

II.5 Свойства сред

Основными материалами, с которыми сталкиваются при анализе ЭМС электронных систем являются проводниковые материалы, магнитные материалы, диэлектрические материалы. Общим для них является то, что они эксплуатируются в условиях действия электрического и/или магнитного поля. В них протекают электрические токи, запасается электрическая или магнитная энергия, выделяется тепловая энергия, происходят потери электрической и/или магнитной энергии, происходит нагревание материалов. Здесь также следует выделить целый громадный класс материалов не по признаку их функционирования, а по составу. Это композиционные материалы.

1. Проводники, диэлектрики, полупроводники

Вещество, внесенное в электрическое поле, может существенно изменить его. В любом веществе, помещённом в электрическом поле, составляющие его электрические заряды (электроны, атомные ядра) испытывают силы со стороны этого поля. В отсутствие внешнего поля частицы распределяются внутри вещества так, что создаваемое ими электрическое поле в среднем по объемам, включающим большое число атомов или молекул, равно нулю. При наличии внешнего поля происходит перераспределение заряженных частиц, и в веществе возникает собственное электрическое поле. Полное электрическое поле $\vec{E}$ складывается в соответствии с принципом суперпозиции из внешнего поля $\vec{E}_0$ и внутреннего поля $\vec{E}'$ создаваемого заряженными частицами вещества.

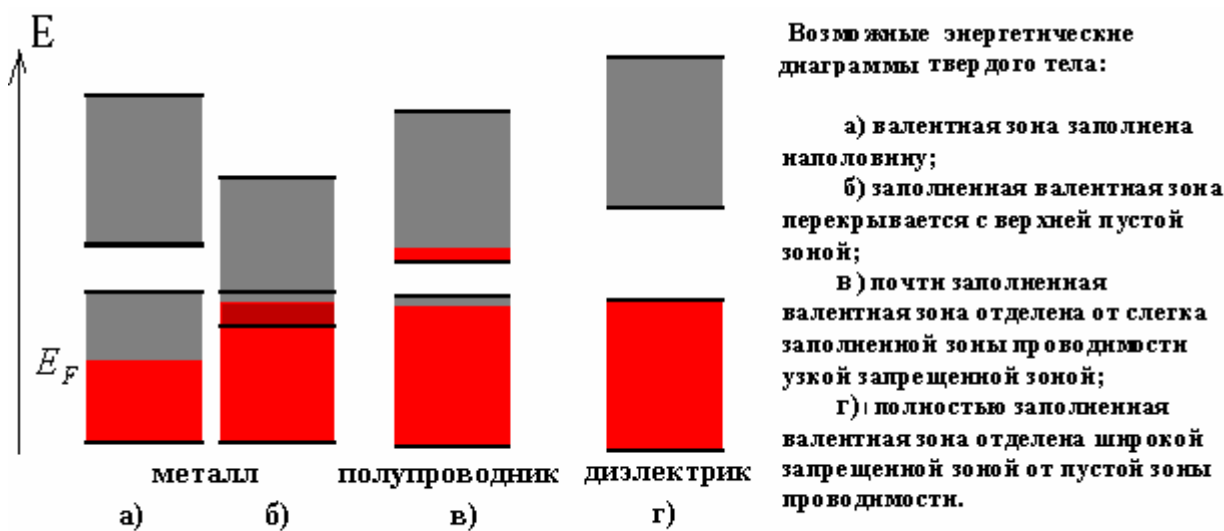
В результате часть зарядов направленно перемещается, образуя электрический ток. Остальные же заряды перераспределяются так, что «центры тяжести» положительных и отрицательных зарядов смещаются друг относительно друга. В последнем случае говорят о поляризации вещества. В зависимости от того, какой из этих двух процессов — электропроводность или поляризация — преобладает, принято деление веществ на проводники (металлы, электролиты, плазма) и изоляторы. Электропроводность изоляторов (диэлектриков) по сравнению с металлами очень мала. Их удельное сопротивление ρ порядка 10^8 — 10^{17} ом·см, а у металлов $\rho \sim 10^{-6}$ — 10^{-4} ом·см. Существует и промежуточный класс — полупроводники, свойства которых определяются процессами как электропроводности, так и поляризации.

Наиболее широкие классы вещества составляют **проводники** и **диэлектрики**. В металлах электрический ток представляет собой упорядоченное движение свободных электронов. Материалы, в которых мало или совсем нет свободных электронов, являются **диэлектриками** или изоляторами. Примерами хороших проводников являются такие металлы, как медь, алюминий,

золото и серебро. Различные пластмассы и керамические материалы представляют собой хорошие изоляторы.

Количественное различие в электропроводности твёрдых диэлектриков и металлов классическая физика пыталась объяснить тем, что в металлах есть свободные электроны, а в диэлектриках все электроны связаны, т. е. принадлежат отдельным атомам, и электрическое поле не отрывает, а лишь слегка смещает их. Однако такое объяснение неточно. Как показывает современная квантовомеханическая теория, твёрдое тело представляет собой как бы гигантскую «молекулу», где каждый электрон принадлежит всему кристаллу в целом. Это в одинаковой степени справедливо и для диэлектриков, и для металлов. Причиной различного поведения электронов в металле и в диэлектриках является различный характер распределения электронов по уровням энергии.

