ДИЭЛЕКТРИКИ. ЧАСТЬ 1

Оглавление

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ 1
Сопротивление и проводимость изоляции 2
Физическая природа электропроводности диэлектриков 4
Влияние различных факторов на сопротивление диэлектриков 4
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ 6
Поляризованность для разных механизмов поляризации 11
Физическая сущность поляризации 13
Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты 13
Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры 14
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ 15
Значения диэлектрической проницаемости для некоторых веществ 16

Диэлектрики — вещества, в которых могут длительно существовать электростатические поля. Эти материалы, в противоположность проводниковым, практически не проводят электрический ток под действием приложенного к ним постоянного напряжения.

Назначение электрической изоляции состоит в том, чтобы препятствовать прохождению тока путями, нежелательными для работы электротехнического устройства. Кроме того, диэлектрики в электрических устройствах, в частности конденсаторах, играют активную роль, обеспечивая емкость требующейся величины.

По химическому составу электроизоляционные материалы разделяются на *органические,* в состав которых входит углерод, и *неорганические,* не содержащие углерода.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

По самому своему назначению диэлектрики под воздействием постоянного напряжения совершенно не должны пропускать тока, т. е. должны быть *непроводниками.* Однако все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении постоянного напряжения пропускают некоторый незначительный ток,

так называемый ***ток утечки***. Таким образом, удельное сопротивление электроизоляционных материалов не бесконечно, хотя и весьма велико.

Сопротивление и проводимость изоляции

Сопротивление участка изоляции равно отношению приложенного к этому участку изоляции постоянного напряжения U (в вольтах) к току утечки I (в амперах) через этот участок:

$$R_{из} = \frac{U}{I}\ [Ом].$$

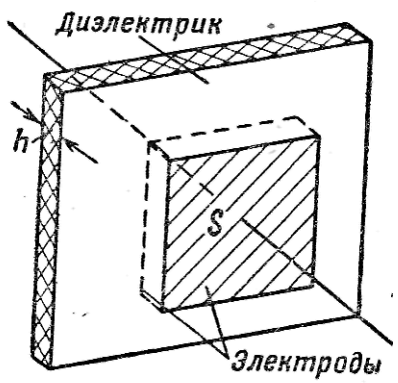
Проводимость изоляции

$$G_{из} = \frac{1}{R_{из}} = \frac{I}{U}\ [Ом^{-1}].$$

Различают ***объемное сопротивление*** изоляции R_V , численно определяющее препятствие, создаваемое изоляцией прохождению тока сквозь ее толщу, и ***поверхностное сопротивление*** R_S определяющее препятствие прохождению тока по поверхности изоляции и характеризующее наличие повышенной проводимости поверхностного слоя диэлектрика за счет увлажнения, загрязнения и т. п.

Полное сопротивление изоляции определяется как результирующее двух сопротивлений, включенных параллельно между электродами, объемного и поверхностного:

$$R_{из} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}.$$



Для плоского участка изоляции с поперечным сечением S [см^2] и толщиной h [см] ***объемное сопротивление*** (исключая влияние краев) равно:

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S}\ [Ом].$$

Здесь ρ_V – ***удельное объемное сопротивление***.

Численно ρ_V равно сопротивлению (в Омах) куба с ребром в 1 см из данного материала, если ток проходит через две противоположные грани куба:

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}\ [Ом \cdot см].$$

1 *Ом·см* = 10^4 *Ом·мм*^{2}*/м* = 10^6 *мкОм·см* = 10^{-2} *Ом·м*.

Величина, обратная удельному объемному сопротивлению

$$\gamma_V = \frac{1}{\rho_V}\,[\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}],$$

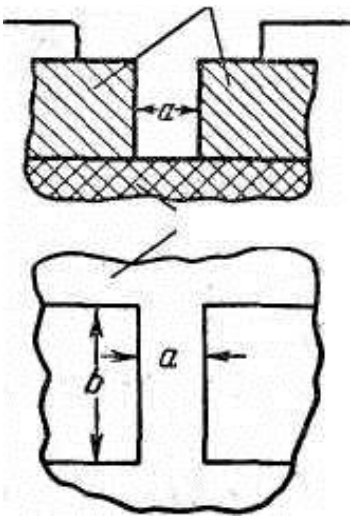
называется ***удельной объемной проводимостью*** материала.

