

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Институт информационных технологий и радиоэлектроники

Кафедра радиотехники и радиосистем

Полушин Петр Алексеевич

Радиоматериалы и радиокомпоненты

Конспект лекций  
по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты» для студентов ВлГУ,  
обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника

Владимир – 2018

## **Оглавление**

1. Введение
  2. Основные материалы, используемые в радиоэлектронике
  3. Проводниковые материалы
  4. Полупроводниковые материалы и физические процессы в них
  5. Диэлектрические материалы и физические процессы в них
  6. Конструкционные материалы
  7. Пассивные радиокомпоненты. Резисторы
  8. Конденсаторы
  9. Индуктивные элементы и магнитные материалы
- Заключение
- Список литературы

## Введение

Данный курс представляет собой одну из основных дисциплин, необходимых работнику в области радиотехники и радиоэлектроники для выполнения своих служебных обязанностей в подавляюще большинстве возможных областей практической деятельности. В связи с этим он является актуальным и имеет социальную и общественную значимость в рамках подготовки кадров по данному направлению подготовки.

Курс является одним из первых дисциплин, где студенты знакомятся с основами знаний в области радиотехники и играет роль одного из основных курсов.

Полученные знания могут быть использованы при выполнении выпускной работы, при изучении дисциплин «Электроника», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Радиопередающих устройств», «Радиоприемных устройств», «Основы кибернетики», при прохождении практик, а также в процессе разработки и проектирования радиоаппаратуры.

Содержание учебного курса соответствует требованиям Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования от 6 марта 2015 года.

Целями и задачами учебного курса являются:

1. Подготовка в области знания основных компонентов, используемых при создании радиоэлектронной аппаратуры.
2. Формирование практических навыков работы с элементной базой.
3. Ознакомление с основами применения современной элементной базы и перспективами ее развития.
4. Подготовка в области радиотехники для разных сфер профессиональной деятельности .
  - проектно-конструкторской;
  - производственно-технологической;
  - научно-исследовательской;
  - сервисно-эксплуатационной.

Самостоятельная (внеаудиторная) работа студентов включает закрепление теоретического материала при подготовке к выполнению и защите лабораторных заданий, а также при выполнении индивидуальной домашней работы. Основа самостоятельной работы - изучение литературы по рекомендованным источникам и конспекту лекций.

## ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

1. Электрофизические свойства основных материалов, используемых в электронной технике.

2. Классификация материалов.

3. Виды химических связей. Особенности строения твердого тела.

4. Элементы зонной теории строения тела.

5. Физические явления в p-n переходе и его свойства

### **Классификация материалов:**

Все материалы электронной техники подразделяются на три группы:

- электротехнические
- конструкционные
- материалы специального назначения

Электротехнические характеризуются определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю.

Материалы разделяют по поведению в магнитном поле:

- сильномагнитные (магнетики)
- слабомагнитные

По реакции на электрическое поле:

- проводники
- полупроводники
- диэлектрики

Проводниковыми называют материалы, основным свойством которых является сильно выраженная электропроводность. К ним относят материалы с  $\rho < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Диэлектриками называют материалы, основным свойством которых является способность к поляризации, а также возможность существования внутри их электрического поля. К ним относят материалы с  $\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

У диэлектриков рассматриваются активные и пассивные свойства.

Среди пассивных свойств:

- малая проводимость, что позволяет использовать их в качестве изоляционных материалов.  $\epsilon$  у них невелика и на нее не обращают внимание.

- способность к поляризации. Используется при изготовлении конденсаторов.  $\epsilon$  у них большое.

**Активные свойства:**

$\epsilon$  зависит от внешних факторов. К ним относят сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики. Вещества в интервале свойств между сегнетоэлектриками и пьезоэлектриками относятся к полупроводникам.

Основным свойством полупроводников является то, что их параметры очень сильно зависят от их вида и концентрации примесей. Свойства полупроводников сильно зависят от внешних факторов:

- температура
- освещенность
- радиация

### **Основные виды химических связей:**

У каждого атома есть свой набор энергетических уровней. Набор энергий, которыми обладают электроны, называется спектром энергетических уровней. Такая картина наблюдается только у уединенных атомов. Спектр линейчатый. Когда атомов много картина усложняется.

**Ковалентная связь:**

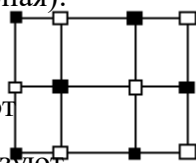
Объединение атомов в молекулу за счет обобществления электронов соседних атомов. Ковалентные связи образуются только между ближайшими, соседними атомами. Молекулы либо симметричны, либо не симметричны. У симметричных молекул общий центр всех положительных зарядов совпадает с общим центром отрицательных зарядов. Они нейтрализуются. Такие вещества называются неполярными. У несимметричных молекул общие центры не совпадают. Образуется электрический диполь. У полярных диэлектриков ковалентная связь очень прочная.

**Ионная связь (гетерополярная):**

**Металлическая связь:**

Все атомы вещества теряют  
какие-то электроны и образуют

решетку из неподвижных  
положительно заряженных



ионов. Все потерянные электроны обобществляются во всем объеме образца, образуя «электронный газ». У веществ с ковалентной связью обобществляются электроны только пар атомов.

У веществ с металлической связью обобществляются любые электроны. Хорошая электропроводность, теплопроводность, ковкость.

Молекулярная связь (силы Ван-дер-Ваальса).

Наиболее универсальная, но наиболее слабая связь.

### **Особенности строения твердых тел.**

Основное свойство кристалла – периодичность структуры (т.е. существование некоторой элементарной ячейки, дублируя которую можно получить всю структуру).

Основная классификация кристаллов:

- по виду ячеек
- по виду симметрии

В кристаллах существуют кристаллографические плоскости и оси.

Монокристаллы:

Структура соблюдается во всем образце. Анизотропия – различные свойства вдоль разных направлений. Эти направления жестко привязаны к решетке и зависят от направления оси.

Поликристаллы:

Состоят из совокупности зерен. Внутри зерен структура наблюдается, а на границе нарушена. Блочная кристаллическая структура.

Отклонения от идеальной структуры кристалла называется дефектом кристалла.

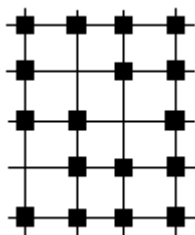
Динамические дефекты возникают при прохождении через кристалл различных типов волн. Фонон – квант непрерывной акустической энергии. Солитон – квант одиночной волны.

Статические дефекты:

- точечные (атомные)
- протяженные

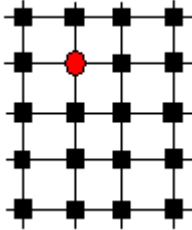
Точечные статические дефекты:

1. Вакансия

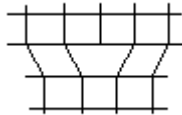


## 2. Вклинился чужеродный атом

- отклоняется от геометрической правильности
- электронные взаимодействия с соседями другие



## 3. Смещение



Протяженные статические дефекты:

- смещение слоев
- поры
- трещины
- границы зерен (поликристаллы)
- микровключения другой фазы

Появление примесей значительно меняет свойства (особенно в полупроводниках).

0,001% примеси меняет сопротивление в  $10^5 - 10^6$  раз.

Полиморфизм

Это вещество может образовывать не один вариант твердой структуры, а несколько.

Эти состояния устойчивы при различных температурах и давлении.

Аллотропные модификации ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

Стекла и аморфные тела

Любой системе соответствует определенная энергия. Чем более система упорядочена, тем ниже эта энергия. Система стремится к минимальному уровню энергии.

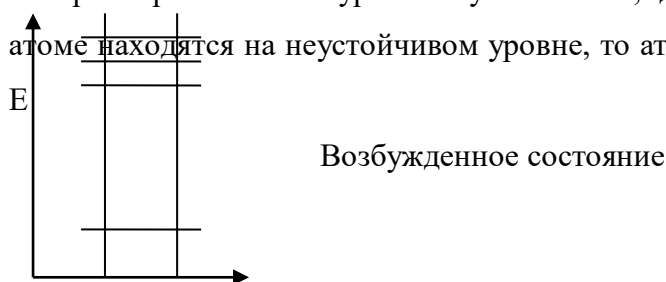
При затвердевании система стремится кристаллизоваться, но удастся это не всегда. С уменьшением температуры увеличивается вязкость (уменьшается скорость перемещения атомов). При этом образуется аморфная структура, в которой регулярность не выражена.

Основные свойства:

- изотропия – нет различий в свойствах по разным направлениям
- нет четко выраженной температуры плавления
- вместо плавления – размягчение (в интервале температур)

### Элементы зонной теории тела.

Зонная теория объясняет все явления в кристаллах при взаимодействии с электромагнитным полем. Основная идея базируется на квантовых явлениях. Этот набор – спектр энергетических уровней атома. Все уровни можно разделить на два вида. Один набор энергетических уровней устойчивый, другой неустойчивый (если электроны в атоме находятся на неустойчивом уровне, то атом находится в возбужденном состоянии).



Устойчивое состояние

Атом стремится к минимальной энергии (из возбужденного состояния в устойчивое). При переходе из возбужденного состояния в устойчивое, энергия излучается в виде кванта. Любое вещество имеет свой спектр излучения.

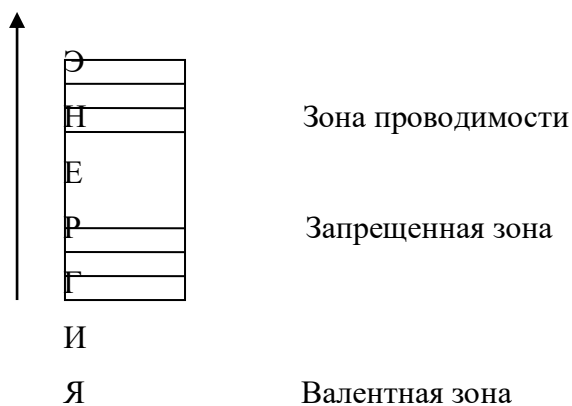
Газообразная среда.

В газообразной среде атомы удалены достаточно далеко, поэтому взаимодействия между атомами практически отсутствуют, следовательно, положение энергетических уровней такое же, как у отдельных атомов. Спектр свечения газа состоит из отдельных полос.

Твердые тела.

Электронные оболочки соседних атомов перекрываются и начинают взаимодействовать друг с другом. Электроны могут переходить от одного атома к другому по средствам обмена без изменения энергии. Поэтому в твердых телах про электроны внешних оболочек нельзя говорить, что они принадлежат отдельному атому. Происходит обобществление электронов (каждый валентный электрон принадлежит как бы всем атомам).



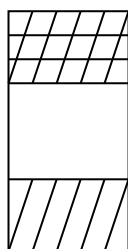


Положение зон зависит только от структуры образца. Количество линий  $\approx 10^{20}$  (соизмеримо с количеством атомов в образце). Это приводит к тому, что зоны ведут себя двояко. На каждой линии может пребывать только определенное число атомов. У различных веществ линии могут быть полностью заполненными, либо частично незаполненными.

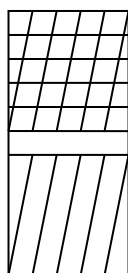
Для того чтобы определить относится ли вещество к проводникам или к диэлектрикам необходимо ответить на два вопроса:

- 1). Если запрещенная зона достаточно широкая, то в валентной зоне есть линии незаполненные электронами.
- 2). Все уровни валентной зоны заполнены.

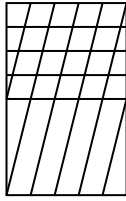
Диэлектрик



Полупроводник (запрещенная зона существует, но она очень маленькая)



Проводник (зона проводимости и валентная зоны смыкаются)



Вещество становится проводником, когда валентные электроны легко переходят в зону проводимости, либо валентная зона полностью заполнена.

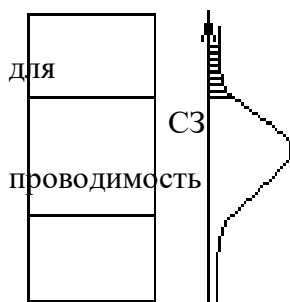
Полупроводник в случае, когда  $\Delta$  Энергия  $< 3$  эВ.

- помещаем образец в электрическое поле
- электрон должен приобрести дополнительную энергию
- получив дополнительную энергию электрон должен перейти на следующий энергетический уровень

- если все уровни заняты, то электроны упорядоченно не движутся

Следовательно, вещество является диэлектриком.

Электропроводность может появиться даже в диэлектрике, если часть электронов перевести из валентной зоны в свободную зону. При нуле градусов по Кельвину (температура абсолютного нуля  $-273^{\circ}\text{C}$ ) все валентные уровни в диэлектрике заняты, свободные уровни пустые. С повышением температуры повышается внутренняя энергия, у некоторых электронов хватает энергии для того, чтобы перейти из валентной зоны в свободную. С повышением температуры у всех диэлектриков в той или иной степени появляется проводимость. С повышением температуры сопротивление диэлектриков уменьшается.