Энергия электронов в твёрдом теле не может иметь произвольного значения. Области энергий, которыми электрон может обладать (разрешённые зоны), чередуются с интервалами энергий, которые электрон не может принимать (запрещённые зоны). Т. к., с одной стороны, электроны стремятся занять уровни с наименьшей энергией, а с др. стороны, в одном энергетическом состоянии может находиться только два электрона, то электроны заполняют энергетические уровни от нулевого до некоторого максимального. В диэлектриках верхний заполненный электронами энергетический уровень совпадает с верхней границей одной из разрешённых зон (*рис.*). В металлах же верхний заполненный электронами энергетический уровень лежит внутри разрешённой зоны.



Зонные диаграммы металла, полупроводника и диэлектрика

Для того чтобы в твёрдом теле под действием электрического поля возник электрический ток (направленное движение электронов), необходимо, чтобы часть электронов могла увеличивать свою энергию под действием поля, т. е. переходить с нижних энергетических уровней на более высокие. В металле такой переход возможен, т.к. к заполненным уровням непосредственно примыкают свободные. В диэлектриках же ближайшие свободные уровни отделены от заполненных запрещённой зоной, которую электроны

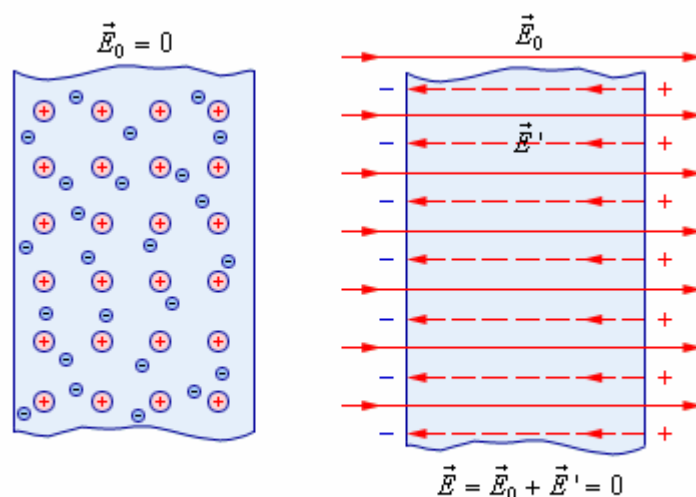
под действием обычных не слишком сильных электрических полей преодолеть не могут. В диэлектриках действие электрического поля сводится к перераспределению электронной плотности, которое приводит к поляризации диэлектриков. Распределение электронов по уровням энергии в полупроводниках и диэлектриках сходно. Полупроводник отличается от диэлектрика лишь более узкой запрещённой зоной. Поэтому при низких температурах свойства полупроводников и диэлектриков близки, а при повышении температуры электропроводность полупроводников возрастает и становится заметной. Резкой грани между диэлектриками и полупроводниками провести нельзя. Вещества с шириной запрещённой зоны $\Delta E < 2\text{—}3$ эв относят к полупроводникам, а с $\Delta E > 2\text{—}3$ эв — к диэлектрикам.

2. Поляризация веществ

2.1 Проводники.

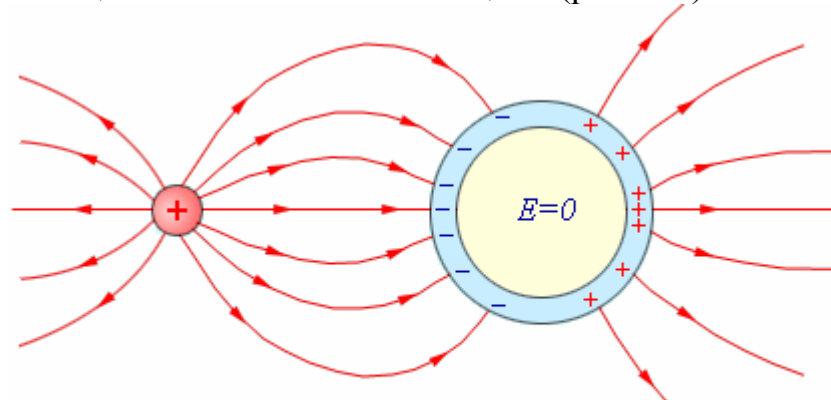
Основная особенность проводников – наличие **свободных** зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объёму проводника. Типичные проводники – металлы. В отсутствие внешнего поля в любом элементе объёма проводника отрицательный свободный заряд компенсируется положительным зарядом ионной решетки. В проводнике, внесенном в электрическое поле, происходит перераспределение свободных зарядов, в результате чего на поверхности проводника возникают нескомпенсированные положительные и отрицательные заряды (рис. .1). Этот процесс называют *электростатической индукцией*, а появившиеся на поверхности проводника заряды – *индукционными зарядами*.

Индукционные заряды создают свое собственное поле $\vec{E}'$ которое компенсирует внешнее поле $\vec{E}_0$ во всем объёме проводника: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$ (внутри проводника). Полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциалу на поверхности проводника.



Электростатическая индукция

Все внутренние области проводника, внесенного в электрическое поле, остаются электронейтральными. Если удалить некоторый объем, выделенный внутри проводника, и образовать пустую полость, то электрическое поле внутри полости будет равно нулю. На этом основана **электростатическая защита** – чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния поля помещают в металлические ящики (рис. .2).