Значения ρ_V практически применяемых твердых и жидких электроизоляционных материалов колеблются примерно от **10^8…10^{10} *Ом·см*** для сравнительно низкокачественных, применяемых в малоответственных случаях материалов (древесина, мрамор, асбестоцемент и пр.) до ***10^{16}…10^{18} Ом·см*** для таких материалов, как янтарь, полистирол, полиэтилен и др.

Для неионизированных газов ρ_V порядка ***10^{19}…10^{20} Ом·см***.

Отношение удельных сопротивлений высококачественного твердого диэлектрика и хорошего проводника (при нормальной температуре) выражается колоссальным числом — порядка ***10^{22}…10^{24}***.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S характеризует свойство электроизоляционного материала создавать в изготовленной из него изоляции поверхностное сопротивление протеканию электрического тока. Поверхностное сопротивление (пренебрегая влиянием краев) между электродами с параллельными друг другу прямыми кромками длиной b, находящимися друг от друга на расстоянии a, при исключении тока объемной утечки через толщу материала равно



$$R_S = \rho_S\frac{a}{b}\,[\text{Ом}],$$

где $\rho_S = R_S\frac{b}{a}\,[\text{Ом}]$ – ***удельное поверхностное сопротивление***.

Величина ρ_S численно равна сопротивлению квадрата (любого размера) на поверхности данного материала, если ток подводится к электродам, ограничивающим две противоположные стороны этого квадрата.

Физическая природа электропроводности диэлектриков

Электропроводность диэлектриков объясняется наличием в них свободных заряженных частиц (т. е. не связанных с определенными молекулами и могущих передвигаться под действием приложенного электрического поля): ионов, молионов (коллоидных частиц), иногда электронов.

Наиболее характерна для большей части электроизоляционных материалов ***ионная электропроводность***. Следует отметить, что в ряде случаев электролизу подвергается основное вещество диэлектрика; примером может служить стекло, в котором благодаря его прозрачности можно непосредственно наблюдать выделение продуктов электролиза. При пропускании постоянного тока через стекло, нагретое для понижения проводимости, у катода образуются характерные древовидные отложения («дендриты») входящих в состав стекла металлов, прежде всего натрия.

Еще чаще наблюдаются такие случаи, когда молекулы основного вещества диэлектрика не обладают способностью легко ионизироваться, но ионная электропроводность имеет место за счет практически неизбежно присутствующих в диэлектрике загрязнений — примесей влаги, солей, кислот, щелочей и т. п. Даже весьма малые, иногда с трудом обнаруживаемые химическим анализом примеси способны заметно влиять на проводимость вещества; поэтому при изготовлении диэлектриков и вообще в технике электрической изоляции такое важное значение имеет чистота исходных продуктов и чистота рабочего места. У диэлектрика с ионным характером электропроводности строго соблюдается закон Фарадея, т. е. пропорциональность между количеством прошедшего через изоляцию электричества (при постоянном токе) и количеством выделившегося при электролизе вещества.

Влияние различных факторов на сопротивление диэлектриков

Температура

При повышении ***температуры*** удельное сопротивление электроизоляционных материалов, как правило, сильно уменьшается. Очевидно, что условия работы электрической изоляции становятся при этом более тяжелыми. При низких температурах, наоборот, даже очень плохие диэлектрики приобретают высокие значения удельного объемного сопротивления ρ_V.

Влажность

Присутствие даже малых количеств воды способно значительно уменьшить ρ_V диэлектрика. Это объясняется тем, что имеющиеся в воде примеси диссоциируют на ионы или же присутствие воды может способствовать диссоциации молекул самого вещества. Таким образом, условия работы электрической изоляции утяжеляются и при увлажнении. Весьма сильно влияет увлажнение на изменение ρ_V волокнистых и некоторых других материалов, в которых влага может образовывать сплошные пленки вдоль волокон — «мостики», пронизывающие весь диэлектрик от одного электрода до другого.

Гигроскопичные материалы для защиты от действия влаги после сушки пропитывают или покрывают негигроскопичными лаками, компаундами и т. п. При ***сушке*** электрической изоляции влага из нее удаляется, и сопротивление ее растет. Поэтому при повышении температуры ρ_V увлажненного материала сначала может даже расти (если влияние удаления влаги перевешивает влияние повышения температуры), и только после удаления значительной части влаги начинается снижение удельного объемного сопротивления ρ_V.

