

5. ПРОВОДНИЦИ И ДИЕЛЕКТРИЦИ В ЕЛЕКТРИЧНО ПОЛЕ

1. Проводници

Проводникът е вещество, което съдържа в структурата си свободни електрични заряди.

Свободните електрични заряди са заряди, които под действие на електрично поле могат да се преместват вътре в обема на проводника на разстояния много по-големи от размерите на йоните.

Проводниците се разделят на два големи класа:

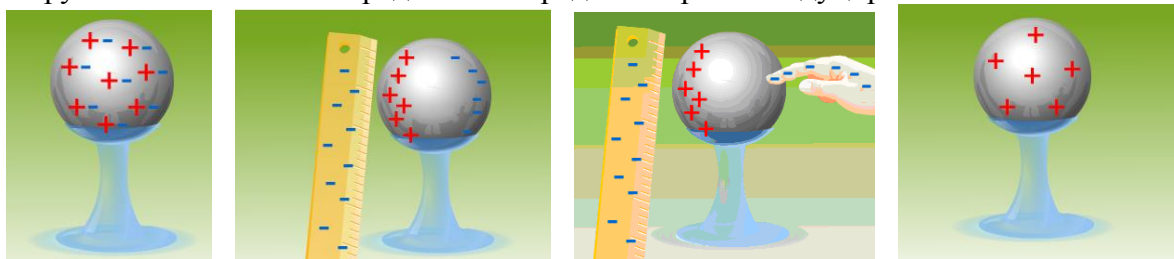
- **проводници от първи род** – метали и техните сплави;
- **проводници от втори род** – електролити.

Свободни електрични заряди за проводниците от първи род са слабо свързаните с кристалната решетка електрони, които се движат между йоните и образуват електронен газ. При прилагане на електрично поле, електроните много бързо се преместват от едно място на проводника към друго – за време приблизително 10^{-19} s.

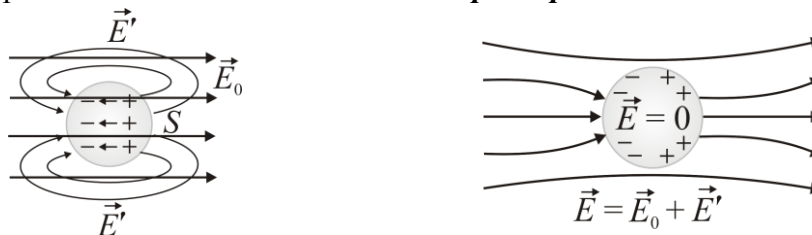
Свободни електрични заряди за проводниците от втори род са положителните и отрицателните йони. При прилагане на електрично поле те се преместват, но хиляди пъти по-бавно от електроните в металите.

2. Незареден проводник, поставен във външно електрично поле.

Електростатична индукция се нарича явлението, при което под действие на външно електрично поле свободните електрони в проводниците се преразпределят така, че да заемат една част от повърхността на проводниците, в която се натрупват отрицателни заряди, а другата част остава с недостиг на електрони, т.е. там се натрупват положителни заряди. Тези заряди се наричат индуцирани.

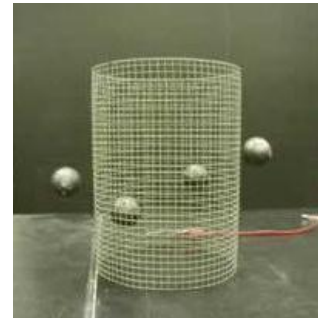


Разглеждаме незареден проводник с произволна форма S , поставен във външно поле \vec{E}_0 . Индуцираните заряди създават поле, с интензитет \vec{E}' , който е обратно насочен на интензитета на външното поле \vec{E}_0 . Разделянето на зарядите продължава, докато двата интензитета се изравнят по големина и **полето вътре в проводника \vec{E} стане нула**.



Интензитетът на електричното поле във всички точки, вътре в проводника е нула.

Тъй като вътрешността на проводника не участва в нулирането на полето, то тя може да се отстрани. Така се получава кухина, затворена от повърхността на проводника, в която са изпълнени зависимостите $\vec{E} = 0$. Тази затворена метална повърхност S се нарича **електростатичен екран**. Тя екранира пространството вътре в S от външното поле \vec{E}_0 , т.е. външните заряди или електрични полета не създават вътре в проводника никакво електрично поле. Това свойство се използва за электростатична защита на уреди и помещения, които трябва да бъдат предпазени от външни полета. За целта уредите се поставят в метална обвивка. В някои случаи е достатъчна една метална мрежа – такива мрежи например предпазват високопланинските постройките от атмосферното електричество.



