

## Тема 1. Электрорадиоматериалы радиоэлектронных средств

### Лекция 5. Диэлектрики: назначение и область применения

#### Вопросы:

- 5.1 Механизмы поляризации диэлектриков.
- 5.2 Параметры диэлектрических материалов: электропроводность, потери, электрическая прочность, механизмы пробоя. Их зависимости от внешних воздействий.
- 5.3 Применение диэлектрических материалов в РЭА.

#### Литература

1. Петров К.С. Радиоматериалы и радиокомпоненты. – М.: Питер, 2003. – 512 с.

#### 5.1 Механизмы поляризации диэлектриков.

Изначальное название диэлектрика, как материала, плохо проводящего электричество, было введено М. Фарадеем. В настоящее время благодаря учению Максвелла отношение к диэлектрикам изменилось, и они стали широко применяться во многих практических областях. В современной трактовке **диэлектрик** – вещество, обладающее свойством поляризоваться при действии на него электрического поля.

Рассмотрим более подробно механизм воздействия электрического поля на диэлектрик, проиллюстрированный на рисунке 5.1. В диэлектрике в отличие от проводников нет свободных заряженных зарядов (рисунок 5.1,а). Они

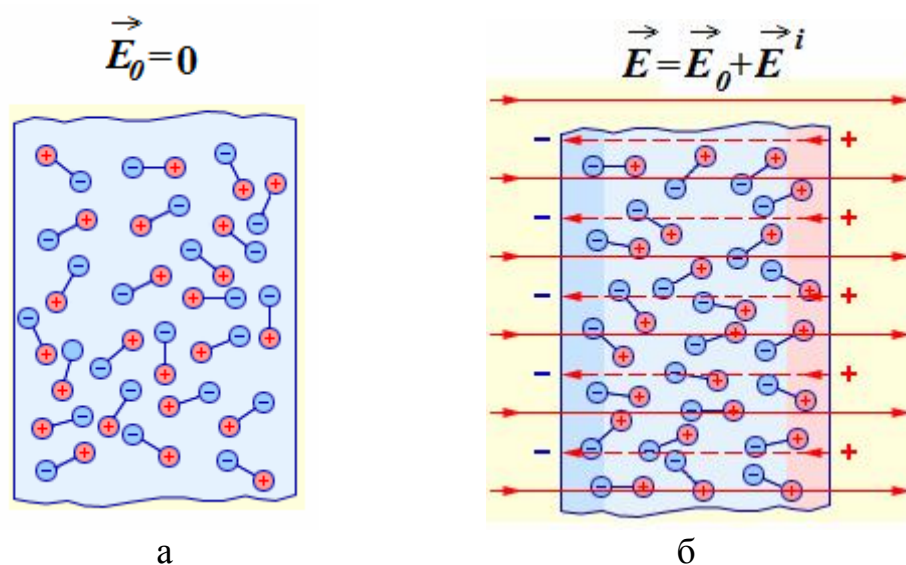


Рисунок 5.1 – Механизм поляризации диэлектрика

состоят из нейтральных атомов и молекул, которые связаны между собой и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика. Однако под действием внешнего электрического поля напряженностью  $\vec{E}_0$  в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов и молекул (рисунок 5.1,б). В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрика появляются избыточные некомпенсированные связанные заряды. В отличие от проводников, все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов. Связанные заряды создают электрическое поле  $\vec{E}^i$ , которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля. Данный процесс называется поляризацией диэлектрика.

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются *ориентационная* и *электронная* поляризации. Эти механизмы проявляются главным образом при поляризации газообразных и жидких диэлектриков.

**Ориентационная (дипольная) поляризация** возникает в случае полярных диэлектриков, состоящих из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают (как показано на рисунке 5.1) Такие молекулы представляют собой микроскопические *электрические диполи* – нейтральную совокупность двух зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Дипольным моментом обладает, например, молекула воды, а также молекулы ряда других диэлектриков ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2$  и т. д.). Поляризация полярных диэлектриков сильно зависит от температуры, так как тепловое движение молекул играет роль дезориентирующего фактора.