Время приложения напряжения

Сопротивление изоляции может уменьшаться с ***повышением напряжения***, что имеет существенное практическое значение: измеряя сопротивление изоляции (машины, кабеля, конденсатора и т. п.) при напряжении, которое ниже рабочего, мы можем получить завышенную величину сопротивления.

Зависимость $R_{из}$ от величины напряжения объясняется рядом ***причин***:

- образованием в диэлектрике объемных зарядов;
- плохим контактом между электродами и измеряемой изоляцией и др.

При достаточно больших напряженностях может происходить освобождение электронов силами электрического поля. Создающаяся при этом добавочная электронная проводимость приводит к существенному увеличению общей электропроводности. Это явление предшествует развитию пробоя диэлектрика.

При приложении к твердому диэлектрику постоянного напряжения в большинстве случаев ток постепенно спадает с течением времени, асимптотически при-

ближаясь к некоторой установившейся величине. Таким образом, постепенно проводимость диэлектрика возрастает, а сопротивление уменьшается. ***Изменение проводимости со временем*** связано с влиянием образования объемных зарядов, с процессами электролиза в диэлектрике и другими причинами.

Характер изменения ***удельного поверхностного сопротивления*** ρ_S диэлектриков от различных факторов (температуры, влажности, величины напряжения, времени воздействия напряжения) сходен с характером изменения ρ_V, рассмотренным выше. Величина ρ_S ***гигроскопичных*** диэлектриков весьма чувствительна к увлажнению.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поляризация – это смещение электрических зарядов в диэлектрике под действием приложенного электрического поля.

Различают:

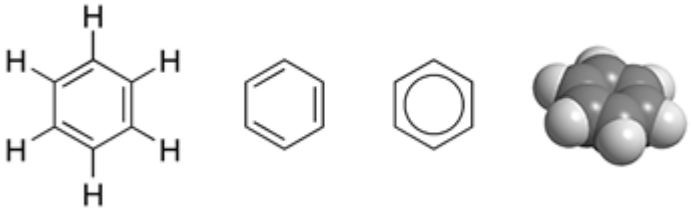
- поляризацию, возникающую ***под действием внешнего электрического поля***, и
- ***спонтанную*** (самопроизвольную), существующую в отсутствии поля – у ***сегнетоэлектриков***.
- В некоторых случаях поляризация диэлектриков проявляется ***под действием механических напряжений***.

В процессе поляризации диэлектрик приобретает ***наведенный электрический момент***, и в нем образуется электрический заряд.

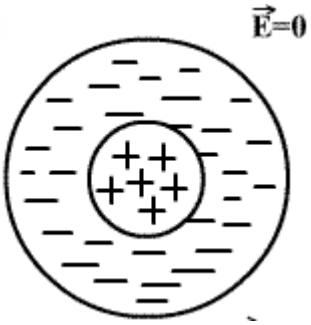
Механизм поляризации в веществе зависит от его структуры. Атомы и молекулы диэлектрика содержат равные количества положительных и отрицательных микроскопических зарядов и в целом электрически нейтральны. В зависимости от строения все диэлектрические вещества можно разделить ***на три большие группы***.

К первой группе принадлежат диэлектрики, состоящие из молекул, у которых “центры тяжести” положительных и отрицательных зарядов совпадают. Примером такого вещества является бензол C_6H_6.

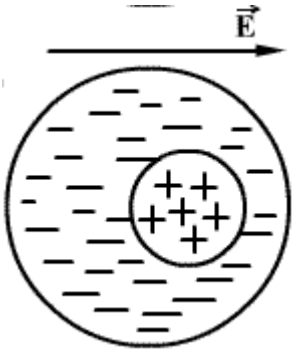
http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-9-dielektriki/



Молекулы таких диэлектриков в отсутствие внешнего электрического поля *не обладают дипольным моментом*.

