимум.

Дипольно-релакционные потери в маловязких жидкостях при низких частотах незначительны и могут быть меньше потерь сквозной электропроводности. Ниже для сравнения приведены значения ϵ и $\text{tg}\sigma$ для неполярной и полярной жидкостей при частоте 50 Гц:

Трансформаторное масло	$\epsilon = 2,3$	$\text{tg}\sigma = 0,001$
Совол	$\epsilon = 5$	$\text{tg}\sigma = 0,02$

Как видно, тангенс угла диэлектрических потерь неполярной жидкости – трансформаторного масла значительно меньше, чем полярной жидкости – совола.

4. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках необходимо рассматривать в связи с их структурой. Твердые вещества обладают разнообразным составом и строением; в них возможны все виды диэлектрических потерь.

Для удобства рассмотрения диэлектрических потерь в твердых веществах последние можно подразделить на четыре группы: диэлектрики молекулярной структуры, ионной структуры, сегнетодиэлектрики и диэлектрики неоднородной структуры.

Диэлектрические потери в диэлектриках молекулярной структуры зависят от вида молекул.

В случае неполярных молекул, в веществах, не имеющих примесей, диэлектрические потери ничтожно малы. К таким диэлектрикам относятся сера, парафин, неполярные полимеры – полиэтилен, политетрафторэтилен, полистирол и др.

Диэлектрики молекулярной структуры с полярными молекулами представляют собой главным образом органические вещества, широко используемые в технике. К ним принадлежат материалы на основе целлюлозы (бумага, картон и др.), полярные полимеры: органическое стекло, капрон, эбонит, бакелит и др.

Потери в этих диэлектриках существенно зависят от температуры, при некоторых температурах обнаруживается максимум и минимум потерь; возрастание

потерь после минимума объясняется увеличением потерь сквозной электропроводности.

Диэлектрические потери твердых веществ ионной структуры связаны с особенностями упаковки ионов в решетке.

В веществах кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов при отсутствии примесей, искажающих решетку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в таких веществах появляются потери от сквозной электропроводности. К веществам этого типа относятся многочисленные кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в современном производстве электротехнической керамики, например (Al_2O_3), входящий в состав ультрафарфора. Примером соединения такого рода является также каменная соль, чистые кристаллы которой обладают ничтожными потерями.

Диэлектрические потери в аморфных веществах ионной структуры – неорганических стеклах – связаны с явлением поляризации и наличием электропроводности.

Рассматривая механизм диэлектрических потерь в стеклах, следует различать:

- а) потери, мало зависящие от температуры и возрастающие прямо пропорционально частоте ($\text{tg}\sigma$ не зависит от частоты);
- б) потери, заметно возрастающие с температурой по закону экспоненциальной функции и мало зависящие от частоты ($\text{tg}\sigma$ уменьшается с возрастанием частоты).

Потери первого вида обуславливаются релакционной поляризацией и сильно выражены во всех технических стеклах. Чисто кварцевое стекло обладает весьма малыми релакционными потерями. Введение в плавленный кварц наибольшего количества окислов вызывает заметное возрастание диэлектрических потерь из-за нарушения внутренней структуры стекла.

Потери второго вида вызываются передвижениями слабосвязанных ионов и должны рассматриваться как потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери проявляются при температурах выше $50\text{-}100^\circ\text{C}$.

Диэлектрические потери в твердых веществах неоднородной структуры. К твердым веществам этого типа, используемым в качестве диэлектриков, принадлежат материалы, в состав которых входит не менее двух компонентов, механически смешанных друг с другом. Любой керамический материал представляет собой сложную многофазную систему. В составе керамики различают кристаллическую фазу, стекловидную и газовую (газы в закрытых порах).

Диэлектрические потери в керамике зависят от характера кристаллической и стекловидной фаз и количественного соотношения между ними. Газовая фаза в керамике вызывает повышение диэлектрических потерь при высоких напряженностях поля вследствие развития ионизации.

Потери в керамике могут оказаться повышенными, если в процессе производства в керамическом изделии образуются полупроводниковые включения с электронной электропроводностью. Увеличение потерь в керамике происходит также за счет адсорбированной влаги при наличии открытой пористости.

ЛЕКЦИЯ 4.

Физико-химические и механические свойства диэлектриков

План:

1. Влажностные свойства диэлектриков
2. Влажность материалов
3. Влагопроницаемость
4. Механические свойства диэлектриков

При выборе электроизоляционного материала для конкретного применения приходится обращать внимание не только на его элементарные свойства в нормальных условиях, но рассматривать также их стабильность при воздействии влажности окружающего воздуха, повышенных температур, мороза и радиоактивных излучений.

Нормальное использование изделия в большой степени зависит от механических свойств материалов: их прочности на растяжение, сжатие, изгиб, удар, твердости или эластичности. В ряде случаев к изделиям, а, следовательно, в известной степени к материалам предъявляются требования вибропрочности при различных амплитудах и частотах колебаний. Для деталей, в которых имеется сопряжение различных материалов, большое значение имеют температурные коэффициенты линейного расширения.

Срок службы изделий в тропических условиях зависит от надежности химической защиты материалов против гнилостных бактерий, насекомых и образования плесени.

1. Влажностные свойства диэлектриков.

Электроизоляционные материалы в большей или меньшей степени гигроскопичны, т.е. обладают способностью впитывать в себя влагу из окружающей среды влагопроницаемы, т.е. способны пропускать сквозь себя пары воды. Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара.

Абсолютную влажность воздуха оценивают массой (m) водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха (m^3). Каждой температуре соответствует определенное значение абсолютной влажности при насыщении ($m_{\text{нас}}$). Большое количество воды воздух содержать не может, и она выпадает в виде росы. Абсолютная влажность, необходима для насыщения воздуха, резко возрастает с увеличением температуры, т.е. растет и давление водяных паров.

Относительной влажностью воздуха называют выражаемое в процентах отношение

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100 = \frac{P}{P_{\text{нас}}} \cdot 100 \quad (1)$$

При нормальной температуре (20°C) и нормальном атмосферном давлении $0,1\text{МПа}$ значение $m_{\text{нас}}$ составляет $17,3\text{ г/м}^3$.

Вода является сильно дипольным диэлектриком с низким удельным сопротивлением, порядка $10^3\text{-}10^4\text{ Ом}\cdot\text{м}$, а поэтому попадание ее в поры твердых диэлектриков ведет к резкому снижению их электрических свойств. Особенно заметно воздействие влажности при повышенных температурах ($30\text{-}40^{\circ}\text{C}$) и высоких

значениях φ , близких к 98-100%. Подобные условия наблюдаются в странах с влажным тропическим климатом, причем в период дождей они могут сохраняться в течение длительного периода времени, что тяжело сказывается при эксплуатации электрических машин и аппаратов. В первую очередь воздействие повышенной влажности воздуха на поверхностном сопротивлении диэлектриков. Для предохранения поверхности электроизоляционных деталей из полярных твердых диэлектриков от воздействия влажности их покрывают лаками, не смачиваемыми водой.

При наличии в диэлектриков объемной открытой пористости или при неплотной структуре влага попадает и внутрь материала.

2. Влажность материалов

Определение влажности электроизоляционных материалов весьма важно для уточнения условий, при которых производится испытание электрических свойств данного материала. Кроме того, для заметно гигроскопичных материалов, приемка и сдача которых происходит по массе, определение влажности весьма важно для строгого учета количества материала. Для текстильных и тому подобных материалов устанавливается так называемая кондиционная влажность, соответствующая равновесной влажности материала при нахождении его в воздухе в нормальных условиях; так, для кабельной бумаги кондиционная влажность принимается равной 8%. На гигроскопичность материала существенное влияние оказывает строение и химическая природа. Большую роль играют наличие и размер капиллярных промежутков внутри материалов, в которые проникает влага.

Сильно пористые материалы, в частности волокнистые, более гигроскопичны, чем материалы плотного строения.

Приводим ориентировочные размеры пор в ангстремах, встречающихся в различных электроизоляционных материалов:

Макропоры в керамике.....	10^3 - 10^4
Капилляры в волокнах целлюлозы.....	1000
Поры в стенках волокна.....	10-100
Межмолекулярные поры различных материалов.....	10-50
Внутримолекулярные поры.....	до 10

Для сравнения укажем, что эффективный диаметр молекул воды равен примерно $1,7\text{\AA}$; поэтому маленькие по размерам молекулы воды могут проникать даже во внутримолекулярные поры целлюлозных электроизоляционных материалов. Если поглощенная влага способна образовать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), уже весьма малы, количества поглощенной влаги приводят к резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, содержащих растворимые в воде

примеси, создающие электролиты с высокой удельной проводимостью. Для подобных материалов (пористых диэлектриков) при переменном напряжении является $\operatorname{tg}\delta$, заметно возрастающий с увлажнением материала. Менее чувствительна величина ε , однако и она, как правило, увеличивается с поглощением влаги ввиду большого значения диэлектрической проницаемости воды по сравнению с другими диэлектриками (для воды $\varepsilon \approx 80$). Поэтому в ряде случаев о гигроскопичности материала судят по увеличению электрической емкости образца под действием влажности.

Влагопроницаемость

Кроме гигроскопичности, большое практическое значение имеет влагопроницаемость электроизоляционных материалов, т.е. способность их пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов, применяемых для защиты покрытий (шланги кабелей, опресовка конденсаторов, компаундные заливки, лаковые покрытия деталей). Благодаря наличию мельчайшей пористости большинство материалов обладает поддающейся изменению влагопроницаемостью. Только для стенок хорошо обожженной керамики и металлов влагопроницаемость практически равна нулю.

Количество влаги m (кг), проходящее за время τ (с) сквозь участок поверхности S (м²) слоя изоляционного материала толщиной h (м) под действием разности давлений водяных паров P_1 и P_2 (Па) с двух сторон слоя, равно:

$$m = \Pi \frac{(P_1 - P_2)S}{h} \tau \quad (2)$$

Это уравнение аналогично уравнению прохождения сквозь тело электрического тока: разность давлений $P_1 - P_2$ аналогична разности потенциалов, m/τ -току, а $h/(\Pi S)$ -сопротивлению тела; коэффициент Π аналогичен удельной объемной проводимости есть влагопроницаемость материала. В системе СИ он измеряется в секундах:

$$[\Pi] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2} = \text{с}$$

Для различных материалов влагопроницаемость изменяется в весьма широких пределах. В качестве примера приведем значения Π следующих материалов. Парафин $1,5 \cdot 10^{-16}$ с, полистирол $6,2 \cdot 10^{-15}$ с, триацетат целлюлозы $2,1 \cdot 10^{-13}$ с.

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их пропитка. Необходимо иметь ввиду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности; это объясняется тем, что молекулы пропитанных веществ, имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами воды, не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры пропитываемого материала они вообще не могут проникнуть.

При длительном использовании электроаппаратуры, особенно в тропических условиях, на органических диэлектриках наблюдается развитие плесени. Появление плесени уменьшает удельное поверхностное сопротивление диэлектриков, приводит

к росту потерь, может снизить механическую прочность изоляции вызвать коррозию соприкасающихся с ней металлических частей.

Наиболее уязвимы для развития плесени целлюлозные материалы, в том числе и пропитанные (гетинакс, текстолит), канифоль, маслянистые лаки и др. наиболее стойкие к образованию плесени являются неорганические диэлектрики: керамика, стекла, смола, кремний, кремнийорганические материалы и некоторые органические, например эпоксидные смолы, фторопластмассы, полиэтилен, полистирол.

С целью повышения плесенеустойчивой органической электрической изоляции в ее состав вводят добавки фунгицидов, т.е. веществ, ядовитых для плесневых грибов и задерживающих их развитие, или же покрывают изоляцию лаком, содержащим фунгициды. К числу сильно действующих фунгицидов принадлежат в частности, некоторые органические соединения, содержащие азот, хлор, ртуть.

4. Механические свойства диэлектриков

Поскольку детали из электроизоляционных материалов подвергаются воздействию механических нагрузок, большое практическое значение имеет механическая прочность этих материалов и способность их не деформироваться от механических напряжений.

Прочность на разрыв, сжатие и изгиб. Простейшие виды статических механических нагрузок-растягивающих, сжимающих и изгибающих изучаются из курса сопротивления материалов.

Значение пределов прочности при растяжении (σ_p), сжатии (σ_c), и изгибе ($\sigma_{и}$) в системе единиц СИ выражаются в паскалях (Н/м²). Так как в практике еще также распространено выражение пределов прочности в кгс/см², а 1Па $\approx 10^{-5}$ кгс/см², то для перевода в паскалы численных значений механических прочностей, выражающих в кгс/см², их надо умножить примерно на 10⁵.

Для электроизоляционных материалов анизотропного строения (слоистых, волокнистых и т.п.) значения механической прочности сильно зависят от направления приложения нагрузки. Важно отметить, что для ряда диэлектриков (стекло, керамических материалов, многих пластмасс и др.) предел прочности при сжатии значительно больше, чем при разрыве и изгибе. Так, например у кварца и стекла при сжимающих напряжениях можно получить $\sigma_c \approx 200$ МПа, а при растяжении $\sigma_p \approx 50$ МПа.

Механическая прочность ряда диэлектриков сильно зависит от площади поперечного сечения образцов. Механическая прочность электроизоляционных материалов сильно зависит от температуры, как правило, уменьшается с ее ростом.

В ряде случаев большое практическое значение имеют хрупкость, твердость и некоторые другие механические характеристики электроизоляционных материалов.

Хрупкость. Многие материалы хрупки, т. е, обладают сравнительно высокой прочностью по отношению к статическим нагрузкам, в то же время легко разрушаются динамическими (внезапно прилагаемыми) усилиями.

Распространенный прием для оценки способности материала сопротивляться действию динамических нагрузок-испытание на ударный изгиб (определение ударной вязкости). Ударную вязкость материала $\sigma_{уд}$ находят делением затраченной на излом образца энергии A на площадь поперечного сечения образца S . Ударная вязкость в системе СИ измеряется в Дж/м², 1Дж/м² $\approx 10^{-3}$ кгс/м². Поэтому для

сохранения неизменными значений ударной вязкости, часто выражаемых на практике в кгс/см²; их удобно приводить к Дж/м².

Очень высокой ударной вязкостью обладает полиэтилен, у которого $\sigma_{уд}$ превышает 100кДж/м²; для керамических материалов $\sigma_{уд}$ составляет всего 2-5кДж/м².

В ряде случаев проверяют способность электроизоляционных материалов выдерживать без разрушения длительное воздействие вибрации, т.е. повторяющихся колебаний определенной частоты и амплитуды. Такая проверка производится на готовых изделиях, которые для этой цели крепятся на платформах (вибростендах), подвергающихся вибрациям по заданному режиму от соответствующего приводного механизма. Определение вибропрочности важно, например, для изоляции ракетного и самолетного электрооборудования.

Твердость. Твердость, т.е. способность поверхностного слоя материала противостоять деформации от сжимающего усилия, передаваемого посредством предмета малых размеров, имеет для диэлектриков менее существенное значение и определяется различными методами.

Вязкость. Для жидких и полужидких электроизоляционных материалов, масел, лаков, заливочных и пропиточных компаундов и т.п. Динамическая вязкость или коэффициент внутреннего трения, жидкости представляет собой величину, входящую в целый ряд законов гидродинамики вязких сред, а именно в закон Пуазейля-истечения вязких жидкостей через капиллярные трубки, в закон Стокса-движение в вязкой среде под действием небольшой постоянной силы.

ЛЕКЦИЯ 5. Диэлектрические материалы.

План:

1. Классификация
2. Газообразные диэлектрики
3. Нефтяные электроизоляционные масла
4. Синтетические жидкие диэлектрики

1. Классификация

Диэлектрические материалы имеют чрезвычайно важное значение для электротехники. К ним принадлежат электроизоляционные материалы; они используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Назначение электрической изоляции, не допускать прохождение электрического тока по каким либо нежелательным путям, помимо тех путей, которые предусмотрены электрической схемой устройства. Очевидно, что никакое, даже самое простое, электрическое устройство не может быть выполнено без использования электроизоляционных материалов.

Кроме того, электроизоляционные материалы используются в качестве диэлектриков в электрических конденсаторах для создания определенного значения электрической емкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определенного вида зависимости этой емкости от температуры или иных факторов.

Наконец, к диэлектрическим материалам принадлежат и активные диэлектрики, т.е. диэлектрики с управляемыми свойствами (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.)

Электроизоляционные материалы подразделяются по их агрегатному состоянию на газообразные, жидкие, твердые. В особую группу могут быть выделены твердеющие материалы, которые в исходном состоянии, во время введения их в изготовленную изоляцию, являются жидкостями, но затем отвердевают и в готовой, находящейся в эксплуатации изоляции представляют собой твердые тела (лаки и компаунды).

Большое практическое значение имеет также разделение электроизоляционных материалов в соответствии с их химической природой на органические и неорганические. Под органическими веществами подразумеваются соединения углерода, обычно они содержат также водород, азот, галогены или иные элементы.

Прочие вещества считаются неорганическими; многие из них содержат кремний, алюминий и другие металлы, кислород и т.п. Многие органические электроизоляционные материалы обладают ценными механическими свойствами, гибкостью, эластичностью, из них могут быть изготовлены волокна, пленки и изделия других разнообразных форм, поэтому они нашли весьма широкое применение.