**Электронный (упругий) механизм** проявляется при поляризации неполярных диэлектриков, молекулы которых не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом. Под действием электрического поля мо-

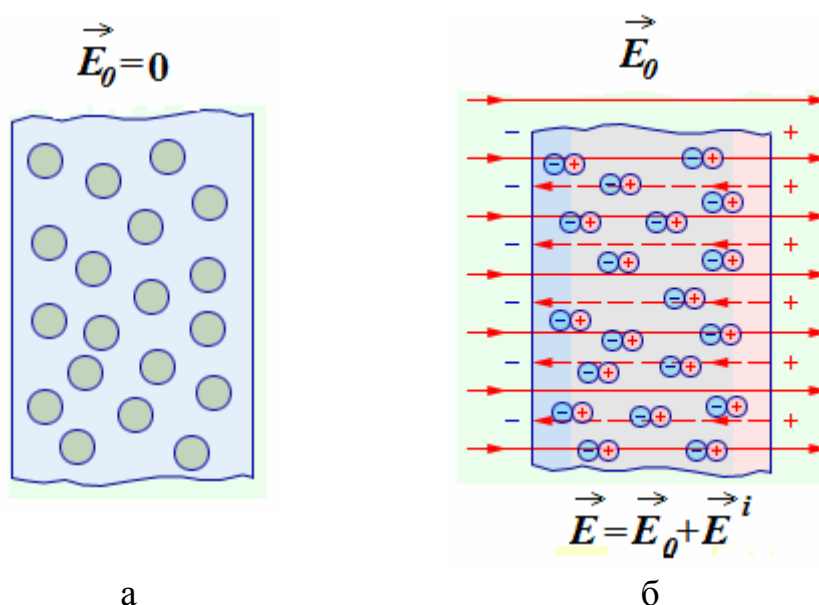


Рисунок 5.2 – Механизм поляризации неполярного диэлектрика

лекулы неполярных диэлектриков деформируются – положительные заряды смещаются в направлении вектора  $\vec{E}_0$ , а отрицательные – в противоположном направлении (см. рисунок 5.2). В результате каждая молекула превращается в электрический диполь, ось которого направлена вдоль внешнего поля. На поверхности диэлектрика появляются некомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле  $\vec{E}^i$ , направленное навстречу внешнему полю. Примером неполярной молекулы может служить молекула метана  $\text{CH}_4$ .

У многих неполярных молекул при поляризации деформируются электронные оболочки, поэтому этот механизм получил название *электронной поляризации*. Этот механизм является универсальным, поскольку деформация электронных оболочек под действием внешнего поля происходит в атомах, молекулах и ионах любого диэлектрика.

В случае твердых кристаллических диэлектриков наблюдается так называемая *ионная поляризация*, при которой ионы разных знаков, составляющие кристаллическую решетку, при наложении внешнего поля смещаются в противоположных направлениях, вследствие чего на гранях кристалла появляются связанные (некомпенсированные) заряды. Примером такого механизма может служить поляризация кристалла  $\text{NaCl}$ .

Деформация неполярных молекул под действием внешнего электрического поля не зависит от их теплового движения, поэтому поляризация неполярного диэлектрика не зависит от температуры.

**5.2. Параметры диэлектрических материалов: электропроводность, потери, электрическая прочность, механизмы пробоя. Их зависимости от внешних воздействий.**

Одним из основных параметров диэлектрических материалов является *диэлектрическая проницаемость*, равная отношению модуля напряженности внешнего поля  $\vec{E}_0$  в вакууме к модулю напряженности полного поля  $\vec{E}_0 + \vec{E}^i$  в однородном диэлектрике:

$$\varepsilon = \frac{|\vec{E}_0|}{|\vec{E}_0 + \vec{E}^i|}. \quad (5.1)$$

Влияние температуры на величину диэлектрической проницаемости оценивают *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости*, показывающему относительное изменение диэлектрической проницаемости при увеличении температуры на  $1^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}. \quad (5.2)$$

Величина данного коэффициента зависит от механизма поляризации диэлектриков, как показано на рисунке 5.3,а. На нем кривые 1 иллюстрируют зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для неполярных диэлектриков, а кривыми 2 – для полярных диэлектриков. Анализ данного рисунка показывает, что неполярные диэлектрики имеют линейную зависимость температурного коэффициента диэлектрической проницаемости. Это свидетельствует о том, что с ростом температуры уменьшается плотность диэлектрика, а, следовательно, и количество поляризуемых частиц. Для данных диэлектриков  $\alpha_\varepsilon \approx -10^{-4} [1/\text{K}]$ .