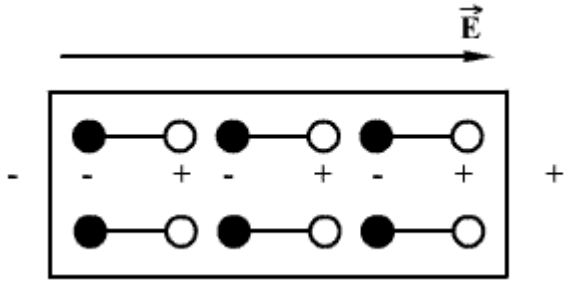


Во внешнем электрическом поле “центы тяжести” положительных (ядро) и отрицательных (электронные оболочки) зарядов молекулы смещаются в противоположные стороны на некоторое расстояние L, малое по сравнению с размерами молекулы.



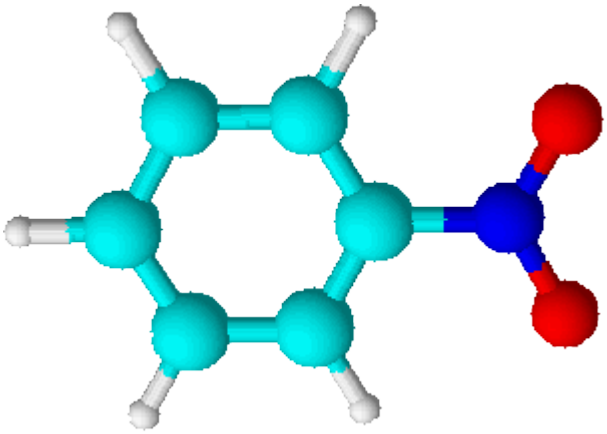
Каждая молекула при этом становится полярной (дипольной), подобной электрическому диполю и приобретает дипольный электрический момент P=qL.

Такого рода поляризация называется ***электронной***. При внесении диэлектрика в электрическое поле все неполярные молекулы превращаются в дипольные, расположенные цепочками вдоль силовых линий поля.

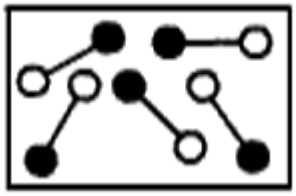


В результате торцы диэлектрика приобретают разноименные заряды - диэлектрик поляризуется. Степень электронной поляризации зависит от его свойств и от величины напряженности поля $\vec{E}$.

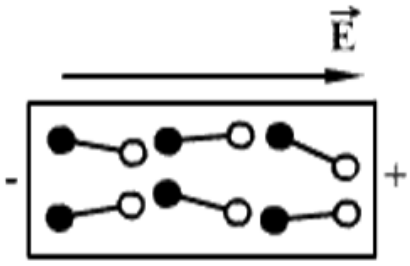
Вторую группу диэлектриков составляют такие вещества ***несимметричными*** молекулами. Примером может служить нитробензол $C_6H_5NO_2$.



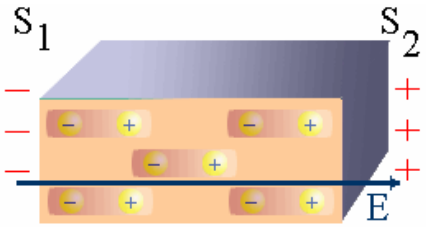
В таких веществах молекулы всегда (и в отсутствие внешнего поля тоже) несимметричны, т.е. являются ***дипольными***. Благодаря тепловому движению дипольные молекулы расположены в диэлектрике беспорядочно. Поэтому диэлектрик в целом оказывается не поляризованным.



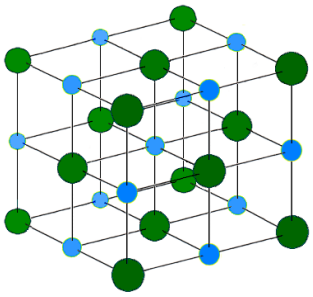
Под влиянием электрического поля все дипольные молекулы диэлектрика повернутся так, что их оси расположатся приблизительно вдоль силовых линий поля. Такого рода поляризация называется ориентационной или дипольной поляризацией. Полной ориентации препятствует тепловое движение. Такой механизм поляризации называется ***дипольным***.



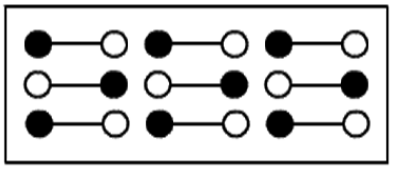
Если диэлектрик находится в однородном электрическом поле, то электрическая нейтральность любого его объема ΔV, содержащего достаточно большое число молекул, обеспечивается взаимной компенсацией противоположных по знаку зарядов диполей, расположенных рядом. В тонких слоях у поверхностей S_1 и S_2 диэлектрика, ограничивающих его объем, в результате поляризации диэлектрика возникают поверхностные поляризационные заряды.