Неорганические электроизоляционные материалы в большинстве случаев не обладают гибкостью и эластичностью, часто они хрупки; технология их обработки сравнительно сложна. Однако, как правило, неорганические электроизоляционные

материалы обладают значительно более высокой нагревостойкостью, чем органические, когда требуется обеспечить высокую рабочую температуру изоляции.

2. Газообразные диэлектрики.

В числе газообразных диэлектриков, прежде всего, должен быть упомянут воздух, который в силу своей всеобщей распространенности часто входит в состав электрических устройств и играет в них роль изоляции, дополнительной к твердым или жидким электроизоляционным материалам. В отдельных частях электрических установок, например на участках воздушных линий электропередач, между опорами, воздух образует единственную изоляцию между голыми проводами линии.

При прочих равных условиях (при одинаковом давлении и температуре, форме электродов, расстоянии между ними и т.д.) различные газы могут иметь заметно различающиеся электрической прочности. Азот имеет практически одинаковую с воздухом электрическую прочность. Однако некоторые газы, имеющие высокую молекулярную массу и соединения, содержащие галогены (фтор, хлор и пр.) для ионизации которых требуется большая энергия, имеют заметную повышенную по сравнению с воздухом электрическую прочность. Так, гексафторид серы SF_6 имеет заметно повышенную электрическую прочность примерно 62,5 выше, чем у воздуха (SF_6 называется элегазом сокращение слов «электричество» и «газ»).

Дихлордифторметан CCl_2F_2 - так называемый фреон имеет электрическую прочность, близкую к электрической прочности элегаза, но его температура кипения всего лишь $242,7K(-30,5^{\circ}C)$, и он при нормальной температуре может быть сжат без сжижения лишь до 0,6 мПа.

Многие углеводороды, в молекулах которых все атомы водорода заменены атомами фтора, имеющими общий состав C_xF_y при нормальных условиях, являются газами (например, CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , C_4F_8 , C_4F_{10}) или жидкостями (например, C_7F_8 , C_7F_{11} , C_8F_{16} , $C_{14}F_{24}$). Электрическая прочность некоторых из этих газов, а также паров жидкостей существенно (в 6-10 раз) превосходит электрическую прочность воздуха.

Значительный интерес для электротехника представляет водород. Это очень легкий газ, обладающий весьма благоприятными свойствами для использования в качестве охлаждающей среды вместо воздуха (водород характеризуется высокими значениями удельной теплопроводности и теплоемкости). При использовании водорода охлаждение вращающихся электрических машин существенно улучшается. Кроме того, при замене воздуха водородом заметно снижаются потери мощности на трение ротора машины о газ и на вентиляцию, так как эти потери приблизительно пропорциональны плотности газа. Вследствии отсутствия окисляющего действия кислорода воздуха замедляется старение органической изоляции обмоток машины и устраняется опасность пожара в случае короткого замыкания внутри машины. Наконец, в атмосфере водорода улучшается работа щеток. Поэтому водородное охлаждение позволяет повысить мощность машины и ее к. п. д.; крупные турбогенераторы, синхронные компенсаторы и т. п. выполняются с водородным охлаждением. Применение циркуляционного водородного охлаждения требует

герметизации машины (подшипники уплотняются при помощи масляных затворов). Чтобы избежать попадания внутрь машины воздуха (водород при содержании его в воздухе от 4 до 74% по объему образует взрывчатую смесь-гремучий газ), внутри машины поддерживается некоторое избыточное давление сверх атмосферного; постепенная утечка водорода восполняется подачей газа из баллонов. При прочих равных условиях электрическая прочность водорода примерно на 40%, а угольного ангидрида CO_2 на 10% ниже, чем электрическая прочность воздуха.

Для заполнения электровакуумных приборов и ламп употребляются инертные газы аргон, неон и другие, а также пары ртути и натрия - инертные газы обладают низкой электрической прочностью. Следует отметить весьма малую теплопроводность криптона и ксенона; это обстоятельство используется в производстве некоторых типов электрических ламп.

3. Нефтяные электроизоляционные масла.

Трансформаторное масло, которым заливают силовые трансформаторы, из всех жидких электроизоляционных материалов находит наибольшее применение в электротехнике. Его назначение двояко: во-первых, масло, заполняя пары волокнистой изоляции, а также промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность изоляции; во-вторых, оно улучшает отвод тепла, выделяемого за счет потерь в обмотках и сердечнике трансформатора. Еще одна важная область применения трансформаторного масла - масляные выключатели высокого напряжения. В этих аппаратах разрыв электрической дуги между расходящимися контактами выключателя происходит в масле или находящемся под повышенным давлением газах, выделяемых маслом под действием высокой температуры дуги; это способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению. Трансформаторное масло применяется также для заливки маслonaполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

Трансформаторное, а также другие нефтяные (минеральные) электроизоляционные масла получают из нефти посредством ее ступенчатой перегонки с выделением на каждой ступени определенной (по температуре кипения) фракции и последующей тщательной отчистки от химических примесей путем обработки серной кислотой, затем щелочной промывки водой и сушки.

Практические важные свойства трансформаторного масла нормируется стандартом ГОСТ 982-68. По средним фактическим данным кинематическая вязкость этого масла составляет $(17-18,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C и $(6,5-6,7) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 50°C ; кислотное число 0,03-0,1г кон/кг, температура вспышки паров $135 \div 140^\circ\text{C}$; температура застывания около минус 45°C .

При работе в трансформаторе или ином маслonaполненном электрическом аппарате масло постепенно стареет. При старении становится более темным, в нем образуются загрязняющие его продукты-кислоты, смолы, которые частично оказываются нерастворимыми; последние, как более тяжелые осаждаются на дне бака и на погруженных в масло деталях в виде слоя «ила», значительно ухудшает теплоотвод от нагреваемых деталей.

При старении масла возрастает а) при доступе воздуха, так как старение масла в значительной степени связано с его окислением кислородом воздуха; особенно интенсивно идет старение при соприкосновении масла с озоном; б) при повышении температуры (обычно наивысшей рабочей температурой масла считают 95°C); в) при соприкосновении масла с некоторыми металлами (медь, свинец, железо и т.п.) и другими веществами катализаторами старения; г) при воздействии света; д) при воздействии электрического поля.

Рекомендуется добавление к трансформаторному маслу ингибиторов (антиокислительных присадок), которые в противоположность катализаторам замедляют старение масла, таковы амидопирин и некоторые другие вещества.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых, предназначенных для компенсации индуктивного сдвига фаз. При пропитке бумажного диэлектрика повышается как диэлектрическая проницаемость, так и электрическая прочность; то и другое дает возможность уменьшить габариты, массу и стоимость конденсатора при заданных рабочем напряжении, частоте и емкости.

Конденсаторное масло сходно с трансформаторным, но требует особо тщательной отчистки адсорбентами. Согласно ГОСТ 5775-68 $\text{tg}\delta$ этого масла, измеряемый при 100°C , должен быть не более 0,002 при частоте 1кГц и не более 0,005 при 50Гц; электрическая прочность просушенного под вакуумом конденсаторного масла должна быть не ниже 20 МВ/м.

Кабельные масла используются в производстве силовых электрических кабелей; пропитывая бумажную изоляцию этих кабелей, они повышают ее электрическую прочность, а также способствует отводу тепла потерь. Кабельные масла бывают различных типов.

Для пропитки бумажной изоляции обычных силовых кабелей на рабочее напряжение до 35 кВ в свинцовых или алюминиевых оболочках (кабеля с вязкой пропиткой) чаще всего применяется масло марки МН-4 относительно малой вязкости (кинематическая вязкость не более $37 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C и не более $9,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 50°C), в которое для повышения вязкости добавляют канифоль или синтетический загуститель. Масло той же марки, но без увеличивающих вязкость добавок применяется для маслonaполненных кабелей на напряжении 110 кВ и выше, в которых с помощью специальных подпитывающих устройств во время эксплуатации поддерживается избыточное давление 0,3-0,4 МПа. Для изготовления маслonaкопительных кабелей высокого давления (до 1,5 МПа), прокладываемых в стальных трубах, применяется особо тщательно дегазированное высоковязкое масло марки С-220-Д, согласно ГОСТ 8463-57 это масло должно иметь кинематическую вязкость не более $800 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C и не более $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 50°C , температура вспышки паров его ни ниже 180°C , температура застывания не выше -30°C , $\text{tg}\delta$ (при 100°C и 50 Гц) не более 0,003, электрическая прочность (при 20°C и 50Гц) не менее 20 МВ/м.

4. Синтетические жидкие диэлектрики.

Трансформаторные и другие электроизоляционные масла нефтяного происхождения обладают рядом преимуществ, которые и обеспечили им весьма

широкое применение: они сравнительно дешевые и могут производиться заводами нефтеперерабатывающей промышленности в весьма больших количествах, при хорошей отчистке их $\text{tg}\delta$, как это и свойственно чистым неполярным диэлектрикам, а электрическая прочность достаточно высока. Однако в некоторых случаях качество этих масел оказывается недостаточно высоким. Например, когда требуется полная пожарная безопасность и взрывобезопасность, маслonaполненные трансформаторы и другие аппараты применяться не могут.

Интервал рабочих температур нефтяных масел, ограниченный с одной стороны, температурой застывания или чрезмерного повышения вязкости и с другой стороны, температурой начала быстрого теплового старения в данных условиях эксплуатации, сравнительно узок. Нефтяные масла склонны и к электрическому старению, т.е. они, могут ухудшать свои свойства под действием электрического поля высокой напряженности. Для пропитки конденсаторов с целью получения повышенной емкости в данных габаритных размерах конденсатора желательно иметь полярный жидкий диэлектрик с более высоким, чем у неполярных нефтяных масел, значением ϵ .

Имеется ряд синтетических жидких диэлектриков, по тем или иным свойствам превосходящих нефтяные электроизоляционные масла.

Хлорированные углеводороды получают из различных углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или даже всех) атомов водорода атомами хлора. Наиболее широкое применение имеют полярные продукты хлорирования дифелена (молекулы которого $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ (или $\text{H}_5\text{C}_5\text{-C}_5\text{H}_5$) состоит из двух фенольных остатков), имеющими общий состав $\text{C}_{12}\text{H}_{10-n}\text{Cl}_n$.

Из числа применения хлорированных дифеленов отметим совол, по составу близкий к пентахлордифенилу $\text{C}_{12}\text{H}_5\text{Cl}_5$. Замена соволом нефтяного масла в производстве силовых бумажных конденсаторов позволяет снизить объем конденсатора при равной реактивной мощности примерно в два раза. Совол более стабилен при работе в электрическом поле, чем масло. Недостатком конденсаторов, пропитанных соволом, является сильное уменьшение емкости при падении температуры ниже 0°C . Хлорированные дифенилы негорючие. Однако их недостатком является высокая токсичность.

Кремнийорганические жидкости обладают весьма малым углом диэлектрических потерь, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. Как и другие кремнийорганические соединения, кремнийорганические жидкости весьма дороги, что ограничивает их применимость. В зависимости от характера радикалов, присоединенных к Si, различают полиметилсилоксановые (ПМЛ), полиэтилсилоксановые (ПЭС), и полиметилфенилсилоксановые (ПМФС) жидкости. Эти жидкости имеют 1кГц и 20°C значение ϵ от 2,5 до 3,3 и $\text{tg}\delta$ 0,0001-0,0003; наивысшая допустимая рабочая температура некоторых этих жидкостей доходит до 250°C длительно и до 350°C кратковременно.

Фторорганические жидкости имеют весьма малый $\text{tg}\delta$, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость, могут работать длительно при температуре 200°C и выше. Пары некоторых фторорганических жидкостей имеют необычно высокую для газообразных диэлектриков электрическую прочность.

Характерными свойствами фторорганических жидкостей является малая вязкость, низкое поверхностное натяжение, высокий температурный коэффициент объемного расширения, сравнительно высокая летучесть. Фторорганические жидкости способны обеспечивать значительно более интенсивный отвод тепла потерь от охлажденных обмоток и магнитопроводов, чем нефтяные масла или кремнийорганические жидкости.

ЛЕКЦИЯ 6

Керамические диэлектрические материалы.

План:

1. *Общие сведения.*
2. *Фарфор.*
3. *Изоляторы из фарфора.*
4. *Различные керамические диэлектрики.*

1. Общие сведения

Керамическими материалами (керамикой) называют неорганические материалы, из которых могут быть изготовлены изделия той или иной формы, подвергаемые в дальнейшем обжигу при высокой температуре, в результате обжига в керамической массе происходят сложные физико-химические процессы, благодаря которым готовое (обожженное) изделие приобретает нужные свойства. Ранее керамические материалы изготавливались на основе глины, образующей в смеси с водой пластичную, способную формоваться в массу и после обжига приобретает значительную механическую прочность. Впоследствии появились и другие виды керамических материалов, в состав которых глина входит лишь в очень малом количестве или же совсем не входит.

Керамические материалы могут быть весьма разнообразны по свойствам и области применения; в электротехнике используют керамические материалы в качестве полупроводниковых, магнитных (ферриты) и т.п. Чрезвычайно большое значение имеют керамические диэлектрические, в частности электроизоляционные, а также сегнетоэлектрические и некоторые другие специальные керамические материалы. Многие керамические электроизоляционные материалы имеют высокую механическую прочность, очень малый угол диэлектрических потерь, значительную нагревостойкость и другие ценные свойства. По сравнению с органическими электроизоляционными материалами керамика, как правило, более стойка к электрическому и тепловому старению, не дает остаточных деформаций при продолжительном приложении к ней механической нагрузки. Металлизация керамики обеспечивает возможность осуществления спайки с металлом, что имеет особое значение для создания герметизированных конструкций.

2. Фарфор.

С самого начала развития электротехники фарфор был широко использован как электроизоляционный материал, и по настоящее время он является одним из основных материалов изоляторного производства. Для изготовления фарфора применяют специальные сорта глин (каолин – высококачественная светлая глина большой частоты, а также другие виды огнеупорных пластичных глин) и минералы кварц SiO_2 и полевой шпат.

Из фарфоровой массы той или иной консистенции различными способами: обточной, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием сквозь отверстие – получают изделия нужной конфигурации. Отформованные изоляторы

или другие фарфоровые изделия сушат для удаления избытка воды. Следующие операции – глазуровка и обжиг. Глазурь – масса, наносимая в виде водной суспензии тонким слоем на поверхность фарфорового изделия. При обжиге глазурь расплавляется и покрывает поверхность фарфора гладким блестящим слоем. Глазурь защищает фарфор от проникновения внутрь неизбежно образующихся в нем пор влаги; глазурованные изоляторы достаточно водостойки, чтобы они могли работать в открытых установках, на воздушных линиях электропередачи и т.п., подвергаясь действию атмосферных осадков. Глазурь улучшает внешний вид фарфора и позволяет придавать фарфоровым изделиям окраску в желаемый цвет. К гладкой поверхности глазури менее пристают различные загрязнения; глазурь уменьшает утечку по поверхности изоляторов и повышает их напряжения перекрытия. Наконец, глазурь, «заглаживая» трещины и другие дефекты на поверхности фарфора, которые являются местами начала разрушения при механических нагрузках, существенно повышает механическую прочность фарфоровых изделий.

2. Изоляторы из фарфора.

Виды изоляторов. Из фарфора изготавливают самые разнообразные изоляторы: линейные изоляторы – подвесные для более высоких напряжений (более 35 кВ) и штыревые для более низких; станционные изоляторы – опорные и проходные (вводы); аппаратные изоляторы, входящие в конструкцию разнообразных аппаратов – трансформаторов, масляных выключателей, разъединителей, разрядников; установочные фарфоровые изделия – ролики, детали патронов, выключателей, штепсельных соединений, предохранителей, оттяжные антенные изоляторы, телеграфные и телефонные изоляторы.

Характеристики. Важнейшая электрическая характеристика изоляторов высокого напряжения – разрядное напряжение, т.е. напряжение, которое, будучи приложено между электродами изолятора. Приводит к возникновению электрического разряда между ними. В подавляющем большинстве случаев этот разряд наступает в виде поверхностного разряда (перекрытия) между электродами, так что изолятор при кратковременном разряде не повреждается. Следует различать два вида разрядного напряжения: сухоразрядное и мокроразрядное. Сухоразрядное напряжение – то значение разрядного напряжения, которое получается при испытании изолятора в нормальных условиях; мокроразрядное – то, которое получается при испытании под искусственным дождем определенной силы с нормированным значением ρ воды; очевидно, что мокроразрядное напряжение меньше сухоразрядного. Значение мокроразрядного напряжения дает представление о том, как будет себя вести изолятор в открытой установке или на линии электропередачи при эксплуатации под дождем.

Кроме разрядных напряжений определяют еще пробивное напряжение – то напряжение, при котором происходит пробой сквозь толщу фарфора между электродами. Пробивное напряжение определяют при помещении испытуемого изолятора в электроизоляционное масло.

Линейные изоляторы. При сооружении воздушных линий электропередачи на напряжение до 35 кВ применяют штыревые изоляторы; они обеспечивают жесткое крепление проводов к определенным точкам опор.

Подвесные изоляторы используются при сооружении линий электропередачи для напряжений вплоть до наиболее высоких, применяемых в настоящее время. Отдельные подвесные изоляторы соединяют последовательно в гирлянды, на которые и подвешивают провода.

Гирлянды подвесных изоляторов бывают поддерживающие, предназначенные для подвеса проводов к промежуточным опорам, и натяжные, крепящие провод к анкерным опорам. Как поддерживающие, так и натяжные гирлянды в зависимости от требуемой механической прочности могут выполняться одиночными, сдвоенными, строенными и т.д. Число отдельных подвесных изоляторов в гирлянде определяется рабочим напряжением линии электропередачи.