В связанной системе частицы, у которых хватает энергии того, чтобы перейти в свободную зону имеют (проводимость у них появляется).

ВЗ

Для перевода электронов из валентной зоны в свободную зону необходим приток энергии. Нагревание. При комнатной температуре заштрихованная область мала и роли не

играет. Проводимость мала. Если электрон перешел из валентной зоны в свободную зону, то на его месте появилась вакансия («дырка»), в которую может попадать электрон. Эта вакансия имеет положительный заряд и может перемещаться по кристаллу как отдельная самостоятельная частица.

Ширина запрещенной зоны может меняться в зависимости от следующих факторов:

- с ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов в узлах решетки

- с ростом температуры может меняться межатомное расстояние

Энергию для перехода электрона из валентной зоны в свободную может дать не только тепловое движение, но и поглощение кванта электромагнитного излучения, ядерные процессы, механические процессы (трение...). Различные аллотропные состояния тоже имеют различные свойства. Углерод → графит (проводник) → алмаз (диэлектрик)

Если в веществе имеются примеси, то эта примесь может создавать валентные зоны в местах запрещенных зон. Если концентрация мала, то атомы примеси могут создавать дискретные уровни. Если концентрация большая, то атомы взаимодействуют друг с другом, может создаться зона проводимости.

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с классификацией основных видов материалов, используемых в радиоэлектронике и особенностями их свойств, позволяющих их классифицировать. Знакомство с основами зонной теории дает возможность подвести научное обоснование под различия свойств материалов и знакомит студентов с современными фундаментальными научными понятиями

## **ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

1. Классификация проводниковых материалов.
2. Общие свойства проводников.
3. Материалы высокой проводимости.
4. Высокотемпературостойкие материалы.
5. Сплавы сопротивления.
6. Припой и флюсы.
7. Неметаллические и композиционные проводящие материалы.

### **Общие свойства проводников.**

К твердым проводникам относятся металлы, металлические сплавы, модификации углерода. К жидким проводникам относятся расплавы металлов и электролиты.

Механизм протекания тока по металлам обусловлен движением свободных электронов. Металлы имеют электронную проводимость и являются проводниками первого рода. Проводники второго рода – растворы кислот, щелочей, солей, ионные растворы. Электрический заряд переносится на ионах. Газы в обычных состояниях проводниками не являются. Однако в результате ионизации у них может проявляться проводимость. Предельным случаем является плазма (сильно ионизированный газ при примерном равенстве положительных и отрицательных ионов). Плазма – очень хороший проводник. В металлах, как уже было сказано, проводимость электронная. Электроны имеют малую массу и хорошую подвижность, поэтому они не только переносят энергию, но и дополнительно выравнивают скорость движения атомов и молекул (электроны выравнивают температура тела). Все металлы имеют хорошую теплопроводность. При температурах близких к абсолютному нулю в металлах наблюдаются сложные квантовые эффекты. При абсолютном нуле все электроны занимали бы один уровень, а этого не происходит. Даже при 0 К электроны движутся и занимают определенный набор энергетических уровней. Самый большой энергетический уровень – уровень Ферми.

$$\varphi_F = \frac{\mathcal{E}_F}{e} \text{ электрохимический потенциал данного вещества}$$

$\mathcal{E}_F$  – определяется концентрацией свободных зарядов в веществе

$e$  – заряд электрона

**Контактные явления.**

Чем больше разница между  $\mathcal{E}_{FA}$  и  $\mathcal{E}_{FB}$ , тем сильнее контактные явления ( $\mathcal{E}_{FA} \neq \mathcal{E}_{FB}$ ). При контактировании различных материалов возникает более интенсивный переход электронов, от материалов у которых уровень электронов больше к материалам, уровень электронов которых меньше. Переход электронов заканчивается, когда  $\Delta\varphi$  нейтрализует уровень Ферми. Проводимость сплавов может очень сильно отличаться от проводимости исходных веществ.

### **Классификация проводниковых материалов.**

Материалы высокой проводимости ( $\rho \leq 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ )

Наиболее распространенные из них Медь и Алюминий.

### *Медь*

Только у серебра  $\rho$  (удельное сопротивление) меньше чем у меди. Медь имеет высокую механическую прочность. Стойкость к коррозии у меди больше чем у железа. Хорошая технологичность (легкость пайки сварки). МТ (медь твердая) – повышенная твердость и упругость при изгибе. ММ (медь мягкая) – твердость и упругость не велики. Хорошая пластичность и большое относительное удлинение до разрыва.

$M0 \leq 0,05$  % примеси

$M1 \leq 0,1$  % примеси

Сплавы Медь + (Sn; Al; Si; Mn; Be; Cd; P)

Cd – для контактов

P – для пружин

Sn – для проводов

Be – для скользящих контактов

Латунь (сплав меди с цинком; наиболее распространенный медный сплав) применяют для изготовления мелких деталей.

### *Алюминий*

Удельное сопротивление алюминия в 1,68 раза больше чем у меди. Масса алюминия в 3,5 раза меньше массы меди.

$AV < 0,07$  % примеси

$A0 < 0,4$  % примеси

$A1 < 0,6$  % примеси

$A2 < 1$  % примеси

$A3 < 2$  % примеси

Существуют марки АТ (алюминий твердый) и АМ (алюминий мягкий).

Алюминий достаточно каррозиоустойчивый из-за существования оксидной пленки. Алюминиевые изделия, испытывающие на себе механическое воздействие, быстрее окисляются.

### *Железо и стали*

Используется как конструкционный, магнитный и проводниковый материал.

### *Свинец*

Мягкий и эластичный материал. Малопрочный и ядовитый. Защищает от радиации.

### *Олово*

Припой. Чистое олово обладает крупнозернистой металлической структурой. Олово имеет хорошие антикоррозийные свойства. При охлаждении олово рассыпается в порошок (так называемая «оловянная чума»).

### **Высоконагревостойкие материалы.**

Основное применение высоконагревостойкие материалы нашли в вакуумной технике и космической промышленности.

#### *Вольфрам*

Тяжелый и твердый металл. Используется в виде проволоки и фольги. Катоды мощных электронных ламп покрывают вольфрамом, а также металл используется в контактах на большие токи.

#### *Молибден*

Используется там же где и вольфрам, но менее химически стоек. Металл нашел широко применение, поскольку относительно дешев. Существуют различные марки молибдена.

#### *Тантал и Ниобий*

Используются как по отдельности, так и в сплаве между собой. Тантал имеет высокую способность поглощать газы. При нагреве  $700^0 - 1800^0$  С проявляется высокая абсорбционная способность. Металл используют в качестве внутреннего покрытия электровакуумных приборов.

#### *Титан и Цирконий*

Выпускаются как чистыми, так и в сплавах со многими металлами (Cu; Al; Cr; Mo; Mg). Характеризуются высокой нагревостойкостью. ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения) в сплавах этих металлов маленький и близок к ТКЛР стекла и керамики.

#### *Серебро, Золото, Платина, Палладий*

Самое распространенное из них – серебро (поскольку оно является самым дешевым из выше перечисленных благородных металлов). У серебра самое маленькое  $\rho$  (удельное сопротивление) и в основном оно используется в СВЧ технике (покрытии внутренних поверхностей). Серебро хорошо защищает от коррозии. Для той же цели используется и золото. Золото очень хороший технологичный материал. Серебро и золото используются в качестве припоя. Палладий является очень хорошим материалом для покрытия. Особенностью этого металла является то, что он в огромных количествах способен поглощать водород (1 дм<sup>3</sup> палладия может поглотить до 850 л водорода). Платина

является химически стойким не окисляющимся металлом с высокой температурой плавления.

#### *Литий, Натрий, Калий, Цезий*

Основное свойство этих металлов – высокая светочувствительность (цезий в ИК-диапазоне, литий в рентгеновском излучении).

#### *Прочие металлы*

Никель характеризуется малой окисляемостью (антикоррозийность) и хорошей обрабатываемостью. Используется для покрытий и изготовления вспомогательных деталей. Ртуть используется в газоразрядных приборах, а также в качестве жидких контактов. Образует амальгамы со многими металлами (Al; Mg; Sn; Pb; Zn; Ag; Au; Pt). Амальгамы используются для нанесения покрытий. Железо в ртути не растворяется.

Кобальт по свойствам близок к никелю. Используется в основном в сплавах. Хром используется в качестве устойчивого покрытия.

#### **Сплавы сопротивления.**

Основное свойство таких материалов – сопротивление. Такие сплавы используются для изготовления мощных проволочных резисторов, в качестве эталонов сопротивления, в измерительной технике (в виде шунтов и добавочных сопротивлений). Наиболее распространенный из таких сплавов – манганин (86% меди + 12% марганца + 2% никеля). Применяется в виде проволоки (жесткой – ПМТ и мягкой - ПММ). Манганин обладает высокой стабильностью сопротивления до 60°C.

Константан (сплав меди и никеля). Стабильность немного хуже стабильности манганина. С медью константан составляет термопару.

Нихром (сплав никеля и хрома). Используется при температуре до 1100°C. При непрерывном нагреве может иметь долгий срок службы. Очень плохо выносит тепловые удары.

Фехраль (железо + хром) и Хромаль (хром + алюминий). В фехрале доминирует железо, а хромале хром. Сходны по свойствам с нихромами.

#### **Припой и флюсы.**

Все припои делятся на две группы:

- мягкие припои ( $t < 400^{\circ}\text{C}$ )
- твердые припои ( $t > 400^{\circ}\text{C}$ )

ПОС – припой оловянно-свинцовый. От ПОС–18 до ПОС–90. Цифры означают процентное содержание олова в припое. Чем меньше олова, тем выше температура

плавления. С увеличением содержания свинца растет пластичность. Олово дороже, чем свинец, поэтому стремятся применять ПОСы с меньшей цифрой. ПОИИ (припой оловянно-индиевый припаивается к стеклу). Иногда в припой добавляют сурьму и ртуть. Среди твердых припоев самые распространенные медно-цинковые (самые дешевые). Для высококачественных паек распространены серебряные припои. Флюсы – это вещества, применяемые для облегчения пайки. В функции флюсов входят: растворять и удалять окислы и загрязнения с поверхности припаиваемых металлов. Некоторые флюсы предохраняют от окисления. Уменьшают поверхностное натяжение припоя, т.е. увеличивают смачиваемость припаиваемых поверхностей. Флюсы делятся на четыре группы:

- активные флюсы (соляная кислота, хлористый цинк, фтористые соединения металлов)
- безкислотные флюсы (канифоль, флюсы на ее основе с добавками спирта и глицерина)
- активированные флюсы (солянокислый или фосфорнокислый ангидрид)
- антикоррозийные (изготавливаются на основе фосфорной кислоты с различными органическими добавками)

### **Неметаллические проводящие материалы.**

Кроме металлов и металлических сплавов в качестве проводников используются и другие материалы. Как правило, это материалы узкоспециализированного назначения. Самые распространенные из них углеродистые материалы (различные варианты графита). Основные свойства: небольшое удельное сопротивление; большая теплопроводность и нагревостойкость; устойчивость к агрессивным средам; легкость механической обработки. Используют природный графит, пиролитический графит (получаемый при термическом разложении углеводорода), сажа, стеклоуглерод.

### **Композиционные проводящие материалы.**

Они представляют собой смесь проводящих наполнителей с диэлектрической связкой. Меняя пропорции компонентов можно менять свойства в широких пределах. В качестве проводящего компонента используются металлы, графит, некоторые карбиды. В качестве связующего компонента используются органические и неорганические диэлектрики. Среди перспективных композиционных проводящих материалов: контактол, кермет.



Контактол – пастообразующие маловязкие полимерные композиции. Используется в качестве токопроводящих клеев, красок, покрытий, как для экранирования, так и для создания проводников. После улетучивания растворителя происходит усадка, и зерна проводящего компонента приходят в гальванический контакт.

Кермет – металлодиэлектрические композиции (гибрид металла и керамики). Широко используется для создания тонкопленочных резисторов. Меняя состав можно менять удельное сопротивление в широких пределах (для изготовления толстопленочных резисторов).

Проводники на основе окислов.

Обычные диэлектрики при неполном окислении и введении примеси приобретают проводящие свойства. Это свойство используется для создания контактных и резистивных слоев. Наибольший интерес представляет двуокись олова. У нее прекрасное сцепление со стеклом и керамикой. Двуокись олова устойчива к агрессивным химическим средам. Наиболее ценное ее свойство – оптическая прозрачность, в том числе в ИК-диапазоне.

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с видами и свойствами проводящих материалов, как одного из основных классов материалов, применяемых в радиоэлектронике для передачи сигналов и основы для построения радиокомпонентов.

## **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИХ**

1. Классификация полупроводников.
2. Физические процессы в полупроводниках.
3. Собственная и примесная проводимости.
4. Особенности отдельных полупроводниковых материалов.

