

## Диелектрици – основни понятия

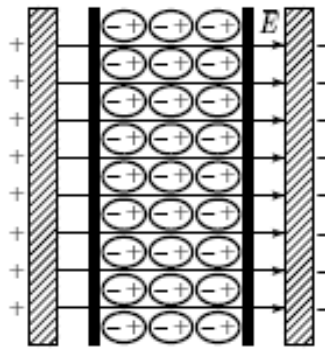
Към диелектриците се отнасят материали със специфично електрическо съпротивление условно над  $10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . От гледна точка на зонната теория, диелектрици условно се наричат вещества с ширина на забранената зона над 3 eV.

Характерните особености на диелектриците са: поляризация в електрично поле, високо специфично електрическо съпротивление, незначително разсейване на електричното поле, диелектрична устойчивост.

### Поляризация на диелектриците

При прилагане на електрично поле към диелектрик, не се наблюдава пренос на свободни носители на заряд, т.к. тяхната концентрация е нищожно малка. Наблюдава се отместване на свързаните заряди, предизвикващо появата на поляризационно състояние.

**Поляризация** се нарича състоянието на диелектрика, което се характеризира с наличие на електричен диполен момент на всеки елемент от неговия обем – фиг.1.



Фиг.1. Поляризация на безкраен плосък диелектрик.

Според начина на възникване се различават няколко вида поляризация: поляризация, възникваща под действието на външно електрично поле; спонтанна (самопроизволна) поляризация, съществуваща при отсъствие на електрично поле; поляризация, възникваща под действие на механични напрежения.

Способността на различните материали да се поляризират в електрично поле се характеризира с относителна диелектрична проницаемост:

$$\varepsilon = C_d / C_0,$$

където  $C_d$  е капацитетът на кондензатор с дадения диелектрик, а  $C_0$  е капацитетът на този кондензатор във вакуум (геометричния капацитет между електродите).

Абсолютната диелектрична проницаемост  $\varepsilon_a$  е свързана с относителната така:

$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0,$$

където  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  е диелектрична проницаемост във вакуум или диелектричната константа.

Количествена характеристика на поляризацията на диелектрика е векторът на **поляризация на диелектрика**, изразяващ електричния момент на единица обем:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{P}_i \quad (1)$$

или

$$\vec{P} = n_0 \vec{p},$$

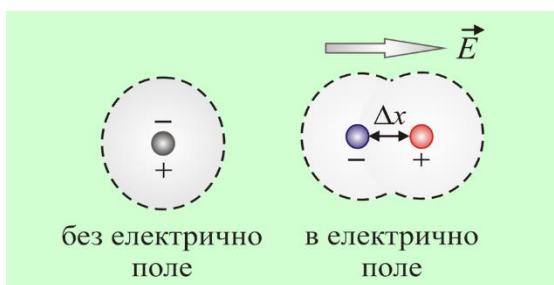
където  $\vec{P}$  - вектор на поляризацията;  $\vec{p}_i$  - електричен момент на  $i$ -тата молекула от обема  $\Delta V$ ;  $n_0$  - концентрация на молекулите – брой молекули в единица обем;  $\vec{p}$  - електричен момент, който е еднакъв за молекулите в единица обем.

**Механизми на поляризация.** В зависимост от строежа на диелектрика се различават:

- *Електронна поляризация.* Под действие на външно електрично поле с интензитет  $\vec{E}$  става еластично отместване на електронния облак на атома или молекулата със заряд  $q$ , спрямо ядрото, на разстояние:

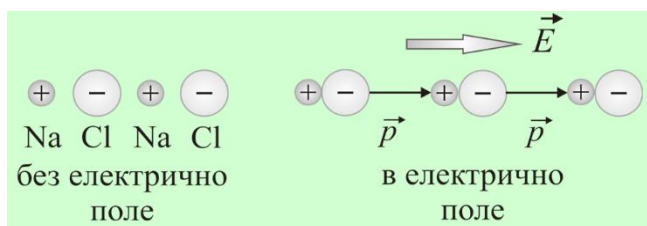
$$\Delta x = q.E/k, \text{ където } k \text{ е еластичната константа.}$$

Това е най-бързата поляризация и се осъществява до  $10^{-15}$  s. Не е свързана със загуби на енергия. След изключване на електричното поле, електронният облак мигновено се връща към равновесното си положение. Електронна поляризация на атом е показана на фиг. 2.



