

Материалы электронной техники

к.т.н., доц. Марончук И.И.

Тема 3

Диэлектрики

Лекция 6

Диэлектрические материалы.

Содержание лекции

- **Классификация диэлектриков**
- **Неорганические диэлектрические материалы. Стекла**
- **Неорганические диэлектрические материалы. Керамика**
- **Органические диэлектрические материалы**
- **Активные диэлектрики**

Классификация диэлектриков.

По области применения (т.е. по функциям, выполняемым в аппаратуре и приборах) все диэлектрические материалы можно разделить на **электроизоляционные** и **конденсаторные**. Первые используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Вторые применяются для создания определенного значения электрической емкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определенного вида зависимости этой емкости от температуры и других факторов.

По возможности управления электрическими свойствами диэлектрические материалы разделяют на **пассивные** (с постоянными свойствами) и **активные**, свойствами которых можно управлять (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты и др.).

По химической природе все диэлектрики делятся на **органические** и **неорганические**. Под органическими веществами подразумеваются соединения углерода; обычно они содержат также водород, кислород, азот, галогены или иные элементы. Прочие вещества считаются неорганическими; многие из них содержат кремний, алюминий и другие металлы, кислород и т.п. Количество диэлектрических материалов исчисляется многими тысячами. Поэтому здесь будут даны лишь общие представления об особенностях строения и свойств основных классов диэлектриков.

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К этому классу диэлектрических материалов относят стекла, керамику и ситаллы.

Неорганические стекла

Неорганические стекла – квазиаморфные твердые вещества, в которых при наличии ближнего порядка отсутствует дальний порядок в расположении частиц. По химическому составу неорганические стекла подразделяют на элементарные, халькогенидные и оксидные. Свойства диэлектриков проявляют лишь оксидные стекла – твердые некристаллические материалы, получаемые переохлаждением расплава стеклообразующих компонентов (оксидов кремния, бора, алюминия, фосфора, титана, циркония и др.). Процесс перехода такой системы из жидкого состояния в стеклообразное является обратимым. Стеклообразное состояние менее устойчиво, чем кристаллическое, характеризуется избыточной внутренней энергией системы, что делает возможным ее самопроизвольный переход в кристаллическое состояние.

Технология изготовления стекла.

Сырьевые материалы измельчают, смешивают и загружают в стекловарочную печь. В результате образуется однородная стекломасса, которая идет на выработку листового стекла или стеклянных изделий. Формовку изделий из стекла осуществляют путем выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, отливки и т. п. Необходимо отметить, что стеклообразное состояние материала получается лишь при быстром охлаждении стекломассы. В случае медленного охлаждения начинается частичная кристаллизация, и стекло теряет прозрачность из-за нарушения однородности.

В зависимости от исходного сырья различают следующие виды оксидных стекол: **силикатное** (на основе двуокиси кремния), **алюмосиликатное** (окись алюминия и двуокись кремния), **боросиликатное** (борный ангидрид и двуокись кремния), **алюмоборосиликатное**, **алюмофосфатное** и др.

Введение в состав шихты оксидов металлов, щелочей и некоторых других веществ придает стеклам специальные свойства.

Наиболее широко в технике применяют силикатное стекло (**основной компонент - диоксид кремния SiO_2**) благодаря его высокой химической стойкости, а также дешевизне и доступности сырьевых компонентов. Чистый диоксид кремния в стеклообразном состоянии (кварцевое стекло) по структуре отличается от кристаллического кварца SiO_2

В кристаллическом кварце валентные связи Si-O образуют регулярный каркас из правильных тетраэдров, в котором каждый атом кремния и кислорода имеет идентичное окружение. В кварцевом стекле каждый атом кремния тоже окружен четырьмя атомами кислорода, и каждый атом кислорода связан с двумя атомами кремния, но в отличие от кристаллического кварца, угол между валентными связями Si-O не везде одинаков.

В каркасах алюмосиликатного или боросиликатного стекла атомы кремния частично заменены атомами алюминия или бора. Широко распространены многокомпонентные силикатные стекла системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ с добавлением Al_2O_3 и MgO . Технология их получения включает составление шихты, варку ее в печах, формование изделий, термическую или химическую обработку. Кварцевое стекло получают плавлением природного или синтетического кварца.

Техническое стекло имеет в основном алюмоборосиликатную стеклообразующую основу ($Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$), модифицированную оксидами металлов, добавки которых облегчают технологию производства стекла и изменяют его физико-механические характеристики. Многокомпонентный состав технических стекол обуславливает разнообразие их свойств и структурную неоднородность, поскольку расплав при охлаждении расслаивается на несколько фаз, затвердевающих в аморфном состоянии. Расстекловывание предупреждают правильным подбором компонентов стекла. Структурную неоднородность стекла частично устраняют прогревом, одновременно снижающим усадочные напряжения.

По химическому составу силикатные стекла разделяют на три группы:

- **Бесщелочные стекла** (отсутствуют окислы натрия и калия). В эту группу входит чисто кварцевое стекло. Стекла данной группы обладают высокой нагревостойкостью, высокими электрическими свойствами, но из них трудно изготавливать изделия, особенно сложной конфигурации и с малыми допусками по размерам.

- **Щелочные стекла без тяжелых окислов или с незначительным их содержанием**, подразделяется на : натриевые, калиевые и калиево-натриевые.

В эту группу входит большинство обычных стекол. Они легко обрабатываются при нагреве, но имеют пониженные электрические свойства и невысокую нагревостойкость.

- **Щелочные стекла с высоким содержанием тяжелых окислов** (например, силикатно-свинцовые и бариевые). Эти стекла, обладая удовлетворительной обрабатываемостью, имеют повышенные электрические свойства, приближающиеся при нормальной температуре к электрическим свойствам стекол первой группы.

По техническому назначению стекла подразделяют на:

- **Электровакuumные стекла.** Используются при изготовлении электронных ламп, электронно-лучевых и рентгеновских трубок, фотомножителей, счетчиков частиц, ламп накаливания, газоразрядных и галогенных ламп, импульсных источников света и т.д. Электровакuumные стекла должны иметь высокие диэлектрические характеристики и во избежание растрескивания спаев согласованный с металлами (или стеклами) коэффициент теплового расширения. Относятся к группе боросиликатных или алюмосиликатных стекол с добавками щелочных окислов.
- **Изоляторные стекла.** Стекла легко металлизуются и используются в качестве герметизированных вводов в металлические корпуса различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов и др.). Другим элементом изоляции, часто встречающимся в дискретных полупроводниковых приборах, являются стеклянные бусы, изолирующие металлические выводы прибора от фланца корпуса, на котором располагается полупроводниковый кристалл с p-n-переходами. Обычно в качестве материала для таких изоляторов используют щелочное силикатное стекло.

• **Цветные стекла.** Добавление некоторых веществ в стекломассу придает силикатным стеклам соответствующую окраску: CaO – синюю, Cr_2O_3 – зеленую, MnO_2 – фиолетовую и коричневую, UO_3 – желтую, Na_2SeO_3 – розовую, что используется при изготовлении светофильтров, эмалей и глазурей.

• **Лазерные стекла.** Используются в качестве рабочего тела в твердотельных лазерах. Активными примесями в них чаще всего служат ионы неодима (Nd^{3+}), концентрация которого может достигать 6 %.

Достоинством таких стекол, кроме высокой концентрации активных частиц, является возможность изготовления активных элементов больших размеров (длиной до 1,8 м и диаметром до 70 мм) практически любой формы с очень высокой оптической однородностью. Недостатки – невысокая монохроматичность выходного излучения и низкая теплопроводность.

Свойства стекол

Механические свойства.

Свойства стекол как некристаллических материалов изотропны. Плотность их изменяется в пределах $2200 \div 6500 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от состава, микротвердость - $4 \div 10 \text{ ГПа}$, модуль упругости - $40 \div 120 \text{ ГПа}$, прочность при сжатии - до 2 ГПа , при растяжении - до 90 МПа , при изгибе - до 120 МПа . Стекло является хрупким материалом, его ударная вязкость низка. Нагревание стекла до температуры размягчения и резкое охлаждение (этот технологический прием называют закалкой стекла) также увеличивает прочность, но при этом увеличивается и хрупкость. Закаленное стекло нельзя резать или сверлить. Прочность стекла повышают химико-термической обработкой. Шлифование и полирование стекла увеличивает его прочность в несколько раз. Для уменьшения шероховатости стекла широко используют огневую полировку (оплавление).

Тепловые свойства оксидных стекол. Как аморфные вещества стекла не имеют резко выраженную температуру плавления. **Нагрев стекол сопровождается изменением их вязкости:** в твердом состоянии динамическая вязкость составляет 10^{18} Па*с, в начале размягчения - 10^{12} Па*с, в расплаве - 10^1 - 10^2 Па*с. Переход стекла из твердого состояния в расплав происходит в температурном интервале, границы которого характеризуются **температурой стеклования** (400 - 600 °С) и **размягчения** (600 - 1000 °С). В этом интервале стекло находится в высоковязком пластическом состоянии. **За температуру размягчения** стекла принимается температура, при которой вязкость его составляет 10^7 - 10^8 Па*с. Наибольшая температура размягчения у кварцевого стекла, которое на 100 % состоит из SiO_2 . Добавки к SiO_2 щелочных оксидов понижают температуру размягчения. Переработку стекла осуществляют при температурах 1000 - 1100 °С, превышающих температуру его размягчения.

Важной характеристикой стекол является **термостойкость** - способность хрупких материалов противостоять, не разрушаясь, термическим напряжениям. **Термостойкость оценивают величиной наибольшего температурного градиента, при котором стекло не разрушается в результате резкого охлаждения.** Эта характеристика связана с температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) стекла. Чем больше значение этого коэффициента, тем выше сжимающие напряжения в стекле, возникающие при его охлаждении. Коэффициент линейного расширения стекол α лежит в пределах от $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (кварцевое стекло) до $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. ТКЛР играет большую роль в оценке стойкости стекол к резким сменам температуры (термоударам). Он имеет значение при пайке и сварке друг с другом различных стекол, при нанесении стеклоэмали на поверхность. Коэффициенты линейного расширения паяемых и свариваемых материалов должны быть приблизительно одинаковыми. Название стекол "вольфрамовые", "молибденовые", объясняются не их составом, а тем, что α этих стекол близки к α вольфрама и молибдена.