Так, для линий 110 кВ обычно гирлянда состоит из 6-7 отдельных изоляторов (звеньев). Для линий 220 кВ берут уже 10-12 звеньев и т.д.

Телеграфно-телефонные изоляторы. Такие изоляторы применяются как для прокладки телеграфных и телефонных линий, так и для монтажа проводов низкого напряжения на столбах, стенах и т.д. По сравнению со штыревыми изоляторами они имеют меньшие геометрические размеры и к их качеству предъявляют менее жесткие требования.

Станционные изоляторы. Опорные изоляторы служат для жесткого крепления шин распределительных устройств и различных деталей электрических аппаратов. Большое значение имеют проходные изоляторы, которые служат для пропуска находящихся под высоким напряжением проводов сквозь стены или полы зданий или различные перегородки.

Аппаратные изоляторы. Эти изоляторы, являющиеся составными частями с различных электрических аппаратах, весьма разнообразны по форме и размерам. Весьма ответвленными аппаратными изоляторами являются вводы, служащие для введения проводников внутрь металлических кожухов или баков аппаратов (трансформаторов, масляных выключателей, конденсаторов и т.п.).

Установочный фарфор. Сюда относятся ролики, детали штепсельных розеток и вилок, ламповых патронов, плавких предохранителей и т.п. В основном это массовая продукция, производимая фарфоровыми заводами посредством в стальных пресс-формах и с довольно сухой фарфоровой массы, качество фарфора в них значительно ниже, чем в фарфоровых изоляторах высокого напряжения.

3. Различные керамические диэлектрики.

Фарфор имеет широкое применение в электротехнике. Однако, отмеченные выше недостатки фарфора прежде всего сравнительно высокий угол диэлектрических потерь, быстро увеличивающийся к тому же при повышении температуры, - затрудняют применение фарфора для электротехнической изоляции при высоких частотах, а также при высоких температурах.

Развитие радиоэлектронной промышленности и электротермии вызвало необходимость в новых керамических материалах, обладающих повышенными свойствами по сравнению с фарфором.

Изделия из различных керамических масс формуруются перед обжигом способами, весьма близкими способом формовки фарфоровых изделий. Эти материалы в зависимости от назначения изготавливаются следующих типов: А – высокочастотные для конденсаторов; Б – низкочастотные для конденсаторов; В – высокочастотные для установочных изделий и других радиотехнических деталей. Для каждого типа изготавливают материалы различных классов и групп с определенными техническими показателями, которые мы здесь кратко ради не приводим.

Керамика с низкой диэлектрической проницаемостью. Эта группа материалов содержит в виде основной кристаллической фазы кварц $\beta\text{-SiO}_2$, корцид $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, цельзиал $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, клиноэнстатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, периклаз MgO , анортит $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, волластонит CaOSiO_2 и циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$.

Радиофарфор. Представляет собой фарфор, стекловидная фаза которого облагорожена введением в нее тяжелого окисла BaO .

Ультрафарфор, изготавливаемый различных марок и представляющий собой дальнейшее усовершенствование радиофарфора, характеризуется большим содержанием Al_2O_3 . У радиофарфора $\text{tg}\sigma$ значительно меньше, а ρ больше, чем у обычного электротехнического фарфора, а электроизоляционные свойства ультрафарфора еще лучше. Кроме того, ультрафарфор имеет существенно повышенную по сравнению с обычным фарфором механическую прочность.

Высокоглиноземистая керамика (алюминоксид) в основном состоит из окиси алюминия (глинозема) Al_2O_3 . Этот материал, требующий сложной технологии изготовления с весьма высокой температурой обжига до (750°C), обладает высокой нагревостойкостью (рабочая температура до 600°C), высоким ρ и малым $\text{tg}\sigma$ при повышенных температурах.

Керамика с высокой диэлектрической проницаемостью. Такая керамика применяется, в частности, для изготовления керамических конденсаторов; по сравнению с конденсаторами из керамики с малой ϵ , такие конденсаторы имеют значительно меньшие размеры и массу. Большая часть керамических материалов с высокой ϵ имеет в качестве основной составной части двуокись титана TiO_2 .

Сегнетокерамика – это особая группа материалов, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами: резкой зависимостью ϵ от температуры и напряженности электрического поля, наличием диэлектрического гистерезиса.

ЛЕКЦИЯ 7.

Проводниковые материалы

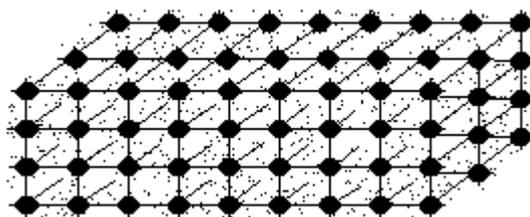
План:

1. Природа проводимости и основные характеристики проводниковых
3. Классификация проводниковых материалов
4. Материалы высокой проводимости Сверхпроводники Высокотемпературные сверхпроводники Криопроводники

Природа проводимости и основные характеристики проводниковых материалов

Из **проводниковых материалов** - твердых тел, жидкостей и газов в электротехнике наиболее часто применяют металлы и сплавы.

Согласно классической теории (**Друде, Лоренци**) металлы можно рассматривать как кристаллический остов, состоящий из **положительных ионов**, погруженных в среду из свободных коллективизированных электронов, называемой "**электронным газом**" или "**электронной жидкостью**".



Наличие свободных делокализованных электронов обуславливает высокую **пластичность**, характерный **блеск** металлов, высокую **электро- и теплопроводность**. Если к проводнику приложить внешнее напряжение, то свободные электроны, совершающие тепловые колебания с средней скоростью порядка 10^5 м/с, приобретают некоторую добавочную скорость направленного движения (несколько мм в секунду), что вызывает протекание электрического тока.

Природа проводимости и основные характеристики проводниковых материалов

Плотность тока **J** связана с напряженностью электрического поля **E** формулой:

$J = \gamma E$ известной, как закон **Ома** в дифференциальной форме. Здесь γ удельная проводимость в симменсах на метр. Удельное сопротивление: $\rho = \frac{1}{\gamma}$. Измеряется в

Ом·м или в внесистемных единицах **Ом·мм²/м**. Предпочтительнее пользоваться единицами **СИ- мкОм·м**.

Связь между единицами удельного сопротивления: **Ом·м = 10⁶ мкОм·м = 10⁶ Ом·мм²/м**

Согласно классической теории металлов: $\gamma = \frac{e^2 n l}{2mV_T}$

где e - заряд электрона,

n - концентрация свободных электронов,

l - средняя длина свободного пробега между двумя соударениями с узлами решетки,

m - масса электрона,

V_T - средняя скорость теплового движения электрона.

Квантово-механическое описание учитывает, что электрон обладает свойствами как частицы, так и волны, поэтому в идеальной периодической решетке электронные волны не рассеиваются. В реальных кристаллах строгая периодичность нарушается примесями, дефектами решетки и тепловыми колебаниями ионов.

Уточненное выражение для удельной проводимости выглядит так: $\gamma = \frac{e^2 n^{\frac{2}{3}} l (\frac{8\pi}{3})^{\frac{1}{3}}}{h}$

где h - постоянная Планка.

Основные характеристики проводниковых материалов:

- удельная электрическая проводимость γ или удельное электрическое сопротивление $\rho = \frac{1}{\gamma}$
- температурный коэффициент удельного сопротивления - $T_{кр}$
- коэффициент теплопроводности λ_T ;
- контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (**термо - Э.д.с.**);
- предел прочности при растяжении $\sigma_{пр}$ и относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$.

Теплопроводность металла

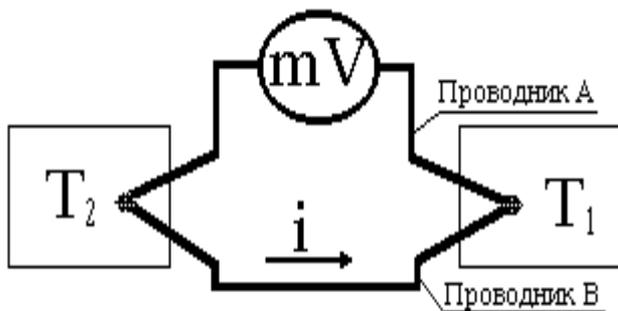
Отношение коэффициента теплопроводности λ_T к удельной проводимости металла выражается законом **Видемана - Франца - Лоренца**: $\frac{\lambda_T}{\gamma} = L_0 T$

$L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ - число Лоренца, T - температура.

Этот закон выполняется для электронной составляющей теплопроводности, если считать, что столкновение электронов носит упругий характер. В некоторых металлах коэффициент теплопроводности определяется суммой электронной и решеточной составляющих.

Термоэлектродвижущая сила

Между двумя различными металлическими проводниками в месте их соединения возникает **контактная разность потенциалов**, обусловленная **различием работы выхода электронов** из разных металлов, **неодинаковой концентрацией электронов** и давлением электронного газа.



Термоэлемент из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой.

Разность потенциалов U , появляющаяся на концах разомкнутой электрической цепи, состоящей из двух различных проводников, контакты которых находятся при различных температурах (T_1 и T_2) называется **термоэлектродвижущей силой (эффект Зеебека)**

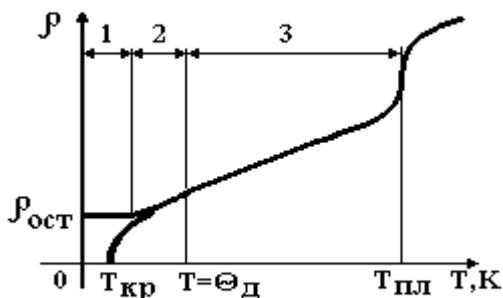
$$U = \lambda_T (T_2 - T_1)$$

где λ_T - относительная дифференциальная (удельная) термо - э.д.с.

Причины термо - э.д.с.:

- температурная зависимость контактной разности потенциалов;
- диффузия носителей заряда от горячих спаев к холодным;
- увлечение электронов фотонами (квантами тепловой энергии).

Зависимость удельного электрического сопротивления металлов от температуры



Характерными температурами являются:

- $T_{пл}$ - температура плавления;
- Θ_D - температура **Дебая**;
- $T_{кр}$ - температура перехода в сверхпроводящее состояние.

У металлов, не обладающих сверхпроводимостью, при низких температурах из-за наличия примесей наблюдается область **1** - область остаточного сопротивления, почти не зависящая от температуры. Остаточное сопротивление тем меньше, чем чище металл. Быстрый рост удельного сопротивления при низких температурах до температуры θ_D может быть объяснен возбуждением новых частот тепловых колебаний решетки, при которых происходит рассеяние носителей заряда - область **2**. При $T > \theta_D$, когда спектр колебаний возбужден полностью, увеличение амплитуды колебаний с ростом температуры приводит к линейному росту сопротивления примерно до $T_{пл}$ - область **3**. При переходе в жидкое состояние у большинства металлов удельное сопротивление увеличивается в **1.5 - 2** раза (у висмута и галлия уменьшается).

***Зависимость удельного электрического сопротивления металлов
от температуры***

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления

$T_{кр}$ определяется так: $T_{кр} = \alpha_\rho =$

$$T_{кр} = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}, \text{ К}^{-1}$$

В справочниках часто приводится величина $\overline{\alpha_\rho}$:

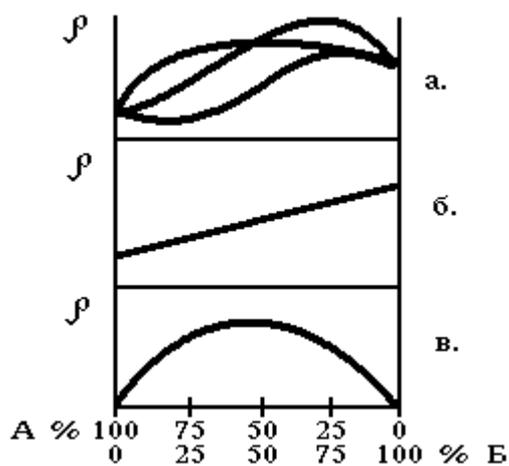
$$\overline{\alpha_\rho} = 1/\rho_{cp} (\rho_2 - \rho_1) / (T_2 - T_1)$$

В области линейной зависимости $\rho(T)$ можно пользоваться выражением:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_\rho (T - T_0)) ,$$

где ρ_0 и α_ρ удельное сопротивление и температурный коэффициент в начале температурного диапазона, а ρ - удельное сопротивление при температуре T .

Электрические характеристики сплавов



Металлические сплавы обычно представляют **механическую смесь** исходных металлов, **твердый раствор** или **химические (интерметаллические) соединения**. Зависимость ρ для двойных сплавов в относительных единицах в функции от процентного содержания компонентов показаны на рисунке:

а - различные варианты систем непрерывных твердых растворов металлов **А** и **Б**;

б - механическая смесь двух металлов;

в - правило **Курнакова Нордгейма** для остаточного сопротивления **изоэлектронных металлов** (принадлежащих к одной группе периодической системы).

Классификация проводниковых материалов

Общепринятая классификация проводниковых материалов отсутствует. Будем рассматривать следующие группы проводниковых материалов:

- материалы высокой проводимости;
- материалы с высоким удельным сопротивлением для резисторов и точных приборов;
- жаростойкие материалы;
- контактные материалы;
- сверхпроводники и криопроводники.

Материалы высокой проводимости

К этой группе относятся **серебро, медь, алюминий**.

Серебро - один из наиболее дефицитных материалов, достаточно широко применяемый в электротехнике и электронике для высокочастотных кабелей, защиты медных проводников от окисления, для электродов некоторых типов керамических и слюдяных конденсаторов в электрических контактах, где оно используется в сплавах с медью, никелем или кадмием, в припоях **ПСр-10, ПСр-25** и др. Серебро марки **Ср999-999.9** должно иметь примесей не более **0.1%**. Удельное электрическое сопротивление $\rho = 0.015 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Механические характеристики серебра невысоки: твердость по **Бринелю** - **25** (немного более золота), предел прочности при разрыве не более **200 МПа**, относительное удлинение при разрыве **~50%**. По сравнению с золотом и платиной имеет пониженную химическую стойкость. Часто применение серебра ограничивается его способностью диффундировать в материалы подложки.

Медь - наиболее широко применяется в качестве проводникового материала: в производстве обмоточных и монтажных проводов и кабелей (мягкая отожженная медь марки **ММ**) в производстве волноводов и т.д.; при изготовлении контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин (медь твердая марки **МТ** - имеет меньшую проводимость и относительное удлинение перед разрывом, но большую механическую прочность, чем отожженная медь марки **ММ**).

Наиболее нежелательными примесями в меди являются **висмут** и **свинец, сера, кислород**. Наиболее чистые сорта проводниковой меди марок **МООК (катодная)** и **МООБ (бескислородная)**, содержат примесей не более **0.001%**. В производстве проводниковых изделий применяют марки меди с содержанием примесей не более **0.05 - 0.1%**, для проводов очень малого диаметра (**0.01 мм**) и проводов, работающих при температурах выше **300°C** применяют проволоку из бескислородной меди. Основные характеристики меди марок **ММ** и **МТ** приведены в таблице.

Характеристика	Медь марки ММ	Медь марки МТ
плотность, кг.м ³	8900	8960
разрушающее напряжение при растяжении, МПа	260 - 280	360 - 390
относительное удлинение, %	6 - 35	0.5 - 2
удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	0.0177 0.0180	0.0172 0.0174
температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, 1/°C	0.0043	

Бронзы - сплавы меди с **оловом (оловянные), алюминием (алюминиевые), бериллием (бериллиевые)** и др. легирующими элементами. По электропроводности уступают меди, но превосходят ее по механической прочности, упругости, сопротивлению истиранию и коррозионной стойкости. Применяются для изготовления пружинящих контактов электрических приборов, контактов токоведущих пружин, проводов линий электрического транспорта, пластин коллекторов электрических машин. Бронзовые детали для упрочнения подвергаются термической обработке - закалке и отпуску при повышенных температурах. Предел прочности на растяжение бронз может быть **800 - 1200 МПа** и более, в то время как проводимость твердых бронз может составлять **10 - 30%** от проводимости чистой меди. Пример некоторых марок бронз:

- **БрО10 (10% олова, остальное медь);**
- **БрА7 (6 - 8% алюминия, остальное медь).**

Алюминий - в **3.3** раза легче меди, имеет сравнительно большую проводимость (для АМ $\rho = 0.028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$) и стойкость к атмосферной коррозии за счет защитной пленки оксида Al_2O_3 . Алюминий мягкий имеет прочность на разрыв **80**, твердый **160 - 170 МПа**. По сравнению с медью имеет больший температурный коэффициент линейного расширения ($26 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$), что является недостатком. В местах контакта алюминиевого провода с проводами из других металлов во влажной среде возникает гальваническая пара, поэтому незащищенная лаками или другими способами алюминиевая проволока разрушается коррозией. Из алюминия особой чистоты с содержанием примесей не более **0.005%** изготавливают электроды алюминиевых конденсаторов и алюминиевую фольгу. Из алюминия, содержащего примесей не более **0.3 - 0.5%** (марки **A7E** и **A5E**), изготавливают проволоку и шины. Для жил кабелей может использоваться алюминий с уменьшенным содержанием примесей - марки **A75K, A8K, A8KY**. Алюминиевые провода можно соединять друг с другом холодной или горячей сваркой, а также пайкой с применением специальных флюсов и припоев. Из алюминиевых сплавов наиболее широко используется **альдрей**, высокие механические свойства которого достигаются за счет наличия в его составе соединения **Mg₂Si** (сплав содержит **98%** чистого алюминия). Его $\sigma_p = 350 \text{ МПа}$, $\rho = 0.0317 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

В линиях электропередачи широко применяют **сталеалюминиевый провод** - стальные жилы, обвитые алюминиевой проволокой. Для сталеалюминиевого провода воздушных линий используется особо прочная стальная проволока с $\sigma_p = 1200 - 1500 \text{ МПа}$, покрытая цинком для защиты от коррозии в условиях повышенной влажности.