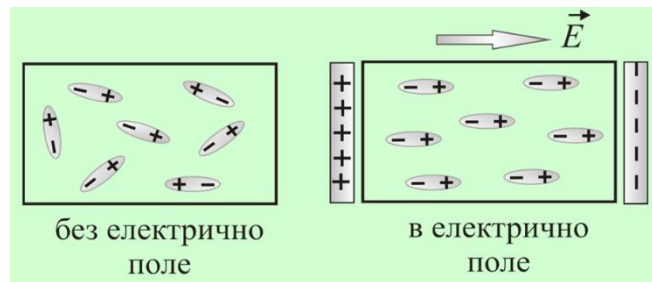
Фиг. 2. Електронна поляризация.

- *Йонна поляризация.* Под действие на външно електрично поле с интензитет  $\vec{E}$  става еластично отместване на йоните от равновесното им положение един спрямо друг на разстояние по-малко от периода на кристалната решетка. Поляризацията се осъществява за време  $10^{-13}$  s. Не е свързана със загуби на енергия. След изключване на електричното поле, йоните постепенно се връщат към равновесното си положение. Примерна поляризация на кристала на натриев хлорид - NaCl е показана на фиг. 3.



Фиг. 3. Йонна поляризация.

- *Диполно-релаксационна или ориентационна поляризация.* Под действие на външно електрично поле с интензитет  $\vec{E}$  става ориентация на диполите преимуществено по посока на полето. Тази поляризация е по-бавна от електронната и йонната. Протича със загуба на енергия, която отива за преодоляване на силите на свързване и на вътрешното триене. След изключване на електричното поле, частиците постепенно се разориентират. Такава поляризация е показана на фиг. 4.



Фиг. 4. Диполно-релаксационна или ориентационна поляризация.

- *Йонно-релаксационна поляризация.* Наблюдава се в йонни диелектрици с непълтна опаковка на йоните, например неорганични стъкла. В този случай под действие на външно електрично поле с интензитет  $\vec{E}$  става еластично отместване на йоните от равновесното им положение един спрямо друг на разстояние по-голямо от периода на кристалната решетка. След изключване на електричното поле, йоните постепенно се връщат към равновесното си положение.
- *Електронно-релаксационна поляризация.* Възниква за сметка на ориентирането във външно електрично поле на „излишни дефектни“ електрони и дупки.
- *Резонансна поляризация.* Възниква за сметка на ориентирането във външно електрично поле на частици, чиято собствена честота съвпада с тази на електричното поле.
- *Миграционна поляризация.* Възниква в материали, в които има слоеве с различна проводимост. Под действие на външно електрично поле, свободните електрони и йони се преместват (мигрират) в рамките на всеки слой и се натрупват на границите им, като образуват обемен заряд. Процесът протича със загуба на енергия. Миграционната поляризация е бавна – може да продължи от няколко секунди до часове в зависимост от структурата. Затова се наблюдава в полета с ниски честоти.
- *Спантанна (самопроизволна) поляризация.* Съществува при сегнетоелектриците, които имат неголеми поляризиращи области, наречени домени. При отсъствието на външно електрично поле, те са ориентирани хаотично. При прилагане на поле, домовете се ориентират по полето и диелектриктът се поляризира. Наблюдават се големи диелектрични загуби и силна зависимост на диелектричната проницаемост от температурата и интензитета на електричното поле. Диелектричната проницаемост има много големи стойности до  $10^5$ .

В зависимост от механизма на поляризация, диелектриците се класифицират така:

- *Линейни диелектрици.* Те имат линейна зависимост между заряда на кондензатора, в който се намира диелектрика и напрежението.
  - *Неполярни диелектрици.* Изградени са от молекули, които не притежават диполен момент, т.е. центърът на тежестта на положителния и отрицателния заряд съвпадат. Следователно, при отсъствие на външно електрично поле резултантният диполен момент на неполярния диелектрик е нула. Такива са молекулите на  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CCl_4$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  (метан),  $(C_2H_4)_n$  – полиетилен и др. Те имат основно само електронна поляризация.
  - *Полярни диелектрици.* Молекулите им имат постоянен диполен момент, т.е. центровете на положителните и отрицателните заряди са отместени на

постоянно разстояние. При отсъствие на външно електрично поле тези диполи са хаотично разположени, вследствие на взаимодействието между тях и топлинното им движение. Без външно електрично поле не притежават собствен диполен момент. Такива са молекулите на  $H_2O$ , метилов алкохол, етилов алкохол, спирт, силициевоорганични съединения, капрон, фенолформалдехидни смоли, поливинилхлорид, политрифлуорхлоретилен (фторопласт), полиетилентерефталат (лавсан), полиметилметакрилат (органично стъкло) и др. Те имат основно електронна и диполно-релаксационна поляризация.

