

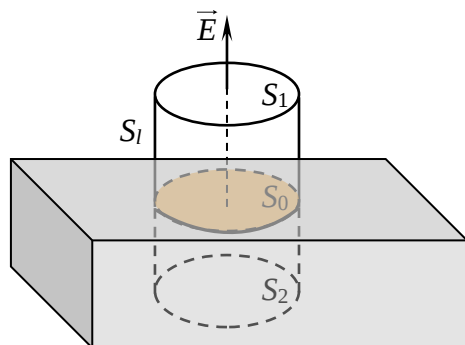
Проводник в електростатично поле. Електростатична индукция. Капацитет. Кондензатори. Енергия на електростатично поле. Диелектрик в електростатично поле. Видове диелектрици. Поляризация на диелектриците. Диелектрична възприемчивост и диелектрична проникваемост

Проводник в електростатично поле. Електростатична индукция

Проводниците са вещества, съдържащи свободни електрични заряди, които лесно могат да се придвижват при прилагане на външно електростатично поле. Типични проводници са металите, където ролята на свободни електрични заряди се изпълнява от валентните електрони. Проводници са също и разтворите на различни соли. При тях свободните заряди са положителни и отрицателни йони, получени при дисоциацията на молекулите. Ние ще разглеждаме основно метални проводници и затова когато нататък говорим за проводник ще разбираме метален проводник.

Първо ще изясним какво е поведението на проводника, когато не е поставен в електростатично поле. Ако проводникът не е зареден, положителните (на йоните от кристалната решетка) и отрицателните (на валентните електрони) заряди се компенсират и проводникът е електронеутрален. Сумарният заряд в проводника е нула, следователно интензитетът на полето в проводника също е нула. От това следва, че в цялата област на проводника потенциалът ϕ е постоянна величина ($d\phi/dr = 0$). Ако проводникът се наелектризира, под действие на кулоновите сили на отблъскване некомпенсирани електрични заряди се разпределят равномерно по повърхността на разглеждания проводник (възможно най-далеч един от друг). Интензитетът на електростатичното поле вътре в проводника отново става равен на нула, а повърхността му представлява екипотенциална повърхност. Следователно интензитетът на полето около заредения проводник ще бъде насочен перпендикулярно на повърхността на проводника. Големината на интензитета близо до повърхността на проводника можем да определим като използваме закона на Гаус. Избираме перпендикулярна на проводника цилиндрична затворена повърхност (фиг. 1), която пресича повърхността на проводника на площ S_0 ($S_0 = S_1 = S_2$). Зарядът $q = \sigma S_0$, който обхваща цилиндричната повърхност, се намира само върху площта S_0 (σ е повърхнинната плътност на зарядите). Като използваме определението за поток на интензитета и закона на Гаус получаваме:

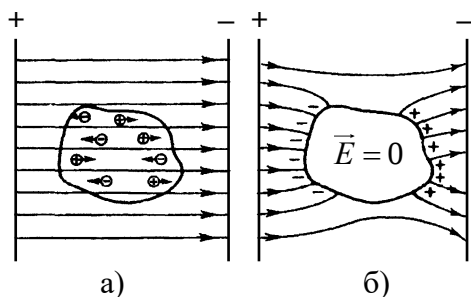
$$\begin{aligned}\Phi_E &= \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \int_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \int_{S_0} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \\ &= \int_{S_1} E \cos \alpha dS + \int_{S_2} E \cos \alpha dS + \int_{S_0} E \cos \alpha dS = \\ &= E \int_{S_1} dS + 0 + 0 = ES_1 = ES_0 = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S_0}{\epsilon_0} \\ E &= \frac{\sigma}{\epsilon_0}\end{aligned}$$



фиг. 1

Вторият и третият интеграл са равни на нула, тъй като вътре в проводника електростатичното поле е нула ($E=0$ за втория), а околната повърхност S_1 е перпендикулярна на вектора на интензитета ($\cos \alpha = 0$ за третия). Следователно интензитетът на електростатичното поле близо до заредената повърхност се определя от големината на повърхнинната плътност на зарядите σ .

Франклинова въртележка ...