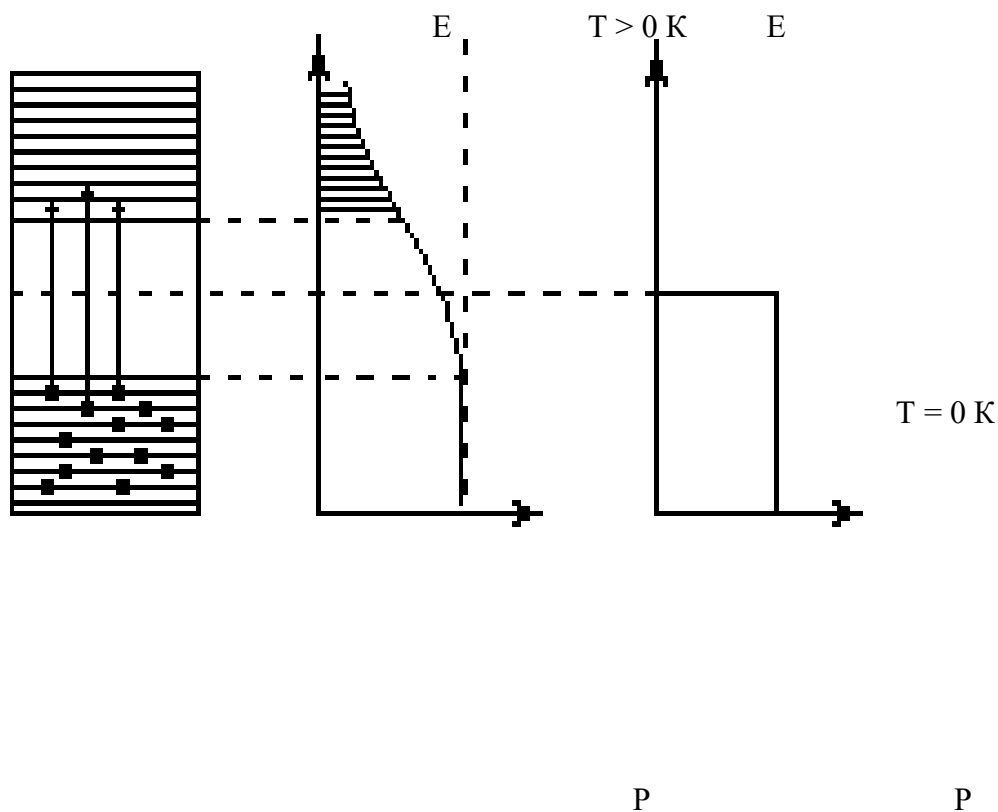
### **Физические процессы в полупроводниках.**

Основная характеристика – способность менять свои свойства под воздействием различных факторов. У полупроводников есть две отличительные черты от проводников:

- с увеличением температуры, в проводниках возрастает сопротивление (у полупроводников сопротивление наоборот уменьшается).

- в металлах примеси, как правило, всегда ухудшают проводимость (в полупроводниках примеси наоборот улучшают проводимость).

В полупроводниках примеси меняют ТКС (температурный коэффициент сопротивления). В металлах проводимость обусловлена металлической связью, а в полупроводниках примесями. В зависимости от степени чистоты полупроводники делятся на собственные и примесные. Собственная проводимость наблюдается, когда при данной температуре влиянием примеси можно пренебречь. При температуре абсолютного нуля валентная зона заполнена полностью, свободная зона полностью пуста. Т.е. проводник ведет себя как идеальный диэлектрик. По мере возрастания температуры, за счет неравномерного распределения температуры, часть электронов попадает из валентной зоны в свободную зону.



Чем выше температура, тем больше закрашенная зона. В валентной зоне, при переходе электронов в свободную зону, столько дырок, сколько ушло электронов. И электроны, и дырки свободно перемещаются по кристаллу, пока не рекомбинируют. Процессы образования свободных электронов и рекомбинации происходят параллельно друг другу, и между ними существует динамическое равновесие (свое для каждой температуры). Уровень собственной проводимости позволяет оценить проводящие

свойства полупроводников. Дырки и электроны выступают в качестве неосновных носителей.

### Примесная проводимость.

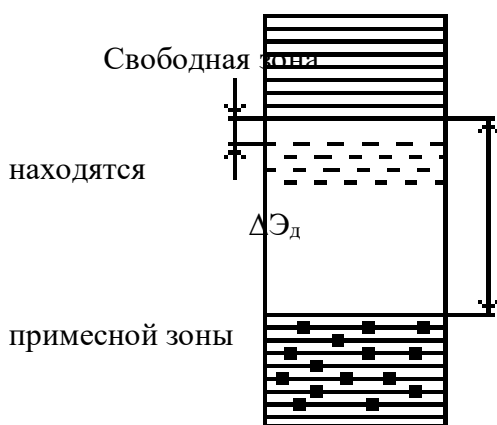
Новые свойства появляются из-за того, что примеси образуют дополнительный уровень в запрещенной зоне. Если примеси в узлах кристаллической решетки, это примеси замещения; между узлами – примеси внедрения. Также роль примеси могут играть дефекты кристаллической решетки. Они тоже порождают дополнительные уровни. При малой концентрации примеси расстояние между соседними атомами велико, поэтому энергетические уровни, которые ими образуются, дискретны, т.е. сплошной зоны не составляют. В зависимости от свойств все примеси делятся на два класса:

- доноры
- акцепторы

При малой концентрации примеси расстояние между атомами примеси большое, поэтому непосредственно обмениваться электронами атомы между собой не могут. Атомы примеси могут поставлять электроны соседним атомам в их свободную зону или принимать их из валентной зоны.

Доноры – поставляют электроны в свободную зону.

Акцепторы – принимают электроны из валентной зоны.



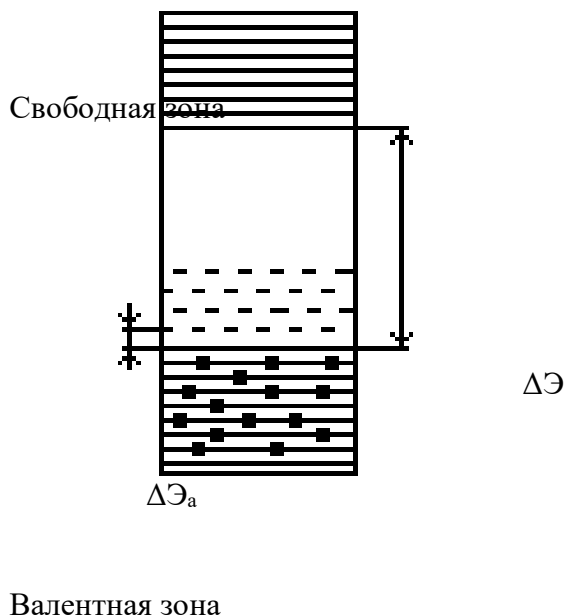
$\Delta \mathcal{E}_d$  – энергия ионизации донора  
 У доноров энергетические уровни  
 вблизи свободной зоны. Энергия  
 необходимая для перехода из  
 в свободную много меньше  $\Delta \mathcal{E}$ .

$\Delta \mathcal{E}$  После перехода электронов из одной  
 другую, они начинают участвовать в  
 электропроводности.

Валентная зона

В примесном уровне остается свободный положительный заряд. Этот положительный заряд не имеет свойства дырки из свободной зоны, поскольку обмениваться с валентной зоной он не может (находится далеко от валентной зоны). С другим атомом примеси также обмен не возможен, поскольку этот атом находится слишком далеко. Получается, что этот положительный заряд является жестко закрепленным. За счет собственной проводимости, в материале есть немного свободно перемещающихся электронов и дырок. За счет примесной проводимости, много свободных электронов и столько же зафиксированных на месте положительных зарядов. Таким образом, среди свободных зарядов доминируют электроны. Такие полупроводники называются полупроводниками

n-типа.

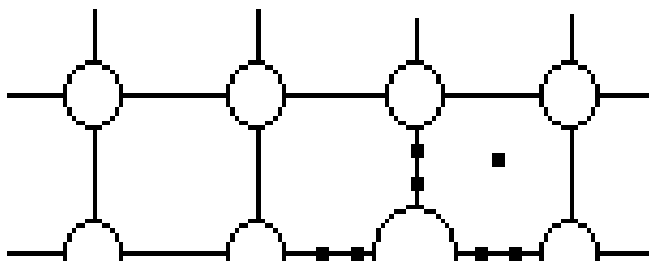


Валентная зона

$\Delta E_a$  – энергия ионизации акцептора. Эта энергия много меньше  $\Delta E$ . Дополнительный электрон в атоме примеси свободно по кристаллу перемещаться не может. Поэтому он остается зафиксированным. В отличие от него дырка может свободно перемещаться. Проводимость является дырочной. Такие полупроводники называются полупроводниками p-типа.

*Пример появления донорного электрона:*

Пусть в кристаллическую решетку кремния внедрился атом мышьяка



As

Четыре электрона с внешней оболочки мышьяка пошли на создание связи с кремнием. На внешнем энергетическом уровне мышьяка пять электронов. У последнего пятого электрона слабая связь с ядром, а, следовательно, большой радиус орбиты. Поэтому ему достаточно получить малую порцию энергии ( $\Delta E_d$ ), чтобы порвать связи с атомом мышьяка, т.е. стать свободным электроном.

Похожие картины наблюдаются при возникновении дырок. Для кремния и германия типичными донорами кроме мышьяка являются фосфор и сурьма. Типичными акцепторами: бор, галлий, индий.

### **Полупроводниковые материалы.**

К этому классу относятся очень разнообразные материалы:

- как органические, так и не органические
- как кристаллические, так и аморфные
- как твердые, так и жидкие
- как магнитные, так и не магнитные

Роднит все эти материалы одно основное свойство: изменение электрофизических свойств даже под небольшим энергетическим воздействием извне.

Двенадцать элементов, в которых проявляются полупроводниковые свойства:

- бор
- углерод (в модификации алмаза)
- кремний
- германий

- олово (в модификации серого олова)
- фосфор
- мышьяк
- сурьма
- сера
- селен
- теллур
- йод

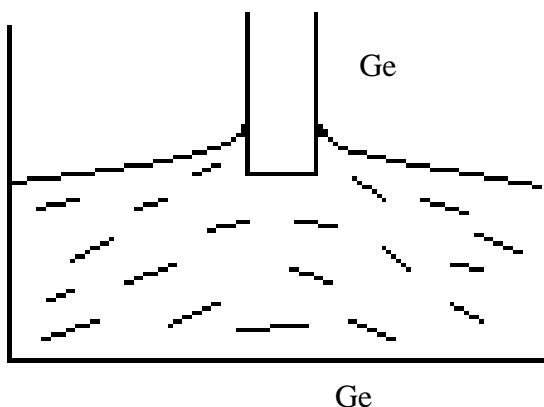
Используются как моно -, так и поликристаллы. Массово использоваться первым стал *германий*. Его применение осложнено из-за высокой рассеянности по поверхности земного шара. Крупных месторождений германия достаточно мало. Основной источник для промышленного получения германия – побочные продукты очистки медных, цинковых и свинцовых руд. Германий химически устойчив в воздухе. Для изготовления полупроводниковых приборов используется германий со специальными примесями. Легирование – процесс введения примеси.

#### **Очистка полупроводниковых материалов.**

##### 1). Зонная плавка.

Вдоль цилиндра путем внешнего нагрева движется расплавленная зона. При кристаллизации примеси, за счет особенности кристаллизации, примеси вытесняются в зону расплава и движутся с ней вдоль цилиндра. Таким образом, перемещающаяся расплавленная зона оттягивает на себя примеси. Процесс проводят несколько раз, после чего концы трубки обрезают.

##### 2). Метод вытягивания из расплава.



В расплав помещается кристаллическая заготовка и после этого медленно поднимается вверх. За ней тянется жидкий столбик, прилипший за счет поверхностного натяжения. При дальнейшем подъеме он затвердевает и образует единое целое с заготовкой. Примеси при вытягивании в заготовку не попадают, а остаются в расплаве. Процесс можно совмещать с легированием. Общие недостатки изделий из германия – низкая рабочая температура, относительно низкое обратное пробивное напряжение.

*Кремний.* Наиболее распространен в виде  $\text{SiO}_2$ . Окончательную очистку кремния производят из газовой фазы, осаждением на твердую затравку. У кремния широкая запрещенная зона. Чистый кремний достаточно инертен. Методы его очистки в основном химические. Устройства, содержащие кремний, изготавливают преимущественно по планарной технологии. Как правило, используются эпитаксиальные методы, которые реализуются путем осаждения тонких слоев. Эпитаксия – ориентированное наращивание одного кристаллического вещества на поверхность кристалла, который служит подложкой. При этом новообразующиеся слои повторяют структуру подложки. Приборы на основе кремния выдерживают более высокую температуру по сравнению с приборами из германия.