Повысить прочность и термостойкость стеклянных изделий можно путем термической и химической обработки. В частности, термическое упрочнение (закалка) при температуре $540\div 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ с быстрым и равномерным охлаждением в потоке воздуха или в масле приводит к выравниванию усадочных напряжений в стекле, росту его прочности (в $3\div 6$ раз) и ударной вязкости ($5\div 7$ раз). **Материал, полученный склеиванием двух стеклянных листов с помощью прозрачной полимерной пленки, называется триплекс. При его разрушении образовавшиеся осколки удерживаются на полимерной пленке и не рассыпаются.**

Химические методы упрочнения (травление, ионный обмен) обеспечивают дополнительное повышение прочности стекла. Еще более высокую прочность и термостабильность имеют термохимически упрочненные стекла. Термохимическое упрочнение производят быстрым охлаждением стеклянного изделия, нагретого выше температуры стеклования, в подогретых кремнийорганических жидкостях. Дополнительное упрочнение обусловлено образованием на поверхности изделия полимерных пленок.

Оптические свойства стекол характеризуются светопропусканием, показателем преломления n и дисперсией k . Показатель преломления n стекол колеблется от 1,47 до 1,96. Обычные стекла прозрачны для лучей видимой части спектра. Добавки придают стеклам окраску. Большинство технических стекол из-за содержания в них примеси оксидов железа, сильно поглощают ультрафиолетовые лучи. **Увиолетовые** стекла, содержащие Fe_2O_3 менее 0,02%, обладают прозрачностью для ультрафиолета. Хорошо пропускает УФ лучи кварцевое стекло, которое используют в специальных "кварцевых" лампах. Стекла, в состав которых входят элементы с малой атомной массой, прозрачны для рентгеновских лучей. Стекло состава (83% B_2O_3 - 2,5% BeO - 14,5% Li_2O) применяют для окошек в рентгеновских трубках. Хрустали поглощают рентгеновские лучи. Нанесение на стекло тонких (0,3 - 1 мкм) пленок металлов или оксидов способствует повышению отражающих свойств стекол в видимом и инфракрасном диапазонах. Введение в стекломассу галогенидов серебра обеспечивает **фототропный эффект** - изменение прозрачности и окрашенности стекла в зависимости от интенсивности падающего света.

Гидролитическая стойкость стекол, или стойкость к действию влаги, оценивается массой составных частей стекла, переходящей в раствор с единичной поверхности стекла при длительном соприкосновении его с водой.

Растворимость стекла увеличивается с ростом температуры. Наивысшей гидролитической стойкостью обладают кварцевые стекла. Это свойство ухудшается при введении щелочных оксидов. Стекла состава $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$ с силикатными модулями m от 1,5 до 2,4 являются растворимыми стеклами. При повышенном давлении и температуре они растворяются в воде, образуя клейкие растворы щелочной реакции. Такой раствор концентрации 30÷50 % с плотностью 1,27–1,95 г/см³ называется **жидким стеклом**. Силикатные стекла стойки к действию кислот за исключением плавиковой (HF), но мало стойки к щелочам. Специальные типы стекол с высоким содержанием B_2O_3 и Al_2O_3 стойки к парам натрия, что важно для некоторых электроосветительных приборов.

Электрические свойства стекол сильно зависят от состава. При нормальной температуре для различных технических стекол удельное сопротивление $\rho = 10^6 \div 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,8 \div 16,2$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4} \div 0,01$. Удельное сопротивление уменьшается с введением в стекло оксидов щелочных металлов с наличием ионов Na или K. Электрическая прочность стекол при электрическом пробое мало зависит от их состава. Решающее влияние на $E_{пр}$ оказывают воздушные включения - пузырьки в толще стекла.

Стекланные волоконные оптические элементы

Для передачи света между источником и приемником излучения используют тонкие стекланные волокна.

Стекловолокно - волокно из тонких стекланных нитей. Его получают из расплавленной стекломассы методом вытяжки через фильеру с последующей быстрой намоткой на бобину. В такой форме стекло не бьется и не ломается, легко гнется без разрушения. Это позволяет ткать из него стеклоткань, изготавливать гибкие световоды и т.д. Основными достоинствами стекловолокна являются высокая механическая прочность, высокая термостойкость, негорючесть, малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Для производства стекловолокна используют щелочные алюмосиликатные, бесщелочные и малощелочные алюмоборосиликатные стекла.

Совокупность методов и средств передачи световой информации с помощью тончайших волокон получила название **волоконной оптики**, которая является важной составной частью оптоэлектроники.

Волоконные устройства имеют ряд преимуществ перед линзовыми, отличаются компактностью и надежностью. С их помощью можно осуществить поэлементную передачу изображения с высокой разрешающей способностью, высокой помехозащищенностью оптического канала связи. Направляющее действие волокон достигается за счет эффекта полного многократного внутреннего отражения.

Волоконно-оптический элемент (ВОЭ) представляет собой световедущую жилу с высоким показателем преломления, окруженную светоизолирующей оболочкой с низким показателем преломления, диаметр световедущего сердечника ($2\div 100$ мкм) в несколько раз превышает длину волны проходящего света. Основными количественными характеристиками световодов, определяющими возможность и эффективность их применения, являются **затухание** (потери энергии, коэффициент светопропускания) и **ширина полосы пропускания**.

К материалам для волоконных световодов предъявляются следующие требования: **наибольшая прозрачность для излучения в требуемом диапазоне длин волн; высокая стабильность структуры и свойств с течением времени; высокая стойкость к влиянию внешних дестабилизирующих воздействий.**

Волоконные световоды изготавливают главным образом из **кварцевого стекла, многокомпонентных силикатных стекол и из некоторых полимеров.**

Перспективными материалами для волоконных световодов, предназначенных для использования в системах и линиях оптической связи, являются **галогидные, халькогенидные и некоторые оксидные стекла, а также кристаллические соединения типа хлоридов, бромидов и иодидов.**

Керамика.

Керамика – большая группа диэлектриков с различными свойствами, объединенная общностью технологического цикла. Технологические схемы керамического производства включают в себя следующие операции.

1. Измельчение и смешивание исходных компонентов. Эта операция производится в шаровых и вибрационных мельницах. В качестве мелющих тел используют керамические или стальные шары различного диаметра. Мельницы бывают как сухого, так и мокрого измельчения. Более тонкое измельчение достигается в водной среде.

2. Пластификация массы и образование формовочного полуфабриката. Полученная в мельнице смесь пластифицируется органическим пластификатором. Пластификаторы подразделяют на **водорастворимые** и **расплавляемые**. Наиболее часто используют поливиниловый спирт и парафин.

3. Формование заготовок. Формование осуществляют методом прессования, протяжкой через мундштук или горячим литьем под давлением. Крупногабаритные изделия сложной формы формуют путем литья жидкой керамической массы в гипсовые формы.

4. Спекание. Спекание изделий производят в туннельных электрических печах при температуре 1300 °С и выше. При спекании происходит выжигание пластификатора, завершаются химические реакции между компонентами. За счет слияния частиц фиксируется форма изделия, материал приобретает необходимую механическую прочность и заданные физические и электрические свойства.

В процессе обжига вследствие испарения влаги, выгорания пластификатора и уплотнения материала происходит усадка изделий. Усадка изменяется в широких пределах и может достигать 20%. Заранее оценить усадку довольно трудно, поэтому допуски на размеры керамических изделий, велики (до 5% от линейного размера).

Классификация керамики

По техническому назначению керамику подразделяют на **установочную** и **конденсаторную**.

К **установочной керамике** относят материалы, из которых изготавливают **основания конденсаторов, разнообразные изоляторы, планки, панели, каркасы катушек, корпуса резисторов, подложки интегральных микросхем**. Она должна иметь низкие потери, хорошие электроизоляционные свойства и прочность.

- **Изоляторный фарфор** - низкочастотная установочная керамика, изготавливается из специальных сортов глины, кварцевого песка и полевого шпата. Обладает низкой пористостью и высокой плотностью, водонепроницаемостью, довольно высокой электрической и механической прочностью. На высоких частотах использование затруднено из-за высоких диэлектрических потерь.

- **Радиофарфор** занимает промежуточное положение между высокочастотными и низкочастотными диэлектриками. Улучшение свойств обусловлено вводом в состав исходной смеси окиси бария, резко снижающей диэлектрические потери.
- **Ультрафарфор** - высокочастотная керамика, отличается повышенным (> 80 %) содержанием глинозема Al_2O_3 . Сочетает в себе низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью и удовлетворительными технологическими параметрами. Предназначена для изготовления установочных деталей и конденсаторов, к которым предъявляются повышенные требования.

- **Алюминоксид** (корундовая керамика) – высокочастотная керамика, на 90÷95% состоит из глинозема. Сочетает низкие диэлектрические потери на радиочастотах, высокую нагревостойкость (до 1600°С), большую механическую прочность и хорошую теплопроводность (в 10÷20 раз больше, чем у изоляторного фарфора). Высокая абразивность алюминоксида затрудняет его механическую обработку. Используется в качестве вакуумплотных изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и для изготовления подложек интегральных микросхем.

- **Поликор** – разновидность алюминоксида. Прозрачен, поэтому его применяют для изготовления колб некоторых специальных ламп – источников света. Обладает высокой плотностью, поликор является ценным материалом подложек для осаждения пассивных элементов гибридных интегральных схем.

- **Брокерит** - высокочастотная керамика на основе оксида бериллия (95÷99 % BeO). Обладает самой высокой теплопроводностью [200÷250 Вт/(м*К)] среди неметаллических материалов. Имеет высокие диэлектрические параметры: $\rho = 10^{16}$ Ом*м, $\text{tg}\delta \leq 3 \cdot 10^{-4}$. Металлизация изделий из брокерита обеспечивает получение вакуумных спаев керамики с медью и коваром. Помимо подложек для интегральных микросхем ее применяют в особо мощных приборах СВЧ. Недостатком данной керамики является токсичность.

- **Форстеритовая керамика** - керамика на основе ортосиликата магния ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$). Имеет небольшие диэлектрические потери, высокое значение удельного объемного сопротивления и хорошую механическую прочность, характеризуется повышенным коэффициентом линейного расширения, благодаря которому ее применяют в электровакуумной технике как изолятор для согласованного спаивания с металлами.

• **Цельзиановая керамика** состоит из цельзиана ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), BaCO_3 и каолина ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Обладает низким температурным коэффициентом линейного расширения, повышенной электрической прочностью и низкими диэлектрическими потерями. Применяется при изготовлении каркасов высокостабильных индуктивных катушек, изоляторов и высокочастотных конденсаторов большой реактивной мощности. Недостатком цельзиановой керамики является сравнительно небольшая механическая прочность.

• **Стеатитовая керамика** – высокочастотная керамика на основе талька ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Обладает малой абразивностью и незначительной усадкой при обжиге (1÷1,5%), поэтому из нее можно изготавливать мелкие детали с высокой точностью в размерах. Стеатитовую керамику применяют в качестве опорных плат, изолирующих колец, деталей корпусов полупроводниковых приборов.