фиг. 2

Нека сега да разгледаме по-подробно и процесите, които настъпват в проводника, когато е поставен във външно електростатично поле. Под действие на външното поле свободните заряди в проводника започват да се движат (фиг. 2а). Преместването им довежда до преразпределение на положителните и отрицателните заряди върху повърхността на проводника. Двете срещуположни стени се оказват заредени с разноименни заряди, които се наричат индуцирани. Тези заряди се разпределят по такъв начин, че създаденото от тях електростатично поле и външното поле се компенсират взаимно. В резултат на това полето вътре в проводника става равно на нула, а силовите линии на приложеното външно електростатично поле се прекъсват и

деформират (фиг 2б). Те са перпендикулярни на заредените повърхности на проводника, като завършват в отрицателните индуцирани заряди и започват от положителните. Процесът, при който става преразпределение на електричните заряди в даден проводник под действие на външно електростатично поле, се нарича електростатична индукция.

Наелектризиране по индукция ...

Капацитет. Кондензатори. Енергия на електростатично поле

Както казахме при зареждането на един проводник с някакво количество електричен заряд, зарядът се разпределя по неговата повърхност, която се оказва екипотенциална равнина ($\phi = \text{const}$). Тъй като потенциалът зависи от големината на заряда, логично е да се предположи, че ако предадем по-голям заряд на проводника, потенциалът на повърхността му ще бъде по-голям. Опитно е установена следната зависимост между потенциала ϕ на повърхността и количеството заряд Q , разпределено върху нея:

$$(1) Q = C\phi$$

Коефициентът на пропорционалност C се нарича електричен капацитет (или просто капацитет) на проводника. (Горният израз е в сила за всеки проводник, който се намира много далеч от други проводници и заредени тела, които могат да му влияят.) Капацитетът е физична величина, която определя големината на заряда, който трябва да предадем на даден проводник, за да стане потенциалът му 1 V . Мерната единица за капацитет се нарича фарад $[F]$. Един проводник има капацитет 1 F , ако при увеличаване на заряда му с 1 C потенциалът му се изменя с 1 V ($1 \text{ F} = 1 \text{ C}/1 \text{ V}$). Капацитетът зависи от формата и размерите на проводника, но не зависи от материала, агрегатното състояние и от това дали е плътен или кух, тъй като некомпенсираните заряди се разпределят по повърхността му

Нека да определим капацитета на заредена проводяща сфера с радиус R , върху чиято повърхност е разпределен равномерно заряд Q . Полето извън сферата е еквивалентно на полето на точков заряд в центъра на сферата. Следователно на повърхността на заредената сфера потенциалът ще бъде:

$$\phi = k \frac{Q}{R} = \frac{Q}{C},$$

откъдето за капацитета C получаваме:

$$(2) C = \frac{R}{k} = 4\pi\epsilon_0 R.$$

Виждаме, че капацитетът на сферата с точност до константа се определя от големината на радиуса ѝ (ако сферата е в среда, различна от вакуум, с диелектрична проникваемост ϵ капацитетът ѝ $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R$).

От (2) можем да определим и често използваната мерна единица за електричната константа ϵ_0 – $[F/m]$.

Система от два изолирани един от друг проводника, които са заредени разноименно с еднакви по големина електрични заряди, се нарича кондензатор. Най-простият кондензатор е плоският – състои се от две заредени пластинки с еднаква площ S , разположени на разстояние d една от друга. Зарядите на пластинките са равни по големина и противоположни по знак: Q и $-Q$. Силовите линии започват от положителната пластинка и завършват в отрицателната. Електростатичното поле е съсредоточено в пространството между двете пластинки, което се запълва с диелектрик с диелектрична проникваемост ϵ_r . Ако потенциалите на двете пластинки са ϕ_1 и ϕ_2 , капацитетът на кондензатора се определя от следното отношение:

$$(3) C = \frac{Q}{\Delta\phi},$$

където Q е големината на заряда върху всяка от пластинките, а $\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2|$ е големината на потенциалната разлика между тях.

Нека да определим от какво зависи капацитетът на плосък кондензатор. Можем да определим големината на интензитета E на полето между пластинките и да го свържем със заряда Q върху всяка от пластинките и с потенциалната разлика $\Delta\phi$:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon_r} = \frac{Q}{S\epsilon_0\epsilon_r} \Rightarrow Q = ES\epsilon_0\epsilon_r$$

$$E = \frac{\Delta\phi}{dr} = \frac{\Delta\phi}{d} \Rightarrow \Delta\phi = Ed$$

Повърхнинната плътност $\sigma = Q/S$, а разстоянието $\Delta r = d$. Като заместим получените стойности за Q и $\Delta\phi$ в (3), за капацитета C на плоския кондензатор получаваме:

$$(4) C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}.$$

Виждаме, че той също зависи само от размерите, формата и веществото, с което е запълнен, но не и от заряда или потенциалната разлика между плочите.