У полярных диэлектриков зависимость  $\varepsilon$  от температуры имеет характерный максимум. Это объясняется тем, что в области низких температур по-

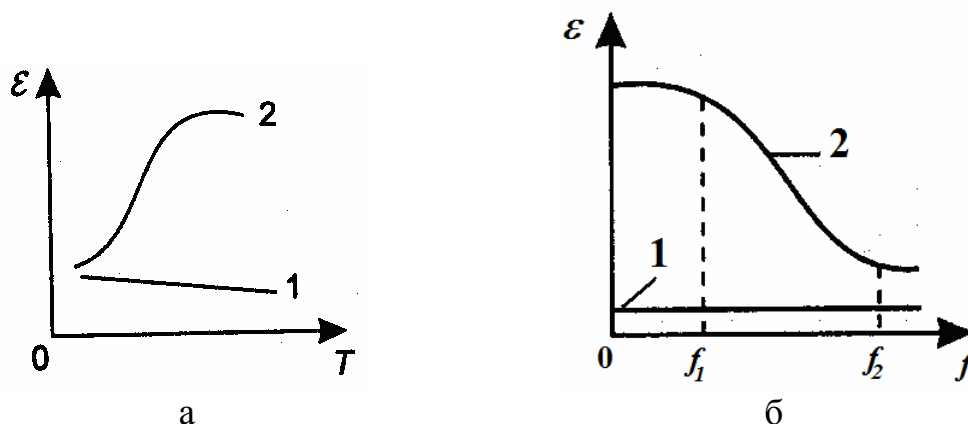


Рисунок 5.3 – Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры и частоты

вышение температуры ведет к ослаблению межмолекулярных сил, что облегчает поворот диполей под действием сил поля. В области высоких температур  $\varepsilon$  уменьшается из-за возрастания беспорядочных тепловых колебаний.

Частотная зависимость проницаемости, показанная на рисунке 5.3,б, обусловлена инерционностью процессов поляризации. У неполярных диэлектриков с электронной поляризацией процесс образования упругих диполей протекает практически мгновенно. В связи с этим диэлектрическая проницаемость (кривая 1) практически не зависит от частоты. У полярных диэлектриков (кривая 2) в области низких частот (вплоть до частоты  $f_1$ ) твердые диполи успевают поворачиваться за половину периода колебаний, поэтому диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты. На частотах выше  $f_1$  диполи не успевают следовать за изменениями поля, вследствие чего снижается интенсивность дипольной поляризации. На частотах выше  $f_2$  процесс дипольной поляризации полностью отсутствует и сохраняется только электронная поляризация.

Основной причиной электропроводности диэлектриков являются примеси. Различают *объемную и поверхностную электропроводность*.

**Объемная электропроводность** создается ионами примесей или ионами диэлектрика, которые, находясь в состоянии первоначального закрепления и совершая тепловые колебания, способны преодолеть силы взаимодействия. Поскольку в объеме имеются как ионы примеси, так и собственные

ионы, то электропроводность диэлектрика определяется суммой двух слагаемых:

$$\sigma = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right), \quad (5.3)$$

в котором  $A_1$ ,  $A_2$  - коэффициенты пропорциональности, зависящие от концентрации собственных и примесных ионов и их подвижности;  $E_1$  и  $E_2$  - суммарная энергия активации собственных и примесных ионов.

При низких температурах преобладает первое слагаемое, при высоких - второе. Ток, создаваемый движением ионов, называют током сквозной проводимости  $I_{ск}$ .

**Поверхностная электропроводность** обусловлена наличием влаги, загрязнениями, различными дефектами на поверхности диэлектрика.

По способности реагировать на влагу различают гидрофобные и гидрофильные материалы. Гидрофобные материалы практически не смачиваются, и их удельное поверхностное сопротивление велико. Гидрофильные материалы смачиваются, поэтому на поверхности диэлектрика образуется непрерывный токопроводящий слой. К гидрофильным материалам относятся полярные и ионные диэлектрики. Для уменьшения поверхностной электропроводности создаются защитные гидрофобные покрытия.

**Диэлектрическими потерями** называют мощность, расходуемую электрическим полем на поляризацию диэлектрика.

Данная мощность выделяется в виде тепла. Поглощение мощности диэлектриком обусловлено медленными поляризациями и электропроводностью диэлектрика.

Потери энергии в диэлектрике определяют величиной  $\operatorname{tg} \delta$ . Здесь угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига между током и напряжением в диэлектрике, называют углом диэлектрических потерь. У широко применяемых диэлектриков  $\operatorname{tg} \delta \approx 2 \dots 5 \cdot 10^{-3}$ , у высококачественных диэлектриков  $\operatorname{tg} \delta \approx 2 \dots 5 \cdot 10^{-4}$ .