Конденсаторную керамику используют для производства **высокочастотных** и **низкочастотных конденсаторов** высокого и низкого напряжения.

Основные требования, предъявляемые к этой керамике, – возможно более высокое значение диэлектрической проницаемости. Это позволяет снизить габариты конденсаторов и уменьшить их массу.

- **Тиконды** – специальные керамические материалы, в состав которых входит титан. Это рутил (TiO_2), перовскит ($CaTiO_3$) и титанат стронция ($SrTiO_3$). Используются для изготовления высокочастотных конденсаторов.

- **Термоскомпенсированные тиконды** - к ним относят титано-циркониевую керамику (твердые растворы $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$), лантановую керамику ($\text{LaAlO}_3\text{-CaTiO}_3$) и станнатную керамику ($\text{CaSnO}_3\text{-CaTiO}_3\text{-CaZrO}_3$). Данная группа материалов отличается повышенной температурной стабильностью свойств, которой добиваются за счет снижения диэлектрической проницаемости. Изготавливают высокочастотные термостабильные конденсаторы.
- **Сегнетокерамика** - низкочастотная конденсаторная керамика (BaTiO_3 , твердые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами). Обладает весьма высокой диэлектрической проницаемостью, но не отличается температурной стабильностью. В качестве конденсаторных материалов используют также установочную керамику (ультрафарфор, стеатитовую и цельзиановую керамики).

Ситаллы.

Ситаллы – это стеклокристаллические материалы, получаемые путем почти полной стимулированной кристаллизации стекол специально подобранного состава. Они занимают промежуточное положение между неорганическими стеклами и керамикой, отличаются повышенной механической прочностью, могут иметь как маленький, так и большой коэффициент линейного расширения, высокую теплопроводность и удовлетворительные электрические характеристики.

Причина ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости, почти идеальной поликристаллической структуре. Свойства ситаллов изотропны. В них совершенно отсутствует вязкая пористость. Усадка материала при его переработке незначительна. Большая абразивная стойкость делает ситаллы малочувствительными к поверхностным дефектам.

Плотность ситаллов в пределах $2400 \div 2950 \text{ кг/м}^3$, прочность при изгибе - $70 \div 350 \text{ МПа}$, временное сопротивление - $110 \div 160 \text{ МПа}$, сопротивление сжатию - $7 \div 20 \text{ ГПа}$, модуль упругости - $85 \div 140 \text{ ГПа}$. Прочность зависит от температуры. Твердость их близка к твердости закаленной стали ($HV = 7000 \div 10500 \text{ МПа}$).

Износостойки, обладают низким коэффициентом трения ($f_{тр} = 0,07 \div 0,19$). Коэффициент линейного расширения лежит в пределах $(7 \div 300) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. По теплопроводности превосходят стекла [$0,8 \div 2,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$].

Технология получения ситаллов. Сначала получают изделие из стекломассы теми же способами, что и из обычного стекла. Затем его подвергают двухступенчатой термической обработке при температурах $500 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ и $900 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. На первой ступени происходит образование зародышей кристаллизации, на второй - развитие кристаллических фаз. Содержание кристаллических фаз к окончанию технологического процесса достигает 95%, размеры оптимально развитых кристаллов составляют $0,05 \div 1 \text{ мкм}$. Ситаллы отличаются от стекол тем, что в основном имеют кристаллическое строение, а от керамики - значительно меньшим размером кристаллических зерен.

По техническому назначению ситаллы подразделяют на **установочные** и **конденсаторные**. Установочные ситаллы широко используют в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и дискретных пассивных элементов (например, тонкопленочные резисторы), деталей СВЧ-приборов и некоторых типов электронных ламп. Достоинством ситалловых конденсаторов являются повышенная электрическая прочность по сравнению с керамическими конденсаторами.

ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Классификация полимеров

Полимеры или высокомолекулярные соединения (ВМС)

- вещества, состоящие из макромолекул, т.е. молекулярных цепей, образованных большим количеством атомов, которые соединены химическими связями.

Реакцию образования полимера из мономеров называют **полимеризацией**. В процессе **полимеризации** вещество может переходить из газообразного или жидкого состояния в состояние густой жидкости или твердое.

Полимер и мономер характеризуются одинаковым элементарным составом.

Помимо реакции полимеризации ВМС может быть получено реакцией **поликонденсации**. Эта реакция связана с перегруппировкой атомов полимеров и выделением из сферы реакции воды или других низкомолекулярных веществ.

Полимеры классифицируют:

По происхождению : природные или биополимеры (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды) и синтетические (например, полиэтилен, полиамиды, эпоксидные смолы), получаемые методами полимеризации и поликонденсации.

По расположению составных звеньев в макромолекуле:

- **линейные**, макромолекулы которых представляют собой линейные цепи;
- **разветвленные**, состоящие из линейных макромолекул с ответвлениями, например, в виде гребенок, звезд, случайно разветвленных цепей
- **сетчатые** – полимеры со сложной топологической структурой, макромолекулы которых образуют единую пространственную сетку, в предельном случае весь объем полимера представляет собой одну огромную молекулу.

В зависимости от структуры основной цепи макромолекул различают два больших класса полимеров. **Гомоцепные полимеры** состоят из макромолекул, основная цепь которых построена из одинаковых атомов. В основной цепи гетероцепных полимеров содержатся атомы разных элементов, чаще всего C, N, Si, P. Из гомоцепных полимеров наиболее распространены **карбоцепные**, главные цепи которых образованы атомами углерода. Полимеры, в состав макромолекул которых наряду с углеводородными группами входят атомы небиогенных (биогенные - необходимые для роста живых тканей) элементов, называют **элементарноорганическими**. **Координационные полимеры** содержат атомы металлов (Zn, Mg, Cu), и поэтому в их основной цепи обычные ковалентные связи сочетаются с координационными. Отдельную группу составляют неорганические полимеры, макромолекулы которых построены из неорганических главных цепей и не содержат органических боковых групп.

По технологическому признаку полимеры подразделяют на реактопласты и термопласты.

Реактопласты - полимеры, переработка которых в изделия сопровождается химическими реакциями образования микромолекулярных сеток, вследствие чего полимер необратимо утрачивает способность переходить в вязкотекучее состояние.

Термопласты после переработки в изделия сохраняют способность к многократным переплавкам.

По химическому составу макромолекул полимеры классифицированы советскими химиками А.А. Берлиным и В.В. Коршаком. Схема этой классификации приведена на рис. В пояснении к нему использованы ранее упомянутые термины.

Высокомолекулярные соединения

Органические

Элементарорганические

Неорганические

Карбоцепные

Гетероцепные

- предельные углеводороды
- непредельные углеводороды
- галогенсодержащие полимеры
- полимерные спирты и их производные
- полимерные кислоты и их производные

- полиэфиры
- полиамиды
- полиуретаны
- полиангидриды
- полиацетаты

- кремнийорганические
- титанорганические
- фосфорорганические
- полимеры, содержащие B, Al, Sn, Fe, Co и др. элементы

- гомогенные
- гетерогенные

К **органическим полимерам** относят соединения, молекулы которых содержат атомы углерода, азота, кислорода, серы и галогенов, входящих в состав главной цепи и боковых групп.

В **элементоорганических полимерах** главная молекулярная цепь состоит из атомов углерода и других элементов (за исключением азота, кислорода и серы), а боковые группы включают атомы углерода и другие атомы (за исключением азота, серы, кислорода и галогенов), непосредственно соединенные с атомами цепи.

Неорганические полимеры, как отмечено ранее, это соединения, которые не содержат атомов углерода в составе макромолекул.

Органические полимеры подразделяют на **карбоцепные** и **гетероцепные**. Главная цепь **карбоцепных полимеров** состоит только из атомов углерода. В состав цепи макромолекул **гетероцепных полимеров** входят атомы O, N, S. Названия карбо- и гетероцепных полимеров образованы из названий химических классов мономеров, входящих в состав макромолекул.

Из **элементоорганических полимеров** наибольшее практическое значение имеют те, макромолекулы которых состоят из атомов **кремния** и **углерода**. **Титанорганические полимеры** содержат в составе углеродных макромолекул атомы **титана**, а **фосфорорганические** - атомы **фосфора**. Совокупность других элементоорганических полимеров образуют **борорганические полимеры** и **полимеры, содержащие Al и Sn**, а также **координационные полимеры**, макромолекулах которых находятся Fe, Co, Ni, Cu, Mn и Zn.

Неорганические полимеры состоят из атомов или групп атомов, соединенных между собой непрерывной системой ковалентных, полярных или координационных связей, образующих **трехмерную пространственную** (например, алмаз), **двухмерную слоистую** (нитрид бора) или **одномерную цепную** (пластическая сера) структуру. Их подразделяют на две группы. В первой макромолекулы состоят из **гомоатомных** (т.е. образованных одинаковыми атомами) цепей. Во второй - макромолекулы имеют **гетероатомную** структуру, т.е. представляют собой комбинацию разных атомов.

Среди **гомоатомных полимеров** наибольшее практическое применение получили углерод, кремний, германий, бор, селен. Более распространены в технике материалы на основе **гетероатомных неорганических полимеров** (стекла, ситаллы, керамика и др.).

Между свойствами **линейных** (термопластичные) и **пространственных** (терморезистивные, или реактопласты) полимеров имеются весьма существенные различия.

Линейные полимеры, как правило, гибки и эластичны, многие из них при умеренном повышении температуры размягчаются, а затем расплавляются.

Пространственные полимеры обладают большей жесткостью, размягчение их происходит при весьма высоких температурах, а многие из них при температуре размягчения химически разрушаются – деструктируют (сгорают, обугливаются и т.п.).

Линейные полимеры способны растворяться в растворителях. **Пространственные** - трудно растворимы или вообще не растворимы. **Линейные полимеры** в большинстве своем способны вытягиваться из раствора или расплава в виде тонких гибких и прочных волокон, пригодных для изготовления текстильных материалов. **Пространственные полимеры** не обладают такими свойствами.

Линейные полимеры при повышении температуры размягчаются (становятся пластичными) и легко деформируются. При этом в них не происходит никаких необратимых изменений свойств. После охлаждения эти материалы приобретают прежние свойства и при новом нагреве вновь размягчаются. Реактопласты при нагреве отверждаются, т.е. приобретают другую (более высокую) механическую прочность и твердость, теряя при этом свойства растворимости.

Термопласты. Термопластичные пластмассы представлены обширной группой полимерных материалов

Полиолефины - углеводороды непредельного ряда, получаемые полимеризацией соответствующих олефинов. Представителями этой группы пластиков являются полиэтилен, полипропилен и их многочисленные сополимеры.