Сталь (железо с содержанием углерода **0.1 - 0.15%**) как проводниковый материал используется в виде шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог и пр. Удельная проводимость стали в **6 - 7 раз** меньше, чем у меди, $\sigma_p = 700 - 750 \text{ МПа}$, относительное удлинение перед разрывом **5 - 8%**. На переменном токе в стали проявляется поверхностный эффект и появляются потери мощности на гистерезис. Такая сталь может использоваться для проводов воздушных линий электропередач, если передаются небольшие мощности и основную роль играет не удельное сопротивление провода, а его механическая прочность.

Сплавы высокого сопротивления для резисторов измерительных приборов

Манганины - сплавы на медной основе, содержащие около **85% Cu**, **12% Mn**, **3% Ni**.

Применяются для изготовления образцовых резисторов, шунтов, приборов и т.д., имеют малую термо-э.д.с. в паре с медью (**1 - 2 мкВ/К**), удельное сопротивление **0.42 - 0.48 мкОм · м**, $\sigma_p = 450 - 600 \text{ МПа}$, относительное удлинение перед разрывом **15 - 30%**, максимальную длительную рабочую температуру не более **200°C**. Можно изготавливать в виде проволоки толщиной до **0.02 мм** с эмалевой др. изоляцией.

Константан - медно-никелевый сплав (средний состав **60% Cu, 40%Ni**), имеет $\rho = 0.648 - 0.52 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\alpha_{\rho} = (5 - 25) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\sigma_p = 400 - 500 \text{ МПа}$, относительное удлинение перед разрывом **20 - 40%**. Термо-э.д.с. в паре с медью **45 - 55 мкВ/К**, поэтому константан можно использовать для **термопар. Реостаты и нагревательные элементы** из константана могут длительно работать при температуре **450°C**.

Жаростойкие сплавы - это сплавы на основе **никеля, хрома** и других компонентов. Устойчивость этих сплавов к высоким температурам объясняется наличием на их поверхности оксидов хрома **Cr₂O₃** и закиси никеля **NiO** . Сплавы системы **Fe-Ni-Cr** называются **нихромами**, на основе никеля, хрома и алюминия **фехралями** и **хромальями**. В марках сплавов буквы обозначают: **Х** - хром, **Н** - никель, **Ю** - алюминий, **Т** титан. Цифра, следующая за буквой, означает среднее процентное содержание этого металла. Некоторые свойства жаростойких сплавов приведены в таблице.

Марка сплава	Тип сплава	$\rho_{\text{мкОм} \cdot \text{м}}$	$T_{\text{кр}} \cdot 10^5 \text{ 1/}^\circ\text{C}$	Максимально допустимая температура, °C
X20H80	Нихром	1.04 - 1.17	9	1100
X13Ю4	Фехраль	1.2 - 1.34	15	960
X23Ю5Т	Хромаль	1.3 - 1.5	5	1150

Основная область применения этих сплавов - **электронагревательные приборы, реостаты, резисторы**. Для электротермической техники и электрических печей большой мощности используют обычно более дешевые, чем нихром, фехраль и хромаль сплавы.

Контактные материалы

Для разрывных контактов в **слаботочных контактах**, кроме чистых тугоплавких металлов вольфрама и молибдена применяют платину, золото, серебро, сплавы на их основе и металлокерамические композиции, например, **Ag - CdO**.

Сильноточные разрывные контакты обычно изготавливают из металлокерамических материалов и композиций, например, **серебро - никель, серебро - графит, медь - вольфрам - никель** и др. Для **скользящих контактов** часто используют контактные пары из металлического и графитосодержащего материалов, а также проводниковые бронзы, латуни (сплавы меди и цинка), твердую медь и медь, легированную серебром (для коллекторных пластин) и др. материалы.

Сверхпроводники

Явление сверхпроводимости открыто в **1911 г. Камерлинг-Оннесом**, обнаружившем, что ртуть, охлажденная до температуры жидкого гелия (**4.4К**), полностью теряет электрическое сопротивление. Позднее было установлено, что **сверхпроводимость** возможна в олове, свинце и других металлах. К настоящему времени известно **35** металлов и более тысячи сплавов и химических соединений различных элементов, обладающих сверхпроводимостью.

Возникновение сверхпроводящего состояния связывается с тем, что при температурах ниже точки перехода электрон локально искажает решетку, создавая область притяжения для другого электрона, при этом силы притяжения между ними будут превосходить силы отталкивания. Такие **электронные пары** будут находиться в **одном квантовом состоянии**. Результатом коллективного поведения пар является рассеяние отдельного электрона на примесях и переход в сверхпроводящее состояние.

Критическая температура. У чистых монокристаллов переход в сверхпроводящее состояние совершается очень резко, занимая интервал температур меньше одной тысячной градуса. Переход в сверхпроводящее состояние зависит от структуры кристаллической решетки. Например, белое олово обладает сверхпроводимостью, серое - нет. Среди чистых веществ сверхпроводимость наблюдается в алюминии, кадмии, индии, галии.

Критическое магнитное поле (критическая индукция). Сверхпроводящее состояние разрушается магнитным полем, когда магнитная индукция превосходит некоторое критическое значение, зависящее от материала сверхпроводника и температуры. Экспериментально обнаружено, что критическое поле (**$H_{кр}$**) достаточно хорошо аппроксимируются параболами типа

$$H_{кр} = H_0 (1 - (T/T_{кр})^2),$$

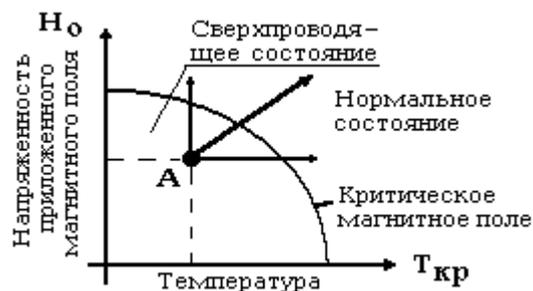
где **H_0** - критическое поле при абсолютном нуле, **$T_{кр}$** - температура сверхпроводящего перехода.

Зависимость критического поля от температуры по сути представляет собой фазовую диаграмму сверхпроводника. Металл будет находиться в сверхпроводящем состоянии при любой комбинации температуры и приложенного магнитного поля, например точку **A**.

Критический ток. Так как суммарный импульс сверхпроводящих электронов не должен превышать некоторого определенного значения для любого сверхпроводника существует критическая плотность тока **$J_{кр}$** , выше которой сверхпроводимость разрушается. Например, если через цилиндрическую проволоку радиуса "**a**" в отсутствие внешнего поля пропускать ток **J**, на ее поверхности возникает магнитное поле напряженностью **H_J** , тогда ток:

$J = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot H$, а критический ток:

$$J_{кр} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot H_{кр}$$

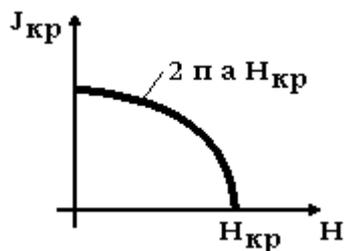


Зависимость критического тока $J_{кр}$ от напряженности магнитного поля H при продольном приложении поля к проводнику, показана на рисунке .

Эффект Мейсснера, обнаруженный в **1933г.**, состоит в вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводящего тела или проводника.

Поверхностный ток, занимая тонкий слой вблизи поверхности сверхпроводника, создает магнитное поле, уничтожающее внутри сверхпроводника внешнее магнитное поле. Поэтому формально сверхпроводник ведет себя как идеальный **диамагнетик**.

Сверхпроводники первого, второго и третьего рода. Сверхпроводники первого рода - это чистые вещества, у которых наблюдается полный эффект Мейсснера (**поля меньше 10^5 А/м**). Сверхпроводники второго рода - это вещества, в которых эффект Мейсснера проявляется частично (поля больше, чем **$10^7 - 10^8$ А/м**). Магнитное поле в них распределено в виде отдельных нитей, а сопротивление равно нулю,



как и у сверхпроводников **1-го** рода. К сверхпроводникам второго рода относятся в основном сплавы (из чистых металлов только **ниобий, ванадий и технеций**). Сверхпроводники третьего рода - это "**жесткие**" сверхпроводники в основном сплавы и химические соединения сверхпроводников **2-го** рода, содержащие дефекты структуры, служащие местами закрепления **вихрей (центров пиннинга)**. **Вихрь** - это область сверхпроводника, в которую проникает внешнее магнитное поле. Каждый вихрь - это элементарный квант магнитного потока. Вихри образуют симметричную решетку, которая при жестком закреплении обеспечивает у сверхпроводников **3-го** рода возможность получения больших критических токов. Например, в проводнике из станнида ниобия

Nb_3Sn в полях с **$B=10Тл$** плотность тока может быть более **10^9 А/м²**.

Сверхпроводники 1-го рода могут существовать в сверхпроводящем или нормальном состоянии, а сверхпроводники **2-го** рода в одном из трех состояний - в сверхпроводящем, смешанном или нормальном. Сверхпроводящие вихри окружают сердцевинки с нормальной проводимостью. **Вертикальные линии** - пронизывающие сердцевинки магнитный поток. Поверхностный ток обеспечивает общий диамагнетизм сверхпроводника.

Соединение	$T_{кр}, K$	Соединение	$T_{кр}, K$
Nb_3Ge	23.2	NbN	17.3
Nb_3Sn	18.5	$LiTiO_4$	13.7
V_3Ga	16.8-14.2	MoN	13-14.8
$NbRu_3$	15-16	$NbSe_2$	7.0

Элемент	$T_{кр}, K$	$H_0, \cdot 10^4 A/m$
алюминий	1.2	0.79
свинец	7.2	6.4
тантал	4.5	6.6
олово	3.7	2.4
цинк	0.9	0.42

Смешанное состояние в сверхпроводнике



Нормальные сердцевинки окружены сверхпроводящими вихрями. Вертикальные линии - пронизывающие сердцевинки магнитный поток. Поверхностный ток обеспечивает общий диамагнетизм сверхпроводника.

На рисунке показаны фазовые диаграммы сверхпроводников **1-го** и **2-го** рода. В таблице сопоставлены верхнее критическое поле $H_{кр2}$ и $B_{кр}$ при **4.2K** и температура $T_{кр}$ станнида ниобия - сверхпроводник **2-го** рода и свинца - сверхпроводника **1-го** рода.

Приведем также примеры критических плотностей тока некоторых сверхпроводниковых сплавов:

- $J_{кр} = 8 \cdot 10^8 A/m^2$ при $B = 0.5 Tл$;
- в молибден-ренийевых сплавах (Mo_3Re), используемых для изготовления проволоки диаметром меньше **0.01мм** $J_{кр} = 10^8 A/m^2$ в поле с $B = 1.5 Tл$;
- в ниобий-титановых сплавах для проволоки с **20%** ниобия при **4.2K** $J_{кр} = 10^9 A/m^2$ при $B = 3 Tл$;
- в ленте из Nb_3Sn на подложке из стали с медным покрытием при **4.2K** $J_{кр} = (2 - 2.7) \cdot 10^8 A/m^2$ при $B = 10 Tл$;
- в ванадий-галиевом сплаве V_3Ga на лентах из ванадия при **4.2K** $J_{кр} = 4.3 \cdot 10^9 A/m^2$ при $B = 14 Tл$.



	$H_{кр,2}$ (4.2К), А/м	$B_{кр}$, Тл	$T_{кр}$, К
Pb	$4.4 \cdot 10^4$	0.08	7.2
Nb_3Sn	$\sim 1.6 \cdot 10^7$	22.0	18

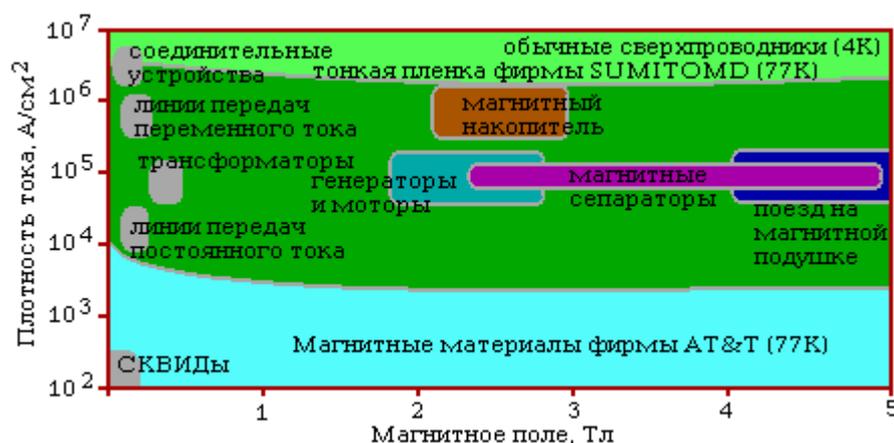
Высокотемпературные сверхпроводники

В начале **1987г.** появились сообщения о разработке керамического материала со структурой $YBa_2Cu_3O_7$, в котором сверхпроводящее состояние наступает при **93К** в поле с $B_{кр}=5.7Тл$. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала $CaTiO_3$). Плотность тока в системах **Y-Ba-Cu-O** получена в настоящее время до $10^4 А/см^2$, что меньше, чем в металлических сверхпроводниках. Перспективными являются висмутовые системы $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$, температура перехода которых достигает **-158°C**. В популярных изданиях имеются сведения о получении **ВТСП** с критической **250К**. Лучшие сверхпроводящие свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток $\sim 10^6 А/см^2$.

Свойства **ВТСП** во многом зависят от технологии. Наиболее простой способ состоит в размоле металлических оксидов, прессования смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре **900°C**. Новое вещество образуется в результате химической реакции. Для устранения межгранулярных прослоек и получения более упорядоченной ориентации кристаллов полученное соединение подвергают плавке с последующим охлаждением. Исследуются и другие методы получения **ВТСП**.

Для широкого применения **ВТСП** требуется преодолеть ряд трудностей, к которым можно отнести необходимость получения больших плотностей тока, гибкости, прочности, способности выдерживать большие магнитные и центробежные нагрузки, легкость обработки, стабильность свойств и др.

Перспективы применения сверхпроводников

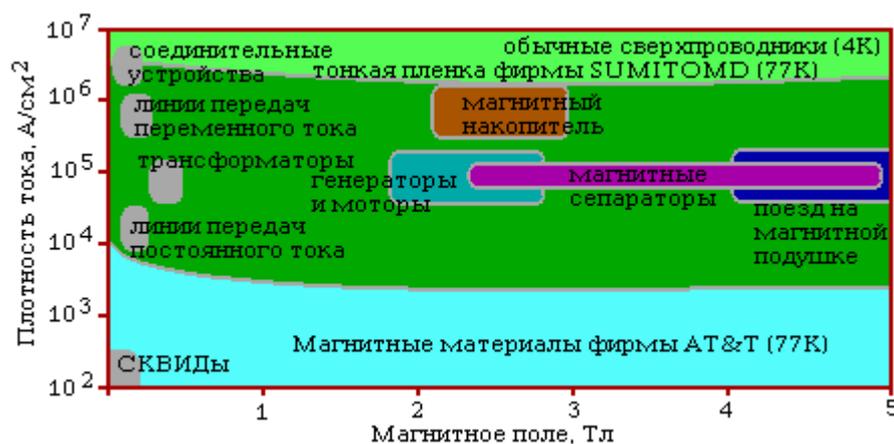


Перспективы применения сверхпроводников

достаточно четко были отражены в статье "Новые сверхпроводники: перспективы применения" Алана М. Вольски и др. в журнале **Scientific American**, апрель 4, 1989 наиболее интересные из которых и приведем ниже.

Сверхпроводящие магниты. С помощью обычного электромагнита, представляющего собой катушку из медного провода, размещенной на железном сердечнике, можно создавать поля до **2Тл**, причем медные провода выдерживают плотность тока до **$400A/cm^2$** .

Сверхпроводники позволяют отказаться от железного сердечника за счет увеличения плотности тока до **$100000A/cm^2$** . Такие плотности тока позволяют получать сплавы из **ниобия-3** и **олова** и **ниобия** с **титаном** при температуре жидкого гелия (**4К**).