*Алмаз.* Существует три модификации алмаза: I; IIa; IIb. Основное применение в полупроводниковых измерительных приборах. Такие приборы имеют существенное преимущество перед газовыми приборами. В алмазе тоже образуется электрический импульс, который фиксируется. Приборы, изготовленные с применением алмазов, более чувствительные и более долговечные.

### **Полупроводниковые соединения типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ .**

$A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  – означает соединение элемента третьей группы с элементом пятой группы. А: бор, алюминий, галлий, индий. В: азот, фосфор, мышьяк, сурьма. В среднем на атом приходится четыре электрона.

3 и 3 электрона – образуют ковалентную связь

2 электрона – образуют ионную связь

В кристаллической решетке атомы чередуются. Из этих пар элементов наиболее распространены: GaAs (арсенид галлия); GaSb (антимонид галлия); InSb; InAs; InP; GaP; AlSb. У таких соединений подвижность электронов, как правило, больше, чем у дырок. Общая проводимость в основном электронная. Особенность таких соединений в том, что при рекомбинации электронов и дырок можно получить оптическое излучение в видимом и ИК-диапазоне. Данные соединения нашли широкое применение в светодиодах и инжекционных лазерах. С ростом длины волны, эффективность приборов повышается.

Арсенид галлия используется при изготовлении солнечных батарей, диодов Ганна, преобразователей Холла и т.д.

Также используются **соединения типа  $A^{II}B^{VI}$** . Из них наиболее распространены ZnS (для промышленных люминофоров); CdS (для особо чувствительных фоторезисторов в видимом диапазоне).

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с полупроводниковыми материалами и процессами в них. Материалы представляют базу для основных активных элементов радиотехнических устройств и их свойства в основном определяют технические характеристики аппаратуры.

## **ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИХ**

1. Физические процессы в диэлектриках.
2. Материалы с малыми и с повышенными диэлектрическими потерями.

### **Физические процессы в диэлектриках.**

Поляризация. Состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема. Вынужденная поляризация (за счет внешнего электрического поля). Спонтанная поляризация. Способность материалов к поляризации характеризуется  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = \frac{C_{\text{диэл}}}{C_{\text{вак}}}.$$

Два назначения:

- электроизоляционная
- способность накапливать энергию электрического поля

### **Механизмы поляризации:**

1. Электронный механизм: Поляризация происходит за счет упругого смещения и деформации электронных оболочек атомов и ионов.
2. Ионный механизм: Наблюдается в твердых телах с ионным строением, возникает за счет упругого смещения ионов.



3. Дипольный (релаксационный) механизм: Дипольные моменты частично ориентированны под действием поля. В отличие от предыдущих двух после снятия поля поляризация убывает  $\sim \frac{1}{e}$ .

4. Ионно-релаксационный механизм: В некоторых веществах в решетке есть слабосвязанные ионы (энергия связи невелика). Под действием внешнего электрического поля такие слабо привязанные ионы могут быть переброшены на величину больше чем период решетки. После снятия внешнего напряжения они медленно возвращаются в положение равновесия, на это перемещение расходуется энергия. Этот вид поляризации называют вредным, так как на высоких частотах мешает время релаксации и рассеивается много энергии.

5. Электронно-релаксационный механизм: Поляризуется за счет избытка электронов или дырок, так же является вредным механизмом поляризации.

6. Резонансная поляризация: Наблюдается на очень высоких частотах (оптический диапазон), если частота электрического поля совпадает с одной из резонансных частот электронных орбит, связей и др.

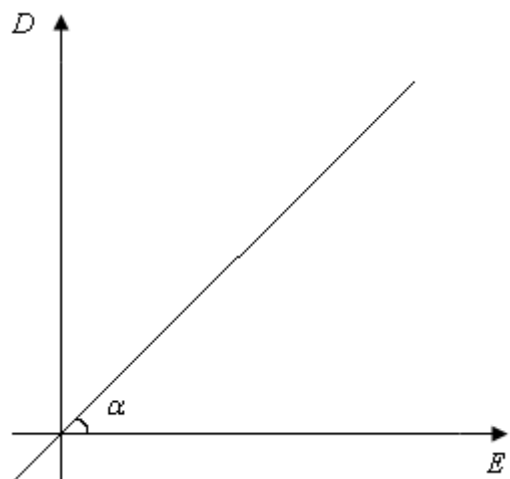
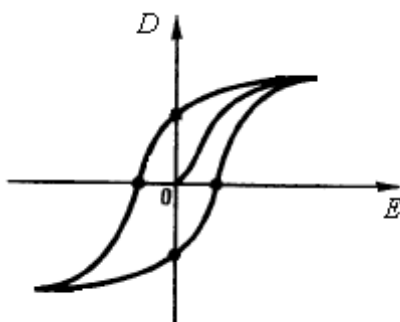
7. Миграционный механизм: Миграционная поляризация наблюдается в твердых телах неоднородной структуры, содержащей большое количество примесей и макроскопических неоднородностей. Проявляется в перемещении этих неоднородностей, является вредной, так как поглощается много энергии.

8. У сегнетоэлектриков наблюдается самопроизвольная поляризация. Она проявляется в наэлектризованности и сохранении наэлектризованности в отсутствие внешнего электрического поля.

### Линейные и нелинейные диэлектрики

У линейных диэлектриков зависимость между напряженностью и индукцией представляет прямую линию, угол наклона определяется диэлектрической проницаемостью среды.

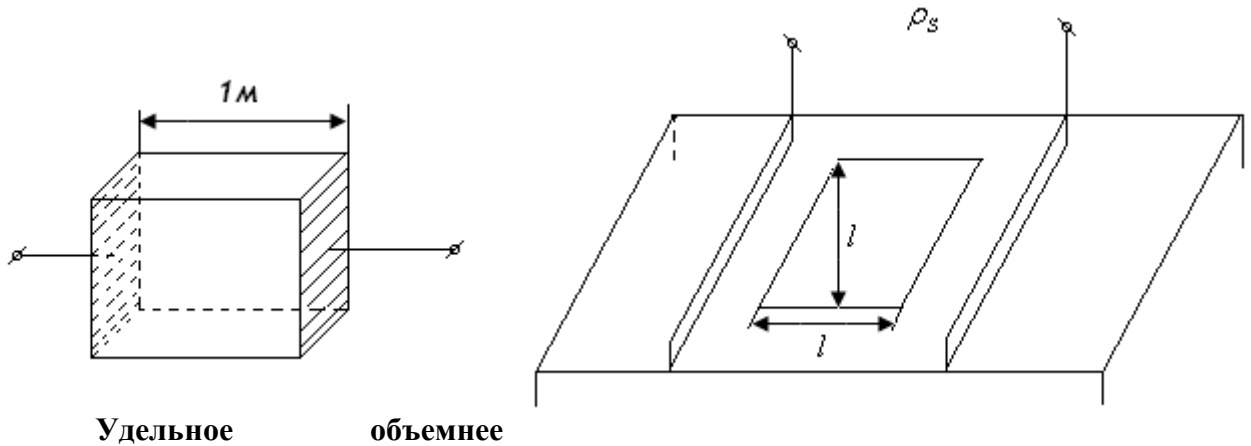
$$\operatorname{tg} \alpha \sim \varepsilon$$



Зависимость линейная значит,  $\varepsilon$  не зависит от напряженности приложенного поля.

### Нелинейные диэлектрики.

У нелинейных диэлектриков может проявляться насыщение и гистерезис.



Удельное  
сопротивление.

объемное

$\rho$  - сопротивление численно равно сопротивлению куба материала с ребром 1 метр.  $[\rho] = 1 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}$

### Удельное поверхностное сопротивление

На поверхность укреплены два электрода и измерено сопротивление между ними. Толщина образца должна быть больше размеров квадрата. Размеры  $L$

значения не имеют.  $[\rho_s] = \text{Ом}$

Используются так же величины обратные сопротивлению: удельная объемная и поверхностная проводимости.

Проводимость по постоянному напряжению на основе сквозного тока.

Электропроводность диэлектриков зависит от многих факторов, таких как:

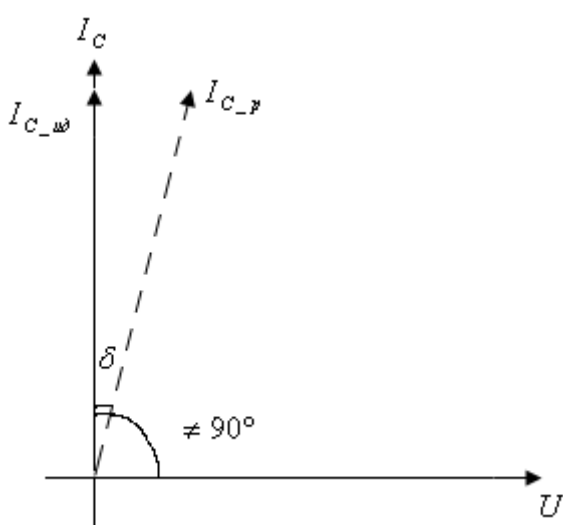
1. Агрегатное состояние
2. Влажность
3. Температура

При длительном воздействии внешнего электрического поля проводимость может меняться. Если сквозной ток при длительном воздействии уменьшается, то проводимость была обусловлена в основном ионами примесей. В результате происходит электрическая очистка образца. Если сквозной ток со временем увеличивается, то причина в старении под напряжением (накопление разнообразных дефектов). В некоторых материалах может наблюдаться анизотропия проводимости, которая проявляется в том, что в различных направлениях проводимость может, меняться в большое число раз (обусловлено

строением кристаллической решетки). При этом эти направления зависят от осей симметрии кристалла (в кварце до 1000 раз).

### Потери в диэлектриках.

Диэлектрическими потерями называются электрической мощностью затрачиваемую на нагрев диэлектрика при прохождении через него электрического тока. При постоянном напряжении нагревают диэлектрик. При переменном напряжении нагрев проявляется многими различными механизмами на различных частотах. Так как потери обусловлены сразу действиями нескольких механизмов, то их сумма является сложной функцией.



Угол  $\delta$  или тангенс угла потерь  $tg \delta$ .

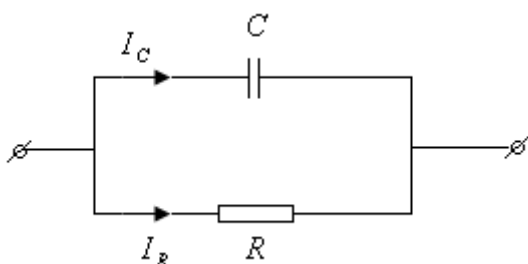
Углом диэлектрических потерь называют угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между токами и напряжениями в емкостной цепи.

Так как есть потери, есть активная составляющая. Чем больше  $\delta$ , тем больше потери.

$$tg \delta = \frac{I_R}{I_c}$$

Схема замещения реального конденсатора:

Все потери конденсатора описываются неким резистором включенным параллельно конденсатору.



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

$P_{акт\_ном} = U^2 \omega C tg \delta$ , где  $\delta$  зависит от частоты.

Вводится коэффициент диэлектрических

потерь:

$$\varepsilon'' = \varepsilon \cdot tg \delta$$

### Виды диэлектрических потерь:

1. Потери на электропроводность (этот вид потерь, как правило, от частоты не зависит).

2. Релаксационные потери (Обусловлены активной составляющей поляризационных токов. Наблюдаются не при всех видах поляризации, а только у тех, в которых имеет место релаксация. Эти потери особенно заметны на ВЧ).

3. Ионизационные потери (Проявляются в газообразных диэлектриках, энергия идет на ионизацию нейтральных атомов и молекул).

4. Резонансные потери (Проявляются при совпадении частоты внешнего колебания с резонансной частотой атомов и молекул. Это ведет к тому, что  $A_m$  атомов и молекул возрастает, за счет этого возрастают тепловые потери.)

### Пробой диэлектриков.

Во внешнем электрическом поле большой напряженности диэлектрик может потерять свои изоляционные свойства ( $E > E_0$ ). При этом в диэлектрике образуется проводящий канал – пробой.

Величина  $U_{np}$  зависит от следующих факторов:

1. Вид материала
2. Толщина материала
3. Конфигурация электрического

поля (форма электродов)

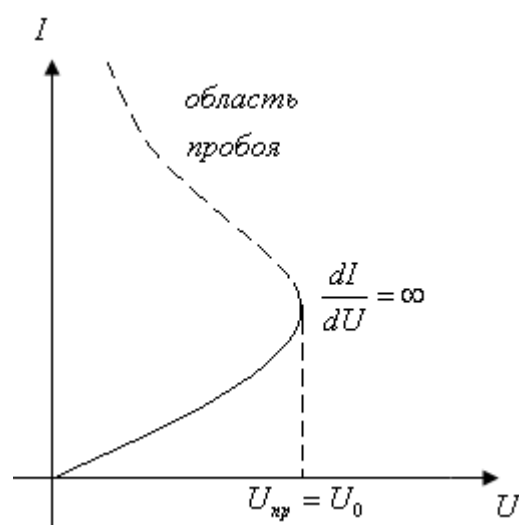
Если поле примерно однородное, то пробой наступает медленнее, чем в случае неравномерной напряженности.  $U_{np}$  - характеризует не способность материала, а способность изделия из этого материала.