Температурные зависимости данного показателя зависят от типа поляризации диэлектрика, как показано на рисунке 5.4. У неполярных диэлектриков (кривая 1) потери растут с ростом температуры. У по-

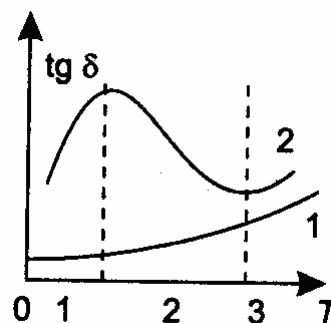


Рисунок 5.4 – Зависимость диэлектрических потерь от температуры

лярных диэлектриков (кривая 2) возможности поворота молекул при низких температурах ограничены из-за сил трения между ними. Вследствие этого в процессе поляризации участвует малое число молекул, а, следовательно, потери на их поляризацию невелики. С ростом температуры растет число молекул, растут и потери на поляризацию. При условии совпадения времени поляризации с длительностью периода поля достигается максимальное значение потерь. Дальнейший рост температуры нарушает данный баланс и потери начинают падать.

В нормальных (рабочих) условиях проводимость диэлектриков крайне низка. В связи с этим их применяют в качестве электроизоляционных материалов. Однако при воздействии сильных электрических полей, когда напряжение превышает некоторое критическое значение, они могут становиться проводниками. Данное явление называется **пробоем диэлектрика**.

Напряжение, приложенное к диэлектрику и приводящее к его пробую, называется **пробивным напряжением** ( $U_{np}$ ), а минимальную напряженность однородного электрического поля, приводящую к пробую диэлектрика, называют электрической прочностью ( $E_{np}$ ):

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d_{\delta}}, \quad (5.4)$$

где  $d_{\delta}$  - толщина диэлектрика.

Существуют несколько разновидностей пробоя:

- **Электрический пробой** – разрешение диэлектрика, обусловленное ударной ионизацией электронами или разрушение связей между атомами, ионами или молекулами. Происходит за время  $10^{-5}$ - $10^{-8}$ с.

- **Тепловой пробой** – разрушение диэлектрика за счет прогрессирующего локального энерговыделения при протекании тока в среде.

- **Электротермический пробой** характерен для хрупких диэлектриков и пористых керамик. Он возникает в результате механического разрушения из-за развития микротрещин под действием разрядов в газовых включениях, которые образуют перегретые области диэлектрика.

- **Электромеханический пробой** – механическое разрушение полимера при высоком напряжении в результате того, что полимер находится в высокоэластичном состоянии. Причиной является уменьшение толщины диэлектрика из-за электростатического притяжения электродов под действием высокого напряжения.

- **Электрохимический пробой** – происходит при напряжениях меньших электрической прочности диэлектрика. Вызывается изменением химического состава и структуры диэлектрика в результате электрического старения. Время развития этого вида пробоя  $10^3$ - $10^8$ с.

### **5.3 Применение диэлектрических материалов в РЭА.**

Диэлектрические материалы широко применяются при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры. При этом выбор конкретного материала определяется областью его использования.

Так, для изготовления катушек индуктивности диэлектрик применяется для выполнения каркаса. При этом для выбора материала необходимо знать:

- диапазон частот;
- требования добротности;
- температурный интервал;
- окружающие условия;
- программу выпуска;



- существующую оснастку предприятия.

В качестве рекомендуемых материалов можно рассматривать фенопласты, полистирол и керамику.

При изготовлении высокочастотных разъемов, в большинстве случаев являющихся коаксиальными, в качестве изолятора целесообразно использовать воздух ( $\rho = 10^{15}$  Ом•см,  $\operatorname{tg} \delta \leq 4 \cdot 10^{-8}$  при  $f = 50$  Гц), а из пластиков – фторопласт-4 ( $\varepsilon = 1,9 \dots 2,2$ ,  $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ ).

При выполнении устройств СВЧ из диэлектрических материалов применяются керамика и слюда. Однако для выполнения стоек и диэлектрических шайб обычно используется керамика и может быть применен фторопласт-4. Для деталей, не находящихся в высокочастотном поле, применяются стеклопластики (СВАМ, АГ-4, АГ-4С).

При изготовлении микросхем диэлектрические материалы применяются материалов подложек. В диапазоне 30..50 МГц подложки изготавливаются с применением стекла, керамики и пластмасс. Основные требования к материалам, из которых изготавливаются микросхемы, могут быть разделены на 2 группы:

- общие требования для всех тонкопленочных схем: высокие изоляционные свойства, механическая прочность, твердость и износостойкость, возможность применения различных форм и размеров, высокая теплопроводность и низкая стоимость;

- свойства, требования к которым изменяются в зависимости от конкретного применения: толщина пазов, качество поверхности, рабочая температура, тепловые расширения.

В качестве основных материалов применяются стекло на основе натриевой извести, стеатит с малыми потерями, окись алюминий и окись бериллия.

В диапазоне СВЧ в микросхемах применяются в качестве подложек как органические материалы (сополимер САМ, фторопласт-4, стеклотекстолит СКМ-1), так и неорганические материалы (сапфир, кварц).

Для создания активных компонентов применяют осаждение пленки.