Нека да определим енергията на електростатичното поле, запасена в кондензатора. Това е електростатичната потенциална енергия на кондензатора и трябва да е равна на работата, която е извършена за зареждането му с определено количество заряд Q . Затова първо ще пресметнем работата, която трябва да се извърши, за да се зареди един проводник. Всеки проводник зареден със заряд Q , има потенциал $\varphi(Q) = Q/C$. За да му предадем заряд dQ трябва да извършим работа dA против електростатичните сили ($dA = -dA_e$) за пренасяне на заряда dQ от безкрайност до проводника. Първо ще пресметнем работата A_e на електростатичните сили:

$$dA_e = -dQ(\varphi_2 - \varphi_1) = -dQ(\varphi(Q) - \varphi_\infty) = -\varphi(Q)dQ = -\frac{Q}{C}dQ,$$

тъй като потенциалът на полето на проводника в безкрайност е нула. Тогава работата на електростатичните сили при зареждане на проводника от заряд Q_1 до Q_2 ще бъде:

$$A_e = \int_1^2 dA_e = -\int_{Q_1}^{Q_2} \frac{Q}{C} dQ = -\frac{1}{2C} Q^2 \Big|_{Q_1}^{Q_2} = -\left(\frac{1}{2} \frac{Q_2^2}{C} - \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{C} \right) = -\Delta U = -(U_2 - U_1).$$

Използвахме връзката между работата на консервативната сила и потенциалната енергия ($A = -\Delta U$). Виждаме, че потенциалната енергия на зареден проводник се дава с израза:

$$U(Q) = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

Ако в началният момент проводникът не е бил зареден ($Q_1 = 0$) виждаме, че работата на електростатичните сили при зареждането му до заряд Q е равна на взетата със знак минус потенциална енергия на заредения проводник, т.е. работата, която ние трябва да извършим е равна точно на потенциалната енергия, която е получил проводникът ($A = -A_e$):

$$(5) A = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{1}{2} Q \varphi.$$

За плоския кондензатор $\Delta\varphi = Ed$ и като използваме (3), (4) и (5) за енергията на плоския кондензатор получаваме:

$$U = A = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C (\Delta\varphi)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 S d.$$

Като имаме предвид, че произведението $V = Sd$ е обемът на кондензатора, можем да определим енергията на единица обем или плътността на енергията w , която се явява характеристика на самото електростатично поле, тъй като не зависи от геометричните характеристики на кондензатора:

$$w = \frac{U}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2.$$

Видове диелектрици. Диполен момент

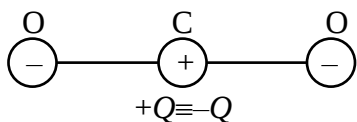
Диелектриците са вещества, които не съдържат свободни електрични заряди. Те са изградени като всички тела от атоми и молекули. За да се разбере тяхното поведение в електростатично поле, е необходимо да се разгледа поведението на електричните заряди на отделните диелектрични атоми или молекули. Всеки атом от диелектрика може да се представи във вид на точково положително ядро и съвкупност от електрони, които обикалят около ядрото по електронни орбити. Като цяло атомите и молекулите са електронеутрални, тъй като съдържат еднакво количество положителни и отрицателни електрични заряди. При прилагане на външно електростатично поле те не се движат, а само се преориентират по посока на полето. Електричните заряди в диелектриците не могат да напускат границите на атомите или молекулите и се наричат свързани заряди.

С известно приближение молекулите на диелектриците могат да се разглеждат като електрични диполи. Електричен дипол се нарича система от два разноименни заряда с еднаква големина Q , които са разположени на определено разстояние един от друг. Всеки електричен дипол се характеризира с величините рамо на дипола $\vec{l}$ и електричен диполен момент $\vec{p}_l$. Векторът, съединяващ двата електрични заряда с посока от отрицателния към положителния, се нарича рамо на дипола. Диполният момент се определя от равенството:

$$(6) \vec{p}_l = Q\vec{l}.$$

Посоката на диполния момент се определя от посоката на рамото (от „-“ към „+“). Мерната единица е [C.m]. Действието на положителните и отрицателните заряди в една диелектрична молекула е такова, че те могат да се разглеждат като съсредоточени в две различни точки, наречени съответно център на положителните и център на отрицателните заряди. Ако с l означим разстоянието между тези два центъра, а с $+Q$ и $-Q$ – съответно общия положителен и отрицателен заряд на молекулата, нейният диполен момент ще се определя от равенството (6).