К третьей группе относятся кристаллические вещества, имеющие ***ионное строение***. Характерный пример - хлористый натрий. Голубым цветом показаны положительные ионы натрия Na^+, зеленым – отрицательные ионы хлора Cl^-.

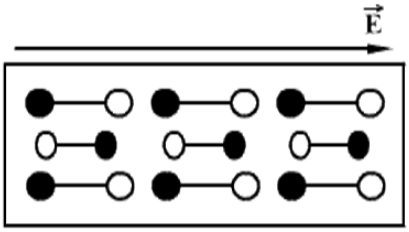


У кристаллических диэлектриков с ионной решеткой каждая пара соседних разноименных ионов подобна диполю.



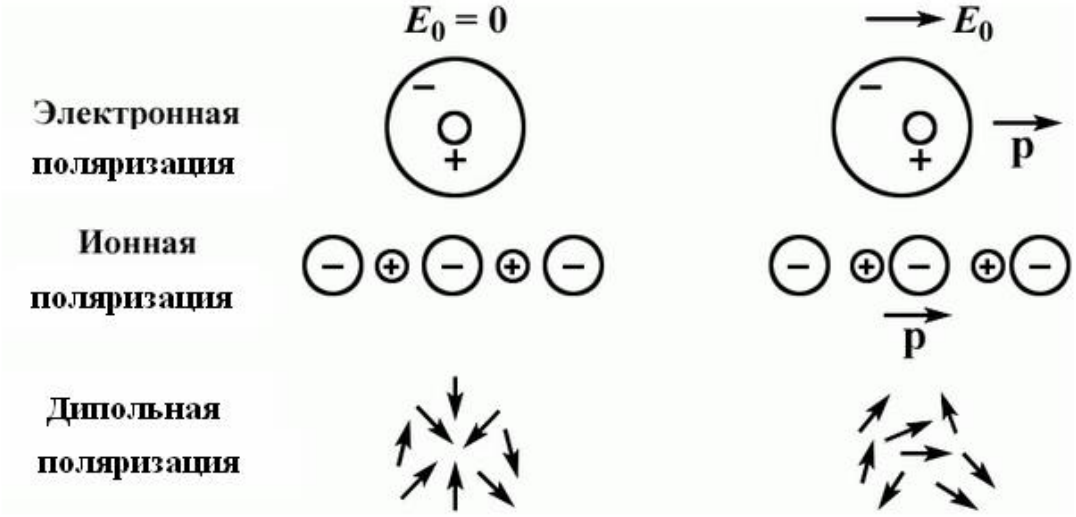
http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-9-dielektriki/

В электрическом поле эти диполи деформируются: удлиняются, если их оси направлены по полю, и укорачиваются, если оси направлены против поля.



В результате диэлектрик поляризуется. Такой механизм поляризации называется ***ионным***.

Сравним все три механизма –



Электронная поляризация обусловлена смещением электронной оболочки атома относительно ядра. ***Ионная*** поляризация вызвана смещением заряженных ионов по отношению к другим ионам. Ориентационная (***дипольная***) поляризация возникает, когда вещество состоит из молекул, обладающих постоянными электрическими дипольными моментами, которые могут более или менее свободно изменять свою ориентацию во внешнем электрическом поле.

Величина, характеризующая степень поляризации диэлектрика – ***вектор поляризации (поляризованность)***. Он равен сумме всех дипольных моментов в единице объема

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i}{\Delta V}.$$

http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-9-dielektriki/

Для определения степени поляризации в точке необходимо ΔV устремить к нулю. Вектор $\vec{P}$ направлен вдоль электрического поля $\vec{E}$, в котором находится диэлектрик. Для не слишком сильных полей можно принять, что величина вектора поляризации пропорциональна величине напряженности поля, т.е. P~E.