Электрическая прочность – минимальная напряженность  $\vec{E}$  однородного электрического поля приводящего к пробую.

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h} \quad h - \text{толщина}$$

При пробое газообразного диэлектрика из-за высокой подвижности молекул после снятия напряжения пробитый участок восстанавливает свои свойства. В основном пробой твердого диэлектрика приводит к разрушению. Пробивные свойства воздуха зависят от:

1. Давление
2. Влажность
3. Внешняя ионизация



По сравнению с остальными диэлектриками  $E_{np}$  воздуха не велико. Пробой в воздухе может развиваться по двум механизмам:

1. Ударная ионизация
2. Фотоионизация

Электрическая прочность газов на различных частотах может меняться. На ВЧ может быть больше на постоянном напряжении. У инертных газов электрическая прочность, как правило, ниже, чем у воздуха.

Жидкие диэлектрики при нормальных условиях имеют более высокую электрическую прочность, чем газы. В то же время наличие примеси сильно ухудшает электрические свойства. В твердых диэлектриках наблюдаются пробои трех типов:

- электрический
- тепловой
- электрохимический

Сущность электрического пробоя заключается в следующем. Из немногих имеющихся электронов, ускоряемых полем, образуются лавины. Если таких лавин много, то в них возникает высокое давление и материал разрушается.

Тепловой пробой характерен для материалов с большими диэлектрическими потерями. У материалов с большими диэлектрическими потерями большая активная составляющая тока. Если есть активная составляющая, происходит выделение тепла. Если охлаждение недостаточно, то материал термически разрушается. В результате протекания тока меняется химический состав диэлектрика. Материал стареет и возникает пробой.

#### **Классификация видов диэлектриков.**

*В зависимости от выполняемой функции диэлектрики делятся на три класса:*

- электроизоляционные материалы

Предназначены для электрической изоляции элементов, находящихся под разными напряжениями.

- конденсаторные диэлектрические материалы

Предназначены для создания электрической емкости и аккумуляции электрической энергии в виде электрического поля.

- активные диэлектрики

Используются для создания специализированных устройств. У них сложная зависимость свойств от внешних условий. Предназначены для разделения постоянного и переменного напряжений.

Для электроизоляционных материалов  $\epsilon$  (диэлектрическая проницаемость среды) малая и большая  $\rho$  (удельное сопротивление).

Для конденсаторных диэлектриков, чем больше  $\epsilon$ , тем лучше.

У активных диэлектриков  $\epsilon$  имеет нелинейную зависимость. На этой нелинейности основано изготовление многих устройств.

*По агрегатному состоянию диэлектрики подразделяют на:*

- газообразные
- жидкие
- твердые
- твердеющие

*По химической природе диэлектрики подразделяют на:*

- органические
- неорганические
- элементоорганические

*Твердые и твердеющие диэлектрики делятся на:*

- линейные полимеры
- эластомеры (каучук)
- композиционные порошковые пластмассы
- пропиточные вещества, включая компаунды и лаки
- волокнистые непропитанные материалы
- лакоткани и слоистые материалы
- монокристаллические диэлектрики
- стекла
- керамика

До начала ионизации *газы* являются идеальными диэлектриками. С началом ионизации это свойство резко падает. С ростом частоты тангенс потерь воздуха сложным образом меняется в широких пределах. С ростом давления пробивные свойства резко улучшаются, и он становится лучшим диэлектриком.

Среди *жидких диэлектриков* выделяют нефтяные масла (трансформаторное, кабельное, конденсаторное). Отличие в марках существует из-за степени очистки и содержания фракций. Трансформаторное масло повышает электрическую прочность, отводит тепло путем конвекции, а также используется для дугогашения. Конденсаторное масло заливают в конденсаторы. Синтетические жидкие масла предназначены для: пропитки изоляции, улучшения металлических свойств конструкции. Самыми перспективными являются фторорганические жидкие диэлектрики. У них повышенная

дугостойкость и теплоотводящие свойства. Растительные масла также относят к жидким диэлектрикам.

Твердые диэлектрики. Сейчас используются полимерные диэлектрики (линейные и пространственные полимеры). Линейные полимеры представляют собой длинные цепочки. Пространственные полимеры представляют собой длинные цепочки, соединенные между собой перемычками, то есть образуют сетку. Линейные полимеры гибкие и эластичные. При высокой температуре они легко расплавляются и размягчаются. В отличие от них пространственные полимеры являются более твердыми. Лишь немногие из них плавятся (при высоких температурах они разрушаются). У элементоорганических диэлектриков главная цепочка образована не углеродом, но может обрамляться органическими фрагментами. Строение макромолекул веществ в основном и определяет электрические свойства. Электрические свойства зависят от симметрии молекул вещества. У веществ с симметричной молекулой либо отсутствует свой дипольный момент, либо он слабо выражен. У таких веществ большое удельное сопротивление и малый тангенс потерь. Их энергия не тратится на поворот диполя. У веществ с несимметричными молекулами электрический момент диполя выражен.

#### **Материалы с малыми диэлектрическими потерями.**

Самые распространенные из них: полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (тефлон). *Полиэтилен* имеет линейное строение, является эластичным, устойчивым к щелочам и кислотам. Его свойства мало зависят от температуры и частоты. Материал используется для изоляции, изготовления пленок и компаундов. *Полистирол* хорошо работает на высокой частоте. Широко используется при изготовлении кабелей. Недостатки полистирола в низкой нагревостойкости и низкой стойкости к старению.

*Тефлон* (фторопласт) обладает исключительно хорошими свойствами. Химическая стойкость у него гораздо выше, чем у благородных металлов. Тефлон не горюч, не гигроскопичен, не смачиваем. Он имеет повышенную стойкость к нагреву и маленький коэффициент трения. Под давлением начинает «плыть». Фторопласт марки Ф-4 самый распространенный. Благодаря своим свойствам широко используется при создании композитных материалов (в комбинации с порошками), а также для пропитки слоистых материалов.

#### **Материалы с повышенными диэлектрическими потерями.**

К ним относятся полярные диэлектрики. Среди них наиболее распространены:

- поливинилхлорид (ПВХ)

- полиэтилентерефталат (ПЭТФ)
- полиметилметакрилат (оргстекло)
- полиамидные смолы (капрон)

Поливинилхлорид (ПВХ) – жесткий и малопластичный. Используется для изоляции проводов; для лаков и покрытий; для механических изделий.

Лавсан – повышенная механическая прочность, относительно высокая температура размягчения. Используется в виде волокон и пленок.

Оргстекло в основном используется как конструкционный материал.

Полиамидные смолы – механическая прочность и эластичность. Высокочастотные свойства полиамидных смол плохие, поэтому они используются на низких частотах.

### **Композиционные порошковые материалы.**

Композиционные порошковые материалы изготавливают с помощью горячего прессования. Такие материалы состоят из связующих веществ и наполнителей. Связующие вещества – смолы, наполнители – порошки. Наиболее распространены фенолформальдегидные смолы. Бакелит – наиболее распространенный композиционный материал.

*Слоистые пластики.* Наполнителями в них являются волокнистые слоистые материалы.

Основные типы среди них:

- гетинакс (наполнитель - бумага, пропитанная смолами)
- текстолит (наполнитель - ткань)

У всех слоистых материалов очень ярко выражена анизотропия.

Стеклотекстолит, пропитанный тефлоном, является наиболее качественным.

*Компаунды* – это смесь различных изоляционных веществ, не содержащих летучих растворителей. Они необратимо твердеют после нагрева, либо при химическом контакте с отвердителями. Отвердители компаундов очень ядовиты. Самый распространенный отвердитель – ПИЦ (полиизоцианат).

Типы компаундов:

- пропиточные
- заливочные
- обволакивающие

### **Стекла.**



Это неорганические квазиаморфные вещества. У них есть ближний порядок (кристаллический) и отсутствует дальний порядок. Диэлектрические свойства отлично проявляются в оксидных стеклах. Чистое кварцевое стекло имеет лучший ТКЛР. У него хорошие механические, диэлектрические и оптические свойства. Электровакуумные стекла применяются для: изготовления баллонов электровакуумных устройств; изоляции выводов ножек микросхем. Основное требование при изготовлении устройств: ТКЛР стекла должен быть близок к ТКЛР соседствующего материала. Для электровакуумных стекол используются специальные названия: платиновые, молибденовые, вольфрамовые...

Это означает, что ТКЛР стекла близок к ТКЛР данного металла.

Лазерные стекла и световоды.

### **Ситаллы (стеклокристаллические материалы)**

Они занимают промежуточное положение между стеклом и керамикой. Ситаллы получают стимулированной кристаллизацией стекол. В результате они состоят из микрокристаллов. По сравнению с керамикой эти микрокристаллы меньше, но много больше, чем у стекла. Существуют установочные и конденсаторные материалы. Они очень прочны и их ТКЛР можно менять в широких пределах.

### **Керамика.**

В основном ее изготавливают на основе различных глин.

Свойства глин:

- высокая нагревостойкость
- отсутствует гигроскопичность
- достаточная механическая прочность
- хорошие диэлектрические свойства
- стабильность характеристик во времени
- прекрасная радиационная стойкость
- дешевизна

Наиболее распространены следующие виды:

- для низких частот – изоляционный фарфор
- для высоких частот – радиофарфор и ультрафарфор

Поликор – лучший материал для подложек. Сегнетокерамика является частным случаем сегнетоэлектриков.

Заключение. В процессе изучения материала лекции студент знакомится с основными диэлектрическими материалами, служащими основой для электроизоляционного оборудования, а также материалом для создания различных радиоэлектронных компонентов.

## ПАССИВНЫЕ РАДИОКОМПОНЕНТЫ. РЕЗИСТОРЫ

1. Классификация пассивных радиокомпонентов.
2. Резисторы, их параметры, типы и свойства.

Основные классы пассивных радиокомпонентов составляют резисторы, конденсаторы и индуктивные элементы. Резисторы обладают активным сопротивлением, конденсаторы и индуктивные элементы обладают реактивным сопротивлением. Резисторы необратимо поглощают энергию из внешней цепи, конденсаторы и индуктивные элементы как поглощают, так и отдают энергию во внешнюю цепь, осуществляя попеременный энергообмен с ней.

В радиоаппаратуре применяется очень широкий диапазон номиналов  $0,01 - 10^{13} \text{ Ом}$  и мощностей  $0,01 - 500 \text{ Вт}$ .

Классификация резисторов:

*По материалу (из чего изготовлен):*

- проволочные резисторы (т.е. из сплавов)
- углеродистые резисторы (пленки на диэлектрическом основании)
- металлопленочные или металлоокисные (сопротивление создается сплавами или окислами металлов)
- композиционные (смесь нескольких компонентов, проводящий из которых только один)
- полупроводниковые

*По назначению:*

- общего применения
- специального назначения

Резисторы специального назначения:

- высокоомные  $10^6 - 10^{13} \text{ Ом}$
- высоковольтные  $10 - 60000 \text{ В}$
- высокочастотные резисторы для частот больше  $10 \text{ МГц}$

- прецизионные резисторы с повышенной точностью номинала (существуют сетки точности  $\pm 10\%$ ;  $\pm 5\%$ ;  $\pm 1\%$ ;  $\pm 0,01\%$ . Чем точнее, тем дороже. Сетка номиналов тесно связана с точностью изготовления)

- микромодульные

- миниатюрные

Номинальная мощность резисторов представляет собой ряд. Это основной ряд мощностей резистора:

*0,01; 0,025; 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 8,0; 10,0; 16,0; 25,0; 50,0; 75,0; 100,0; 160,0; 250,0; 500,0 Вт*

Номинальная мощность резистора – это максимально допустимая мощность, которую резистор может рассеивать при непрерывной работе длительное время в пределах паспортного интервала температур без изменения своих электрических свойств.

Для резисторов вводится удельная тепловая нагрузка, равная отношению мощности к площади рассеивающей поверхности.  $\left[ \frac{Вт}{см^2} \right]$

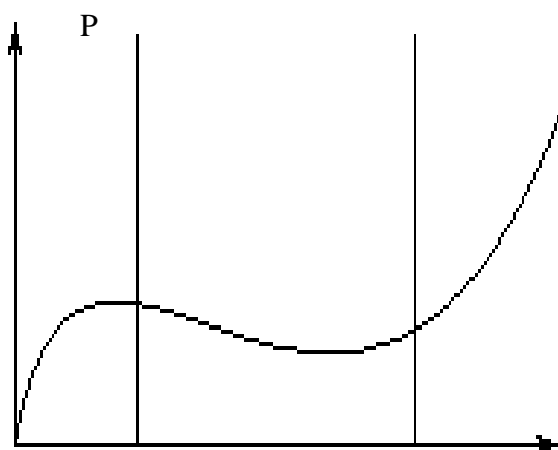
### **Гарантийный срок службы.**

Теория надежности.