В зависимост от строежа на молекулите, от които са изградени, диелектриците се разделят на две групи: неполярни и полярни диелектрици. Неполярните диелектрици съдържат неполярни молекули, а полярните диелектрици – полярни молекули. Ще се спрем накратко на характерните особености на двата вида молекули и ще разгледаме поведението им във външно електростатично поле.



фиг. 3

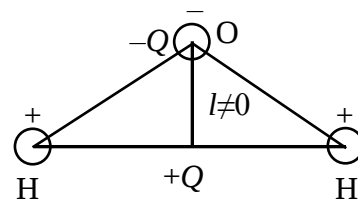
Неполярните молекули имат симетричен строеж. При тях центровете на положителните и отрицателните заряди съвпадат ($\vec{l} = 0$), поради което те нямат собствен диполен момент ($\vec{p}_l = 0$) и затова се наричат неполярни. Примери за неполярни диелектрици са въглеродният диоксид (CO_2) (фиг. 3), водородът (H_2), азотът (N_2), кислородът (O_2) и др. Ако поставим една неполярна молекула във външно електростатично поле,

двата центъра (на положителните и отрицателните заряди) се отдалечават един от друг. Ядрата на атомите се отместват в една посока, а електроните в противоположната. В резултат на това молекулата придобива диполен момент $\vec{p}_l \neq 0$, който се нарича индуциран и се определя от следното равенство:

$$\vec{p}_l = \beta \epsilon_0 \vec{E}.$$

Величината β се нарича поляризуемост на молекулата и зависи от обема ѝ, $\vec{E}$ е интензитетът на приложеното електростатично поле.

Полярните молекули имат несиметричен строеж. При тях центровете на положителните и отрицателните заряди не съвпадат и те притежават собствен диполен момент $\vec{p}_l \neq 0$ ($\vec{l} \neq 0$). Наричат се полярни, тъй като имат диполен момент, различен от нула и в отсъствие на приложено електростатично поле. Примери за полярни диелектрици са водата (H_2O) (фиг. 4), амонякът (NH_3), солната киселина (HCl), въглеродният оксид (CO) и др. Когато поставим една полярна молекула във външно електростатично поле, нейният диполен момент се завърта и се ориентира по посока на полето, но големината му практически не се променя.



фиг. 4

Защо не се променя ...

Нека сега разгледаме поведението на двата вида диелектрици в отсъствие и при наличие на външно електростатично поле. Неполярният диелектрик в отсъствие на електростатично поле е електронеутрален. Отделните молекули, от които е изграден, нямат диполни моменти, следователно и общият диполен момент на диелектрика е равен на нула. Полярният диелектрик се характеризира с различни от нула диполни моменти на отделните молекули. В отсъствие на електростатично поле вследствие на хаотичното топлинно движение диполните моменти на отделните молекули са ориентирани в най-различни посоки. Общият диполен момент на диелектрика в този случай също е равен на нула.

Поляризация на диелектриците. Диелектрична възприемчивост и диелектрична проницаемост

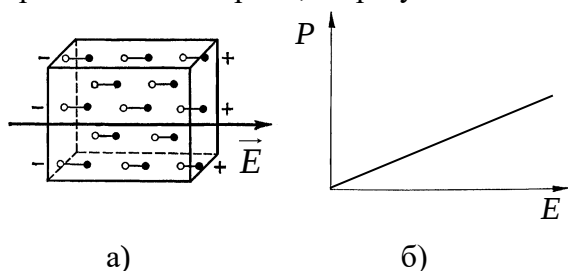
При поставянето на кой да е от двата вида диелектрици във външно електростатично поле настъпва процес на диелектрична поляризация: явление, при което на две срещуположни повърхности на диелектрика, разположени перпендикулярно на посоката на приложеното електростатично поле, се появяват разноименни електрични заряди. Тези заряди се характеризират с величината повърхнинна плътност на свързаните заряди, която се означава със σ_p и по големина е еднаква за двете повърхности ($\sigma_p^+ = \sigma_p^- = \sigma_p$). Поляризацията на диелектрика е процес на привеждането му в състояние, при което в рамките на малък обем от веществото геометричната сума от векторите на диполните моменти се оказва различна от нула. Всеки диелектрик, в който е протекъл процес на поляризация, се нарича поляризиран. Като количествена мярка за степента на поляризация на диелектрика се въвежда векторната физична

величина диелектрична поляризация, която се определя от общия диполен момент на единица обем от диелектрика:

$$(7) \quad \vec{P} = \frac{\vec{P}_V}{V} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i}{V},$$

където V е общият обем на диелектрика, $\vec{p}_i$ – диполният момент на една отделна молекула, N – броят на молекулите в целия обем V , а $\vec{P}_V$ – пълният диполен момент за целия обем V . От (7) се вижда, че мерната единица за диелектрична поляризация е $[C/m^2]$. Механизмът на процеса поляризация е различен за неполярните и полярните диелектрици, затова ще разгледаме поотделно двата случая.