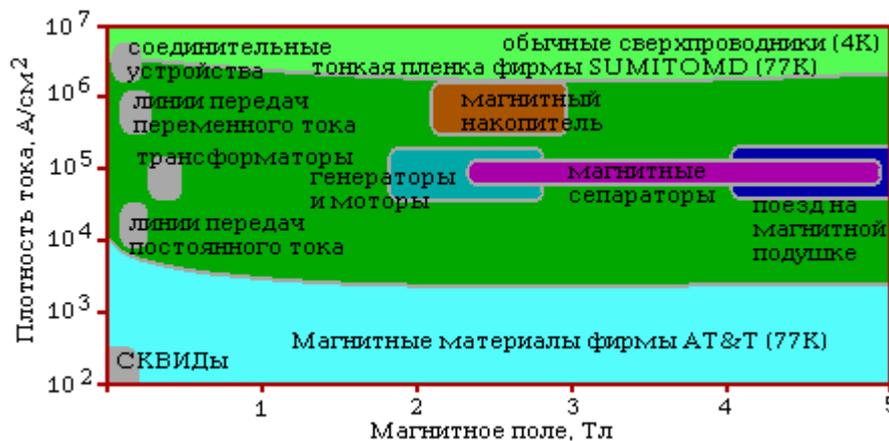


Перспективы применения сверхпроводников

достаточно четко были отражены в статье "Новые сверхпроводники: перспективы применения" Алана М. Вольски и др. в журнале **Scientific American**, апрель 4, 1989 наиболее интересные из которых и приведем ниже.

Сверхпроводящие магниты. С помощью обычного электромагнита, представляющего собой катушку из медного провода, размещенной на железном сердечнике, можно создавать поля до **2Тл**, причем медные провода выдерживают плотность тока до **$400A/cm^2$** .

Сверхпроводники позволяют отказаться от железного сердечника за счет увеличения плотности тока до **$100000A/cm^2$** . Такие плотности тока позволяют получать сплавы из **ниобия-3** и **олова** и **ниобия** с **титаном** при температуре жидкого гелия (**4К**).



Перспективы применения сверхпроводников

достаточно четко были отражены в статье "Новые сверхпроводники: перспективы применения" Алана М. Вольски и др. в журнале **Scientific American**, апрель 4, 1989 наиболее интересные из которых и приведем ниже.

Сверхпроводящие магниты. С помощью обычного электромагнита, представляющего собой катушку из медного провода, размещенной на железном сердечнике, можно создавать поля до **2Тл**, причем медные провода выдерживают плотность тока до **400А/см²**. Сверхпроводники позволяют отказаться от железного сердечника за счет увеличения плотности тока до **100000А/см²**. Такие плотности тока позволяют получать сплавы из **ниобия-3** и **олова** и **ниобия** с **титаном** при температуре жидкого гелия (**4К**). Объемные образцы **иттрий - барий - оксид меди** выдерживают плотность тока до **4000А/см²** при температуре жидкого азота (**77К**) в поле **1Тл**. В отсутствие магнитного поля плотность тока может достигать **17000А/см²**.

Генераторы и линии электропередач. Сверхпроводящие магниты могут повысить **КПД** генераторов большой мощности до **99.5%**, хотя у обычных генераторов он уже достигает **98.6%**. Ежегодная экономия топлива составит **1%**. Экономически рентабельными сверхпроводниковые линии электропередач могут стать только при передаче по ним большого количества энергии.

Аккумулирование электроэнергии. Сверхпроводящие накопители энергии с охлаждением жидким азотом обошлись бы на **3%** дешевле, чем обычные, а общие капитальные затраты уменьшаются еще на **5%**.

Поезда на магнитной подушке - наиболее перспективное применение сверхпроводников для скоростных поездов. Стоимость сооружения пути длиной **500км** обойдется в **1.5 - 4.5 млрд долл.** Стоимость самих поездов составит не более **10%** от общей суммы затрат, а система охлаждения всего **1%**. Сверхнизкие температуры до **10⁻⁶К** достигнуты в магнитных холодильниках при использовании магнитоэлектрического эффекта. Такие системы важны для космических и оборонных программ.

Компьютеры и сверхпроводники. В будущем может быть создан суперкомпьютер на **ВТСП** с быстроедействием в **1000** раз больше, чем у компьютеров, проектируемых в настоящее время. Время переключения на переходах

Джозефсона (два сверхпроводника, разделенных тонким слоем диэлектрика) составит не более 10^{-13} с для $T_{кр}=10\text{К}$ и 10^{-14} с для материала с $T_{кр}=100\text{К}$.

СКВИДы (**сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор**). С помощью **СКВИДа** можно измерять падение напряжения до 10^{-18}В , токи 10^{-18}А (несколько электронов в секунду) и магнитные поля меньше 10^{-14}Тл . Аналогов подобной чувствительности нет. Новые сверхпроводники позволяют регулировать частоты до 10^{12}Гц (близко к квантовому пределу). Чувствительность обычных приборов не превышает 10^{10}Гц . Применение **СКВИДов** - **магнитоэнцефалография, элементы памяти**

Криопроводники

Это материалы, удельное сопротивление которых достигает малых значений при **криогенных температурах** (ниже -173°C). Сверхпроводящее состояние в этих материалах не наблюдается. Наиболее широко в качестве криопроводников применяется **чистая медь** и **алюминий** (марки **A999** с **0.001%** примесей), **бериллий** (**0.1%** примесей). При температуре жидкого гелия у алюминия **A999** удельное электрическое сопротивление равно $(1 - 2) \cdot 10^{-6} \text{мкОм}\cdot\text{м}$. Применяются криопроводники в основном для изготовления **жил кабелей, проводов**, работающих при температурах жидкого водорода (-252.6°C), неона (-245.7°C) и азота (-195.6°C).

ЛЕКЦИЯ 8.

Основные параметры полупроводников.

План:

1. Определение и классификация полупроводниковых
2. Основные параметры полупроводниковых материалов
3. Собственные и примесные полупроводники, типы носителей заряда.

Определение и классификация

Полупроводники при комнатной температуре занимают по удельному сопротивлению, имеющему значения $10^{-6} - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, промежуточное положение между металлами и диэлектриками. По ширине запрещенной зоны к полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной зоны которых лежит в диапазоне **0.1 - 3.0 эВ**. Приведенные данные следует считать ориентировочными, так как они относятся к нормальным условиям, но могут сильно отличаться в зависимости от температуры. Удельная проводимость полупроводников в сильной степени зависит от вида и количества содержащихся в них примесей и дефектов. Для них характерна чувствительность к свету, электрическому и магнитному полю, радиационному воздействию, давлению и др. В полупроводниках часто наблюдается смешанный тип химических связей: **ковалентно-металлический, ионно-металлический** и др. К ним относятся многие химические элементы и химические соединения:

- - **простые вещества**: германий, кремний; селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк и др.;
- - **окислы и сульфиды многих металлов**: **NiO, Cu₂O, CuO, CdO, PbS** и др.;
- - **тройные соединения**: **CuSbSr, CuFeSe₂, PbBiSe₃** и др.;
- - **твердые растворы** **GeSi, GaAs_{1-x}P_x** и др.;
- - **органические красители и другие материалы**: антрацен, фталоцианин, нафталин и другие.

Полупроводники могут быть жидкими или твердыми, кристаллическими или аморфными.

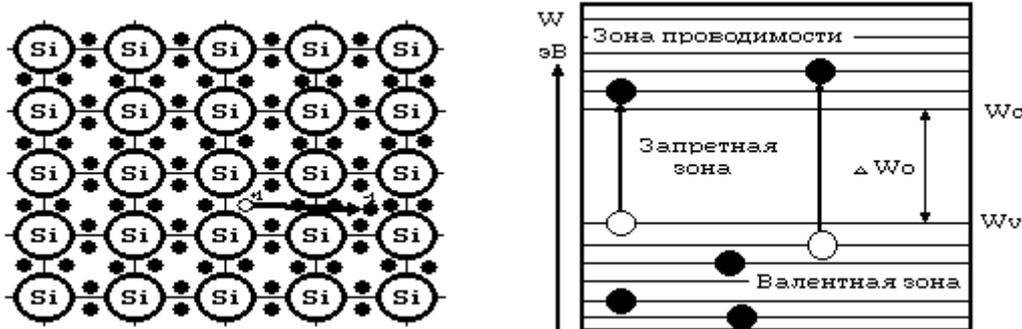
Основные параметры полупроводников.

Из электрофизических параметров важнейшими являются: **удельная электрическая проводимость** (или величина обратная ей - **удельное электрическое сопротивление**), **концентрация электронов и дырок**, **температурные коэффициенты удельного сопротивления**, **ширина запрещенной зоны**, **энергия активации примесей**, **работы выхода**, **коэффициента диффузии носителей заряда** и другие. Для некоторых применений важны **коэффициент термо-ЭДС** и **коэффициент термоэлектрического эффекта**, **коэффициент Холла** и т.п. К фундаментальным параметрам относятся **плотность**, **постоянная**

кристаллической решетки, коэффициент теплопроводности, температура плавления и др.

**Собственные и примесные полупроводники, типы носителей заряда.
Собственная проводимость.**

Свободными носителями заряда в полупроводниках как правило, являются **электроны**, возникающие в результате ионизации атомов самого полупроводника (**собственная проводимость**) или атома примеси (**примесная проводимость**). В некоторых полупроводниках носителями заряда могут быть **ионы**. На рисунке показана атомная модель кремния и энергетическая диаграмма собственного полупроводника, в котором происходит процесс генерации носителей заряда. При абсолютном нуле зона проводимости пустая, как у диэлектриков, а уровни валентной зоны полностью заполнены. Под действием избыточной энергии ΔW_0 , появляющейся за счет температуры, облучения, сильных электрических полей и т.д., некоторая часть электронов валентной зоны переходит в зону проводимости. Энергия ΔW_0 в случае беспримесного полупроводника, равна ширине запрещенной зоны и называется **энергией активации**. В валентной зоне остается свободное энергетическое состояние, называемое **дыркой**, имеющей единичный положительный заряд.



**Собственные и примесные полупроводники, типы носителей заряда.
Собственная проводимость.**



При отсутствии электрического поля дырка, как и электрон, будет совершать хаотические колебания, при этом происходят и обратные переходы электронов из зоны проводимости на свободные уровни валентной зоны (**рекомбинация**). Эти процессы условно показаны на рисунке.

Электропроводность, возникающая под действием электрического поля за счет движения электронов и в противоположном направлении такого же количества дырок, называется **собственной**. В удельную проводимость

полупроводника дают вклад носители двух типов - электроны и дырки:

$$=e(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p), \text{ где}$$

n и μ_n концентрация и подвижность электронов,

p и μ_p концентрация и подвижность дырок.

Для собственного полупроводника концентрация носителей определяется шириной запрещенной зоны и значением температуры по уравнению Больцмана

$$n = \text{const EXP}(-\Delta W_0 / 2kT), 1/\text{м}^3$$

то есть при $0 < kT < \Delta W_0$ переброс через запрещенную зону возможен. В собственном полупроводнике концентрация электронов n_i равна концентрации дырок p_i , $n_i = p_i$, $n_i + p_i = 2n_i$.

Подвижность носителей заряда представляет скорость, приобретаемую свободными электронами или ионами в электрическом поле единичной напряженности

$$\mu = V/E, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$$

Подвижность дырок существенно меньше, чем подвижность электронов. Подвижность электронов и дырок в некоторых полупроводниках показана в таблице.

Полупроводники	Подвижность электронов м ² /(В·с)	Подвижность дырок м ² /(В·с)
Ge	0.380	0.180
Si	0.135	0.050
GaAs	0.820	0.040
InAs	3.000	0.020
InSb	7.000	0.400

Наибольшая подвижность была обнаружена в антимониде индия **InSb** и в арсениде индия **InAs**.

Примесная проводимость. Поставка электронов в зону проводимости и дырок в валентную зону может быть за счет примесей, которые могут ионизоваться уже при **низкой** температуре. Энергия их активации значительно меньше энергии, необходимой для ионизации основных атомов вещества. Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, занимают уровни в запретной зоне вблизи дна зоны проводимости. Они называются **донорными**. Примеси, захватывающие электроны из зоны проводимости, располагаются на уровнях в запретной зоне вблизи потолка

валентной зоны и называются **акцепторными**. На рисунке показаны энергетические диаграммы полупроводника, содержащего донорные и акцепторные примеси. Примеси с энергией $\Delta W_0 < 0.1$ эВ являются оптимальными. Их относят к "**мелким**" примесям. Мелкие уровни определяют электропроводность полупроводников в диапазоне температур **200-400 К**, "**глубокие**" примеси ионизируются при повышенных температурах. Глубокие примеси, влияя на процессы рекомбинации, определяют фотоэлектрические свойства полупроводников. С помощью глубоких примесей можно компенсировать мелкие



Энергетическая диаграмма полупроводника, содержащего донорные примеси



Энергетическая диаграмма полупроводника, содержащего акцепторные примеси

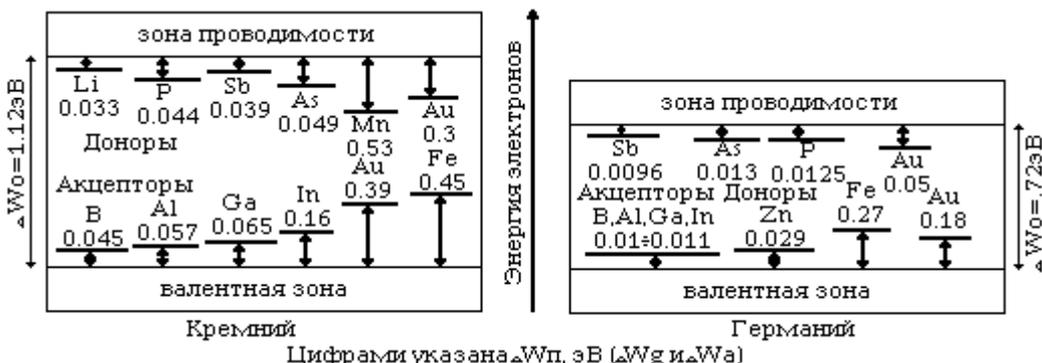
получить материал с **высоким удельным сопротивлением**. Например, глубокими акцепторами можно полностью компенсировать влияние мелких донорных примесей.

В примесном полупроводнике взаимосвязь между количеством электронов и дырок подчиняется закону действующих масс $n \cdot p = n_i^2$, где n_i собственная концентрация. Таким образом, чем больше вводится электронов, тем меньше концентрация дырок. На рисунке на энергетической диаграмме (по Ш.Я.Коровскому) показаны донорные и акцепторные уровни различных примесей в германии и кремнии.

Общее выражение для удельной электрической проводимости полупроводника с примесями можно записать так

$$\gamma = \gamma_0 \text{EXP}(-\Delta W_0/2kT) + \gamma_1 \text{EXP}(-\Delta W_0/2kT),$$

где первый член определяет собственную, а второй примесную проводимости.



Зависимость подвижности носителей заряда от температуры

Подвижность носителей заряда в полупроводниках зависит от температуры, так как тепловое хаотическое колебание частиц мешает упорядоченному движению.

Основные причины, влияющие на температурную зависимость подвижности это **рассеяние** на:

- тепловых колебаниях атомов или ионов кристаллической решетки;
- на атомах или ионах примесей;
- на дефектах решетки (пустых узлах, искажениях, связанных с внедрением иновалентных ионов, дислокациями, трещинами и т.д.).

При низких температурах преобладает рассеяние на примесях и подвижность μ изменяется согласно выражению

$$\mu = a \cdot T^{3/2},$$

где **a** - параметр полупроводника.

При высоких температурах преобладает рассеяние на тепловых колебаниях решетки

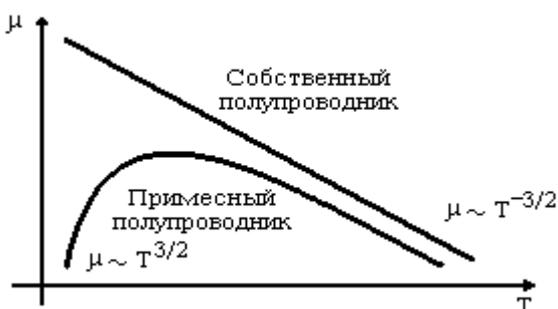
$$\mu = b \cdot T^{-3/2},$$

где **b** - параметр полупроводника.

В примесном полупроводнике имеет место как одна, так и другая составляющая в зависимости $\mu(T)$, определяемая выражением

$$\mu = \left[\frac{1}{a} T^{-3/2} + \frac{1}{b} T^{3/2} \right]^{-1}$$

Характер изменения μ от температуры для собственного и примесного полупроводников показан на рисунке.



Для **собственного** полупроводника концентрация свободных носителей заряда в зависимости от температуры определяется выражением

$$n = A \cdot \text{EXP}(-\Delta W_0 / 2kT),$$

где

- n - концентрация носителей заряда;
- ΔW_0 - ширина запрещенной зоны;
- k постоянная Больцмана;
- A константа, зависящая от температуры;

Для примесных полупроводников

$$n_1 = B \cdot \text{EXP}(\Delta W_n / 2kT),$$

где

- ΔW_n - энергия ионизации примеси;
- B - константа, не зависящая от температуры.

При увеличении концентрации носителей заряда в полупроводниках выше определенного предела она практически перестает зависеть от температуры. Для электронов критическая концентрация имеет порядок 10^{25} м^{-3} . Такие полупроводники называются **вырожденными**.

Зависимость концентрации носителей заряда от температуры при разном содержании примесей показана на рисунке. Увеличением концентрации примесей с низкой подвижностью в данном примесном полупроводнике можно добиться увеличения его удельного сопротивления.



Так, используя глубокий акцептор хром можно получить арсенид галлия с удельным сопротивлением до $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Такие полупроводники относятся к **высокоомным компенсированным**.