Экспериментально установлена следующая вероятность отказа.

Участок от 0 до  $t_1$  обусловлен заводским браком.

Участок от  $t_2$  и далее обусловлен отказом из-за старения аппаратуры.



0            t<sub>1</sub>                            t<sub>2</sub>            t

$\lambda$  – интенсивность отказов (среднее количество отказов в единицу времени).  $\lambda$  – паспортное данное. Время работы  $T = \frac{1}{\lambda_{общее}}$

*Коэффициент напряжения.*

Он определяет изменение сопротивления резистора под воздействием внешнего напряжения. Под воздействием внешнего напряжения может меняться структура проводящего слоя. Это может приводить к небольшим изменениям величины сопротивления (особенно важно для прецессионных резисторов).

$$\text{Коэффициент нагрузки: } k_n = \frac{P_p}{P_{ном}}$$

$P_p$  – рассеиваемая мощность в реальных условиях

$P_{ном}$  – номинальная рассеиваемая мощность

При точных расчетах надежности, этот коэффициент всегда учитывается, т.к. он определяет интенсивность отказов.

### **Типы конструкций резисторов.**

*Проволочные резисторы.*

Они представляют собой проволоку, намотанную на каркас.

Применяются дольше остальных резисторов. Прецессионные мощные резисторы являются исключительно проволочными.

Их достоинства:

- высокая стабильность параметров
- малый ТКС
- очень маленький уровень собственных шумов
- высокая точность соответствия номиналов

Недостатки:

- большие габариты
- высокая стоимость
- большая собственная индуктивность и емкость

Проволочные резисторы можно представить как сложную RLC конструкцию. На высоких частотах данный тип резисторов не применяется. Резисторы могут быть как постоянных, так и переменных номиналов (по проволокам скользит контакт). Мощные переменные резисторы изготавливают проволочными.

Материалы для проволочных резисторов:

- манганин
- константан (не применяют при изготовлении измерительных приборов, из-за возможности возникновения термо-ЭДС)

- нихром (для больших мощностей, т.к. он более нагревостоек)

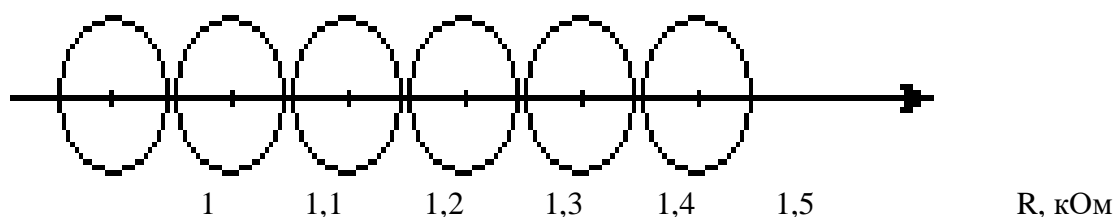
Основные типы проволочных резисторов:

- ПЭ (проволочно-эмалированные)
- ПЭВ (проволочно-эмалированные влагостойкие)
- ПЭВР (проволочно-эмалированные влагостойкие регулируемые)
- ПЭВТ (проволочно-эмалированные влагостойкие термостойкие до 450<sup>0</sup> С)
- МВС, МВСТ, С5... - повышенной точности
- ПТ, ПТН, ПТМ, ПТМН, ПТМК, ПТММ... - многослойные
- РП, ПП, ППБ... - переменные проволочные

### Углеродистые резисторы.

Это резисторы поверхностного типа, т.е. собственно резистор представляет собой пленку на диэлектрическом основании (как правило, керамическом). Пленку получают с помощью пиролиза (высокотемпературного разложения углеводородов).

В зависимости от величины сопротивления резисторы подразделяют на группы:



ВС, ОВС, ВСЕ – резисторы общего назначения (они различаются условиями эксплуатации).

Резисторы особого назначения:

БЛП, УЛИ – точные

УЛМ – малогабаритные

УНУ – на высоких частотах

УВ – повышенной мощности (поглотители энергии)

### **Металлопленочные и металлоокисные резисторы.**

Они имеют вид пленок, наносимых на различные диэлектрические основания.

Их особенности:

- повышенная нагревостойкость
- стабильность сопротивления при изменении напряжения
- малый уровень шумов
- хорошие ВЧ свойства

Виды резисторов:

МТ – металлопленочный защищенный

МЛТ – повышенная термостойкость

МУН – ультра ВЧ незащищенный

МПЦ – герметизированный прецизионный

У резисторов этого типа можно реализовать как положительный, так и отрицательный ТКС.

Металлоокисные резисторы изготавливают на основе двуокиси олова.

Их виды:

МОУ – ультра ВЧ

МОН – низкоомные

ССНМ и СКНМ – миниатюрные

### **Композиционные резисторы.**

Для их изготовления используются специальные смеси, состоящие из проводящего материала + связующие. Таким образом, можно изготавливать резисторы с номиналом от 0,1 до  $10^{12}$  Ом. Эта технология позволяет изготавливать резисторы любой формы.

Достоинства:

- надежность работы в различных условиях эксплуатации
- позволяют реализовать ТКС в любых пределах
- простая технология изготовления, несложное оборудование, дешевые исходные материалы

Недостатки:

- зависимость сопротивления от напряжения
- значительный уровень собственных шумов
- старение

- большие потери на ВЧ

Эти факторы ограничивают применение композиционных резисторов.

Самые распространенные типы композиционных резисторов:

КВМ – вакуумированные

КИМ – изолированные

КЭВ – высоковольтные

Серии композиционных резисторов:

СП – переменные

СПЕ – повышенная нагревостойкость и влагостойкость

СПО – повышенная надежность и износостойкость, объемные

СПЗ – для монтажа

### **Полупроводниковые резисторы.**

Полупроводниковые резисторы изготавливают из полупроводников с концентрацией примеси  $10^{17} - 10^{19}$ . Основное применение: изготовление низкоомных резисторов для высоких температур на основе кремния. В настоящее время данная технология развивается на основе оксида кадмия, оксида бария, оксида бериллия.

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с одним из основных классов радиокомпонентов. Знания в этой области важны для специалиста, т.к. резисторы являются самым широко распространенным видом радиодеталей.

## **КОНДЕНСАТОРЫ**

1. Свойства и параметры конденсаторов
2. Основные виды конденсаторов

Основные характеристики любого конденсатора:

- емкость
- сопротивление изоляции
- потери энергии на различных частотах
- электрическая прочность
- реактивная мощность

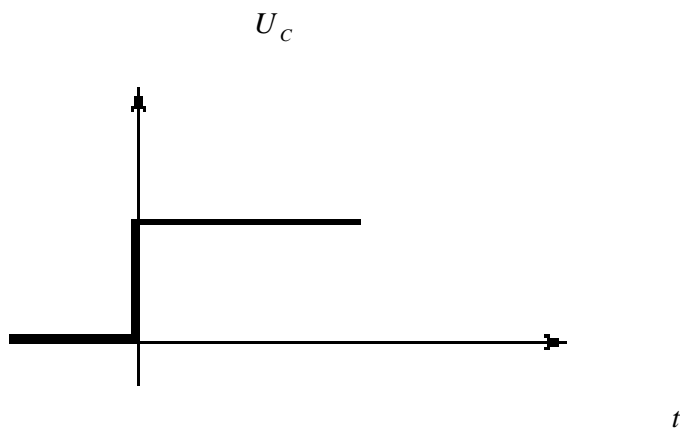
$$C = \frac{\xi \cdot \xi_0 \cdot S}{d} - \text{емкость плоского конденсатора}$$

$$C = \frac{2\pi \cdot \xi \cdot \xi_0 \cdot l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} - \text{емкость цилиндрического конденсатора}$$

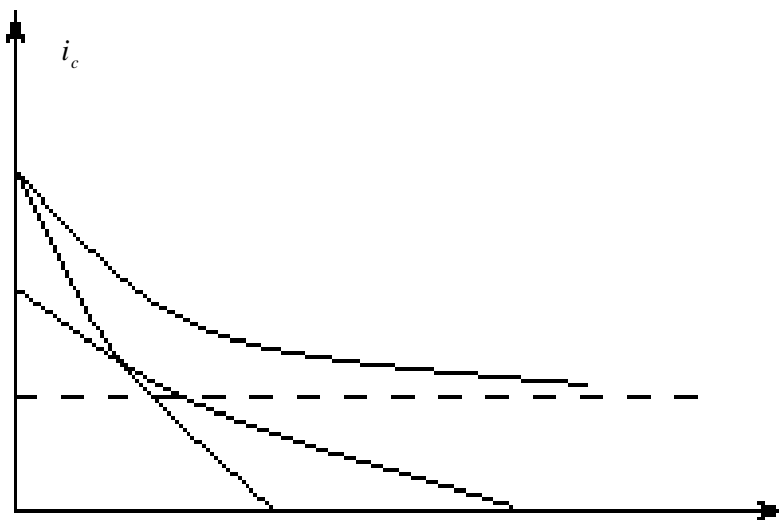
$l$  – длина цилиндрического конденсатора

$$R_2 > R_1$$

*Сопротивление изоляции*



Если к конденсатору приложить скачкообразное напряжение, то ток через него будет складываться из различных составляющих.





$i_c$  $i_{ym}$  $i_n$  $i_{abc}$  $t$ 

$i_n$  - ток нагрузки, обусловлен накоплением энергии (спадает по экспоненте)

$i_{ym}$  - ток утечки, обусловлен сквозным движением зарядов сквозь диэлектрик

$i_{abc}$  - ток абсорбции, обусловлен медленными компонентами поляризации

$i_c$  - суммарный ток

Сопротивление утечки измеряют спустя некоторое время после подачи напряжения.

#### *Потери энергии.*

Реальный конденсатор рассеивает электрическую энергию двумя способами:

- на потерях в диэлектрике
- на рассеивание во внешнюю среду

#### *Электрическая прочность.*

Электрическая прочность зависит от качества и толщины диэлектрика.

Электрическая прочность характеризуется:

$U_{np}$  - пробивное напряжение, выводит из строя конденсатор при быстром испытании

$U_{исп}$  - испытательное напряжение. Напряжение, которое должен выдерживать конденсатор в течение достаточно длительного времени.  $t \approx 1 \text{ мин}$

$U_{раб}$  - рабочее напряжение. Напряжение, которое конденсатор выдерживает длительное время.

$$\frac{U_{np}}{U_{раб}} = K_1 \quad \frac{U_{исп}}{U_{раб}} = K_2$$

Эти коэффициенты характеризуют запас по электрической прочности.

На краях обкладок конденсатора возникают краевые эффекты, которые выражаются в искажении поля, поэтому локальная напряженность на краях обкладок всегда выше.

Опасность пробоя на краях обкладок конденсатора выше, чем в середине обкладок.

Чтобы предотвратить пробой:

- утолщают края обкладок

- с ростом толщины слоев диэлектрика пробивное напряжение конденсатора возрастает только до определенного уровня. В дальнейшем оно может уменьшаться за счет краевых эффектов. Поэтому существует оптимальная толщина диэлектрика.

На кратковременную электрическую прочность влияет частота электрического поля  $f$ .

У твердых диэлектриков пробивное напряжение растет с ростом частоты.

У жидких диэлектриков пробивное напряжение с ростом частоты падает.

Под действием напряжения ускоряется старение диэлектриков (уменьшается пробивное напряжение). Это явление может привести к двум видам пробоя:

- ионизационный пробой (за счет ионизации газовых включений, содержащихся в диэлектрике)

- электрохимический пробой. При протекании токов утечки ионы вступают в различные химические реакции.

Основные типы конденсаторов:

- бумажные и металlobумажные
- пленочные и пленочнобумажные
- воздушные и газонаполненные
- керамические
- электролитические
- оксидно-полупроводниковые

*Бумажные и металlobумажные конденсаторы.*

Диэлектриком в них является бумага.

КБГ – конденсатор бумажный герметизированный

К основному названию конденсатора добавляются буквы

Ц – цилиндрический металлический корпус

П – прямоугольный металлический корпус

И – из керамики или стекла

М – металлические с керамическим изолятором

КБП – конденсатор бумажный проходной

В металлобумажных конденсаторах вместо фольги используется тонкий слой металла, напыленный в вакууме испарением на бумагу. Преимущество металлобумажных конденсаторов заключается в их способности самовосстанавливаться после пробоя. При длительном хранении у них начинают расти потери.