Ако в дадено електростатично поле внесем неполярен диелектрик, в него настъпва електронна поляризация. В неполярните молекули се осъществява отместване на центровете на положителните и отрицателните заряди, в резултат на което те се превръщат от неполярни в полярни молекули с



фиг. 5

индуциран диполен момент. Индуцираните диполни моменти са по посока на интензитета на полето. В действителност това отместване на центровете представлява деформация на електронните орбити в атомите, затова и настъпила поляризация се нарича електронна. Тя не зависи от температурата на диелектрика, тъй като топлинното движение не влияе на положението на центровете на положителните и отрицателните заряди (фиг. 5а). Интерес представлява зависимостта на електронната

поляризация на диелектрика от големината на интензитета на приложеното електростатично поле. Ако неполярният диелектрик, който разглеждаме, е еднороден (съставен от еднакъв вид молекули) и полето е хомогенно ($\vec{E} = \text{const}$), индуцираните диполни моменти на всички молекули ще бъдат еднакви по големина и строго ориентирани по посока на полето (поляризацията е пълна). Общият индуциран диполен момент за единица обем ще бъде $\vec{P} = n\vec{p}_i$, където n е концентрацията на молекулите, а $\vec{p}_i = \beta\epsilon_0\vec{E}$ диполният момент на една молекула. Тогава диелектричната поляризация е:

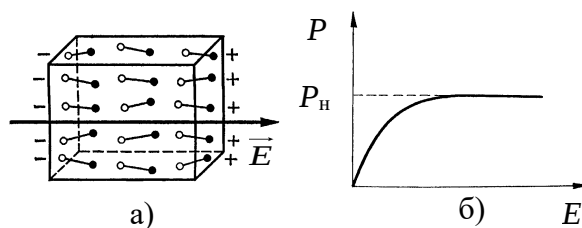
$$(8) \quad \vec{P} = n\beta\epsilon_0\vec{E} = \chi\epsilon_0\vec{E}.$$

Коефициентът $\chi = n\beta$ се нарича диелектрична възприемчивост и характеризира свойството на всеки диелектрик да се поляризира във външно поле (χ е безразмерна величина, винаги по-голяма от нула).

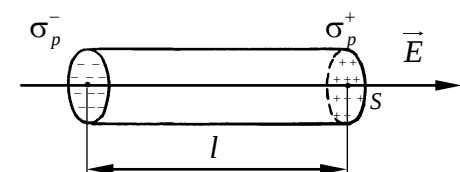
На фиг. 5б е показана зависимостта на електронната поляризация от интензитета, тя е линейна, което следва и от (8). С нарастването на интензитета се увеличава и общият диполен момент за единица обем на диелектрика. (За различните диелектрици наклонът на правата е различен.)

Пояснение за наклона ...

А сега нека внесеният във външно електростатично поле диелектрик е полярен. Поляризацията, която настъпва, се нарича ориентационна. Различно ориентираните диполни моменти на отделните молекули (поради топлинното хаотично движение) се ориентират по посока на полето. Поляризацията на диелектрика в този случай не е пълна, тъй като тя се влияе от температурата на диелектрика (фиг. 6а). Електростатичното поле се стреми да ориентира диполите на диелектрика в една определена посока, а топлинното движение променя тази ориентация. Ориентацията ще бъде толкова по-пълна, колкото интензитетът на приложеното поле е по-голям и топлинното движение на молекулите е по-слабо интензивно (ниска температура на диелектрика). Ориентационната поляризация зависи нелинейно от интензитета на полето (фиг. 6б). За малки стойности на интензитета зависимостта е линейна. С нарастването на E увеличаването на P се забавя и при определена стойност на E настъпва насищане, при което диполните моменти на всички молекули се ориентират по полето.



фиг. 6



фиг. 7

Пояснение за наклона ...