*Электростатическая защита.
Поле в металлической полости равно нулю*

а

Об электростатической защите мы подробнее поговорим в главе “Экранирование”.

Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, силовые линии у поверхности должны быть перпендикулярны к ней.

2.2.Диэлектрики

В отличие от проводников, в идеальных диэлектриках (изоляторах) нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле $\vec{E}_0$ в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные нескомпенсированные **связанные** заряды. Все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле $\vec{E}'$, которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности $\vec{E}_0$ внешнего поля. Этот процесс называется *поляризацией диэлектрика*. В результате полное электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля $\vec{E}_0$.

Поляризацию диэлектриков характеризуют **вектором поляризации** P , который представляет собой дипольный момент единицы объёма D . Дипольный момент нейтральной в целом системы зарядов есть вектор, равный произведению расстояния между центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов на величину заряда одного знака. Направлен этот вектор от центра тяжести отрицательных к центру тяжести положительных зарядов. Вектор P зависит от напряжённости электрического поля E . Поскольку сила, действующая на заряд, пропорциональна E , то, естественно, что при малых полях величина P пропорциональна E . Коэффициент пропорциональности χ в соотношении $P = \chi E$ называется диэлектрической восприимчивостью диэлектрика. Но чаще оказывается удобным вместо вектора P пользоваться вектором электрической индукции

$$D = E + 4\pi P = \varepsilon E$$

Ясно, что

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\chi.$$

В вакууме $\chi = 0$ и $\varepsilon = 1$ (в системе единиц СГСЕ). Значение ε (или χ) является основной характеристикой диэлектрика.

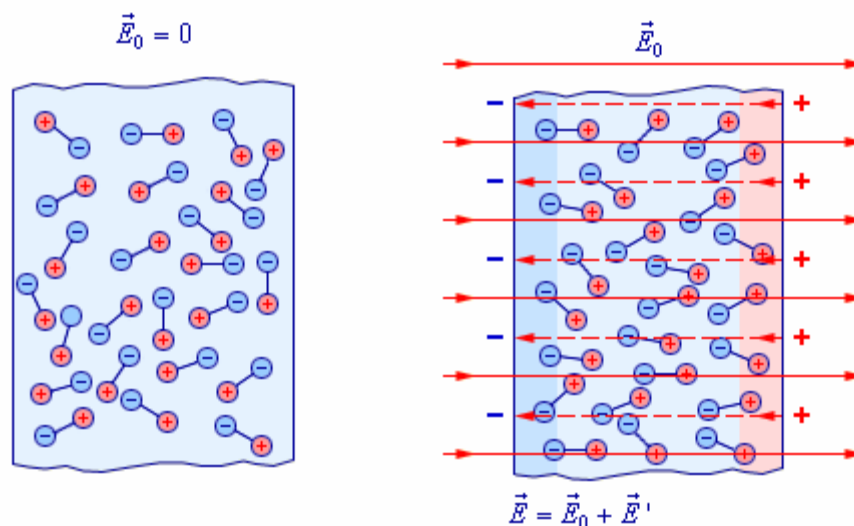
В анизотропных диэлектриках (например, в некубических кристаллах) направление вектора поляризации P определяется не только направлением поля E , но также выделенными направлениями среды, например, осями симметрии кристалла. Поэтому вектор P будет составлять различные углы с вектором E в зависимости от ориентации E по отношению к осям симметрии. В результате вектор D будет определяться через вектор E с помощью не одной величины ε , а несколькими величинами (в общем случае — шестью), образующими тензор диэлектрической проницаемости.

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются ориентационная и электронная поляризации.

Ориентационная или дипольная поляризация возникает в случае *полярных диэлектриков*, состоящих из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. 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.

При отсутствии внешнего электрического поля оси молекулярных диполей ориентированы хаотично из-за теплового движения, так что на поверхности диэлектрика и в любом элементе объема электрический заряд в среднем равен нулю.

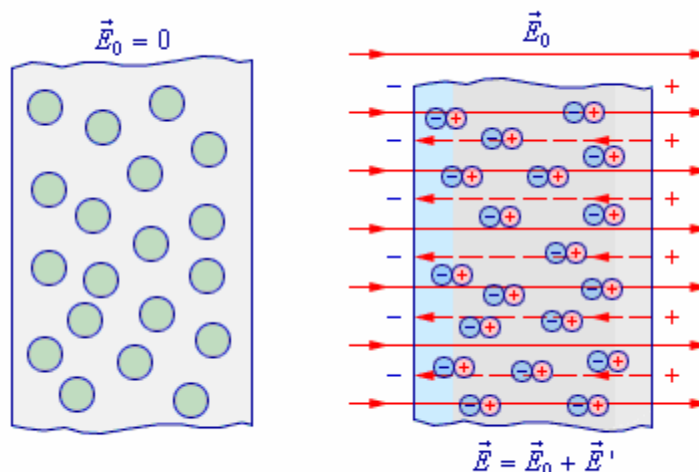
При внесении диэлектрика во внешнее поле $\vec{E}_0$ возникает частичная ориентация молекулярных диполей. В результате на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные макроскопические связанные заряды, создающие поле $\vec{E}'$ направленное навстречу внешнему полю $\vec{E}_0$ (рис. 3).



Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

Поляризация полярных диэлектриков сильно зависит от температуры, так как тепловое движение молекул играет роль дезориентирующего фактора.

Электронный или упругий механизм проявляется при поляризации *неполярных диэлектриков*, молекулы которых не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом.



Поляризация неполярного диэлектрика

Под действием электрического поля молекулы неполярных диэлектриков деформируются – положительные заряды смещаются в направлении вектора $\vec{E}_0$ а отрицательные – в противоположном направлении. В результате каждая молекула превращается в электрический диполь, ось которого направлена вдоль внешнего поля. На поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле $\vec{E}'$ направленное навстречу внешнему полю $\vec{E}_0$. Так происходит поляризация неполярного диэлектрика (рис. 4).

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

лекулы может служить молекула метана CH_4 . У этой молекулы четырехкратно ионизированный ион углерода C^{4+} располагается в центре правильной пирамиды, в вершинах которой находятся ионы водорода H^+ . При наложении внешнего электрического поля ион углерода смещается из центра пирамиды, и у молекулы возникает дипольный момент, пропорциональный внешнему полю.

Электрическое поле $\vec{E}'$ связанных зарядов, возникающее при поляризации полярных и неполярных диэлектриков, изменяется по модулю прямо пропорционально модулю внешнего поля $\vec{E}_0$. В очень сильных электрических полях эта закономерность может нарушаться, и тогда проявляются различные *нелинейные эффекты*. В случае полярных диэлектриков в сильных полях может наблюдаться *эффект насыщения*, когда все молекулярные диполи выстраиваются вдоль силовых линий. В случае неполярных диэлектриков сильное внешнее поле, сравнимое по модулю с внутриатомным полем, может существенно деформировать атомы или молекулы вещества и изменить их электрические свойства. Однако эти явления практически никогда не наблюдаются, так как для этого нужны поля с напряженностью (10^{10} – 10^{12}) В/м. Между тем, гораздо раньше наступает электрический пробой диэлектрика.

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 (нескомпенсированные) заряды.

2. 3 Диэлектрические потери.

В силу электрических и магнитных потерь проницаемости ε и μ следует рассматривать как комплексные:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \text{ и } \mu = \mu' - i\mu''$$

В физической и радиотехнической практике комплексные проницаемости (т.е. их мнимые и вещественные части) подлежат измерению.

Существуют специальные обозначения для отношений $\varepsilon''/\varepsilon'$ и μ''/μ' :

$$\text{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \text{ и } \text{tg} \delta^m = \mu''/\mu'$$

Величина δ называется углом диэлектрических потерь, а δ^m - углом магнитных потерь. Угол δ^m есть фаза запаздывания B по отношению к H , точно также, как при отсутствии электропроводности $\delta = \alpha$ есть обсуждавшаяся выше фаза запаздывания D по отношению к E . При наличии электропроводности ($\sigma \neq 0$) и инерционности поляризации надо внести $\varepsilon e^{-i\alpha}$ вместо ε . Это дает:

$$\varepsilon' = \varepsilon \cos \alpha \quad \text{и} \quad \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \varepsilon \sin \alpha,$$

где ε - обычная диэлектрическая проницаемость.

Название разности фаз δ углом диэлектрических потерь связано с тем, что наличие δ приводит к поглощению энергии электрического поля в диэлектрике. Потери в диэлектрике наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении используют другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

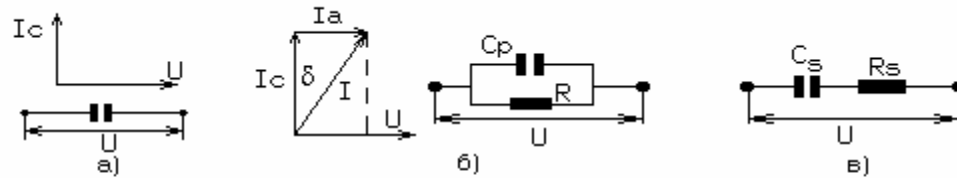
Угол диэлектрических потерь – это угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в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

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

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

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком обладающим потерями, находящемуся в цепи переменного напряжения. Эта схема должна быть выбрана так, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была равна мощности рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток опережал напряжение на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

Поставленная задача может быть решена заменой конденсатора с потерями идеальным конденсатором с последовательно включенным активным сопротивлением (рис. ,) или идеальным конденсатором шунтированным активным сопротивлением (рис. , б). Такие эквивалентные схемы, конечно, не дают полностью объяснения механизма диэлектрических потерь в реальных диэлектриках.



Схемы замещения и векторные диаграммы:
 - идеального диэлектрика а);
 - диэлектрика с потерями б), в):
 б) параллельная схема; в) последовательная схема.

Пренебрегая инерционностью поляризации ($\alpha = 0$) из формулы для $\dot{\epsilon}$ можно получить

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon}$$

В этом случае тангенс угла диэлектрических потерь есть отношение плотностей тока проводимости и смещения. Это соотношение можно использовать как критерий для деления веществ на проводники и диэлектрики:

$$\operatorname{tg} \delta \gg 1 - \text{проводник}$$

$$\operatorname{tg} \delta \ll 1 - \text{диэлектрик}$$

3. Основные диэлектрики

1. Полимеры. Общие свойства

Полимеры - высокомолекулярные соединения, имеющие большую молекулярную массу. Молекулы полимеров, называемые **макромолекулами**, состоят из большого числа многократно повторяющихся структурных группировок (**элементарных звеньев**), соединенных в цепи химическими связями. Например, в молекуле поливинилхлорида:

-CH₂-CHCl-CH₂-CHCl-CH₂-CHCl-CH₂-CHCl- повторяющимся звеном является группировка: **-CH₂-CHCl-**.