Полиэтилен (ПЭ) представляет собой продукт полимеризации этилена ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) с линейной макромолекулой, имеющей небольшое число ответвлений. В зависимости от условий полимеризации получают продукт с различной молекулярной массой. Химическая промышленность производит ПЭ при различных давлениях. **ПЭ высокого давления** (ПЭВД) имеет молекулярную массу $30 \div 400$ тыс. ед. ат. массы, **низкого и среднего давления** (ПЭНД и ПЭСД) - $50 \div 800$ тыс. Выпускается также **сверхвысокомолекулярный ПЭ** (СВМПЭ) с молекулярной массой, достигающей нескольких миллионов. Достоинством ПЭ является сочетание высокой химической стойкости, удовлетворительных механических свойств с технологичностью переработки и низкой стоимостью.

Полипропилен (ПП) – термопластичный линейный полимер, продукт полимеризации пропилена

ПП – это твердое, в тонких слоях прозрачное, в толстых – молочно-белое вещество с высокой (до 75 %) степенью кристалличности и температурой плавления около 170 °С. ПП отличается от ПЭ более высокой ударной вязкостью, прочностью, износостойкостью, обладает высокими диэлектрическими свойствами, низкими паро- и газопроницаемостью. ПП нерастворим в органических растворителях, устойчив к действию кипящих воды и щелочей, но обладает низкими термо- и светостойкостью. Около 30 % ПП перерабатывают в волокна, пленки, трубы и профилированные изделия. Электроизоляционные свойства такие же, как у полиэтилена. Используются в качестве диэлектрика в силовых конденсаторах.

Галогенопроизводные полиолефинов составляют основу широко используемых в электронной технике пластмасс – поливинилхлоридов и фторопластов.

Поливинилхлорид (ПВХ) представляет собой высокомолекулярный продукт полимеризации винилхлорида ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) с молекулярной массой $14\div 85$ тыс. ед. На основе ПВХ изготавливают два вида пластмасс – **винипласт** и **пластикат**.

Винипласт – это жесткий ПВХ, не содержащий пластификаторов. Выпускают в виде листов, труб, пленок и сварочных прутков. Винипласт хорошо обрабатывается резанием, гнется, формуются, выдувается, поддается сварке и склеиванию. В качестве конструкционного материала он может служить заменителем цветных металлов, используют для футеровки химической аппаратуры, для изоляции проводов, защитных оболочек кабелей. **Пластифицированный ПВХ называют пластикатом.** Введение пластификаторов не только улучшает пластичность, но и повышает морозостойкость ПВХ (до -50°C), стойкость к воздействию переменных нагрузок и вибраций. Пластикат широко применяют для изоляции кабелей, изготовления труб, искусственной кожи, клеев.

Фторопласты - полимеры фторпроизводных этиленового ряда: тетрафторэтилена ($CF_2=CF_2$), трифторэтилена ($CF_2=CHF$), трифторхлорэтилена ($CF_2=CFCl$), винилфторида ($CH_2=CHF$) и др.

Достоинством фторопластов является высокая стойкость в агрессивных средах, в том числе сильных кислотах, за исключением плавиковой, щелочей, трехфтористого хлора, элементарного фтора при повышенных температурах.

Фторопласты термостойки - температура их интенсивной термоокислительной деструкции составляет около $400^{\circ}C$.

Фторопласты некоторых марок обладают уникальными антифрикционными свойствами - низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью при трении без смазки.

Наиболее широко распространенным представителем фторопластов является **политетрафторэтилен** (ПТФЭ) - фторопласт-4 (тефлон, флюон). ПТФЭ является самым стойким из всех конструкционных материалов - полимеров, металлов, силикатов - к воздействию агрессивных сред, климатических факторов, микроорганизмов.

Карбоцепные полимеры **жирноароматического ряда** представлены в номенклатуре пластмасс группой **полистиролов** (ПС) - продуктов полимеризации стирола.

ПС обладает высокими диэлектрическими свойствами, водостойкостью и химической стойкостью; отличается радиационной стойкостью и высоким коэффициентом преломления, легко окрашивается в различные цвета. **Недостатками ПС являются большая хрупкость, невысокие теплостойкость и ударная вязкость.** Выпускают различные виды модифицированного ПС и сополимеров стирола: общего назначения; ударопрочные, вспенивающиеся, АБС-пластики.

Полиметилметакрилат (ПММА) – линейный термопластичный полимер, получаемый полимеризацией метилового эфира метакриловой кислоты $[CH_2=C(CH_3)-COOCH_3]$. Молекулярная масса ПММА может достигать нескольких млн. ед., плотность – 1190 кг/м^3 , показатель преломления – 1,492. ПММА (иногда называемый органическим стеклом) – бесцветный прозрачный полимер, обладающий высокой проницаемостью для ультрафиолетового и видимого света (оргстекло толщиной 3 мм пропускает до 92 % УФ лучей, силикатное – лишь до 3 %), высокой атмосферостойкостью, хорошими физико-механическими и электроизоляционными показателями.

Из **гетероцепных термопластов** наибольшее применение в качестве конструкционных материалов получили полимеры из **класса простых и сложных полиэфиров**, а также **полиацетали и полиамиды**.

Полисульфоны (полиариленсульфоны, полиэфирсульфоны) - продукты конденсации ароматических сульфонилхлоридов с углеводородами, твердые некристаллические термопласты белого цвета. Основное достоинство полисульфонов - высокая термостойкость: они стабильны при нагревании на воздухе до 400 °С. Физические и электрические свойства полисульфонов незначительно изменяются в широком интервале температур (от -100 до +175 °С), а также при длительном нагревании при 140 °С. Полисульфоны применяют для изготовления электротехнических изделий

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – твердый полимер белого цвета, представляющий собой сложный полиэфир терефталевой кислоты и этиленгликоля. ПЭТФ не растворяется в большинстве органических растворителей, имеет высокую температуру плавления ($255 \div 265 \text{ }^\circ\text{C}$), стоек к действию слабых щелочей, смазок, масел, спиртов, кетонов, эфиров. ПЭТФ используют главным образом в производстве полиэфирных волокон (лавсан). Из него изготавливают также пленки (основа для лент магнитной записи и кинофотопленок, теплостойкая изоляция обмоток трансформаторов) и литьевые изделия (радиодетали, химическое и другое оборудование).

Поликарбонаты (ПК) – сложные полиэфиры угольной кислоты, получаемые поликонденсацией дифенилпропана и фосгена. Это твердые бесцветные или желтоватого цвета прозрачные вещества, растворяющиеся в хлорированных углеводородах, крезоле и других растворителях.

Температура их плавления колеблется от 150 до 270 °С. ПК обладают высокой механической прочностью в широком интервале температур (от -135 до +140 °С), теплостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, атмосферо- и влагостойкостью. Устойчивы к действию разбавленных кислот, растворов минеральных солей, углеводородов, бензина, масел и т.д., но нестойки в растворах щелочей и хлорсодержащих углеводородов. ПК применяются для изготовления деталей конструкционного и электроизоляционного назначения в приборостроении (телефонные аппараты, вентиляторы, экраны для кинескопов телевизоров и т.д.). Порошкообразные ПК используют для нанесения покрытий на металлические детали.

Полиарилаты - сложные эфиры двухатомных фенолов. Это термостойкие полимеры (максимальная рабочая температура до 250 °С), обладающие высокими диэлектрическими свойствами и механической прочностью, а также химической стойкостью к действию кислот и разбавленных щелочей, высокой радиационной стойкостью. Полиарилаты находят применение в радио- и электротехнике в виде пленок (электроизоляционные материалы) и фильтрующих материалов (фильтры Петрянова).

Полиамиды (ПА) - гетероцепные полимеры, содержащие в основной цепи макромолекулы амидные группы $-CO-NH-$. В зависимости от химического строения ПА могут быть линейными, разветвленными или сшитыми.

Полиамиды - один из самых распространенных конструкционных полимерных материалов. В настоящее время промышленность выпускает полиамиды многих марок: П6 (капрон), П66 (анид), П610, П12 и др. Главным достоинством ПА как конструкционных материалов является сочетание высокой прочности, износо-, тепло- и химической стойкости с технологичностью переработки в изделия.

Полиимиды (ПИ) - ароматические гетероциклические полимеры, содержащие в цепи макромолекулы циклическую имидную группу. В зависимости от метода получения и структуры полимерной цепи ПИ могут быть термопластичными и термореактивными. Важными достоинствами ПИ являются высокая термостойкость (до 350 °С), стойкость к термоокислительной деструкции и радиационному облучению, прочность, износостойкость. ПИ не растворяются в органических растворителях, стойки к маслам, слабым кислотам и основаниям, но гидролизуются под действием щелочей и перегретого пара. Для ПИ характерна весьма высокая для органических полимеров теплопроводность 150÷180 Вт/(м*К). Изделия из ПИ можно успешно эксплуатировать при температурах от -200 до +350 °С. ПИ используют для изготовления электроизоляционной пленки, эмали для обмоточных проводов, заливочных компаундов, волокон, клеев.

Полиуренаты - линейные полимеры, в цепочках молекул которых между углеводородными остатками располагаются группы $-NHCOO-$. В определенных условиях полиуретаны могут образовывать молекулы пространственной структуры. Полиуретаны используются для эмалирования проводов. Такие провода более нагревостойки, чем провода лакированные, но уступают проводам с полиэфирной изоляцией. Эмалированные провода весьма удобны при монтаже, т.к. обслуживаются в припое без снятия эмали.

Реактопласты.

Терморезактивные пластмассы (реактопласты) отличаются от термопластов повышенной теплостойкостью, практически полным отсутствием ползучести под нагрузкой при обычных температурах, постоянством физико-механических показателей в интервале температур эксплуатации. Основу терморезактивных пластмасс составляют смолы, или олигомеры (т.е. полимеры сравнительно небольшой молекулярной массы), которые в процессе отверждения превращаются в неплавкие и нерастворимые продукты.

Причиной отверждения является образование поперечных связей между макромолекулами – сшивка, которая происходит с участием специальных реагентов (отвердителей) или под действием тепла, излучений высоких энергий и др. Как правило, терморезактивные (отверждающиеся) пластики содержат наряду со связующим компонентом (смолой) наполнители – порошковые, волокнистые или слоистые.

Большинство терморезактивных пластмасс получают на основе феноло-формальдегидных, эпоксидных и мочевино-формальдегидных смол.