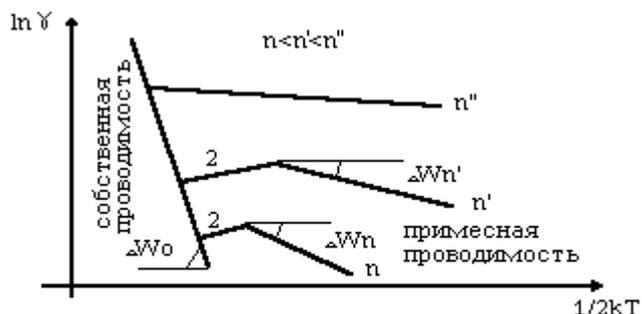
Зависимость удельной проводимости от температуры

Характер этой зависимости в полулогарифмических координатах показан на рисунке. В области собственной проводимости удельная проводимость полупроводника зависит от температуры согласно выражению:

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\Delta W_0 / 2kT}$$

В области примесной электропроводности удельная проводимость выражается

$$\gamma_{\text{п}} = \gamma_1 e^{-\Delta W_{\text{п}} / 2kT}$$



Уменьшение γ на участке 2 связано с истощением примесных уровней и рассеянием носителей на фононах (тепловых колебаниях решетки) и дефектах решетки при увеличении температуры

Уменьшение удельной проводимости на участке 2 приведенной зависимости связано с истощением примесных уровней и рассеянием носителей на **фононах (тепловых колебаниях решетки)** и **дефектах решетки** при увеличении температуры. Приведенные уравнения можно использовать для определения ширины запрещенной зоны полупроводника.

Так, для области собственной проводимости при температурах T_1 и T_2 для удельных проводимостей γ_1 и γ_2 справедливы формулы

$$\ln \gamma_1 = \ln \gamma_0 - \Delta W_0 / 2kT_1,$$

$$\ln \gamma_2 = \ln \gamma_0 - \Delta W_0 / 2kT_2,$$

из которых получим

$$\Delta W_0 = 2k(\ln \gamma_1 - \ln \gamma_2) / (1/T_2 - 1/T_1).$$

Аналогично можно определить энергию активации на примесном участке электропроводности.

Время жизни носителей заряда и

диффузионная длина

В каждом полупроводнике носители имеют некоторое среднее время жизни τ , так как генерируемые носители заряда могут рекомбинировать, встречаясь между собой и с различными дефектами решетки. τ характеризует время жизни **неосновных** (и неравновесных) носителей заряда, появляющихся, например, при воздействии на образец светом (условие равновесия $np=n_i^2$) характеризует равновесные носители заряда при данной температуре. Время жизни определяется по формуле

$$\tau = 1/(V_T N S),$$

где

- V_T тепловая скорость носителей заряда,
- S сечение захвата,
- N концентрация ловушек.

Значения τ_n и τ_p могут находиться в зависимости от типа полупроводника, носителей, температуры и других факторов в диапазоне от 10^{-16} до 10^{-2} с. Избыточные носители, диффундируя от места генерации за время жизни, преодолевают некоторое расстояние L до тех пор, пока их концентрация уменьшится в "e" раз. Это расстояние называется диффузионной длиной, которая определяется по формуле

$$L = D \tau,$$

где D - коэффициент диффузии.

Диффузией изготавливаются **p-n** переходы. Предельно высокое значение τ требуется для **фотоприемников, излучательных** и других приборов.

Основные эффекты в полупроводниках и их применение

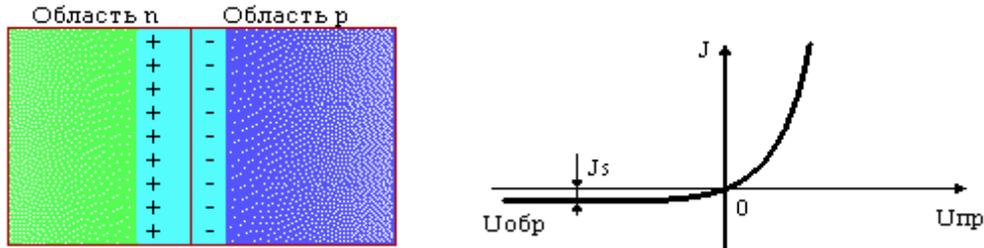
С точки зрения применения в электротехнике к важнейшим относятся **эффекты выпрямления, усиления (транзисторный эффект), Холла, Ганна, фотоэлектрический, термоэлектрический.**

Электронно-дырочный p-n переход. Выпрямительными свойствами обладает лишь **p-n** переход и контакт полупроводника с другими металлами. **p-n** переход представляет собой границу, отделяющую друг от друга области с **дырочной** и **электронной проводимостью** в примесном полупроводнике. **Переход**

должен быть непрерывным. На рисунке показан незрезкий **p-n** переход для разомкнутой цепи. В цепи с переменным электрическим полем **p-n** переход работает как выпрямитель. На рисунке показана вольт-амперная характеристика **p-n** перехода, которая описывается выражением

$$J = J_s \cdot (e^{qU/kT} - 1),$$

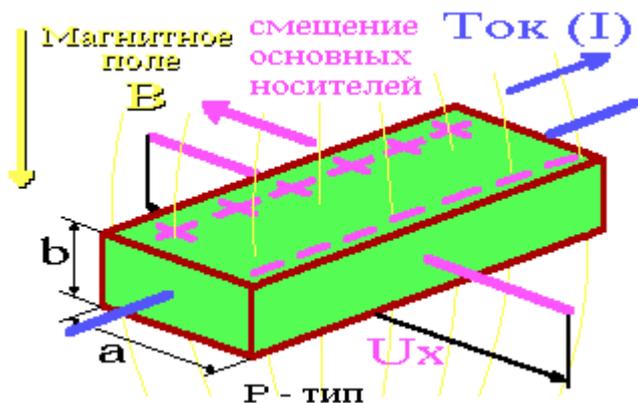
где J_s - ток насыщения (при обратном включении **p-n** перехода этот ток равен обратному току); U - приложенное напряжение; $q/kT = 40 \text{ В}^{-1}$ при комнатной температуре.



Эффект Холла заключается в возникновении **ЭДС Холла** на гранях полупроводникового бруска с током, помещенного в магнитное поле. Величина **ЭДС Холла** определяется векторным произведением тока I и магнитной индукции B . На рисунке изображен случай дырочного полупроводника. Знак **ЭДС Холла** легко определить по правилу левой руки. Отогнув в сторону большой палец, найдем направление смещения основных носителей заряда для данного типа полупроводника. Рассчитывается **ЭДС Холла** так

$$U_x = R_x (IB/b),$$

где R_x - постоянная Холла $R_x = -A/(nq)$ - для **n**-полупроводника, $R_x = B/(pq)$ - для **p**-полупроводника, n и p концентрации электронов и дырок); A и B - коэффициенты, значения которых от **0.5** до **2.0** для различных образцов. В сильных полях или для вырожденных полупроводников $A=B=1.0$. Для монокристаллических образцов с совершенной структурой $A=B=3\pi/8$.



Наиболее часто датчики Холла изготавливают на основе **селенида** и **теллурида ртути (HgTe, HgSe)**, **антимонида индия (InSb)** и других полупроводниковых материалов в виде тонких пленок или пластинок. С их помощью возможно измерение магнитной индукции или напряженности магнитного поля, силы тока и мощности, а при подведении к контактам переменных напряжений - и преобразование сигналов. По измерению ЭДС Холла можно определить знак носителей заряда, рассчитать их концентрацию и подвижность.

Эффект Ганна - относится к эффектам сильного поля и заключается в появлении **высокочастотных колебаний электрического тока** при воздействии на полупроводник электрического поля высокой напряженности.

Впервые этот эффект наблюдался на арсениде галлия **GaAs** и **фосфиде индия InP**. На основе этого эффекта разработаны приборы, генерирующие в диапазоне частот до сотен гигагерц.

Фотоэлектрический эффект. При облучении полупроводников светом в них можно возбудить проводимость. Фототок с энергией $h\nu$ большей или равной ширине запрещенной зоны ΔW_0 , переводит электроны из валентной зоны в зону проводимости. Образующаяся при этом пара электрон-дырка является свободной и участвует в создании проводимости. На рисунке показана схема образования фотоносителей в собственном, донорном и акцепторном полупроводниках. Таким образом, если $h\nu < \Delta W_0$ - для собственных полупроводников, $h\nu < \Delta W_{II}$ - для примесных полупроводников, то появляются добавочные носители тока и проводимость повышается. Эта добавочная проводимость называется фотопроводимостью. Основная проводимость, обусловленная тепловым возбуждением носителей тока называется **темновой проводимостью**. Из приведенных формул можно определить минимальную частоту ν_0 или максимальную длину волны λ_0 , при которой свет возбуждает фотопроводимость

$$\lambda_0 = c h / \Delta W_0 \text{ и } \lambda_0 = c h / \Delta W_{II}.$$



Схема образования фотосистемы в собственном полупроводнике

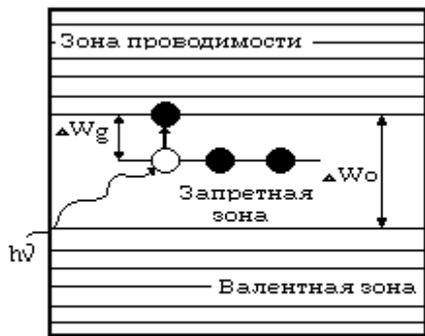


Схема образования фотосистемы в донорном полупроводнике

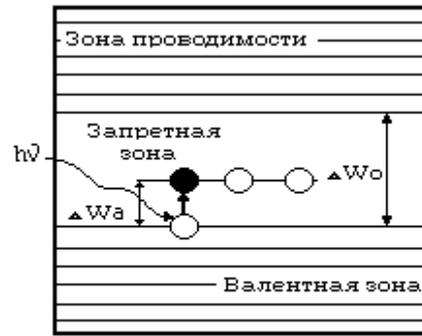


Схема образования фотосистемы в акцепторном полупроводнике

Наиболее чувствительные фотосопротивления изготавливаются из **сернистого кадмия (CdS)** и **сернистого свинца (PbS)**. Используются и другие полупроводниковые материалы. Единственным материалом для интегральных датчиков является кремний.

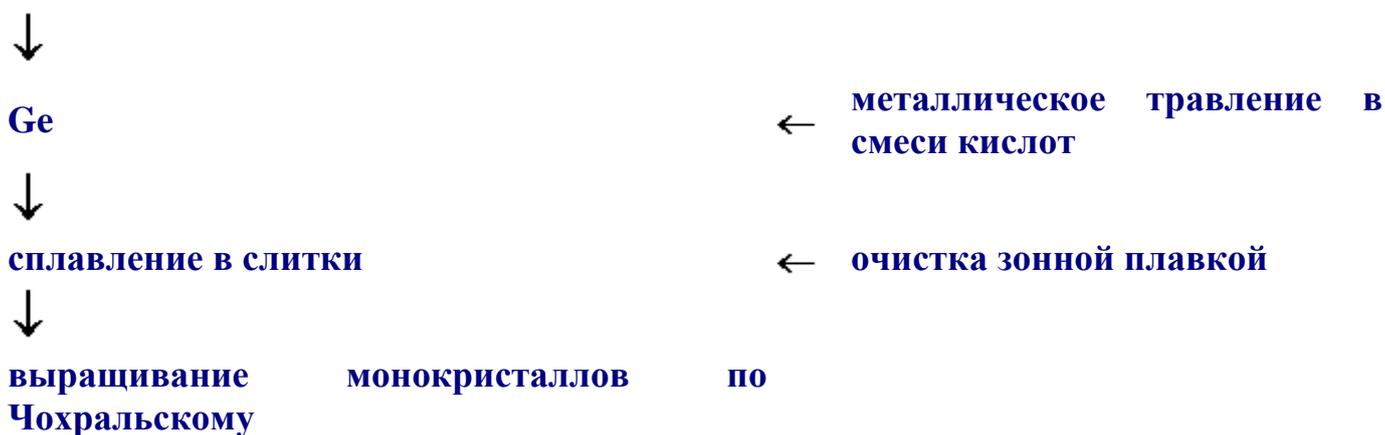
Полупроводники используются в том числе и в **оптоэлектронных устройствах: светодиодах, лазерах, фотодетекторах (датчиках), солнечных батареях, фильтрах.**

Термо-ЭДС в полупроводниках, как и в металлах возникает под действием разности температуры. Основой преобразователей тепловой энергии в электрическую являются термоэлементы, составленные из последовательно включенных полупроводников **p** и **n**-типов. Большая термо-ЭДС полупроводников позволяет использовать их в качестве эффективных **преобразователей тепловой энергии** в электрическую.

Простые полупроводники

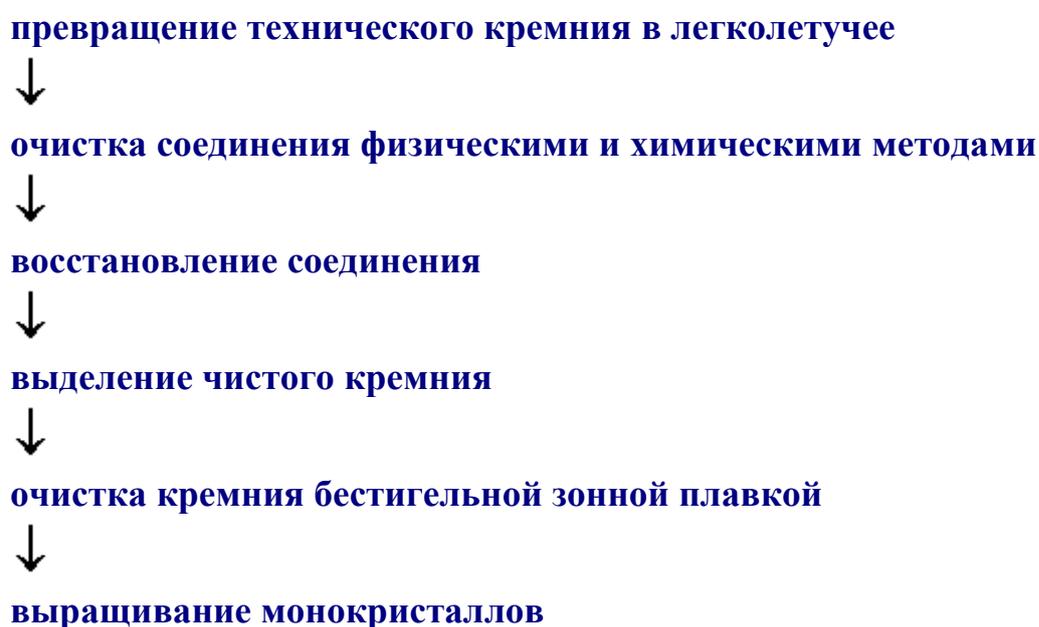
Германий. Один из наиболее хорошо изученных полупроводников. Упрощенная технологическая схема производства германия показана ниже





При зонной очистке вдоль горизонтально расположенного образца создается **4-5 узких расплавленных зон**, перемещающихся вдоль слитка. Примеси оттесняются к концу слитка. Процесс повторяют много раз. Монокристаллы германия можно создавать диаметром до **300-500мм**. Германий применяется для изготовления **диодов** различных типов, **транзисторов**, **датчиков Холла**, **тензодатчиков**, **детекторов ядерных излучений** и в **ИК-оптике**. Рабочий диапазон германиевых приборов от **-60** до **+70°С**.

Кремний полупроводниковой чистоты получается по следующей примерной технологической схеме:



Метод бестигельной зонной плавки позволяет получать кристаллы кремния до **100 мм**. Схема этого метода показана на рисунке. Кремниевые приборы благодаря большей, чем у германия ширине запрещенной зоны, могут работать при более высоких температурах, чем германиевые. Верхний предел рабочей температуры достигает у кремниевых приборов **180-200°С**. Кремний является пока единственным материалом для изготовления **БИС** и **микропроцессоров**. Кремний удается наращивать на монокристаллы или на инородные подложки при толщине слоя **5-10**

мкм. Этот процесс производится при температуре, меньшей температуры плавления и называется **эпитаксией**, при наращивании на инородных подложках, например, на сапфире - **гетероэпитаксией**. Такие структуры используются как основа **ИС** наиболее быстродействующих, энергоемких и радиационно стойких.

Селен - элемент группы таблицы Менделеева, обладающий рядом интересных электрических свойств. Применяется для изготовления выпрямителей переменного тока, фотоэлементов, а также в технологии красок, пластмасс, керамики, как легирующая добавка при производстве стали, в электрофотографии.

Теллур - элемент группы Менделеева с шириной запрещенной зоны **0.35 эВ**. Применяется в виде сплавов с сурьмой и свинцом для изготовления термоэлектрических генераторов. Некоторые характеристики германия, кремния, селена приведены в таблице.

Свойства	Германий	Кремний	Селен
Атомный номер	32	14	34
Температура плавления, °С	937	1412	218
Собственное удельное сопротивление при 20°С, Ом·м	0.47	2·10³	-
Собственная концентрация носителей, м ⁻³	2·10¹⁹	2·10¹⁶	-
Ширина запрещенной зоны, эВ			
при 0 К	0.74	1.165	2.5
при 300 К	0.65	1.12	2.0
Подвижность электронов, м ² /(В·с)	0.39	0.14	-
Подвижность дырок, м ² /(В·с)	0.19	0.05	0.2·10²

Карбид кремния - бинарное соединение с большой шириной запрещенной зоны **2.8-3.1 эВ** в зависимости от модификации. Карбид кремния одно из наиболее твердых веществ, полупроводниковые приборы из которого могут работать при высоких температурах вплоть до **700°С**. Карбид кремния устойчив против окисления до температуры свыше **1400°С**. При комнатной температуре он не взаимодействует ни с какими кислотами.