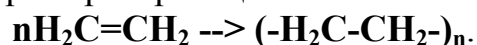
Полимеры получают из **мономеров** - веществ, каждая молекула которых способна образовывать одно или несколько составных звеньев. Так как полимеры представляют собой смеси молекул с различной длиной цепи, то под молекулярной массой полимера понимают ее среднее статистическое значение. Молекулярная масса полимера может достигать значения несколько миллионов.

Степень полимеризации является важной характеристикой полимеров - она равна числу элементарных звеньев в молекуле. Например, структурную формулу поливинилхлорида можно записать в компактном виде



где **n** - степень полимеризации. Полимеры с низкой степенью полимеризации называют **олигомерами**.

Полимеризацией называют реакцию образования полимера из молекул мономера без выделения низкомолекулярных побочных продуктов. При этой реакции в мономере и элементарном звене полимера соблюдается одинаковый элементный состав. Примером реакции является полимеризация этилена:



Поликонденсация - реакция образования полимера из мономеров с одновременным образованием побочных низкомолекулярных продуктов реакции (воды, спирта и др.). Элементный состав мономерной молекулы отличается от элементного состава полимерной молекулы. Реакция поликонденсации лежит в основе получения важнейших высокополимеров, таких как фенолформальдегидные, полиэфирные смолы и др. Термином **смола** в промышленности иногда пользуются наряду с названием **полимер**.

Полимеры делят на два типа - **линейные** и **пространственные** в зависимости от пространственной структуры макромолекул. В линейных полимерах макромолекулы состоят из последовательности повторяющихся звеньев с большим отношением длины молекулы к ее поперечному размеру. Макромолекулы пространственных полимеров связаны в общую сетку.

Термопластические полимеры (термопласты) получают на основе полимеров с линейной структурой макромолекул. При нагревании они размягчаются, а при охлаждении затвердевают. При этом процессе не происходит никаких химических изменений. Для электрической изоляции применяются в основном в форме нитей или пленок, получаемых из расплавов. Способность к формированию и к растворению в подходящих по составу растворителях сохраняется у них и при повторных нагревах.

Термореактивные полимеры получают из полимеров, которые при нагревании или при комнатной температуре вследствие образования пространственной сетки из макромолекул (отверждения) переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Этот процесс является необратимым.

Электрические свойства полимеров. Для неполярных, очищенных от примесей полимеров, полученных **полимеризацией** (полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен и др.) характерны большие значения ρ_v (10^{14} - 10^{16} Ом·м), малый $\text{tg } \delta$ (порядка 10^{-4}), малое значение ϵ (2.0 - 2.4).

Полярные полимеры имеют более низкие значения ρ_V , большие значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$.

Относительная диэлектрическая проницаемость слабополярных полимеров составляет обычно 2.8 - 4.0; для полярных в зависимости от строения полимера она меняется от 4 до 20. Влияние строения полимера на ϵ в основном определяется значением дипольного момента отдельного звена макромолекулы и числом полярных групп в единице объема.

ϵ значительно возрастает при увеличении в полимере содержания воды. Увеличение степени кристалличности также приводит к увеличению ϵ . Так, у аморфного полистирола ϵ составляет 2.49 - 2.55, у кристаллического - 2.61.

Для применения полимеров в кабельной технике предпочтительнее материалы с малой ϵ (неполярные и слабополярные полимеры), в конденсаторостроении - с повышенными значениями ϵ . При высоких частотах используются такие полимеры как полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен, в которых мала ϵ и диэлектрические потери. В низкочастотных конденсаторах или при постоянном токе, можно применять полимеры с повышенными значениями ϵ в стеклообразном состоянии.

Значения $\operatorname{tg} \delta$ зависят от химического строения, структуры полимера. Низкомолекулярные примеси и, в частности, влага, включения пузырей воздуха, пыль, частицы низко- и высокомолекулярных веществ могут привести к появлению дополнительных максимумов в температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$. Значения $\operatorname{tg} \delta$ для неполярных полимеров лежат в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} . Вблизи и выше T_c - температуры стеклования возможен рост $\operatorname{tg} \delta$ при повышении температуры, что обусловлено повышением ионной проводимости полимера. Значения $\operatorname{tg} \delta$ полярных полимеров в сильной степени зависят от частоты и температуры, что ограничивает их применение при высоких частотах.

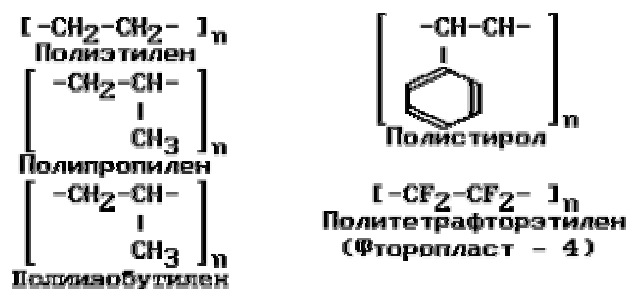
Электрическая прочность $E_{пр}$ с повышением температуры резко снижается в области T_c для аморфных и $T_{пл}$ для кристаллических полимеров. Полярные полимеры имеют более высокую $E_{пр}$, чем неполярные в области комнатных и низких температур.