Феноло-формальдегидные смолы (ФФС) - олигомерные продукты конденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий поликонденсации образуются резольные (терморезактивные) или новолачные (термопластичные) ФФС. В процессе переработки они отверждаются с образованием трехмерных полимеров. Отвержденные ФФС обладают высокими атмосферо- и термостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, стойки к действию большинства кислот. ФФС в течение длительного времени стабильны при нагревании до 200 °С и в течение ограниченного времени способны противостоять действию более высоких температур (несколько часов при 250÷500 °С, несколько минут при 500÷1000 °С). ФФС находят наибольшее применение в производстве специальных видов пластмасс (фенопласты, пенофенопласты), а также для связывания стекловолокна и асбеста при изготовлении тепло- и звукоизоляционных материалов. ФФС используют как основу лаков, эмалей, клеев и герметиков.

Эпоксидные смолы (ЭС) - олигомеры или мономеры, содержащие в молекуле не менее двух эпоксидных групп и способные превращаться в полимеры пространственного строения в процессе поликонденсации или полимеризации с помощью отвердителей (алифатические и ароматические полиамины, ангидриды дикарбоновых кислот, синтетические смолы). Отвержденные ЭС обладают хорошими влагозащитными свойствами, высокой адгезией к металлам, стеклу и керамике, хорошими диэлектрическими свойствами и высокой химической стойкостью. По прочностным показателям продукты отверждения ЭС превосходят все применяемые в промышленности полимерные материалы на основе других синтетических смол. ЭС широко используют как основу лакокрасочных материалов, клеев, герметиков, заливочных и пропиточных компаундов, связующих для высокопрочных армированных пластиков, для модифицирования других олигомеров и полимеров с целью повышения их прочности, теплостойкости, адгезии к различным материалам.

Кремнийорганические смолы (силиконы или полиорганосилоксаны) содержат, помимо характерного для органических полимеров углерода, кремний (он является одной из важнейших составных частей многих неорганических диэлектриков: слюды, асбеста, ряда стекол, керамических материалов). Основа строения молекулы - силоксановая группировка чередующихся атомов кремния и кислорода. Полиорганосилоксаны могут быть термопластичными и иметь линейное строение и терморезактивными с образованием пространственных структур. Кремнийорганические смолы используются в лаках, компаундах и в пластмассах. Некоторые из пластмасс весьма эластичны (например, кремнийорганические каучуки). Электроизоляционные свойства кремнийорганических соединений высоки даже при повышенной температуре. Их высокая нагревостойкость дает возможность использования в композиции с нагревостойкими неорганическими материалами (слюда, стекловолокно, асбест) в виде миканитов, стеклолакотканей. Однако эти материалы сравнительно дороги и имеют низкую механическую прочность.

Эластомеры

К ним относят **натуральный и синтетический каучуки**.

Натуральный каучук получают из особых растений – каучуконосов. Эти растения содержат каучук в соке (латексе), представляющем взвесь в воде мелких частиц округлой формы (глобул). Каучук выделяется при коагуляции латекса и удалении примесей. По химическому составу натуральный каучук представляет собой полимерный углеводород, имеющий состав $(C_5H_8)_n$ и строение, характеризующее наличием двойных связей. Уже при нагреве до $50^\circ C$ каучук размягчается и становится липким, а при низких температурах он хрупок. Каучук растворяется в углеводородах и сероуглероде. Раствор каучука в бензине называется резиновым клеем, применяется для склеивания каучука и резины. Каучук – аморфное вещество, но в растянутом состоянии он дает рентгенограммы, характерные для кристаллических тел, имеющих упорядоченное расположение молекул в пространстве. После снятия растяжения каучук вновь приобретает свойства аморфного тела.

Синтетический каучук (СК), представляет собой продукт полимеризации мономеров углеводородного, нитрильного, сульфидного, силоксанового (т.е. содержащих атомы углерода, азота, серы, кремния) и других типов. Молекулы синтетических каучуков отличаются от молекул натуральных каучуков большей степенью разветвленности, а сочетание разных звеньев при полимеризации позволяет получать большое разнообразие сополимеров с широким набором физико-механических и специальных характеристик. Основными видами СК, имеющими наиболее важное практическое значение, являются бутадиеновые (полибутадиены - продукты полимеризации бутадиена или дивинила и бутадиен-стирольные, относимые к группе СК общего назначения, а также бутадиен-нитрильные, кремнийорганические, полиуретановые и каучуки других видов, относящиеся к СК специального назначения. Главное применение практически всех каучуков - переработка в резино-технические материалы и изделия.

Основным процессом переработки каучуков в резину является **вулканизация** - процесс сшивки макромолекул каучука при нагревании под действием специальных вулканизирующих агентов (чаще всего - серы), приводящий к образованию пространственно-сетчатой структуры. Однако разнообразие требований к резинотехническим материалам обуславливает необходимость введения в каучуковую основу перед вулканизацией целевых добавок и наполнителей. Требуется также проведение специальной механической или термической предварительной обработки (пластикации) резиновой смеси. Эта обработка позволяет снизить высокоэластическую и повысить пластическую составляющую его деформации, что необходимо для введения и перемешивания ингредиентов резиновой смеси (полуфабриката резины).

Вулканизация способствует повышению нагревостойкости и морозостойкости, механической прочности и стойкости к растворителям. Добавлением 1÷3 % серы получают **мягкую резину** (высокая деформация и упругость), 30÷35 % серы дают **твердую резину (эбонит)** – твердый материал с высокой стойкостью к ударным нагрузкам.

Резину широко применяют как электроизоляционный материал и в качестве уплотнителей. **Недостатки резины:** низкая нагревостойкость, малая стойкость к неполярным жидкостям (бензол, бензин), малая стойкость к действию света, особенно ультрафиолетового, озона. Содержащиеся в резине остатки свободной (не связанной химически с каучуком) серы оказывает вредное воздействие на медь (образуется сернистая медь). Поэтому резиновую изоляцию на медную жилу непосредственно не накладывают. Медь покрывают разделителем, например, оловом. На алюминий резину можно накладывать непосредственно.

Слоистые пластики

Гетинакс электротехнический листовой – слоистый материал, полученный методом горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивным связующим на основе фенолформальдегидных или эпоксидных смол. Содержание смолы в гетинаксе 40÷55 %. Иногда гетинакс фольгируют медной электролитической фольгой, облицовывают хлопчатобумажными, стеклянными или асбестовыми тканями, армируют металлической сеткой. В зависимости от назначения гетинакс выпускают нескольких марок.

Для получения листового гетинакса бумагу пропитывают спиртовым или водно-спиртовым раствором резольной смолы либо расплавленной смолой под давлением.

Пропитанные листы сушат, режут, собирают в пакеты и прессуют при 150÷160 °С, затем охлаждают под давлением. Иногда гетинакс подвергают дополнительной термообработке (ступенчатому нагреву до 120÷130 °С).

Гетинакс обладает высокой механической прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами. Гетинакс применяют как электроизоляционный материал в изделиях, длительно работающих при температурах от -65 до $+120$ °С; в производстве деталей телефонов, телевизоров, радиоаппаратуры и как декоративный материал для облицовки мебели, интерьеров судов и т.д. Из фольгированного гетинакса делают печатные схемы. Основную массу деталей из гетинакс изготавливают механической обработкой.

Текстолит представляет собой слоистый материал, полученный методом горячего прессования хлопчатобумажных тканей, пропитанных терморезистивным связующим на основе фенолформальдегидной или эпоксидной смолы. Благодаря применению х/б тканей текстолит обладает высокой прочностью при сжатии и повышенной ударной вязкостью, прекрасно подвергается механической обработке сверлением, резанием, штамповкой, поэтому он широко применяется при изготовлении деталей, нагруженных знакопеременными электрическими и механическими нагрузками или работающих при трении (втулки, кулачки и т. п.).

Как электроизоляционный материал текстолит применяется для работы в трансформаторном масле и на воздухе в условиях нормальной относительной влажности окружающей среды при частоте тока 50 Гц. Длительно допустимая рабочая температура от -65°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

Стеклотекстолит электротехнический листовой представляет собой слоистый материал, полученный методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных термореактивным связующим на основе совмещенных эпоксидной и фенолформальдегидной смол.

Стеклотекстолитовые листы изготавливают толщиной от 1,5 до 70 мм.

Предназначен для работы на воздухе в условиях нормальной и повышенной относительной влажности окружающей среды при напряжении свыше 1000 В и частоте тока 50 Гц. Высокая механическая прочность и электрическая стабильность позволяют проводить механическую обработку материала и использовать его для конструктивных деталей электрооборудования. Стеклотекстолит превосходит текстолит по ряду свойств: термостойкость от 140 до 180 °С против 105÷125 °С у текстолита; удельное сопротивление 10^{11} Ом·м против 10^7 Ом·м; тангенс угла потерь 0,02 против 0,07. Длительно допустимая рабочая температура от -65 °С до +155 °С.

Электроизоляционные компаунды

Компаундами называют смеси различных изоляционных веществ (смола, битумов, эфиров, масел и т.д.), которые в момент применения находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов.

По назначению электроизоляционные компаунды делятся на **пропиточные** и **заливочные**.

Пропиточные компаунды служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых, главным образом, для обмоток электрических машин, катушек аппаратов, трансформаторов и других электротехнических конструкций. После пропитки повышается электрическая прочность материала и всей конструкции в целом, улучшаются теплопроводность, теплоотдача обмоток, что позволяет увеличить мощность электрических машин и аппаратов при тех же размерах, увеличиваются механическая прочность, влагостойкость, срок службы всей конструкции.

Заливочные компаунды используют для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями, для защиты изоляции от влаги, для увеличения пробивного напряжения, для улучшения теплоотвода, повышения механической прочности и т. д.

По отношению к нагреванию электроизоляционные компаунды делятся на **термопластичные** и **терморективные**.

Термопластичные компаунды, твердые при нормальной температуре, при нагревании размягчаются, становятся пластичными и переходят в жидкое состояние. При охлаждении снова затвердевают. Расплавление и отверждение этой группы компаундов можно производить многократно. Для изготовления этих компаундов часто применяются нефтяные битумы в сочетании с растительными и минеральными маслами, канифолью и некоторыми термопластичными полимерами. К их числу относятся битумные компаунды.

Терморективные компаунды в момент их применения находятся в жидком состоянии, а затем затвердевают в результате происходящих в них химических реакций. Отверждение компаундов этой группы происходит под действием отвердителя или катализатора. После отверждения компаунд становится твердым, неплавким и не растворимым в обычных растворителях.