- *Йонни диелектрици.* Хетерополярни кристали, изградени от йони. Без външно ЕП не притежават собствен диполен момент. Разделят се на две подгрупи:
  - *Диелектрици с йонна и електронна поляризация.* Такива са кварц, слюда, корунд, титаниев диоксид.
  - *Диелектрици с йонна, електронна и релаксационна поляризация.* Такива са неорганичните стъкла, керамиката.
- *Нелинейни диелектрици.* Те имат нелинейна зависимост между заряда на кондензатора, в който се намира диелектрика и напрежението. Формата е във вид на хистерезис. Към този клас се отнасят само сегнетоелектриците.

### Електропроводимост на диелектриците

При поляризацията става преместване на зарядите във веществото, което и обуславя появата на токове в диелектрика, наречени токове на преместване.

При електронната и йонната поляризации, токовете на преместване са кратковременни и не могат да се регистрират с приборите. Токовете на преместване при забавена поляризация, наблюдавани при много технически диелектрици, се наричат абсорбционни токове  $I_{абс}$ .

При постоянно напрежение абсорбционните токове протичат само в периода на превключване. При променливо напрежение те протичат през цялото време на прилагане на електрично поле.

Наличието на неголямо количество свободни носители на заряд, както и инжекция на такива от електродите, определят възникването на неголям ток на проводимост  $I_{пров}$ . След приключването на процесите на поляризация през диелектрика протича само ток на проводимост.

И така, плътността на тока в диелектрика (ток на утечките)  $j$  е сума от плътността на абсорбционния ток  $j_{абс}$  и тока на проводимост  $j_{пров}$ :

$$j = j_{абс} + j_{пров}$$

Плътността на тока на преместване се определя от скоростта на изменение на електричната индукция  $\vec{D}$ , включваща мигновените (електронни и йонни) и забавени премествания на зарядите:

$$j = \frac{d\vec{D}}{dt} = j_{абс}$$

В слаби електрични полета носители на заряд в диелектриците в болшинството случаи са йоните. В силни електрични полета, във връзка с процеса на ударна йонизация, започва да преобладава йонната проводимост.

Съпротивлението  $R$  на диелектрика, намиращ се между два плоски електрода, към които е приложено напрежение  $U$ , се изчислява по формулата:

$$R = \frac{U}{I - I_{abc}},$$

където  $I_{abc}$  е сума от токовете, предизвикани от всички забавени механизми на поляризация.

Твърдите диелектрици имат обемна и повърхностна електропроводимост. За оценка на тези величини се използват специфичното обемно  $\rho_v$  и специфичното повърхностно  $\rho_s$  съпротивление.

Специфичното обемно  $\rho_v$  съпротивление се намира по формулата:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h},$$

където  $R_v$  е обемното съпротивление,  $S$  е площта на електрода,  $h$  е дебелината на образеца.

Специфичното повърхностно  $\rho_s$  съпротивление се намира по формулата:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l},$$

където  $R_s$  е повърхностното съпротивление,  $d$  е ширината на електрода,  $l$  е разстоянието между електродите.

Пълната проводимост на твърдия диелектрик е сума от обемната и повърхностната проводимости:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s}.$$

Величината, характеризираща времето, в течение на което напрежението на електродите на кондензатора, изключени от захранването, намалява вследствие на разреждане  $e$  пъти, се нарича време константа или време на релаксация:

$$\tau = R.C = 8,85 \cdot 10^{-12} \rho \epsilon.$$

При продължителна работа под напрежение токът на проводимост през твърди или течни диелектрици с времето може да намалява или да нараства. Към намаляване води електропречистването на материала от йони на странични примеси. Към увеличаване води стареенето на материала, което създава нарастване на концентрацията на свободните носители на заряд.

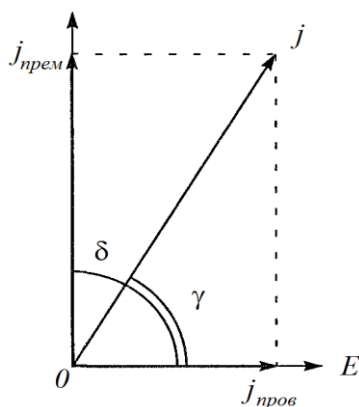
## Диелектрични загуби

Диелектричните загуби са свързани със сложни явления, които стават в материала при въздействие на електрично поле. Те се проявяват при постоянно и променливо поле. Но качеството на диелектрика в постоянно поле обикновено се характеризира с неговото специфично повърхностно и обемно съпротивление, а не с диелектрични загуби.