Нагревостойкость полимерных материалов. Длительная рабочая температура линейных полимеров за исключением фторсодержащих полифенилов не превышает 120°C , особенно нагревостойкость кремнийорганических и некоторых элементоорганических полимеров, длительная рабочая температура которых достигает $180 - 200^\circ\text{C}$.

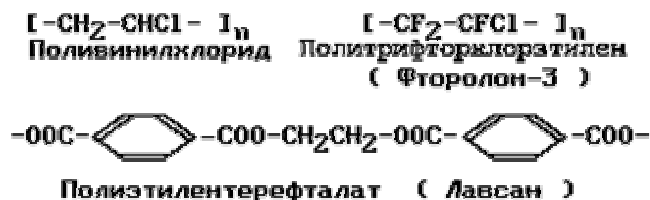
Природные полимеры - целлюлоза, шеллак, лигнин, латекс, протеин и **искусственные**, получаемые путем переработки природных - натуральный каучук, целлюлоза и др. сыграли большую роль в современной технике. Однако для производства и потребления диэлектрических материалов в настоящее время наибольшее значение имеют **синтетические полимеры**.

Синтетические полимеры

Линейные неполярные полимеры. К неполярным полимерам с малыми диэлектрическими потерями относятся полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен, получаемые полимеризацией. Мономерные звенья макромолекул этих полимеров не обладают дипольным моментом. Эти полимеры имеют наибольшее техническое значение из материалов, получаемых полимеризацией.



Линейные полярные полимеры. По сравнению с неполярными полимерами материалы этой группы обладают большими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 3 - 6$) и повышенными диэлектрическими потерями ($\text{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$ на частоте 1 МГц). Такие свойства обуславливаются асимметричностью строения элементарных звеньев макромолекул, благодаря



чему в этих материалах возникает дипольно-релаксационная поляризация.

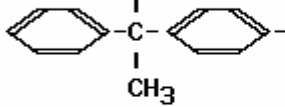
Удельное поверхностное сопротивление этих материалов сильно зависит от влажности окружающей среды. К числу этих полимеров относятся **поливинилхлорид**, фторолон-3 (политрифторхлорэтилен), полиамидные смолы. Для электротехнических целей эти полимеры применяются в основном как изоляционные и конструкционные в диапазоне низких частот.

Полимеры, получаемые поликонденсацией. В зависимости от особенностей проведения реакции поликонденсации могут быть получены полимеры как с линейной, так и с пространственной или сетчатой структурой молекул. В связи с тем, что при поликонденсации происходит выделение низкомолекулярных побочных продуктов, которые не всегда могут быть полностью удалены из полимера, диэлектрические параметры поликонденсационных полимеров несколько ниже, чем у получаемых с помощью полимеризации. Однако поликонденсационные полимеры могут быть получены с рядом ценных свойств, обуславливающих их широкое применение для мате-

$$\text{CH}_2\text{-CHCH}_2\text{-[-ORCH}_2\text{CH-CH}_2\text{-]}_n\text{-ORCH}_2\text{CH-CH}_2$$

$$\begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array} \qquad \begin{array}{c} | \\ \text{OH} \end{array} \qquad \begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array}$$

$$\text{CH}_2\text{-CH-} \begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array} \text{ эпоксигруппа,}$$

где R = 

Эпоксидная диановая смола

$$\dots - \begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{Si} \\ | \\ \text{R} \end{array} - \text{O} - \begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{Si} \\ | \\ \text{R} \end{array} - \text{O} - \begin{array}{c} \text{R} \\ | \\ \text{Si} \\ | \\ \text{R} \end{array} - \text{O} - \dots$$

где R – органические радикалы
 (CH₃, C₂H₅, C₆H₅, и др)

Линейный кремнийорганический полимер

$$\dots - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{CH}_2 \end{array} - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{CH}_2 \end{array} - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array} - \dots$$

$$\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{OH} \end{array} - \text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ | \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$$

Фенолформальдегидная смола

Фенолформальдегидная смола (резол), молекулы которой при нагревании легко переходят в пространственное строение благодаря наличию релаксационноспособных групп (-CH₂ОН-)

В таблице приведены основные показатели некоторых упомянутых полимеров.