Термореактивные компаунды также делятся на **компаунды горячего и холодного отвердевания.**

Компаунды горячего отвердевания переходят в твердое состояние при специальной термической обработке, а **компаунды холодного отвердевания** переходят в твердое состояние под действием отвердителей. Из термореактивных компаундов наиболее широкое распространение в электронной технике получили эпоксидные компаунды, отличающиеся высокой механической прочностью, высокой нагревостойкостью, а также хорошими электрическими свойствами. Однако при работе с эпоксидными компаундами следует помнить, что в неотвержденном состоянии смолы, а также пары отвердителей являются токсичными веществами. Отвердевшие эпоксидные композиции не токсичны.

Компаунды широко применяют для пропитки и заливки отдельных узлов электро- и радиоаппаратуры: трансформаторов, дросселей, конденсаторов. Их используют также для герметизации и опрессовки дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Некоторые разновидности эпоксидных компаундов обладают высокой оптической однородностью и прозрачностью к излучению в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Благодаря этим свойствам они находят применение в качестве оптических согласующих (иммерсионных) сред при выводе излучения из светодиодов.

Клеи и герметики

Клеи (адгезивы) – композиции на основе веществ, способных соединять (склеивать) твердые тела благодаря образованию между соединяемыми поверхностями и клеевой прослойкой прочных адгезионных связей. В состав клеевой композиции входят **отвердители и добавки** (наполнители, растворители, стабилизаторы, пластификаторы и др.). **Добавками** регулируют специфические свойства клея – **липкость** (способность клея «сцепляться» с поверхностью образца при комнатной температуре), **вязкость, скорость отверждения, сохранность или жизнеспособность** (время, в течение которого клей пригоден к применению), а также эксплуатационные свойства клеевой прослойки – **прочность, жесткость, термо-, морозо-, атмосферостойкость и др.** Клеящие свойства **жидких клеев** проявляются при комнатной температуре, а **твердых клеев** – при нагревании или действии растворителей.

По типу основы клеи подразделяют на **органические** и **неорганические**.

К неорганическим клеям относят клеи на основе клеящих веществ (связок) неорганической природы, относящиеся к группам минеральных и металлических клеев.

Минеральные клеи производят в виде порошков, растворов и дисперсий, преимущественно на основе оксидов и силикатов металлов.

Керамические клеи – композиции на основе высокоплавких оксидов Mg, Al, Si, Zr и оксидов щелочных металлов.

Технология их изготовления состоит из операций сплавления компонентов, быстрого охлаждения сплава в воде, сушки, измельчения и смешения с наполнителями и другими модификаторами. Клей наносят на соединяемые поверхности изделий, которые склеивают при небольшом давлении и температуре, превышающей на $20\div 50$ °С температуру плавления композита. Такие клеевые соединения работоспособны до 3000 °С и применяются для склеивания керамики, металлов, графита и других термостойких материалов в авиационной и электронной промышленности.

Алюмофосфатные клеи – вязкие жидкости или пасты. Примерная рецептура клея (масс. ч.): связка – 7, смесь наполнителей – 10. Наиболее распространенный состав связки (масс. ч.): 7,5 Al_2O_3 , 33,0 P_2O_5 , 59,5 H_2O . В качестве наполнителей используют металлы, графит, Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MgO . Клеевые прослойки на основе алюмосиликатных клеев застывают при комнатной или повышенной (100÷600 °C) температурах. Клеевые соединения работоспособны в интервале температур до 2000 °C и используются при производстве электровакуумных и электронагревательных приборов в радиоэлектронной и электротехнической промышленности.

Силикатные клеи - водные растворы силикатов натрия или калия (жидких стекол) или дисперсии на их основе, которые могут содержать наполнители (глина, CuO , SiO_2) и модифицирующие добавки (P_2O_5 , V_2O_5 или др.). Отверждаются при комнатной температуре или при температурах до $100\text{ }^\circ\text{C}$ в результате испарения воды и коагуляции дисперсной фазы. Клеевые соединения работоспособны до $1100\text{ }^\circ\text{C}$, используются в радиоэлектронике, авиационной промышленности для склеивания керамики, стекол, металлов, картона, бумаги и других материалов.

Металлические клеи разделяют на **пасты, порошки и клеи-пленки**. Клеи-пасты получают на основе жидкого металла, например Ga, и порошка более тугоплавкого металла (Cu, Al, Fe, Ni, Mg).

Клеи-порошки готовят из легкоплавких сплавов на основе Bi, Pb, Sn, In, Cd.

Клеи-пленки - предварительно спеченные ленты из тугоплавких металлов, которые перед использованием пропитывают жидким металлом.

Металлические клеи придают соединительному шву высокую прочность (до 30 МПа при равномерном отрыве), тепло- и электропроводность. Клеевые соединения работоспособны при температурах выше 800 °С и используются в радиотехнической, авиационной и других отраслях промышленности для склеивания металлов, кварца, стекол, а также для соединения металлов с керамикой, кремнием, ферритами.

Органические клеи подразделяют на **природные и синтетические**.

Природные клеи изготавливают на основе клеящих природных полимеров животного и растительного происхождения. Они могут содержать модифицирующие добавки: растворители (вода), антисептики (салициловая или борная кислота), стабилизаторы (щелочи, жидкое стекло), а также смолы, повышающие липкость (канифоль).

Животные клеи получают из материалов, богатых коллагеном, а также из казеина и продуктов его переработки. **Коллаген** – фибриллярный белок, составляющий основу соединительной ткани животных – кожи, связок, сухожилий, хрящей, костей. Получаемые из коллагена протеиновые клеи применяют для склеивания древесины, кожи, бумаги, для приготовления клеевых красок. Недостаток – низкая водостойкость и гниение под действием микроорганизмов.

Казеин (от лат. *caseus* - сыр) - основная белковая фракция коровьего молока. Клей на основе казеина содержит добавки: канифоль, жидкое стекло, фенол. Наиболее распространен казеиновый канцелярский клей, применяемый для соединения древесины, фанеры, бумаги, картона, бумаги со стеклом, древесины с тканью. Прочность при сдвиге клеевых соединений из древесины ~10 МПа. Жидкие казеиновые клеи нетоксичны и неогнеопасны.

Наиболее распространенные растительные клеи изготавливают на основе **крахмала, декстрина и натурального каучука**. Клеи на основе **крахмала** используют в основном для склеивания бумаги. **Декстриновые клеи** (водные растворы продуктов частичного расщепления гомополисахаридов) применяют для склеивания бумаги, картона, бумаги со стеклом и древесиной. **Резиновые клеи** - растворы натурального каучука в бензине или его водные суспензии, обычно содержат вулканизирующие агенты и модификаторы. Применяются для склеивания кожи, тканей, бумаги и резин.

Синтетические клеи изготавливают на основе синтетических мономеров, олигомеров, полимеров или их смесей. По сравнению с другими клеями синтетические клеи получили наиболее широкое распространение в электронной технике благодаря возможности направленного изменения их свойств. Синтетические клеи чаще всего классифицируют по химической природе основы: на **термореактивные** (реактивные) и **термопластичные**. У термореактивных клеев при склеивании изменяется химическая структура, и они из пластичного состояния необратимо переходят в стеклообразное или эластичное в результате отверждения – протекания химической реакции поликонденсации или полимеризации. Структура термопластичных клеев при склеивании не изменяется, они затвердевают в результате удаления растворителей или застывания расплава.

Герметики (герметизирующие составы) – пастообразные или вязкотекучие композиции на основе полимеров или олигомеров, отверждающиеся (вулканизирующиеся) в зазорах конструкций с образованием эластичных прослоек, предотвращающих утечки рабочих сред. По деформационно-прочностным характеристикам они занимают в номенклатуре машиностроительных материалов промежуточное положение между клеями и резинами. По консистенции герметики могут представлять собой замазки, пасты или растворы в органических растворителях. По упругости герметики разделяют на эластичные, пластичные и эластопластичные. Кроме того, существуют их классификации по теплостойкости (50÷70 °C, 100÷150 °C, свыше 200 °C), стойкости к топливам и маслам, а также по методам заполнения зазоров (шпательные, заливочные и т.д.).

Основой наиболее распространенных герметизирующих составов являются синтетические высокомолекулярные каучуки. В зависимости от механизма формирования герметизирующей прослойки различают герметики **термореактивные** (вулканизирующиеся) и **термопластичные** (невысыхающие и высыхающие).

Вулканизирующиеся герметики — это термореактивные материалы, которые в процессе герметизации из исходного текучего состояния необратимо переходят в эксплуатационное эластичное состояние. В эту группу герметиков входят:

- вулканизирующиеся составы на основе полисульфидных, силиконовых, фторсилоксановых и некоторых других каучуков;
- сшивающиеся под действием отвердителей составы на основе низкомолекулярных каучуков и олигомеров с реакционноспособными группами OH, COOH, SH, NCO и др;
- анаэробные герметики на основе смол акрилового или метакрилового ряда, не содержащие растворителей.

Невысыхающие герметики – термопластичные материалы, обратимо переходящие из исходного вязкотекучего в эксплуатационное пластическое или эластопластическое состояние. Их основой являются высокомолекулярные и низкомолекулярные каучуки (полиизобутиленовый, бутилкаучук, этилен-пропиленовый), полностью насыщенные или с малым количеством двойных связей в молекулах.

Высыхающие герметики (также относящиеся к термопластичным материалам) представляют собой растворы резиновых смесей в органических растворителях, но в отличие от невысыхающих – находящиеся при эксплуатации в эластическом состоянии. При добавлении растворителя они снова переходят в вязкотекучее состояние. Такие герметики получают на основе высокомолекулярных вулканизирующихся синтетических каучуков (бутадиен-стирольных, бутадиен-нитрильных, хлорпреновых и др.), а также на основе термоэластопластов (бутадиен-стирольных, изопрен-стирольных, уретановых и др.) в сочетании со смолами.

Основные эксплуатационные характеристики

герметиков: жизнеспособность – период времени до использования, в течение которого сохраняются их технологические свойства; газонепроницаемость при рабочих температурах в различных средах; адгезия к поверхности детали герметизируемого соединения; разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение при разрыве, плотность герметизирующей прослойки, а также технологичность процесса герметизации.

Процесс герметизации включает приготовление герметика, подготовку поверхности деталей, образующих герметизируемое соединение, нанесение герметика, его вулканизацию или отверждение.

Герметизация может быть **внутришовной, поверхностной и комбинированной**. Для внутришовной герметизации, которую осуществляют, заполняя герметиком зазор в конструкции, применяют обычно уплотнительную ленту (ткань, пропитанную невысыхающей замазкой) или самовулканизирующуюся пасту. Поверхностную герметизацию осуществляют после сборки соединения, нанося на него покрытие из низковязких герметиков, в состав которых могут входить растворители. Выбор способа герметизации определяется конструкцией соединения и условиями его эксплуатации. Так, для уплотнения емкостей с агрессивными жидкостями, находящимися под избыточным давлением, используют комбинированную герметизацию, для жестких конструкций с небольшими зазорами - поверхностную.

АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Кристаллические диэлектрики, в которых ионы разного знака расположены в определенном порядке, могут поляризоваться и в отсутствие внешнего электрического поля. В обычных диэлектриках такая поляризация не происходит, так как создаваемое внутри них электрическое поле компенсируется полем свободных зарядов, натекающих на поверхность образца извне и изнутри. Нарушение такой компенсации, приводящее к временному появлению электрического поля в кристалле, происходит в **пьезоэлектриках** (при определенных деформациях) и в **пироэлектриках** (при изменении температуры кристалла). Разновидностью **пироэлектриков** являются **сегнетоэлектрики**, поляризация которых может существенно изменяться под влиянием внешних воздействий. Наведенная во внешнем поле поляризация может долго сохраняться в диэлектриках (например, в полимерах и керамике) после снятия поляризующего поля (**так называемые электреты**).

Пьезоэлектрики - кристаллические вещества, в которых при сжатии и растяжении в определенных направлениях возникает электрическая поляризация (прямой пьезоэффект). **Обратный пьезоэффект** - появление механической деформации в кристалле под действием приложенного электрического поля. Функциональная связь между механическими и электрическими параметрами в обоих случаях линейна.

Пьезоэффект наблюдается только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Наличие других элементов симметрии (оси или плоскости симметрии) может запрещать появление поляризации в некоторых кристаллографических направлениях, т.е. также ограничивает число кристаллов-пьезоэлектриков. В результате пьезоэлектрики могут принадлежать лишь к 20 точечным группам симметрии из 32.

Количественной характеристикой пьезоэффекта является совокупность пьезоконстант (пьезомодулей) - коэффициентов пропорциональности d в соотношениях между электрическими (напряженность электрического поля, поляризация) и механическими величинами (механические напряжения, относительная деформация). Так как механические напряжения могут быть представлены совокупностью шести независимых величин (сжатия/растяжения вдоль трех осей и сдвига в плоскостях, перпендикулярных этим осям), а вектор поляризации имеет три независимые компоненты, то в общем случае может быть 18 разных пьезоконстант.

Величины пьезоконстант сильно различаются для кристаллов разных типов и для разных кристаллографических направлений: от единиц до сотен пикокулонов на ньютон (пК/Н). Веществами с хорошо выраженными пьезоэлектрическими свойствами являются монокристаллы, природные или искусственно выращиваемые (кварц, дигидрофосфаты калия и аммония, сегнетова соль и др.), и поликристаллические твердые растворы, подвергнутые предварительной поляризации в электрическом поле (пьезокерамика). В табл. приведены значения пьезомодулей некоторых пьезоэлектриков.

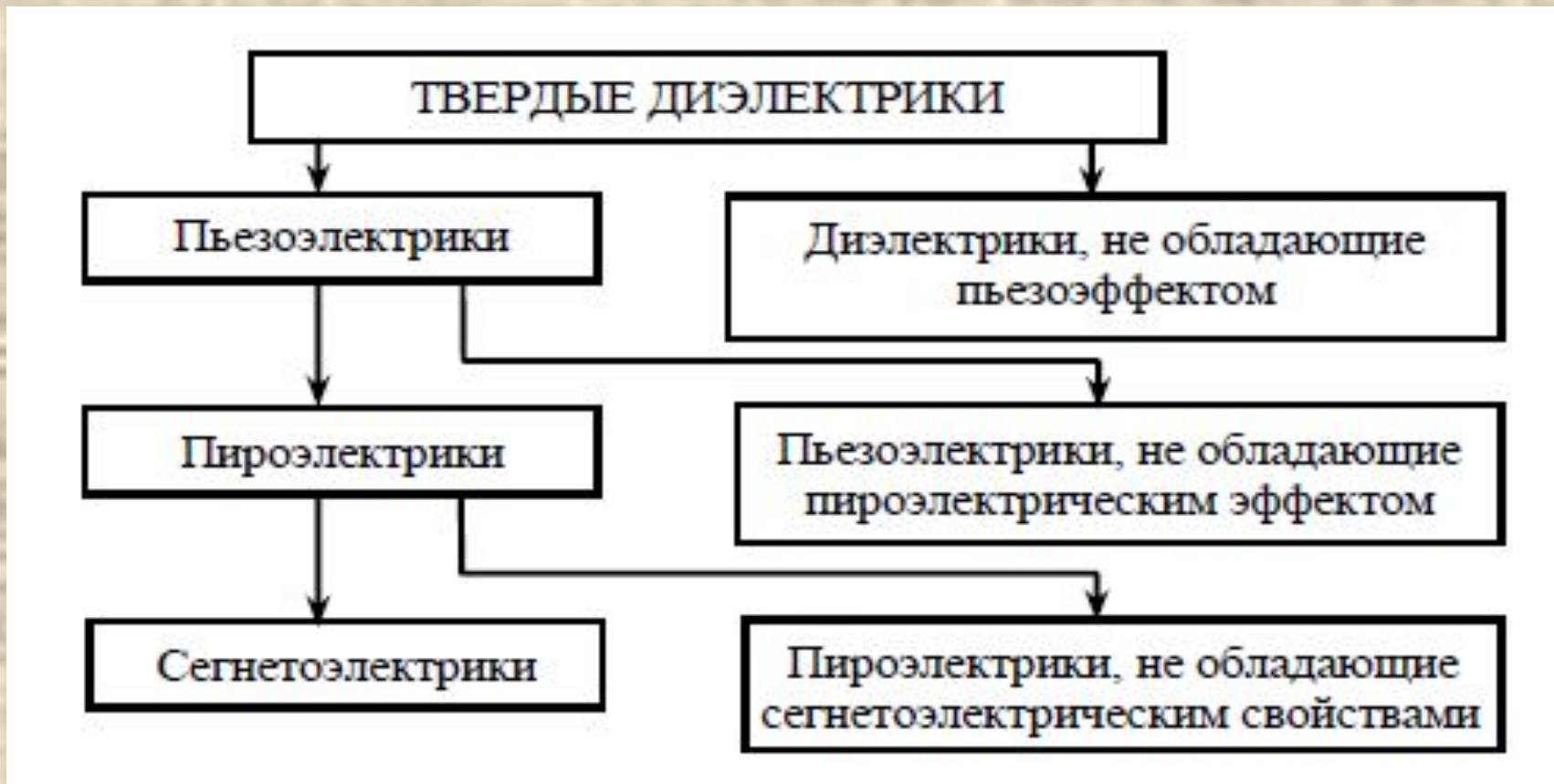
Основные параметры пьезоэлектрических материалов

Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Диэлектрическая проницаемость	Пьезомодуль d_{ik} , пК/Н
Кварц	2,66	4,5	2,31 (d_{11})
Турмалин	2,9 – 3,2	8,2	3,6 (d_{15}), 1,9 (d_{33})
Сегнетова соль	1,77	4000*	790 (d_{14}), 53 (d_{25})
Титанат бария ТБ-1	5,3	1500	45 (d_{31}), 100 (d_{33})
Пьезокерамика на основе цирконата-титаната свинца:			
– ЦТБС-3	7,2	2300	125 (d_{31}), 320 (d_{33})
– PZT-5	7,5	3400	274 (d_{31}), 590 (d_{33})
Поливинилиденфторид (PVDF)	1,76	11	20 (d_{31})

Пироэлектрики - кристаллические диэлектрики, на поверхности образцов которых при изменении температуры возникают электрические заряды.

Появление электрических зарядов связано с изменением спонтанной (самопроизвольной) поляризации диэлектрика. Спонтанная поляризация может существовать только при достаточно низкой симметрии кристалла. Иметь зависящую от T спонтанную поляризацию, т.е. быть пироэлектриками, могут лишь кристаллы (полярные диэлектрики) в которых есть не изменяющееся при всех преобразованиях симметрии полярное направление, вдоль которого располагается вектор спонтанной кристаллизации.

Изменение поляризации в пироэлектрике может происходить под действием механических напряжений, т.е. все пироэлектрики являются пьезоэлектриками (но не наоборот). Некоторые пироэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами (рисунок).



Классификация твердых диэлектриков по признаку поляризуемости

Типичным пироэлектриком является турмалин (алюмоборосиликат) – природный или синтетический монокристалл. В нем при изменении температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ возникает электрическое поле $E = 400\text{ В/см}$. Пироэлектрическими свойствами обладают керамические сегнетоэлектрики, поляризованные в электрическом поле, а также некоторые полимеры.

Пироэлектрики используют как термоэлектрические преобразователи в приемниках ИК-излучения, пирометрах, видиконах.

Пироэлектрические коэффициенты кристаллических материалов
при $T = 300 \text{ K}$

Материал	p , нКл/(см ² ·К)
Турмалин	0,4
Сегнетоэлектрические монокристаллы:	
– LiTaO ₃	21
– LiNbO ₃	4
– Pb ₅ Ge ₃ O ₁₁	5
Керамические сегнетоэлектрики:	
– BaTiO ₃	23
– титанат-цирконат свинца PZT-5	6–50
Полимеры	
– поливинилфторид (PVF)	1
– поливинилиденфторид (PVDF)	4

Сегнетоэлектрики - кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной поляризацией, а также нелинейной зависимостью поляризации от напряженности приложенного электрического поля. Сегнетоэлектрики получили свое название от сегнетовой соли $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ - минерала, у которого впервые были обнаружены сегнетоэлектрические свойства.

Обычно сегнетоэлектрики не являются однородно поляризованными кристаллами, а состоят из доменов - областей с различными направлениями поляризации. Результирующий электрический дипольный момент образца практически равен нулю. Равновесная доменная структура отвечает минимуму свободной энергии кристалла. Число доменов в кристалле, ориентация их спонтанной поляризации зависят от симметрии кристалла.

Характеристики некоторых сегнетоэлектриков

Вещество	Формула	Температура фазового перехода T_C , °C	Поляризация насыщения P_S , мкКл/см ²
Титанат бария	BaTiO ₃	133	25
Сегнетова соль	KNaC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	-18; +24	0,25
Дигидрофосфат калия	KH ₂ PO ₄	-150	5,1
Ниобат лития	LiNbO ₃	1210	50
Фторбериллат аммония	(NH ₄) ₂ BeF ₄	-97	0,15
Молибдат гадолиния	Gd ₂ (MoO ₄) ₃	159	0,18
Сульфат аммония	(NH ₄)SO ₄	-49	0,45

Сегнетоэлектрические материалы (монокристаллы, керамика, пленки) с большими значениями диэлектрической проницаемости применяют в конденсаторах. Резкое изменение проводимости некоторых сегнетоэлектриков вблизи точки фазового перехода используют для контроля и измерения температуры. Большая величина пирозлектрических констант позволяет использовать сегнетоэлектрики в детекторах электромагнитного излучения. Благодаря сильной зависимости диэлектрической проницаемости от внешнего электрического поля сегнетоэлектрики применяют в нелинейных конденсаторах (варикондах).