Карбид кремния применяется для изготовления **варисторов (нелинейных резисторов)**, **светодиодов**, **высокотемпературных диодов**, **транзисторов**, **тензорезисторов**, **счетчиков частиц высоких энергий**, способных работать в химически агрессивных средах. В электротехнике карбид кремния применяется для изготовления **вентильных разрядников**, предназначенных для защиты от

перенапряжений аппаратуры и линий передачи высокого напряжения. Карбид кремния применяется для изготовления **силитовых стержней** для электрических печей на максимальную температуру до **1500°C**. Силитовые стержни изготавливаются на основе карбида кремния, кристаллического кремния и углерода.

Бинарные соединения

Бинарные соединения - соединения A_3B_5 классифицируют по **металлоидному** элементу. Различают **нитриды, фосфиды и антимониды**. Особое место среди них занимает **арсенид галлия**, отличающийся большой шириной запрещенной зоны (**1.4 эВ**) и высокой подвижностью электронов (**0.85 м²/(в · с)**). Он используется для изготовления приборов, работающих при высоких температурах и высоких частотах, для **инжекционных лазеров, светодиодов, туннельных диодов, диодов Ганна, транзисторов, солнечных батарей** и других приборов. Широко применяются **антимонид индия, фосфид галлия, антимонид галлия**.

Соединения A_2B_6 , к которым относятся **халькогениды цинка, кадмия, ртути, сульфиды, селениды, теллуриды** применяются для изготовления фоторезисторов, высоковольтных датчиков Холла, в инфракрасной технике, для создания промышленных люминофоров и другие.

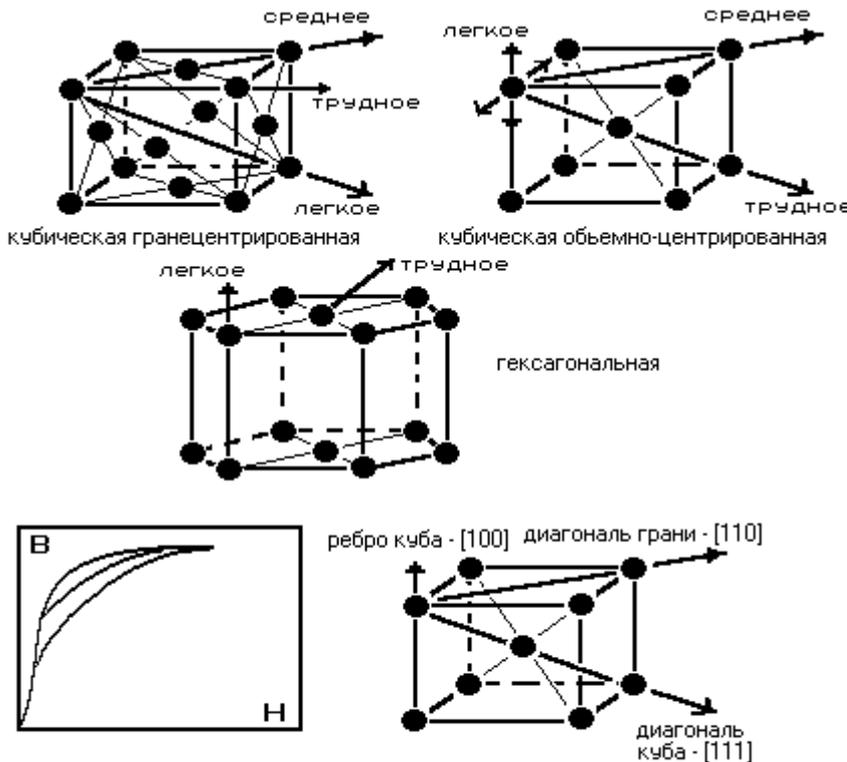
ЛЕКЦИЯ 9

Магнитные материалы

План:

1. Структура ферромагнетиков
2. Электрические свойства магнитных материалов
3. Магнитотвердые материалы. Магнитомягкие материалы

Структура ферромагнетиков



Ферромагнетики в основном кристаллизуются в трех типах решеток: кубической пространственной, кубической объемно-центрированной и гексагональной, показанных на рисунке.

Зависимости $B=f(H)$ показывают, что кристаллы являются магнитоанизотропными. На рисунке эта зависимость показана для железа. Направления намагничивания указаны в квадратных скобках. При отсутствии внешнего поля векторы намагничивания располагаются в легком направлении. Площадь, заключенная между кривыми легкого и трудного намагничивания, пропорциональна энергии, которую требуется затратить для изменения направления намагничивания от легкого до трудного.

Энергию естественной кристаллографической магнитной анизотропии - E_k характеризуют константами кристаллографической магнитной анизотропии. Для кубического кристалла

$$E_k = K_0 + K_1 \cdot (\alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \cdot \alpha_1^2) + K_2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2$$

где K_0, K_1, K_2 - константы кристаллографической магнитной анизотропии;

а $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - направляющие косинусы вектора намагниченности по отношению к осям x, y, z ребер куба.

Это **обратимое изменение формы и размеров образца** при переходе ферромагнетика через точку Кюри при отсутствии внешнего поля (самопроизвольная магнитострикция) и при воздействии внешнего поля на ферромагнетик при $T < T_k$. Сумму энергий кристаллографической магнитной анизотропии и магнитоупругой в результате магнитострикции называют **энергией магнитной анизотропии**.

Магнитная проницаемость

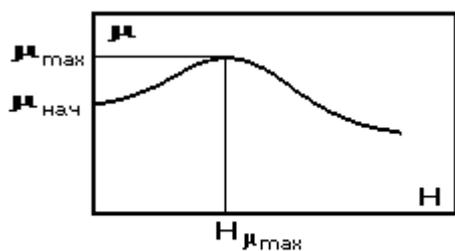
В технике используется несколько десятков видов магнитной проницаемости в зависимости от конкретных применений магнитного материала.

Абсолютная проницаемость $\mu_a = B/H$, **относительная проницаемость** $\mu = (1/\mu_0) \cdot (B/H)$. Зависимость $\mu = F(H)$ показана на рисунке. **Начальная и максимальная проницаемости** являются частными случаями нормальной проницаемости (слово "нормальная" принято опускать)

$$\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 \cdot H}; \quad \mu_{макс} = \frac{B \cdot \mu_{макс}}{\mu_0 \cdot H_{\mu_{макс}}}$$

При одновременном воздействии на магнитный материал постоянного H_0 и переменного H_{\sim} магнитных полей и, обычно, при условии $H_{\sim} \ll H_0$ вводят понятие **дифференциальной проницаемости** $\mu_{диф}$

$$\mu_{диф} = \mu_0 \cdot \frac{dB}{dH}$$



Зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H

Потери в магнитных материалах

В переменных полях площадь петли гистерезиса увеличивается за счет потерь на гистерезис P_r , потерь на вихревые токи P_v и дополнительных потерь P_d . Такая петля называется динамической, а суммарные потери полными или суммарными. Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема материала (удельные потери)

$$P_r = \oint H \cdot dB, \text{ Дж/м}^3.$$

При перемагничивании с частотой f (Гц)

$$P_r = \frac{f \oint H \cdot dB}{\gamma}, \text{ Вт/кг, где } \gamma - \text{ плотность материала, кг/м}^3.$$

Потери на вихревые токи для листового образца $P_v = \frac{1.64 d^2 f^2 B_{\max}^2}{\gamma \cdot \rho}$, где

- B_{\max} - амплитуда магнитной индукции, Тл;
- f - частота переменного тока, Гц;
- d - толщина листа, м;
- γ - плотность, кг/м³;
- ρ - удельное электросопротивление, Ом·м.

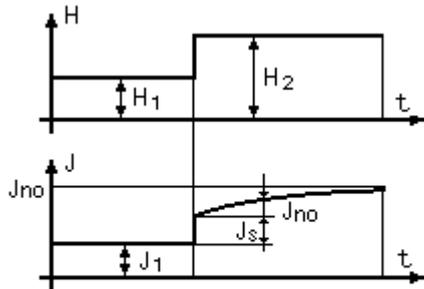
Дополнительные потери или потери на магнитную вязкость (магнитное последствие) обычно находят как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи

$$P_d = P - (P_r + P_v).$$

Магнитная вязкость $J_n = J_n(t)$ зависит от времени действия магнитного поля. J при включении магнитного поля H быстро достигает значения J_1 , а затем со временем возрастает в соответствии с формулой

$$J_n(t) = J_{no}(1 - \exp(-t/\tau)),$$

где J_{no} - намагниченность при $t \rightarrow \infty$; τ - время релаксации. На рисунке показана зависимость напряженности магнитного поля и намагниченности от времени действия магнитного поля. В магнитотвердых магнитных материалах время τ магнитной релаксации может достигать нескольких минут. Такое явление называют **сверхвязкостью**.



Зависимость намагниченности J магнитного материала от времени действия магнитного поля t .
(по Мишину Д.Д.)

Тангенс угла магнитных потерь используют в переменных полях. Его можно выразить через параметры эквивалентной схемы, показанной на рисунке. Индуктивную катушку с сердечником из магнитного материала представляют в виде последовательной схемы из индуктивности L и активного сопротивления R . Пренебрегая собственной емкостью и сопротивлением обмотки катушки, получаем

$$\operatorname{tg} \delta_m = r / (\omega L).$$

Активная мощность P_a :

$$P_a = J^2 \cdot \omega L \cdot \operatorname{tg} \delta_m.$$

Величина, обратная $\operatorname{tg} \delta_m$ называется **добротностью сердечника**.

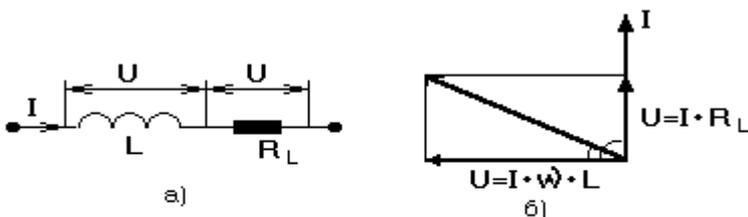
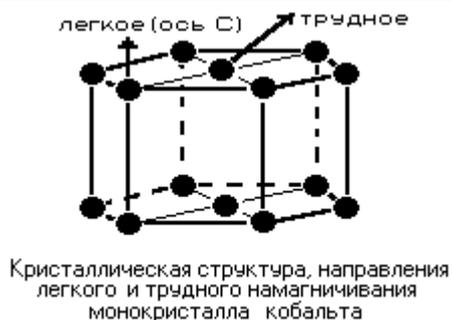


Схема замещения а) и векторная диаграмма б) индуктивной катушки с сердечником из магнитного материала.

Электрические свойства магнитных материалов

Удельное электрическое сопротивление ρ металлических магнитных материалов зависит от состава и направления намагниченности по отношению к направлению движения электронов проводимости. Электрические свойства технических **Fe, Co, Ni** показаны в таблице.

материал	ρ , мкОм·м	температурный коэффициент электрического сопротивления, 10^{-3} K^{-1}
Fe	0.097 (20 °C)	6.2
Co	0.32 (500 °C)	13.8 (500 °C)
Ni	0.068(0-100 °C)	6.7



В чистых монокристаллических образцах металлов наблюдается значительная анизотропия электросопротивления. Так, в монокристаллах кобальта в направлении оси С $\rho_c = 0.103 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, а в плоскости, перпендикулярной этой оси $\rho_p = 0.055 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$

В ферритах по сравнению с металлическими ферромагнетиками удельное электрическое сопротивление много выше, сопоставимо с ρ полупроводников и может меняться в широких пределах в зависимости от состава, типа элементов структуры, вида примесей. Так, для феррита иттрия удельное сопротивление $10^{10} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для феррита никеля $10^3 - 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для феррита лития $1 - 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Энергия активации проводимости ферритов находится в пределах $0.2 - 2 \text{ эВ}$. В ферритах часто наблюдается **поляронная** (прыжковая) проводимость, обусловленная перескоком локализованных электронов из одного состояния в другое. **Полярны** - квазичастицы, образованные локализованными на ионах электронами вместе с окружающим их полем поляризации. В случае поляронов малого радиуса энергия ионизации примесного центра $0.2 - 0.6 \text{ эВ}$.

Классификация магнитных материалов

Магнитомягкие материалы способны намагничиваться до насыщения в слабых полях, обладают **высокой магнитной проницаемостью** и **малыми потерями на перемагничивание**. Условно к магнитомягким относят материалы с $H_c > 800 \text{ А/м}$. Применяются в основном в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электромагнитов, электрических машин и т.д.

Магнитотвердые материалы отличаются **большой удельной энергией**, которые тем больше, чем больше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c материала. К магнитотвердым относят материалы с $H_c > 4 \text{ кА/м}$. Используются главным образом для постоянных магнитов.

Намагничивание магнитомягких материалов происходит в основном за счет смещения междоменных границ, а в магнитотвердых - за счет вращения

вектора намагниченности (в магнитотвердых материалах на основе редкоземельных элементов преобладают процессы смещения).

Магнитные материалы специального назначения

Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ПГ), магнитоотрицательные, термомагнитные, ферриты СВЧ и другие (детальная классификация приведена в книге "Материалы электронной техники" В.П.Пасынкова и В.С.Сорокина).

Магнитотвердые материалы. Основные параметры.

Для характеристики магнитотвердых материалов обычно используют ту часть кривой гистерезиса, которая лежит во втором квадранте, а в первом изображают изменение удельной магнитной энергии от индукции, как показано на рисунке. Магнитная энергия в воздушном зазоре постоянного магнита будет максимальна при некоторых значениях H_d и B_d (см. рисунок). Условие

$$W=(B_d \cdot H_d)/2=W_{\max}, \text{ Дж/м}^3$$

определяет наилучшее использование магнита и является важнейшим параметром, характеризующим качество материала. Множитель 1/2 иногда опускается.

Коэффициент выпуклости

$$\eta=(B \cdot H)_{\max}/(B_r \cdot H_c)$$

характеризует форму кривой размагничивания - степень прямоугольности. **Для магнитотвердых материалов**, используемых в различных областях современной техники $H_c=5 \cdot 10^3-5 \cdot 10^6$ А/м, $(BH/2)_{\max}=0.5-200$ кДж/м³, $(BH/2)_{\max}=1-400$ кДж/м³.



Магнитомягкие материалы. Технически чистое железо

Технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь) содержит менее **0.05% углерода** и минимальное количество примесей других

элементов. Получается прямым восстановлением чистых руд, а также с применением электролитического или карбонильного процессов.

Низкоуглеродистая электротехническая сталь (другое название "армко-железо") обладает высокими значениями магнитной проницаемости и индукции насыщения, низкой коэрцитивной силой. Однако из-за малого удельного электрического сопротивления имеет повышенные потери на вихревые токи и применяется поэтому только в устройствах постоянного тока - полюсных наконечниках электромагнитов, магнитопроводах реле, экранирующих корпусах и др.; является основным компонентом при изготовлении многих магнитных материалов. Промышленностью выпускается также в виде электролитического и карбонильного железа; последнее получается в виде листов и готовых изделий из порошка путем конденсации газообразного пентакарбонила железа $FeCo_5$. В таблице отражены основные магнитные характеристики железа.

Материал	μ		H_c , А/м	B_s , Тл	ρ , мкОм·м
	Начальная	Максимальная			
Технически чистое железо	250-400	3500-4500	50-100	2.18	0.1
Электролитическое железо	600	15000	30	2.18	0.1
Карбонильное железо	2000-3000	20000-21500	6.4	2.18	0.1

На магнитные свойства железа **вливают:**

- химический состав;
- структура;
- размер зерна;
- искажения кристаллической решетки;
- механические напряжения.

Магнитные свойства железа улучшаются:

- при выращивании крупного зерна;
- в результате многократных переплавок в вакууме.

Внутренние напряжения в деталях снимаются отжигом.

Электротехнические стали

Электротехнические стали - сплавы железа с **0.5-5%** кремния, которые образуют с железом твердый раствор.

Кремний переводит углерод из формы цементита в графит, действует как раскислитель, связывая вредные газы, прежде всего кислород; способствует росту зерен, уменьшению констант магнитной анизотропии и магнитострикции;

увеличивает удельное сопротивление, то есть уменьшает потери на вихревые токи. При содержании **Si>5%** ухудшаются механические свойства, повышаются твердость, хрупкость. **Основные вредные примеси:** углерод, сера, кислород, марганец.

Свойства стали существенно **улучшаются** при создании магнитной текстуры, создаваемой холодной прокаткой и отжигом, при этом потери уменьшаются приблизительно в два раза.



При ребровой текстуре наилучшие магнитные свойства получаются в направлении прокатки, наихудшие - под углом 55° к направлению прокатки.

При кубической текстуре наилучшие магнитные свойства обеспечиваются в направлении всех ребер куба элементарных ячеек

В обозначении марок электротехнических сталей используются четыре цифры, обозначающие: **первая** - структурное состояние и вид прокатки: **1** - горячекатанная изотропная; **2**- холоднокатанная изотропная; **3** - холоднокатанная анизотропная с ребровой текстурой; **вторая** - содержание кремния в весовых процентах - классы **0, 1, 2, 3, 4, 5** с содержанием кремния от **0.4%** для класса **0** до **3.8-4.8%** для класса **5**; **третья, четвертая** - гарантированные удельные потери и магнитная индукция.