Диэлектрические параметры	Полиэтилен	Фторопласт-4	Поливинилхлорид	Эпоксидные смолы
ρ_V , Ом·м	10^{15}	$10^{15} - 10^{18}$	$10^{11} - 10^{13}$	$10^{12} - 10^{13}$
ϵ , 1МГц	2.2 - 2.4	1.9 - 2.2	3.1 - 3.4	3.9 - 4.2
$tg\delta$, 1МГц	$(2 - 4) \cdot 10^{-4}$	$(2 - 2.5) \cdot 10^{-4}$	0.015 - 0.018	-
$E_{пр}$, МВ/м	45 - 55	25 - 27	35 - 45	20 - 80
$T_{раб}$, °С	90	260	90	120 - 140

Пластмассы и пленочные материалы

Пластмассы находят применение в электротехнике как в качестве электроизоляционных, так и в качестве конструкционных материалов. По составу в большинстве случаев пластмассы представляют собой композиции из **связующего** и **наполнителя**. Кроме связующих и наполнителя применяют **пластификаторы** для улучшения технологических и эксплуатационных свойств пластмасс. В некоторые пластмассы вводятся **стабилизаторы** - химические соединения, способствующие длительному сохранению свойств пластмасс и повышению стойкости пластмасс к воздействию тепла, света, кислорода воздуха. По способности к формованию полимерные материалы подразделяются на две группы - **термопласты (термопластичные)** и **реактопласты (термореактивные)**.

Широкое применение в электрических машинах, аппаратах, трансформаторах, приборах получили **слоистые пластики**, преимущественно электроизоляционного назначения. К слоистым пластикам относятся **гетинакс** и **текстолит** с разными наполнителями и **древеснослоистые пластики**.

Гетинакс получается путем горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивной смолой. Гетинакс выпускается нескольких марок - фольгированный с одной и с двух сторон.

Текстолит аналогичен гетинаксу, но изготавливается из пропитанной ткани. Текстолит, изготовленный на основе ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой может работать в интервале температур от **-60** до **+105°С**.

Электроизоляционные органические полимерные пленки - тонкие и гибкие материалы нашли широкое применение в производстве конденсаторов, электрических машин, аппаратов и кабельных изделий. Органические полимерные пленки могут быть разделены на две большие группы, разде-

ляющиеся по электрофизическим свойствам: неполярные и полярные пленки. Марки наиболее важных электроизоляционных пленок приведены в таблице.

Неполярные пленки	Полярные пленки
Полиэтиленовая (ПЭ)	Поливинилхлоридная (ПВХ)
Полипропиленовая (ПП)	Полиамидная
Политетрафторэтиленовая (ПТФЭ)	Полиэтилентерефталатная

Стекло и керамика

Стеклообразное состояние является основной разновидностью **аморфного** состояния вещества. Стеклами называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания. По химическому составу имеющие практическое значение стекла делятся на три основных типа:

оксидные - на основе оксидов (SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3);

галогенидные - на основе галогенидов, главным образом BeF_2 (фторберилятные стекла) и

халькогенидные - на основе сульфидов, селенидов и теллуридов.

Наиболее широко применяются оксидные стекла.

Электрические свойства стекла в сильной степени зависят от их состава. Большинство стекол характеризуются ионной проводимостью. Наиболее сильно понижает электропроводность стекол SiO_2 и B_2O_3 . Наименьшую электропроводность имеет кварцевое стекло, а наибольшую - высокощелочные. Обычно стекла более химически устойчивые имеют меньшую электропроводность. ρ_V стекол при невысоких температурах колеблется в пределах от 10^8 до 10^{15} Ом·м.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из потерь проводимости и потерь релаксационных и структурных. $\text{tg}\delta$ стекол увеличивается с ростом содержания щелочных оксидов при малом содержании оксидов тяжелых металлов. Стекла с большим содержанием оксидов PbO и BaO имеют низкий $\text{tg}\delta$

Самую низкую  имеет кварцевое стекло (3.7 - 2.8) и стеклообразный борный ангидрид (3.1 - 3.2), у которых наблюдается преимущественно электронная поляризация. При наличии в составе стекол оксидов металлов свинца и бария, обладающих высокой поляризуемостью,  стекло увеличивается и становится высокой (порядка 20).

В переменном электрическом поле электрическая прочность стекол составляет 17 - 80 МВ/м.

Электротехническая керамика представляет собой материал, получаемый в результате отжига формовочной массы заданного химического состава из минералов и оксидов металлов.

Широкое применение в качестве электроизоляционного материала находит **электротехнический фарфор**, который является основным керамическим материалом, используемым в производстве широкого ассортимента низковольтных и высоковольтных изоляторов и других изоляционных элементов с рабочим напряжением до **1150 кВ** переменного и до **1500 кВ** постоянного тока. Электротехнический фарфор, как и любая другая керамика, состоит из кристаллической, аморфной и газовой фаз.

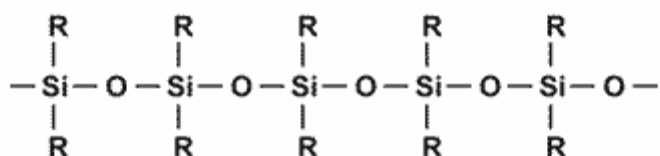
Его свойства определяются химическим и фазовым составом, микро и макроструктурой и технологией изготовления. Основными компонентами фарфора являются сырьевые вещества: **каолин** и **глина**, **кварц**, **полевой шпат**, **гипс**, **пегматит**. Электроизоляционные свойства фарфора при нормальной температуре удовлетворительные для использования его при низких частотах: $\epsilon = 6 - 7$, $tg\delta$ около **0.02**. $tg\delta$ электротехнического фарфора, однако быстро растет при увеличении температуры, что затрудняет применение его при высоких температурах и на высоких частотах.