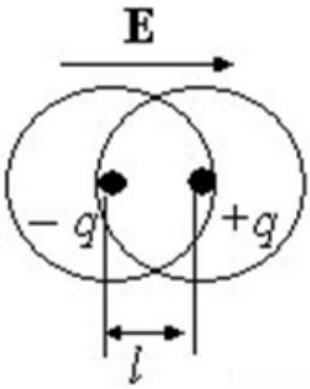
В системе СИ вектор поляризации

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0 \vec{E},$$

где χ - ***диэлектрическая восприимчивость*** вещества, справочная величина для конкретного вещества.

Поляризованность для разных механизмов поляризации

Электронный механизм поляризации



Во внешнем электрическом поле E положительные заряды внутри молекулы смещаются по направлению поля, а отрицательные в противоположном направлении, в результате чего молекулы приобретают дипольный момент, направленный вдоль внешнего поля

Индуцированный дипольный момент молекулы пропорционален напряженности внешнего электрического поля $p_i=\alpha\varepsilon_0 E$, где α - поляризуемость молекулы.

Значение поляризованности в этом случае равно

$$P=np_i ,$$

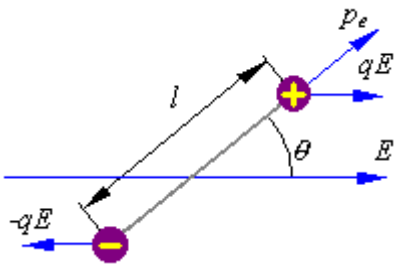
где n - концентрация молекул $n = \frac{N}{\Delta V}$;

p_i - индуцированный дипольный момент молекулы, который одинаков для всех молекул и направление которого совпадает с направлением внешнего поля.

Дипольный механизм поляризации

Характерен для ***полярных*** диэлектриков. В отсутствие внешнего электрического поля молекулярные диполи ориентированы случайным образом, так что макроскопический электрический момент диэлектрика равен нулю.

http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-9-dielektriki/

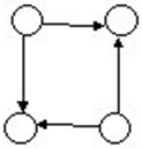


Если поместить такой диэлектрик во внешнее электрическое поле, то на молекулу-диполь будет действовать момент сил F, стремящийся ориентировать ее дипольный момент в направлении напряженности поля. Однако полной ориентации не происходит, поскольку тепловое движение стремится разрушить действие внешнего электрического поля.

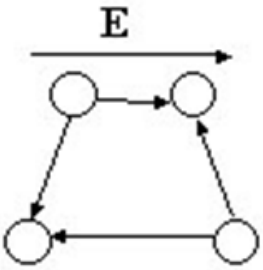
Такая поляризация называется ориентационной. Поляризованность в этом случае равна P=n<**p**> , где <**p**> - среднее значение составляющей дипольного момента молекулы в направлении внешнего поля.

Ионный механизм поляризации

В ионных кристаллах (NaCl и т.д.) в отсутствие внешнего поля дипольный момент каждой элементарной ячейки равен нулю –



Под влиянием внешнего электрического поля положительные и отрицательные ионы смещаются в противоположные стороны. Каждая ячейка кристалла становится диполем, кристалл поляризуется.



Поляризованность и в этом случае можно определить как $P=np_i$, где p_i - значение дипольного момента элементарной ячейки, *n* - число ячеек в единице объема.

Поляризованность изотропных диэлектриков любого типа связана с напряженностью поля соотношением $P=\chi\varepsilon_0 E$, где χ - *диэлектрическая восприимчивость* диэлектрика.

Физическая сущность поляризации

Поляризация, как и проводимость, обусловлена передвижением в пространстве электрических зарядов. Различия этих двух явлений:

1) при поляризации имеет место смещение *связанных* с определенными молекулами зарядов, не могущих выходить за пределы данной молекулы, в то время как проводимость обусловлена движением (дрейфом) свободных зарядов, могущих перемещаться в диэлектрике на сравнительно большое расстояние;

2) смещение при поляризации – ***упругий*** сдвиг зарядов; по окончании действия приложенного к диэлектрику напряжения смещенные заряды имеют тенденцию к возвращению в исходные положения, что для проводимости не характерно;

3) поляризация однородного материала имеет место практически во всех молекулах диэлектрика, в то время как электропроводность диэлектриков часто обусловливается наличием незначительного количества примесей (загрязнений).