В таблице приведены характеристики различных типов электротехнических сталей с толщиной листа 0.35 мм, применяемых в энергетическом машиностроении. Для рассматриваемых сталей большое значение имеют удельные потери.

марка стали	магнитная индукция В, Тл при напряженности маг-		Удельные потери, Вт/кг (не более)		ρ мкОм*м
	1	10	ρ1,0/50	ρ1,5/50	
1511	Горячекатанная сталь		1.35	3.0	0.6
	1.30	1.9			
2412	Холоднокатанная изотропная сталь		1.15	2.5	0.5
	1.35	1.95			
3415	Холоднокатанная анизотропная сталь		0.46	1.03	0.5
	0,1	2,5			
	1.61	1.9			

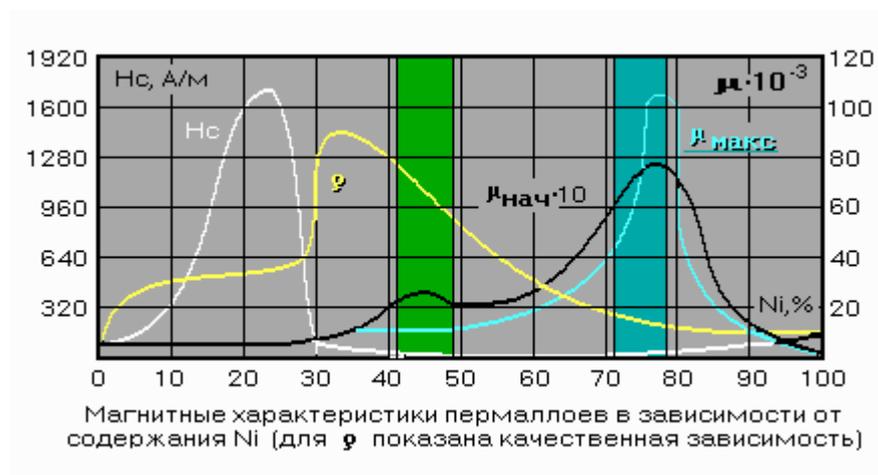
Для оценки характеристик электротехнических сталей в сопоставлении с другими магнитными материалами приведены их удельные значения: $\mu_{нач}=200-600$; $\mu_{макс}=3000-8000$; $H_c=10-65$ А/м; $B_s=1.95-2.02$ Тл; $P=0.25-0.6$ мкОм * м.

Электротехнические стали с высоким содержанием следует применять, если требуются малые потери на гистерезис и вихревые токи и высокая проницаемость в слабых и средних полях. **Холоднокатанные текстурированные стали** имеют более высокую магнитную проницаемость в области слабых полей и более низкие удельные потери по сравнению с горячекатанными сталями. После резки, штамповки и других операций с электротехнической сталью, вызывающих появление налета, ухудшающего магнитные свойства, необходим отжиг в неокислительной среде при температуре **750-800 °С**.

Пермаллои

Пермаллои - железоникелевые сплавы с высокой проницаемостью в слабых полях. По составу выделяют **низконикелевые (40-50% Ni)** и **высоконикелевые (72-80 %Ni)**). Такое подразделение обусловлено смещением магнитных и электрических характеристик в зависимости от процентного содержания никеля. Из диаграммы видно, что $\mu_{нач}$ имеет два максимума: относительный (1) и абсолютный (2): **1** - область с содержанием никеля **40-50%** соответствует низконикелевому пермаллою; **2** - область с содержанием **72-80%** - высоконикелевому, обладающими и наибольшими значениями $\mu_{макс}$.

Из характеристик следует, что ρ у низконикелевого пермаллоя значительно выше (примерно в два раза), чем у высоконикелевого пермаллоя. Это приводит к разграничению области применения низконикелевых и высоконикелевых пермаллоев.



Особенности технологии пермаллоя

Обе группы пермаллоев для улучшения электромагнитных свойств легируются различными элементами, например молибденом, хромом, медью и некоторыми другими элементами. Плавка осуществляется в вакууме или нейтральных газах. Тонкие листы и ленты выпускаются или штамуются

холоднокатанными с последующим высокотемпературным отжигом для получения высоких магнитных свойств. Поверхность ленты для навивки (при изготовлении тороидальных сердечников) и последующего отжига покрывается тонким слоем окислов кремния, магния или алюминия способом катафореза или осаждением из суспензии, жидкой фазой которой является легко испаряющаяся жидкость, например ацетон. **В процессе сборки и эксплуатации** сердечников из пермаллоя не допустимы механические напряжения (удары, рихтование, сдавливание обмоткой и другие) из-за ухудшения магнитных характеристик.

Свойства пермаллоев

Высокие магнитные свойства пермаллоев, их способность легко намагничиваться объясняют близостью к нулю констант кристаллографической анизотропии и намагниченности насыщения, но это же приводит и к большей чувствительности магнитных свойств от внешних напряжений. По основным магнитным свойствам выделяются несколько групп пермаллоев. Посмотрите свойства нелегированного высоконикелевого и низконикелевого пермаллоев.

Основные свойства некоторых наиболее распространенных марок пермаллоев приведены в следующей таблице. Цифра в обозначении марки указывает процентное содержание никеля.

Группа	Марка	Основные свойства
1	79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ	Наивысшая магнитная проницаемость (μ) в слабых полях
2	50НХС	Высокая μ и повышенное φ в слабых полях
3	45Н, 50Н	Повышенная μ и B_{Σ}
4	50НП, 79НМП, 34НКМП, 65НП	Прямоугольная петля гистерезиса, анизотропия магнитных свойств

Ni, %	$\mu_{нач}$	$\mu_{макс}$	$H_c, A/m$	$B_{\Sigma}, Tл$	$\varphi, мкВм^2м$
50	2000–3200	50000–60000	6	1.55	0.5
78.5	7000–14000	100000–200000	2	1.05	0.25

Применение пермаллоев

Сплавы с наибольшей $\mu_{макс}$ и $\mu_{нач}$ рекомендуются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов при их толщинах менее **0.02 мм** - для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и реле.

Сплавы с повышенным удельным сопротивлением реализуют для сердечников импульсных трансформаторов и аппаратуры звуковых и высоких частот, работающих без перемагничивания.

С увеличением частоты следует применять более низконикелевые пермаллои тонкого проката.

Альсиферы

Альсиферы - сплавы Al-Si-Fe, оптимальный состав (**9.6% Si, 5.4% Al**) имеет следующие свойства: $\mu_{\text{нач}}=35400$; $\mu_{\text{макс}}=117000$; $H_c=1.76$ А/м. Это нековкий, с высокой твердостью хрупкий материал (легко размалывается в порошки).

Область применения - магнитные экраны, корпуса приборов и аппаратов, фасонные детали магнитопроводов и другие изделия, работающие в постоянных магнитных полях. Из-за хрупкости толщина стенок должна быть не менее **1-2 мм**. **Тонкие порошки альсифера** применяются в качестве ферромагнитной составляющей магнитодиэлектриков.

Магнитомягкие ферриты

Магнитомягкие ферриты - химические соединения окисла железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Наиболее широко применяются ферриты со структурой шпинели, отвечающими формуле $MeFe_2O_4$, где **Me** - какой-либо двухвалентный катион.

Самопроизвольная намагниченность ферритов обусловлена спиновыми магнитными моментами трехвалентных ионов железа и двухвалентных ионов металла, между которыми существует косвенное обменное взаимодействие через ионы кислорода. **Синтез ферритов** производится по керамической технологии и может быть осуществлен по трем различным технологическим схемам: **1** - из механической смеси оксидов или карбонатов; **2** - термическим разложением твердой смеси солей, полученной выпариванием из водного раствора; **3** - из совместно сочетаемых гидроксидов, карбонатов, оксилатов.

Наиболее распространенный - первый способ.

Применение магнитомягких ферритов

Магнитомягкие ферриты применяются:

- для магнитопроводов, работающих в слабых, сильных магнитных полях до **100 МГц** и в импульсном режиме;
- для изготовления магнитных усилителей, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, статоров и роторов высокочастотных двигателей, термомагнитных компенсаторов и так далее.

Механические, магнитные и электрические свойства магнитомягких ферритов

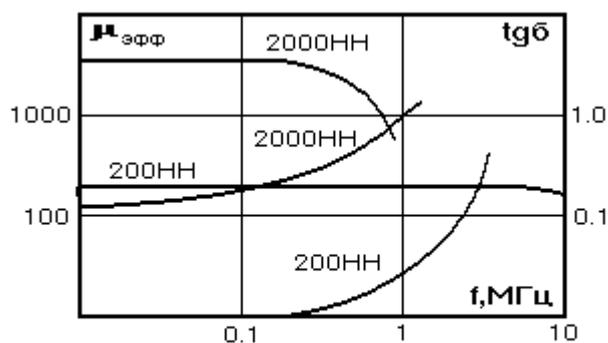
Механические свойства как и у керамики - твердость, хрупкость, недопустимость обработки резанием. При спекании - усадка от **10 до 20%**. Хорошо шлифуются и полируются абразивными материалами, режутся алмазным инструментом.

Наиболее широко в качестве магнитомягких ферритов применяют никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты, представляющие собой твердые растворы замещения, образованные простыми ферритами **NiFe₂O₄** и **MnFe₂O₄**, являющиеся ферромагнетиками, с немагнитным **ZnFe₂O₄**.

В переменных полях для оценки допустимого частотного диапазона ферриты кроме μ характеризуются **tgб**- тангенсом угла магнитных потерь. Для ферритов потерями на вихревые токи и гистерезис в области слабых полей можно пренебречь.

начиная с некоторой, характерной для данной марки феррита значения, **tgб** возрастает более резко, при этом уменьшается μ . Эту частоту называют критической **f_{кр}**. Частоту, при которой $\mu_{нач}$ уменьшается до **0.7** от ее значения **f=0** называют граничной - **f_{гр}**.

Причина уменьшения и роста tgб связывается со сложными резонансными и релаксационными процессами. Зависимости μ и **tgб** от частоты в логарифмическом масштабе для разных марок никель-цинкового феррита показана на рисунке. Цифра в обозначении марки феррита означает величину начальной магнитной проницаемости $\mu_{нач}$.



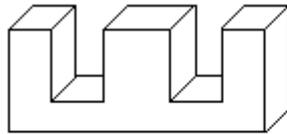
Зависимости эффективной магнитной проницаемости $\mu_{эфф}$ и тангенса угла магнитных потерь **tgб** от частоты **f** для различных марок ферритов

Магнитные и электрические свойства трех марок никель-цинковых ферритов приведены в таблице.

ρ ферритов в зависимости от химического состава и термической обработки изменяется от **10 до 10⁸ Ом · м**. **Основной недостаток** ферритов по сравнению с металлическими магнитными материалами - малое значение их магнитной

проницаемости. Некоторые типы изделий из магнитомягких ферритов показаны на рисунке.

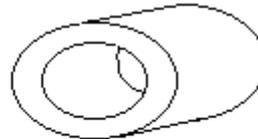
Марка феррита	$\mu_{\text{макс}}$	$H, \text{А/м}$ (при $\mu_{\text{макс}}$)	$f_{\text{кр}}, \text{МГц}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$T_K, ^\circ\text{C}$
2000 НН	7000	12	0.2	10^8	70
200 НН	300	160	3.0	10^3	120
10 ВЧ	40	3700	250	10^8	500



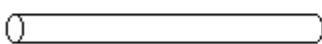
Ш-образный сердечник



П-образный сердечник



Кольцевой сердечник



Ферритовые антенны

Специальные магнитные материалы

Материалы с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД), применяемые для изготовления запоминающих устройств (ЗУ). **Емкость** отдельного устройства (чипа) на ЦМД может составлять 10^5 бит. Чем меньше H_c , тем выше быстродействие ЦМД-устройства. Обычно H_c должна быть **не больше 10 А/м**. Основные материалы для ЦМД устройств приведены в таблице.

Материал	Свойства, особенности технологии или применения
Ортоферриты $R\text{FeO}_3$ R - редкоземельный элемент (Y, Sm, Eu, Er, Yb)	Высокая подвижность доменных границ , прозрачность в красном свете ($\lambda = 0.6 \text{ мкм}$). Плотность информации не велика. $10^3 - 10^4$ бит/см ²
Ферриты гранаты $R_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	Плотность информации выше $10^5 - 10^6$ бит/см² , но подвижность доменных границ ниже, чем у ортоферритов. Применяются в виде монокристаллических пленок.
Аморфные магнитные пленки сплавов Cd-Co и CdFe	Плотность информации до 10^9 бит/см² . Относительно низкая стоимость. Низкая термостабильность и низкое электрическое сопротивление - недостатки.
Гексагональные	Высокая намагниченность насыщения. Субмикронное ЦМД

ферриты
BaFe₁₂O₁₉ и др.

, однако низкая подвижность ограничивает применение

Аморфные магнитомягкие материалы (АММ)

Аморфные магнитомягкие материалы (АММ) являются магнетиками с неупорядоченным расположением атомов, получаемом наиболее часто в результате быстрой закалки расплава со скоростью охлаждения **10⁴10⁶ град/с**. **Аморфные тонкие пленки с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД)** можно получать катодным распылением или вакуумным напылением редкоземельных и переходных металлов. **Металлические аморфные сплавы** содержат **75-85%** одного или нескольких переходных металлов (**Fe, Co, Ni**) и **15-25%** стеклообразователя, в качестве которого используют бор, углерод, кремний, фосфор. По магнитным свойствам **АММ** близка к электротехническим сталям и пермаллоям. Наиболее перспективные сплавы- железоникелевые, высококобальтовые и высокожелезистые. Для получения оптимальных свойств применяют термомагнитную обработку, что позволяет повысить **B_s** и прямоугльность петли гистерезиса. Магнитные свойства двух промышленных сплавов после термообработки показаны в таблице

Марка	B _с , Тл	J _{макс}	H _с , А/м	B _r /B _с при H _c , А/м	ρ, мкОм*м
45НП-А	0.78	310000	1.6	0.93	1.4
44НП-А	0.88	750000	0.56	0.72	1.6

АММ имеют повышенную твердость и коррозионную стойкость.

Удельное сопротивление **АММ** в **3-5** раз больше, чем у кристаллических.

Применение: магнитные экраны, сердечники малогабаритных трансформаторов, магнитных усилителей, головки магнитозаписывающих устройств.

Магнитодиэлектрики

Как и ферриты являются **высокочастотными магнитными материалами**. **По сравнению с ферритами** имеют более стабильные свойства, но по ряду электромагнитных параметров уступают ферритам. Получаются по технологии аналогичной технологии пластмасс.

МД состоят из мелкоизмельченного ферромагнетика, частицы которого изолированы и скреплены немагнитным материалом. В качестве ферромагнетика наиболее часто используют альсифер, карбонильное железо, пермаллой, в качестве связки как органические материалы такие как бакелит, полистирол, шеллак, так и неорганические - жидкое стекло, стеклоэмали и другие.

Прессование изделий из МД - колец, сердечников и т.д. производится при давлениях $(14-20) \cdot 10^2$ МПа ($14-20$ Т/см²), чем выше давление, тем выше магнитная проницаемость.

Примеры магнитных характеристик промышленных магнитодиэлектриков показаны в таблице.

Основа магнито- диэлектрика	Марка	$\mu_{нач}$	Пределы линейности тангенса угла потерь	
			на частоте f, МГц	на величине H, А/м
Альсифер	ТЧ-90	79-91	до 0.5 >>20	до 240 >>1200
	ВЧ-22	19-24		
Карбонильное	Р-10	$\mu_{эфф}$ 2.9	100	2400
	Р-100	1.55		

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы применяются в основном для изготовления постоянных магнитов многих устройств в электро- и радиотехнике, автоматике, приборостроении, электронике. По сравнению с электромагнитами постоянного тока имеют ряд преимуществ, главные из которых: повышенная работоспособность; экономия материалов и потребления энергии; экономическая и техническая выгода применения.

Для получения высокой коэрцитивной силы в магнитных материалах кроме выбора химического состава используют технологии, оптимизирующие кристаллическую структуру и затрудняющие процесс перемагничивания - это **закалка сталей на мартенсит, дисперсионное твердение сплавов, создание высоких внутренних механических напряжений, посторонних включений при высокой магнитострикции** и других. В результате затрудняются процессы смещения доменных границ. **У высококоэрцитивных сплавов** магнитная текстура создается путем их **охлаждения в сильном магнитном поле**.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Богородицкий Н.П., Посынков В.В., Фареев Б.М. Электротехнические материалы. Л. Энергоатомиздат, 1985.
2. Камалов Ш.М., Ахмедов А.Ш. Электротехника материаллари. Ўқитувчи, Тошкент. 1994.
3. Камалов Ш.М., Ахмедов А.Ш. Диэлектриклар. Ўқитувчи, Тошкент. 1990.

Дополнительная литература:

1. Казарновский Д.М., Тарёев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов, Энергия, 1969.
2. Штофа Я.Н. Электротехнические материалы в вопросах и ответах. Пер, со. словац. М: Энергоатомиздат, 1984.
3. Никулин Н.В. Электроматериаловведение. М. Высш. Шк 1984.
4. Мозберг Р.К. Материаловедение: Учеб.пос.М: Высш шк 1991.
5. Электромонтажные работы Кн Э.материалы. М. Высш шк 1992.
6. Справочник по электрическим материалѹ. Москва. Ленинград. Энергия. 1974. 1976