Для применения в радиотехнической и электронной промышленности было разработано большое количество керамических материалов, обладающих повышенными свойствами по сравнению с фарфором.

Конденсаторная керамика имеет повышенные ($\epsilon = 10 - 230$) и высокие значения ($\epsilon = 900$). В первом случае керамика относится к высокочастотным диэлектрикам, ее $tg\delta$ на частоте **1 МГц** не должен превышать **0.0006**, во втором случае керамика низкочастотная - на частоте **1 кГц** $tg\delta = 0.002 - 0.025$. К конденсаторной керамике обычно предъявляются требования возможно меньшего значения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости. Многие из этих материалов имеют в своем составе двуокись **титана - рутил (TiO_2)**. Среди них можно выделить керамику на основе **титаната кальция** и **титаната стронция** - **$CaTiO_3$** и **$SrTiO_3$** .

СИЛИКОНОВАЯ РЕЗИНА – это эластичный материал, получаемый на базе высокомолекулярных кремнийорганических соединений и по внешнему виду напоминающий синтетическую или обычную натуральную резину. Однако вследствие своей особой химической структуры она отличается целым рядом свойств, которые позволяют ей занять особое место среди резиновых эластичных материалов.

Основная структура силиконовой резины, в отличие от обычных видов резины, – это цепи из атомов кремния и кислорода с редкими поперечными сшивками. Этим обстоятельством обуславливается присущий ей в некоторой степени неорганический характер.



Фрагмент молекулы силиконового каучука

Остальные связи кремния заняты органическими радикалами (R), в первую очередь метильными, чем объясняется сходство с обычными сортами резины.

Силиконовая резина сохраняет свои свойства практически неограниченное время при температурах от -50°C до $+180^{\circ}\text{C}$.

Как и у всех силиконов, большинство свойств силиконовой резины зависят от температуры в меньшей степени, чем у органических материалов. Благодаря этому силиконовую резину можно с успехом использовать при более высоких и более низких температурах. К таким свойствам относятся, например, сохранение формы, эластичность, упругость, прочность, жёсткость и предельное удлинение. Среди электрических характеристик, которые также в меньшей степени зависят от температуры, следует назвать пробивную прочность, диэлектрические показатели, объёмное сопротивление.

Силиконовая резина при комнатной температуре обладает отличными изоляционными свойствами. Как уже отмечалось, эти свойства зависят от температуры лишь в малой степени. Поэтому силиконовая резина при температурах выше $+100^{\circ}\text{C}$ превышает по своим изоляционным показателям все традиционные эластомеры.

При сгорании изоляции из силиконовой резины остаётся непроводящий слой SiO_2 , благодаря чему обеспечивается более высокая защита электрических приборов и установок при нежелательных перегрузках.

Основные электрические характеристики	
Диэлектрическая прочность	18-20 кВ/мм
Объёмное сопротивление	$10 \cdot 10^{14}$ Ом*см
Диэлектрическая проницаемость (25°C , 50 Гц)	2,7 - 3,3

4. Композиционные материалы

Композиционные материалы - материалы, состоящие из нескольких компонент, выполняющих разные функции, причем между компонентами существуют границы раздела.

Сочетание двух или более материалов позволяет использовать сильные стороны каждого из материалов. При этом свойства композита, далеко не всегда являются промежуточными между свойствами компонентов. В ряде случаев улучшаются характеристики, либо появляется материал с принципиально новыми характеристиками.

Например, стеклопластик. Он состоит из волокон стекловолокна, пропитанных полимером, обычно эпоксидным полимером. Основное достоинство этого материала - высокая механическая прочность. Прочность эпоксидного компаунда недостаточно велика, этот материал достаточно хрупок. Прочность стеклянного волокна - значительна, но у него хрупкость также значительна. После пропитки волокон и последующей полимеризации прочность стеклопластикового стержня на разрыв не уступает прочности волокон, тогда как хрупкость у стержней в принципе отсутствует.

Основными характеристиками материалов являются электропроводность или обратная величина - сопротивление, плотность, механическая прочность при различных нагрузках, теплоемкость, теплопроводность. Для диэлектрических материалов наиболее важны удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электрическая прочность.

Здесь нужно ввести еще два понятия о структуре. Существуют две принципиально различные структуры: матричная и взаимопроникающая.

Структура является матричной, если по одному из компонентов можно попасть в любую точку этого компонента, не пересекая границ раздела компонент.

Такая компонента называется дисперсионной фазой, или матрицей композиции. Компонента, частички которой окружены дисперсионной компонентой называется дисперсной фазой, или наполнителем.

Например, частички сажи в полиэтилене. Полиэтилен является матрицей, частички сажи - наполнителем. Другой пример - молоко. Вода является дисперсионной средой, микрокапельки жира в ней - дисперсной фазой.

Структура называется взаимопроникающей, если не выполняется условие матричности и геометрические характеристики обоих компонентов (форма частиц) одинаковы.

Например, материал, приготовленный методами порошковой металлургии, когда смешивают два, или несколько разных порошков и полученную смесь прессуют.

Литература

Основы теории цепей: Учеб. для вузов /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. –5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528с.

Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. –7-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 1978. –528с.

Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов.-7-е изд., Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. –304 с.,ил.

Коробейников С.М. Диэлектрические материалы: Учебное пособие, Новосибирск, НГТУ, 2000, 67 с.