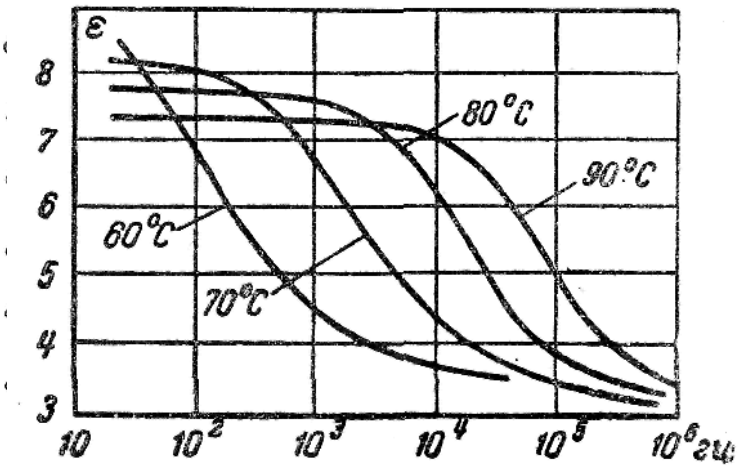
В то время как ток проводимости существует все время, пока к диэлектрику приложено извне постоянное напряжение, *ток смещения (емкостный ток)* возникает лишь при включении или выключении постоянного напряжения или вообще при изменении величины приложенного напряжения; *длительно* существует емкостный ток только в диэлектрике, находящемся под воздействием *переменного напряжения.*

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

Так как время установления деформационной поляризации весьма мало по сравнению с временем изменения знака напряжения даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной радиоэлектронике, поляризация нейтральных диэлектриков успевает установиться полностью за время, которым по сравнению с полупериодом переменного напряжения можно пренебречь. Поэтому практически существенной зависимости ε *от частоты* у нейтральных диэлектриков нет.

http://cifra.studentmiv.ru/ekm-teoriya-9-dielektriki/

У дипольных диэлектриков при повышении частоты переменного напряжения величина ε сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой *критической частоты,* когда поляризация не успевает полностью установиться за один полупериод, ε начинает снижаться, приближаясь при весьма высоких частотах к значениям, характерным для нейтральных диэлектриков; при повышении температуры критическая частота увеличивается.



В резко *неоднородных диэлектриках,* в частности в диэлектриках с вкраплениями воды, наблюдается явление так называемой *междуслойной* поляризации. Междуслойная поляризация сводится к накоплению электрических зарядов на границах раздела диэлектриков (в случае увлажненного диэлектрика — на поверхности вкрапленной воды). Процессы установления междуслойной поляризации весьма медленны и могут протекать на протяжении минут и даже часов. Поэтому увеличение емкости изоляции вследствие увлажнения последней тем больше, чем меньше частота переменного напряжения, приложенного к изоляции.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

У нейтральных диэлектриков ε слабо зависит от температуры, уменьшаясь при повышении последней вследствие теплового расширения вещества, т. е. уменьшения количества поляризующихся молекул в единице объема вещества.

У дипольных диэлектриков в области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью, ориентация дипольных молекул вдоль поля в большинстве случаев невозможна или во всяком случае затруднена. При повышении температуры и уменьшении вязкости возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего ε существенно возрастает. При высокой температуре вследствие

усиления тепловых хаотических тепловых колебаний молекул степень упорядоченности ориентации молекул снижается, что вновь приводит к снижению ε.

У кристаллов с ионной поляризацией, стекол, фарфора и других видов керамики с большим содержанием стекловидной фазы, диэлектрическая проницаемость возрастает при повышении температуры.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Если мы рассматриваем некоторый участок изоляции с электродами, к которым подается напряжение U [В], то заряд этого участка Q [Кл] определяется выражением

$$Q=CU\,.$$

Здесь C есть ***емкость*** данного участка изоляции, измеряемая в фарадах *(ф)*.

Емкость изоляции зависит как от материала (диэлектрика), так и от геометрических размеров и конфигурации изоляции.