#### *Пленочные и пленочнобумажные конденсаторы.*

В качестве диэлектрика используются синтетические пленки. Пленки бывают полярными, неполярными и комбинированными.

Тонкопленочные конденсаторы изготавливают путем нанесения лака на фольгу и последующим ее сворачиванием.

#### *Слюдяные конденсаторы.*

Для изготовления слюдяных конденсаторов используется специальная слюда (*мусковит*). Слюда хорошо подходит для изготовления конденсаторов, поскольку она имеет стабильные параметры и малые потери. Обкладки делают как из фольги, так и вжиганием серебра в поверхность слюды.

Виды слюдяных конденсаторов: СГМ, КСО, КСГ, для больших мощностей используются конденсаторы КВ (высоковольтные конденсаторы).

Слюдяные конденсаторы являются эталонами конденсаторов.

#### *Керамические конденсаторы.*

Керамические конденсаторы – самый распространенный тип конденсаторов. Их отличительными параметрами являются стабильность параметров и относительная дешевизна.

Виды керамических конденсаторов:

КТК – конденсатор трубчатый керамический

КДК – конденсатор дисковый керамический

КЭТ – конденсатор эмалированный трубчатый

КТ – трубчатый

КП – пластинчатый

КО – опорный

КДО – дисковый опорный

КДМ – дисковый малогабаритный  
КТМ – трубчатый малогабаритный  
КДУ – для УКВ  
КНТБ – блок трубчатых конденсаторов

*Подстроечные конденсаторы.*

Подстроечные конденсаторы служат для регулировки емкости в определенных пределах. Обкладки таких конденсаторов изготавливаются вжиганием металла в керамику.

КПК – конденсатор подстроечный керамический

*Низкочастотные керамические конденсаторы.*

В качестве диэлектрика в них используют сегнетокерамику. У сегнетокерамики большое значение  $\xi$  (диэлектрическая проницаемость среды), а значит, при том же объеме можно изготовить конденсатор большей емкости.  $\xi$  и  $C$  (емкость) зависят от внешнего напряжения. На высоких частотах у сегнетокерамических конденсаторов большие потери.

В вариконде используется зависимость емкости от напряжения.

*Керамические конденсаторы высокого напряжения.*

Для нейтрализации краевых эффектов реализуют любые формы диэлектриков, в частности делают утолщения на краях. В таких конденсаторах легко повысить пробивное напряжение.

КВКГ – горшковый  
КВКТ – трубчатый  
КВКБ – бочоночный

*Стекланные, стеклопленочные, стекломалевые, стеклокерамические конденсаторы.*

Основные преимущества:

- дешевизна
- хорошая электрическая прочность при небольшой толщине

Основные недостатки:

- хрупкость
- при больших емкостях получаются большие потери

Конденсаторы данного типа изготавливают слоями (стеклянная лента, затем алюминиевая фольга, затем снова стеклянная лента и т.д.). После наложения друг на друга, эти слои спекаются в монолитный блок. При низкой емкости конденсаторы имеют хорошую добротность.

### **Стеклоэмалевые конденсаторы.**

Стеклоэмалевые конденсаторы изготавливают путем нанесения на металл стеклянного порошка, после чего этот металл с порошком нагревают. Также стеклоэмалевые конденсаторы можно изготавливать чередованием слоев стеклоэмали и серебряной пасты, и последующим их высушиванием.

### **Конденсаторы с газообразным диэлектриком.**

Три типа конденсаторов с газообразным диэлектриком:

- газонаполненные
- воздушные
- вакуумные

В них используются такие свойства диэлектриков как:

- малая проводимость
- малые диэлектрические потери
- независимость  $\xi$  от частоты и температуры

Конденсаторы с газообразным диэлектриком применяют в ВЧ аппаратуре.

Особенности:

- невозможно использовать диэлектрик в качестве крепления
- после пробоя конденсатор восстанавливается
- переменная емкость достигается перемещением системы обкладок

Для данного типа конденсаторов  $\xi = 1$ . Следовательно, конденсаторы получаются больших размеров. Подбирая нужную геометрическую форму обкладок легко получить любой закон изменения емкости.

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с основными видами конденсаторов и их основными параметрами. Знание этого материала является важным для квалификации бакалавра, т.к. конденсаторы являются одним из основных видов радиодеталей.

## ИНДУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Магнитные материалы, используемые в электронной технике.
2. Индуктивные элементы, их параметры, типы и свойства.

Особенности магнитных материалов:

Намагниченностью называется отношение магнитного момента к объему  $I_M = \frac{M}{V}$ .

$I_M = k_M \cdot H$  где  $k_M$  - коэффициент магнитной восприимчивости

Магнитная проницаемость среды  $\mu = k_M + 1$ .

Первопричиной магнитных свойств являются круговые токи в атоме.

*Классификация веществ по магнитным свойствам:*

- диамагнетики  $k_M < 0$  порядка  $k_M \approx 10^{-6}$

Диамагнетические эффекты проявляются у всех веществ, просто у прочих групп он маскируется другими более сильными магнитными эффектами.

- парамагнетики  $k_M > 0$  порядка  $k_M \approx 10^{-6} - 10^{-3}$

У атомов таких веществ свой магнитный момент, но ориентирован он хаотически, а под действием внешнего магнитного поля происходит некоторое упорядочивание. Данный эффект сильно зависит от температуры.

- ферромагнетики  $k_M \approx 10^6$

Внутри каждой малой области магнитные моменты ориентированы одинаково. Эффект зависит от температуры и от внешнего магнитного поля.

- антиферромагнетики  $k_M > 0$   $k_M \approx 10^{-5} - 10^{-3}$

Это особый класс веществ, в которых при определенной температуре наблюдается антипараллельная ориентация магнитных моментов. У соседних областей они противоположно направлены и поэту скомпенсированы. При увеличении температуры антиферромагнетики переходят в парамагнетики.

- ферримагнетики

Общий магнитный момент у них обусловлен антипараллельным расположением. Противоположный магнитный момент не скомпенсирован, поэтому  $k_M > 0$ . Эффект зависит от внешних условий. Ферро - и ферримагнетики относятся к сильным магнитным материалам.

## **Виды магнитных материалов.**

Все магнитные материалы делятся на:

- магнитомягкие
- магнитотвердые

### *Магнитомягкие материалы.*

К ним относятся материалы с высокой магнитной проницаемостью среды и малой коэрцитивной силой  $H_c$ .

Магнитомягкие материалы обладают следующими свойствами:

- способны намагничиваться до насыщения, даже в слабых магнитных полях
- узкая петля гистерезиса
- малые потери на намагничивание

$$H_c < 800 \frac{A}{m}$$

Существуют специальные группы:

- материалы с прямоугольной петлей гистерезиса
- ферриты для СВЧ
- магнитострикционные материалы

Магнитомягкие материалы используют в местах, где актуально КПД, определяемое потерями энергии. Одной из основных причин потерь энергии является потеря энергии на вихревые токи. Поскольку в переменном магнитном поле внутри объема материала наводятся вихревые токи. Для борьбы с потерями электрической энергии используют материалы с большим удельным сопротивлением, а весь материал делят на пластины.

Основой электротехнических материалов является железо. Для повышения сопротивления в железо добавляют кремний. Такое железо получается достаточно хрупким.

### *Текстурированные магнитные материалы.*

Специальной обработкой материалу придается анизотропия свойств. Например, магнитная проницаемость среды вдоль ленты больше магнитной проницаемости среды поперек ленты. Толщина пластин в трансформаторах имеет определенный оптимум. Чем тоньше листы, тем меньше потери на вихревые токи. С последующим уменьшением толщины, начиная с определенного размера, наблюдается резкий рост коэрцитивной силы.

В качестве магнитных материалов часто используют сплавы. *Пермаллой* (сплав железа и никеля). Наибольшая магнитная проницаемость среды достигается при 75% никеля, однако у сплава невысокое удельное сопротивление, поэтому существенны потери на вихревые токи (Особенно на ВЧ). *Альсифер* (сплав алюминия, кремния, железа). Изделия изготавливают в основном путем прессования из порошков. Эти материалы, как правило, используются для низких частот. Для высоких частот используются ферриты и магнитодиэлектрики. У ферритов  $\rho = 10^3 - 10^{13}$ . Ферриты используются в основном в виде ферритовой керамики. Исходными продуктами при изготовлении являются: порошок окислов и различные пластификаторы.

Основными причинами потерь в ферритах являются: релаксационная и резонансная. Каждой марке соответствует своя частота.

В слабых магнитных полях ферриты могут заменять стали. В сильных полях не применяются, т.к. они быстро насыщаются. Основное применение ферриты нашли в качестве сердечников, в фильтрах, в широкополосных трансформаторах, и магнитных антеннах. Монокристаллы ферритов применяют для магнитных записей.

К низкокоэрцитивным сплавам относят также магнитодиэлектрики. Их получают с помощью прессования порошкового ферромагнитного материала с изолирующей связкой. Связка образует сплошную изоляцию между зёрнами. По некоторым свойствам они лучше ферритов.

#### *Магнитотвердые материалы.*

От магнитомягких материалов они отличаются высокой коэрцитивной силой, т.е. площадь петли гистерезиса у них больше.

Две основных области применения магнитотвердых материалов:

- для изготовления постоянных магнитов
- для записи и длительного хранения информации

Основное требование, предъявляемое к магнитотвердым материалам: максимальная концентрация энергии магнитного поля в окружающем пространстве. Для получения большой коэрцитивной силы необходимо затруднить процесс перемещения границ доменов. Домены, у которых магнитный момент совпадает с внешним магнитным полем, распространяют свои границы за счет соседних областей. Для затруднения процесса намагничивания необходимо магнитные моменты доменов повернуть и так их зафиксировать. Такого результата можно добиться путем охлаждения в сильном магнитном поле. Основные материалы: железо, никель, алюминий, кобальт.



Особенно перспективны металлокерамические магниты. Их изготавливают прессованием металлов и магнитов.

Для магнитной записи применяют ленты с порошком магнитотвердых материалов. Чем выше коэрцитивная сила, тем ниже размагничиваемость ленты. Магнитный порошок для лент имеет сильно вытянутую игольчатую структуру с ориентацией вдоль ленты. Чем меньше частицы, тем меньше шумовой фон ленты. Для широкополосности используют железо и хром.

### **Катушки индуктивности.**

Подразделяются на:

- контурные катушки (определяют частоты генераторов и фильтров)
- катушки связи (связь между контурами и каскадами)
- вариометры (переменная индуктивность)
- дроссели (для развязки (разделения ВЧ и НЧ колебаний))

По конструкции делятся на:

- с сердечником
- без сердечника

По типу намотки:

- однослойные
- многослойные

Основные параметры катушек:

- номинальная индуктивность
- добротность
- собственная емкость
- стабильность индуктивности

Отклонения номиналов от  $\pm 0,1\%$  до  $\pm 20\%$ .

$$\text{Добротность } Q = \frac{X_L}{R}$$

$X_L$  - индуктивное сопротивление

$R$  - величина всех потерь

Потери определяются тремя факторами:

- омическое сопротивление
- потери на излучение
- потери в сердечнике (если он есть)

Собственная емкость катушки складывается из межвитковых емкостей и емкости других элементов конструкции. Для уменьшения емкости, диэлектрик каркаса выбирают с малой величиной диэлектрической проницаемости среды.

Нестабильность параметров:

- в основном нестабильность возникает при изменении температуры
- также зависит от влажности

Экранирование:

- для уменьшения влияния магнитного поля катушки на окружающее пространство
- для уменьшения наводок на катушку

Экранирование всегда уменьшает индуктивность катушки.

Вариометры:

- со скользящим контактом
- со взаимноповорачивающимися катушками (возможно изменение индуктивности в 10 и более раз)

## **Трансформаторы**

Трансформаторами называют электромагнитные устройства, имеющие две и большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенные для изменения значений переменного напряжения и тока. Трансформатор состоит из ферромагнитного магнитопровода (сердечника) и расположенных на нем обмоток. Обмотка, подключаемая к источнику преобразуемого напряжения, называется первичной, а обмотки, к которым подключены потребители электрической энергии, — вторичными. В зависимости от назначения трансформаторы подразделяют на трансформаторы питания, согласующие и импульсные.

Трансформаторы питания применяют в блоках питания радиоустройств и служат для получения переменных напряжений, необходимых для нормального функционирования аппаратуры. Условно их подразделяют на маломощные (выходная мощность до 1 кВт) и мощные (выходная мощность более 1 кВт), низковольтные (напряжение на обмотках не превышает 1000 В) и высоковольтные. Кроме того, трансформаторы питания дополнительно классифицируют по частоте преобразуемого напряжения. По конструкции к трансформаторам питания близки дроссели. По существу, это однообмоточные трансформаторы, предназначенные для последовательного включения в цепи пульсирующего тока в целях устранения пульсаций этого тока.