Нека да определим връзката между диелектричната поляризация и повърхнинната плътност на свързаните заряди. Да разгледаме един

малък цилиндричен образец от някакъв диелектрик с основа S и височина l , който е поставен в електростатично поле с интензитет $\vec{E}$ насочен по оста на цилиндъра (фиг. 7). Повърхнинните плътности на свързаните заряди, появяващи се върху двете срещуположни стени на образца, които са перпендикулярни на $\vec{E}$, ще бъдат съответно σ_p^+ и σ_p^- ($\sigma_p^+ = \sigma_p^- = \sigma_p$). Общите количества положителни и отрицателни заряди, които са разпределени равномерно по двете основи S , ще бъдат съответно $Q^+ = \sigma_p^+ S$ и $Q^- = \sigma_p^- S$. Цилиндърът можем да разгледаме като електричен дипол с големина на диполния момент $p_l = Ql = \sigma_p Sl = \sigma_p V$. Тогава големината на диелектричната поляризация P на дипола ще бъде:

$$(9) P = \frac{\sigma_p V}{V} = \sigma_p.$$

Следователно диелектричната поляризация на образца се определя от повърхнинната плътност на свързаните заряди на срещуположните стени на дадения диелектрик.

Накрая ще определим интензитета на резултантното електростатично поле, което възниква при поставяне на неполярен диелектрик във външно електростатично поле. Нека две безкрайни, успоредни и равномерно заредени равнини с повърхнинна плътност на свободните електрични заряди σ^+ и σ^- създават хомогенно електростатично поле с интензитет $\vec{E}_0$ във вакуум. Силовите линии на интензитета са насочени от положително към отрицателно заредената равнина и са перпендикулярни на двете равнини (фиг. 8). Ако внесем пластинка от еднороден неполярен диелектрик в това поле, под влияние на полето диелектрият се поляризира, като на двете срещуположни стени на пластинката се появяват некомпенсирани свързани електрични заряди с повърхнинна плътност съответно σ_p^+ и σ_p^- . Те създават в диелектрика собствено еднородно електростатично поле с интензитет $\vec{E}_p$,

насочен в посока, обратна на $\vec{E}_0$. Следователно интензитетът на сумарното (резултантно) поле в диелектрика ще има големина $E = E_0 - E_p$. Големината на интензитета E_p можем да определим, като използваме формулата за интензитет на полето между две успоредни равнини, (4) и (3):

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} = \frac{P}{\epsilon_0} = \frac{\chi \epsilon_0 E}{\epsilon_0} = \chi E$$

и за големината на интензитета E получаваме:

$$E = E_0 - \chi E$$

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon_r}.$$

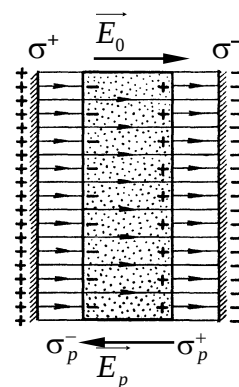
Величината $\epsilon_r = 1 + \chi$ се нарича относителна диелектрична проницаемост. Тя е характерна величина за всеки диелектрик и също както χ определя количествено свойството му да се поляризира при поставяне във външно електростатично поле. Както и диелектричната възприемчивост χ , диелектричната проницаемост ϵ_r е безразмерна величина. За вакуум $\epsilon_r = 1$, а $\chi = 0$, а за всяка диелектрична среда, различна от вакуум, $\epsilon_r > 1$. Относителната диелектрична проницаемост показва колко пъти интензитетът на електростатичното поле в диелектрична среда е по-малък от интензитета на електростатичното поле във вакуум.

Пробив в диелектрик ...

Стойностите на относителната диелектрична проницаемост ϵ_r зависят от стойностите на диелектричната възприемчивост χ . За повечето диелектрици χ и ϵ_r имат стойности, по-малки от 10. Например за хартията $\epsilon_r = 2$, за стъклото $\epsilon_r = 5 \div 10$, за слюдата $\epsilon_r = 4 \div 8$, а за порцелана $\epsilon_r = 6$. Изключение прави водата, за която $\epsilon_r = 81$.

Освен „стандартните“ диелектрици, които разгледахме досега, съществуват и такива с екзотични свойства, които намират голямо приложение. Сегнетоелектриците (наричат ги още и фероелектрици) запазват електричната си поляризация и след изключване на външното поле, пироелектриците променят поляризацията си при нагряване, пиезоелектриците – при прилагане на допълнително налягане и др.

Запалка ...



фиг. 8