Пусть C_o — емкость вакуумного конденсатора произвольной формы и размеров. Если, не меняя размеров, формы и взаимного расположения обкладок конденсатора, заполнить пространство между его обкладками материалом с диэлектрической проницаемостью ε, то емкость конденсатора увеличится и достигнет значения

$$C=\varepsilon\, C_o.$$

Таким образом, ***диэлектрическая проницаемость какого-либо вещества есть число, показывающее, во сколько раз увеличится емкость вакуумного конденсатора, если, не меняя размеров и формы электродов конденсатора, заполнить пространство между электродами данным веществом.***

Различают ***относительную*** и ***абсолютную диэлектрические проницаемости***.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε является безразмерной и показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Эта величина для воздуха и большинства других газов в нормальных условиях ***близка к единице*** (в силу их низкой плотности). Для большинства твёрдых или

жидких диэлектриков относительная диэлектрическая проницаемость лежит в диапазоне от ***2 до 8*** (для статического поля) и редко превышает значение 100.

Велики её значения для веществ с молекулами, обладающими большим электрическим дипольным моментом. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков составляет ***десятки и сотни тысяч***.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость в зарубежной литературе обозначается буквой ε, в отечественной преимущественно используется сочетание $\varepsilon\varepsilon_0$, где ε_0 — электрическая постоянная. Абсолютная диэлектрическая проницаемость используется только в Международной системе единиц (СИ), в которой индукция и напряжённость электрического поля измеряются в различных единицах. В единицах Международной системы единиц (СИ): $[\varepsilon_0]$=Ф/м.

Значения диэлектрической проницаемости для некоторых веществ

Вещество	Химическая формула	Условия измерения	Характерное значение ε_0
Вакуум	-	-	1
Воздух	-	Нормальные условия, 0,9 МГц	1,0005898 6 ± 0,00000050
Углекислый газ	CO_2	Нормальные условия	1,0009
Тефлон	-	-	2,1
Нейлон	-	-	3,2
Полиэтилен	$[-CH_2-CH_2-]_n$	-	2,25
Полистирол	$[-CH_2-C(C_6H_5)H-]_n$	-	2,4-2,7
Каучук	-	-	2,4
Битум	-	-	2,5-3,0
Сероуглерод	CS_2	-	2,6
Парафин	$C_{18}H_{38} – C_{35}H_{72}$	-	2,0-3,0
Бумага	-	-	2,0-3,5
Электроактивные полимеры	–	–	2-12
Эбонит	$(C_6H_9S)_2$	–	2,5-3,0
Плексиглас (оргстекло)	-	-	3,5
Кварц	SiO_2	-	3,5-4,5
Диоксид	SiO_2	–	3,9

кремния			
Бакелит	-	-	4,5
Бетон	–	–	4,5
Фарфор	–	–	4,5-4,7
Стекло	–	–	4,7 (3,7-10)
Стеклотекстолит FR-4	-	-	4,5-5,2
Гетинакс	-	-	5-6
Слюда	-	-	7,5
Резина	–	–	7
Поликор	98 % Al_2O_3	-	9,7
Алмаз	–	–	5,5-10
Поваренная соль	NaCl	–	3-15
Графит	C	–	10-15
Керамика	–	–	10-20
Кремний	Si	–	11.68
Бор	B	–	2.01
Аммиак	NH_3	20 °C	17
		0 °C	20
		−40 °C	22
		−80 °C	26
Спирт этиловый	C_2H_5OH или CH_3-CH_2-OH	–	27
Метанол	CH_3OH	–	30
Этиленгликоль	HO—CH_2—CH_2—OH	–	37
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	–	42
Глицерин	$HOCH_2CH(OH)$-CH_2OH или $C_3H_5(OH)_3$	0 °C	41,2
		20 °C	47
		25 °C	42,5
Вода	H_2O	200 °C	34,5
		100 °C	55,3
		20 °C	81
		0 °C	88
Плавиковая кислота	HF	0 °C	83,6
Формамид	$HCONH_2$	20 °C	84
Серная кислота	H_2SO_4	20-25 °C	84-100
Пероксид во-	H_2O_2	−30 °C —	128

дорода		+25 °C	
Синильная кислота	HCN	(0-21 °C)	158
Двуокись титана	TiO_2	-	86-173
Титанат кальция	$CaTiO_3$	-	170
Титанат стронция	$SrTiO_3$	-	310
Барий-стронций титанат	-	-	500
Титанат бария	$BaTiO_3$	(20-120 °C)	1250-10000
Цирконат-титанат свинца	($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$, $0<x<1$)		500-6000
Сополимеры	-	-	до 100000
Сульфид кадмия	CdS		9,3