Согласующие трансформаторы предназначены для изменения уровня напряжений (токов) электрических сигналов, несущих полезную информацию. Они позволяют согласовать источник сигналов с нагрузкой при минимальном искажении сигнала. Вместе с активными элементами (транзисторами, лампами) они входят в состав устройств, усиливающих электрические колебания в широкой полосе частот. Различают входные, межкаскадные и выходные трансформаторы. Входные трансформаторы включают на входе усилительного устройства для согласования выходного сопротивления источника сигналов, например микрофона, с входным сопротивлением усилителя. Так как уровень входных сигналов сравнительно невелик, то эти трансформаторы должны быть хорошо защищены от воздействия внешних магнитных полей. Межкаскадные трансформаторы согласуют выходное сопротивление предыдущего каскада с входным сопротивлением последующего. Выходные трансформаторы согласуют выходное сопротивление усилителя с внешней нагрузкой. Выходные трансформаторы должны обеспечивать передачу большой мощности от усилителя в нагрузку.

Импульсные трансформаторы предназначены для формирования и трансформации импульсов малой длительности. Основным требованием, предъявляемым к импульсным трансформаторам, является требование малых искажений формы трансформируемого импульса.

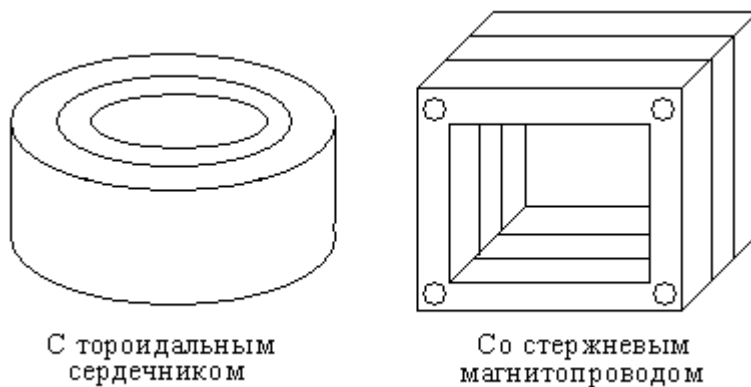
Несмотря на различие функций трансформаторов, основные физические процессы, протекающие в них, одни и те же. Поэтому трансформаторы различного схемного назначения имеют однотипное устройство.

### **Магнитопроводы трансформаторов.**

Магнитопроводы служат для того, чтобы обеспечить более полную связь между первичной и вторичной обмотками и увеличения магнитного потока. Выбор материала магнитопровода зависит от назначения и свойств трансформатора. Для трансформаторов питания широкое распространение получили холоднокатаные стали марок 3411-3424. В этих сталях при холодной прокатке кристаллы ориентируются вдоль направления проката, благодаря чему удается получить более высокую индукцию и меньшие потери. Для трансформаторов применяют три типа магнитопроводов: стержневой, броневой и кольцевой. По конструкции броневые сердечники подразделяют на сердечники, собранные из штампованных пластин, и ленточные.

Трансформаторы со стержневым магнитопроводом имеют неразветвленную магнитную цепь, на двух его стержнях располагают две катушки с обмотками. Такую конструкцию используют обычно для трансформаторов большей и средней мощности, так

как наличие двух катушек увеличивает площадь теплоотдачи и улучшает тепловой режим обмоток. Трансформаторы с броневым сердечником имеют разветвленную магнитную цепь, обмотки в этом случае размещают на центральном стержне магнитопровода. Такие магнитопроводы используют в маломощных трансформаторах.



Пластинчатые магнитопроводы собирают из отдельных штампованных Ш-образных или П-образных пластин толщиной 0,35-0,5 мм и перемычек. При сборке встык все пластины составляют вместе и соединяют перемычками. Магнитопровод в этом случае состоит из двух частей, что позволяет получить воздушные зазоры в магнитной цепи, необходимые для нормальной работы трансформаторов, у которых через обмотки помимо переменного тока протекает постоянный ток. При сборке внахлест пластины чередуются так, чтобы у соседних пластин разрезы были с разных сторон, что обеспечивает отсутствие воздушного зазора в магнитопроводе. При этом уменьшается его магнитное сопротивление, однако возрастает трудоемкость сборки. Для уменьшения потерь на вихревые токи пластины изолируют друг от друга слоем оксидной пленки, лаковым покрытием или склеивающей суспензией.

Ленточные магнитопроводы получают путем навивки ленты трансформаторной стали толщиной 0,1-0,3 мм, после чего «витой сердечник» разрезают и получают два С-образных сердечника, на один из которых устанавливают катушки с обмотками, а затем вставляют второй С-сердечник. Для получения минимального немагнитного зазора в магнитопроводе торцы сердечником склеивают пастой, содержащей ферромагнитный материал. Если необходим зазор, то в месте стыка двух сердечников устанавливают прокладки из бумаги и картона требуемой толщины. В случае броневых ленточных сердечников применяют одну катушку с обмотками и четыре С-образных сердечника. Ленточная конструкция сердечников позволяет механизировать процесс изготовления трансформаторов. При этом трудоемкость процесса установки сердечника в катушку

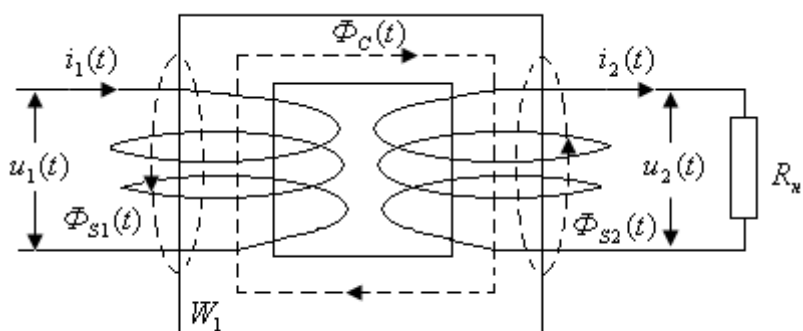
снижается, а отходы материалов сокращаются. Потери в ленточных сердечниках меньше, чем в пластинчатых. Это объясняется тем, что в пластинчатых сердечниках магнитные силовые линии часть пути проходят перпендикулярно направлению проката, а в ленточных сердечниках линии поля расположены вдоль направления проката по всей длине магнитопровода.

Трансформаторы на тороидальных сердечниках наиболее сложные и дорогие. Основными преимуществами их являются очень незначительная чувствительность к внешним магнитным полям и малая величина потока рассеяния. Обмотки в трансформаторе наматывают равномерно по всему тороиду, что позволяет еще более уменьшить магнитные потоки рассеяния.

### Физические основы функционирования трансформаторов.

Функционирование трансформаторов основано на связи цепей через магнитный поток.

При подключении к первичной обмотке, имеющей  $W_1$ , витков, переменного



напряжения  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$  в ней появляется переменный ток  $i_1(t)$  и возникнет магнитный поток,  $\Phi_1(t)$  который в основном будет замыкаться через магнитопровод и пронизывать витки как первичной, так и вторичной обмотки, имеющей  $W_2$  витком, в результате

чего в первичной обмотке индуцируется ЭДС  $e_1(t)$ , а во вторичной  $e_2(t)$ . Наличие ЭДС  $e_2(t)$  вызовет появление тока  $i_2(t)$  во вторичной обмотке, и на нагрузочном резисторе  $R_n$  появится напряжение  $u_2(t)$ . Ток  $i_2(t)$  создаст магнитный поток  $\Phi_2(t)$ , направленный навстречу потоку  $\Phi_1(t)$ , в результате чего в магнитном проводе установится результирующий магнитный поток  $\Phi_c(t)$ . Незначительная часть потока, создаваемого током  $i_1(t)$  замыкается не через магнитопровод, а через воздух. Этот поток называется потоком рассеяния  $\Phi_{s1}(t)$ , точно так же существует поток рассеяния вторичной обмотки  $\Phi_{s2}(t)$ . В правильно сконструированном трансформаторе потоки рассеяния ничтожно малы, и ими можно пренебречь.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа напряжение  $u_1(t)$  должно быть равно сумме падения напряжения на активном сопротивлении провода первичной обмотки и двух ЭДС, обусловленных потоками  $\Phi_C(t)$  и  $\Phi_{S1}(t)$  сцепленными с первичной обмоткой:

$$u_1(t) = i_1(t)R_1 + W_1 \frac{d\Phi_C}{dt} + L_{S1} \frac{di_1(t)}{dt}$$

Соответственно, для вторичной обмотки

$$u_{21}(t) = -i_2(t)R_2 + W_2 \frac{d\Phi_C}{dt} - L_{S2} \frac{di_2(t)}{dt}$$

Значение ЭДС, индуцируемой в первой обмотке, определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$e_1(t) = W_1 \frac{d\Phi_C}{dt} = W_2 \frac{d}{dt} \Phi_m \cos 2\pi ft = 2\pi f W_1 \Phi_m \sin \omega t = E_{1m} \sin \omega t$$

Действующее значение ЭДС [В] равно:

$$E_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f W_1 \Phi_m$$

Магнитный поток  $\Phi_m$  можно выразить через индукцию  $B_m$  :

$$\Phi_m = B_m S_C$$

Где  $S_C$  - площадь поперечного сечения сердечника, см<sup>2</sup>

Тогда величина ЭДС первичной обмотки равна:

$$E_1 = 4,44 f W_1 B_m S_C \cdot 10^{-4}$$

Соответственно, ЭДС вторичной обмотки равно

$$E_2 = 4,44 f W_2 B_m S_C \cdot 10^{-4}$$

Из последних соотношений следует:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_2}{W_1} = n$$

Это соотношение называется коэффициентом трансформации.

### **Потери в трансформаторах.**

Под потерями в трансформаторе понимают затраты мощности на нагрев обмоток, перемагничивание и вихревые токи в сердечнике. В конечном счете, мощность потерь выделяется в виде тепла, которое должно быть рассеяно в окружающую среду

Потери на вихревые токи зависят от удельного сопротивления материала сердечника и от частоты магнитного поля. Чтобы уменьшить эту составляющую потерь, применяют специальные трансформаторные стали с большим удельным сопротивлением.

Кроме того, сердечники изготавливают из тонких листов, изолированных друг от друга. Чем выше частота тока, тем больше потери на вихревые токи, поэтому сердечники трансформаторов, работающих на высоких частотах, делают из более тонкого металла.

Потери на перемагничивание (гистерезис) зависят от максимальной индукции в сердечнике: чем больше индукция, тем больше площадь петли гистерезиса и тем больше потери. Обычно при расчетах потери на перемагничивание и вихревые токи не разделяют, и свойства материала оценивают удельными потерями  $P_{c,yd}$ , то есть потерями, отнесенными к 1 кг материала:

$$P_{c,yd} = aB_m^z$$

где  $a$  - эмпирический коэффициент;  $z = 2-3$ .

Потери в сердечнике зависят от массы сердечника  $G_C$ :

$$P_C = P_{c,yd} G_C$$

*Заключение.* Индуктивные элементы составляют важный класс радиотехнических деталей. Определяющую роль в их свойствах и характеристиках играют используемые при этом магнитные материалы. Это обуславливает важность изучения материалов данной лекции.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

В процессе изучения материалов курса студент знакомится с основными материалами, используемыми в радиоэлектронике и радиокомпонентами, изготавливаемыми промышленностью. Это имеет как самостоятельное значение, позволяющее использовать данные знания при создании и эксплуатации радиоаппаратуры, так и служит основой для дальнейшего изучения активных компонентов электроники.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

### *Основная литература.*

Герасимов С.М и др. Физические основы электронной техники. – Киев, Вышш.шк.,2011. – 433с.

Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 368 с.

Антипов Б.Л., Сорокин В.ЧС., Терехов В.А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. Учебное пособие для вузов. – СПб. Изд-во «Лань», 2012. – 208 с.

Методические указания к лабораторным работам «Радиокомпоненты и электроника», Архипов Е.А., Никитин О.Р., Тарарышкина Л.И., Титов В.Н. – Владимир, ВлГУ, 2013. – 81с.

Практикум «Введение в микроэлектронику» Сушкова Л.Т., Тарарышкина Л.И., Титов В.Н. – Владимир, ВлГУ, 2010. – 127с.

*Дополнительная литература.*

Бобровников Л.З. Электроника. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 557с.

Гусев в.г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш.шк., 1982. – 495с.

Лачин В.И. Электроника. – Ростов н/Д, Феникс. 2004. – 572с.

Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций. – СПб.: Корона, 2010, - 415с.

Шишкин Г.Г., Электроника: Учебник для вузов / Г.Г. Шишкин, А.Г.Шишкин. – М.: Дрофа, 2009. – 703 с.

Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. – М.: Наука, 2006, 143с.

Электрорадиоматериалы. /Под роед. Б.М.Тареева. – М.: Высш. шк., 1980. – 400с.

Яманов С.А. Химия и радиоматериалы. – М.: Высш.шк., 2000. – 400с.