При въздействие на електричното поле върху диелектрика, част от електричната енергия се превръща в топлина и се разсейва. Разсеяната част от погълнатата от диелектрика електрична енергия се нарича диелектрични загуби. Или диелектричните загуби са електричната мощност, изразходвана за нагряване на диелектрика, намиращ се в електрично поле.

За характеризиране на способността на диелектрика да разсейва енергия в електрично поле се използват величините ъгъл на диелектричните загуби и тангес на този ъгъл.

В диелектрик, поставен в променливо електрично поле с интензитет  $E$  и ъглова честота  $\omega$ , възниква ток на преместване с плътност  $j_{\text{прем}}$  и ток на проводимост с плътност  $j_{\text{пров}}$  фиг.5. Ъгълът на диелектричните загуби  $\delta$  е ъгълът между векторите на плътността на променливия ток на диелектрика  $j$  и на тока на преместване  $j_{\text{прем}}$ . Или ъгълът на диелектричните загуби  $\delta$  е ъгълът, допълващ до  $90^\circ$  ъгълът на отместването на фазите  $\gamma$  между тока и напрежението в капацитивна електрична верига.



Фиг. 5. Векторна диаграма на плътността на тока в диелектрик.  $\delta$  е ъгълът между векторите на плътността на общия ток на диелектрика  $j$  и на тока на преместване  $j_{\text{прем}}$ ,  $\gamma$  е ъгълът на отместването на фазите между тока и напрежението.

Тангенсът на ъгъла на диелектричните загуби  $\text{tg}\delta$  определя активната мощност, която се отделя в диелектрика, работещ при променливо напрежение. Той се изразява с отношението на плътностите на тока на проводимост  $j_{\text{пров}}$  и на тока на преместване  $j_{\text{прем}}$

$$\text{tg}\delta = \frac{j_{\text{пров}}}{j_{\text{прем}}}.$$

Въвеждането на безразмерният параметър  $\text{tg}\delta$  е удобно, защото той не зависи от формата и размера на диелектрика, а само от свойствата на диелектричния материал.

Колкото повече се разсейва мощността в диелектрика, толкова по-малък е ъгълът на отместването на фазите  $\gamma$  и толкова по-голям е ъгълът на диелектричните загуби  $\delta$ .

Колкото по-голям е  $\text{tg}\delta$ , толкова повече се нагрява диелектрият в електричното поле със зададена честота и напрежение.

Диелектричните загуби могат да се разделят на следните видове:

- *Загуби на проводимост.* Такива загуби имат диелектриците със значителна проводимост. Тангенсът на ъгъла на диелектричните загуби може да се намери по формулата:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho},$$

където  $\varepsilon$  е диелектричната проникваемост,  $f$  е честотата,  $\rho$  е специфичното електрическо съпротивление на диелектрика.

- *Релаксационни загуби.* Такива загуби имат диелектриците със забавени видове поляризации. Проявяват се при високите честоти на електричното поле, когато се проявява изоставането на поляризацията от изменението на полето. Релаксационните загуби зависят от времето на релаксация  $\tau$  и честотата на изменение на полето  $\omega$ :

- при  $\tau \ll \frac{1}{\omega}$ , става пълна поляризация и практически няма загуби;
- при  $\tau \gg \frac{1}{\omega}$ , става незначителна поляризация и загубите са малки
- при  $\tau \approx \frac{1}{\omega}$ , времето на поляризация е сравнимо с периода на изменението на полето и загубите са максимални.

- *Йонизационни загуби.* Такива загуби се наблюдават в газове и пористи твърди диелектрици. Тангенсът на ъгъла на диелектричните загуби може да се намери по формулата за загуби на проводимост. Активните йонизационни загуби в порите могат приблизително да се сметнат по формулата:

$$P = Af(U - U_i)^3,$$

където  $A$  е емпирична константа,  $U_i$  е праговото напрежение на йонизация.

Йонизационните загуби водят до загряване на порите.

- *Резонансни загуби.* Резонансните загуби са свързани с резонансната поляризация. Проявяват се при съвпадение на честотата на електрическото поле със собствената честота на трептене на осцилаторите. При тези условия кондензаторът се държи като активно съпротивление.
- *Хистерезисни загуби.* Характерни са само за сегнетоелектриците, които имат доменна поляризация, съпровождаща се в променливи полета с диелектричен хистерезис. Хистерезисните загуби съществуват до температури до точката на Кюри.