Электреты. По определению Г. Сесслера (G.M. Sessler, немецкий физик, один из основателей теории электретного состояния диэлектриков) электрет – это образец из диэлектрика, обладающий квазипостоянным электрическим зарядом. Термин «квазипостоянный» означает, что постоянные времена, характеризующие разряд электрета, значительно превосходят интервалы времени, в течение которых изучается электрет. Электреты применяют как источники постоянного электрического поля (в электретных микрофонах и телефонах, вибродатчиках, генераторах слабых сигналов, электрометрах и др.), а также как чувствительные преобразователи в дозиметрах и запоминающих устройствах. Электреты используют для изготовления барометров, гигрометров и газовых фильтров. Фотоэлектреты применяют в электрофотографии.

Электрет, не покрытый металлическими электродами, может создавать в окружающем пространстве электростатическое поле. В большинстве случаев суммарный заряд электрета равен или близок к нулю, поэтому обычно электростатическое поле обусловлено не наличием нескомпенсированного заряда, а лишь разделением различных по знаку зарядов. Так будет, если поляризационные и реальные заряды не компенсируют друг друга в каждой точке диэлектрика. Такой электрет можно считать электростатическим аналогом магнита, хотя, конечно, электретные свойства могут быть обусловлены не только наличием диполей, но и присутствием зарядов одного знака. Существование в пространстве поля электрета и аналогию с постоянными магнитами часто используют в качестве признаков понятия электрета. Отсюда - и созвучие англоязычных терминов: *electret* и *magnet*.

Существует несколько способов получения электретов. Стабильные электреты получают, нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (термоэлектреты), освещая его в сильном электрическом поле (фотоэлектреты), облучая радиоактивным излучением (радиоэлектреты), поляризацией в сильном электрическом поле без нагревания (электроэлектреты) или в магнитном поле (магнитоэлектреты), механической деформацией (механоэлектреты), трением (трибоэлектреты), действием поля коронного разряда (короноэлектреты), поляризацией полимеров в контакте с электродами из разнородных металлов (металлополимерные электреты).

Электретный эффект присущ монокристаллическим неорганическим диэлектрикам (щелочно-галогидные монокристаллы, корунд, рутил), неорганическим поликристаллическим диэлектрикам (титанаты щелочноземельных металлов, ультрафарфор, керамические диэлектрики), полимерам (политетрафторэтилен, полиметилметакрилат, поливинилхлорид, поливинилиденхлорид и др.), тканям живого организма (биоэлектреты). *Электреты можно получить практически из всех диэлектриков, а электретный эффект - такое же общее физическое явление, как поляризация и проводимость. Для возникновения электретного состояния необходимо, чтобы твердое тело содержало достаточно глубокие уровни захвата электронов и достаточно глубокие потенциальные ямы для ионов и дипольных молекул, а также имело бы не очень большую электропроводность (не больше $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$).*

Жидкие кристаллы.

Жидкие кристаллы (которые называют также мезофазами, веществами в мезоморфном состоянии, анизотропной жидкостью) представляют собой вещества в состоянии, промежуточном между твердым кристаллическим и изотропным жидким. Сохраняя основные свойства жидкости, прежде всего, текучесть, они проявляют характерную для твердых кристаллов анизотропию. В отсутствие внешних воздействий в жидких кристаллах анизотропны диэлектрическая проницаемость, диамагнитная восприимчивость, электропроводность и теплопроводность.

По структуре ЖК представляют собой вязкие жидкости, состоящие из молекул вытянутой или дискообразной формы, определённым образом упорядоченных во всем объёме этой жидкости. Наиболее характерным свойством ЖК является их способность изменять ориентацию молекул под воздействием электрических полей, что открывает широкие возможности для применения их в промышленности. По типу ЖК обычно разделяют на две большие группы: нематики и смектики. В свою очередь нематики подразделяются на собственно нематические и холестерические жидкие кристаллы.

По своим общим свойствам ЖК можно разделить на две большие группы:

- термотропные ЖК, образующиеся в результате нагревания твердого вещества и существующие в определенном интервале температур и давлений.

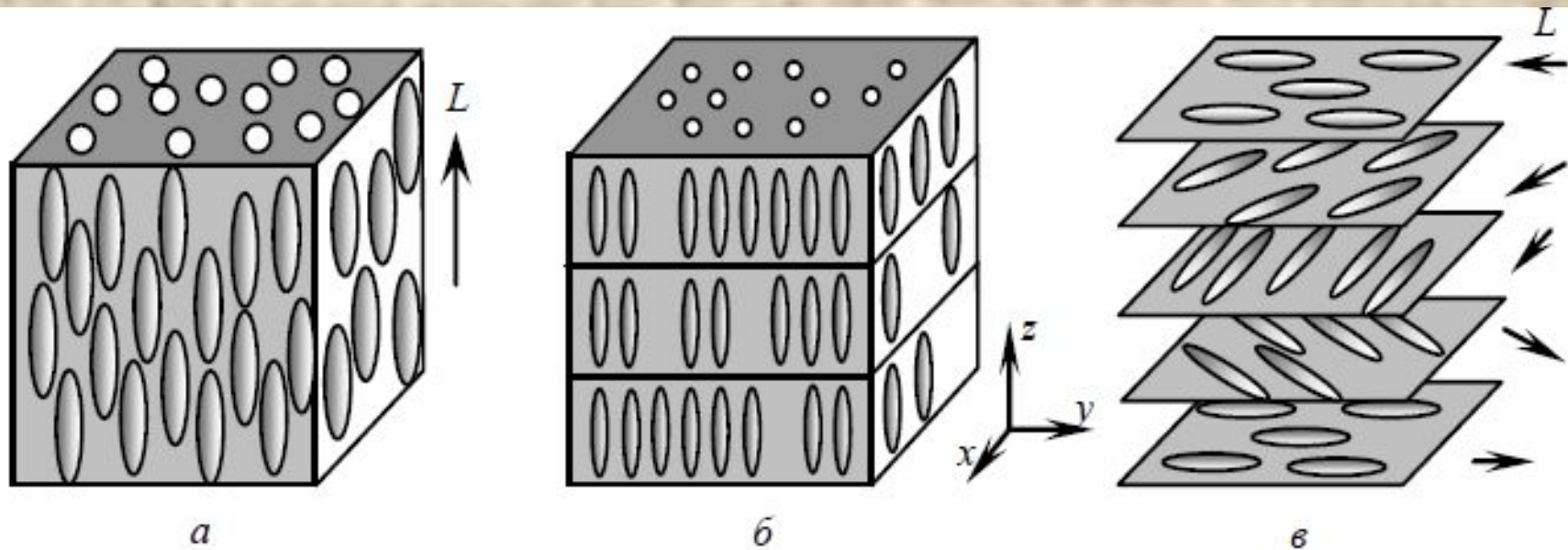
- лиотропные ЖК, которые представляют собой двух- или более компонентные системы, образующиеся в смесях стержневидных молекул данного вещества и воды (или других полярных растворителей). Эти стержневидные молекулы имеют на одном конце полярную группу, а большая часть стержня представляет собой гибкую гидрофобную углеводородную цепь. Такие вещества называются амфифилами (амфи — по-гречески означает «с двух концов», филос — «любящий», «благорасположенный»). Примером амфифилов могут служить фосфолипиды.

Термотропные ЖК подразделяются на три больших класса:

1. Нематические жидкие кристаллы. В этих кристаллах отсутствует дальний порядок в расположении центров тяжести молекул, у них нет слоистой структуры, их молекулы скользят непрерывно в направлении своих длинных осей, вращаясь вокруг них, но при этом сохраняют ориентационный порядок: длинные оси направлены вдоль одного преимущественного направления. Они ведут себя подобно обычным жидкостям. Нематические фазы встречаются только в таких веществах, у молекул которых нет различия между правой и левой формами, их молекулы тождественны своему зеркальному изображению (ахиральны). Примером вещества, образующего нематический ЖК, может служить N-(пара-метоксибензилиден)-пара-бутиланилин.

2. Сметические жидкие кристаллы имеют слоистую структуру, слои могут перемещаться относительно друг друга. Толщина сметического слоя определяется длиной молекул (преимущественно, длиной парафинового «хвоста»), однако вязкость сметиков значительно выше, чем у нематиков, и плотность по нормали к поверхности слоя может сильно меняться. Типичным является терефтал-бис (пара-бутиланилин).

3. Холестерические жидкие кристаллы — образуются, в основном, соединениями холестерина и других стероидов. Это нематические ЖК, но их длинные оси повернуты друг относительно друга так, что они образуют спирали, очень чувствительные к изменению температуры вследствие чрезвычайно малой энергии образования этой структуры (порядка 0,01 Дж/моль). В качестве типичного холестерика можно назвать амил-пара-(4-цианобензилиденамино)-циннамат.



Типы жидкокристаллических структур:

a – нематические, *b* – смектические, *v* – холестерические

Практическое применение жидких кристаллов.

Жидкие кристаллы широко используют для устройства индикаторов и табло, отображающих буквенную, цифровую и аналоговую информацию в электронных часах, калькуляторах, измерительных приборах. В комбинации с фоточувствительными полупроводниковыми приборами служат средством усиления и преобразования изображений, а также оптической обработки информации. Зависимость шага спирали холестерических жидких кристаллов от температуры обусловила использование пленок этих веществ как индикаторов распределения температуры на поверхности тел (жидкокристаллическая термография).

Количество известных в настоящее время жидких кристаллов превышает десятки тысяч и непрерывно увеличивается.

Контрольные вопросы.

1. Классифицируйте диэлектрические материалы.
2. Неорганические стекла - как основной класс неорганических диэлектрических материалов.
3. Какие свойства неорганических стекол Вы знаете.
4. Что представляют собой стеклянные волоконные оптические элементы?
5. Классифицируйте виды керамик.
6. Что Вы знаете о ситаллах?
7. Полимеры. Классифицируйте виды полимеров.
8. Что Вы можете сказать о термопластах?
9. Что Вы знаете о реактопластах?
10. Расскажите про эластомеры.
11. Какие клеи и герметики применяются в электронной технике?
12. Что Вы можете сказать о пьезо- и пьезоэлектрических материалах.
13. Какие материалы называются сегнетоэлектриками?
14. Что Вы знаете о электретах и электретном эффекте?
15. Жидкие кристаллы. Их классификация и применение.