3. Поле на наелектризиран проводник

Във вътрешността на проводник е внесено определено количество заряд $+q$ чрез подходяща опитна установка, т.е. проводникът е наелектризиран.

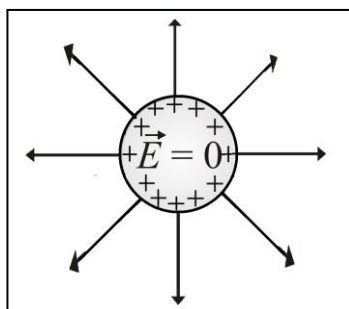


а) поле вътре в проводника

Зарядите ще се стремят да се отдалечат максимално под действие на кулоновите сили на отблъскване и ще се разположат по повърхността на проводника S . В резултат на това обемният заряд вътре в проводника ще е нула и електричното поле ще бъде нула.

Електричното поле във вътрешността на наелектризиран проводник е нула, потенциалът във всички точки на проводника е постоянен и повърхността на проводника е **еквипотенциална**.

б) поле вън от проводника



Повърхността на проводника е еквипотенциална, следователно векторът на интензитета \vec{E} е перпендикулярен на повърхността на проводника, във всяка нейна точка.

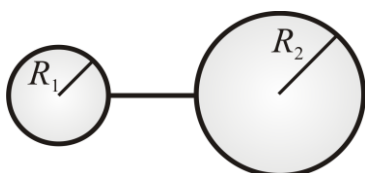
Извън проводника силовите линии на полето са перпендикулярни на неговата повърхност.

Установено е, че интензитетът на полето в непосредствена близост извън проводника е:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

където $\sigma = q/S$ е повърхностната плътност на заряда. Следователно полето е пропорционално на повърхностната плътност на заряда σ и ако повърхността на проводника е заредена неравномерно, то полето няма да е хомогенно.

в) разпределение на зарядите по повърхността на проводника



Разглежда се подходящ модел на проводник – две заредени метални сфери с различни радиуси R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$), свързани с тънък проводник. Сферите и съединителният проводник образуват едно цяло, т.е. един проводник.

Тогава неговата повърхност е екипотенциална и следователно потенциалите на сферите са равни:

$$\varphi_1 = \varphi_2; \quad \varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1}; \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} \Rightarrow \frac{q_1}{R_1} = \frac{q_2}{R_2},$$

където q_1 е зарядът разпределен по първата сфера с радиус R_1 (повърхност S_1), а q_2 е зарядът разпределен по втората сфера с радиус R_2 (повърхност S_2).

Зарядите се изразяват чрез повърхностната плътност на заряда:

$$q_1 = \sigma_1 S_1 = \sigma_1 4\pi R_1^2; \quad q_2 = \sigma_2 S_2 = \sigma_2 4\pi R_2^2.$$

Замества се и се получава, че:

$$\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2 \quad \text{или} \quad \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Използва се уравнение (1) и се получава следният израз:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Следователно:

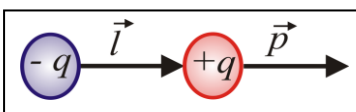
$$\sigma \sim \frac{1}{R} \quad \text{или} \quad E \sim \frac{1}{R}. \quad (2)$$

Тъй като σ и E са обратно пропорционални на радиуса на кривината на проводника, следва че в по-острите части на проводника (където R е малко), интензитетът на полето E ще е по-голям, т.к. в тези части повърхностната плътност на заряда σ е по-голяма. Затова при високи напрежения се избягват заострените ръбове.

В заострените краища на зареден проводник интензитетът на електричното поле е много голям, тъй като там се натрупват най-много некомпенсирани заряди и в резултат на това около острието възниква силно нееднородно електрично поле.

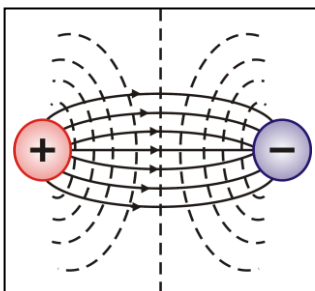
4. Електричен дипол

Електричният дипол е система от два равни по големина и противоположни по знак точкови заряди $-q$ и $+q$, разположени на достатъчно малко разстояние l един от друг.



Характеристика на електричния дипол е векторната величина: $\vec{p} = q\vec{l}$, която се нарича **диполен момент** или **електричен момент на дипола**.

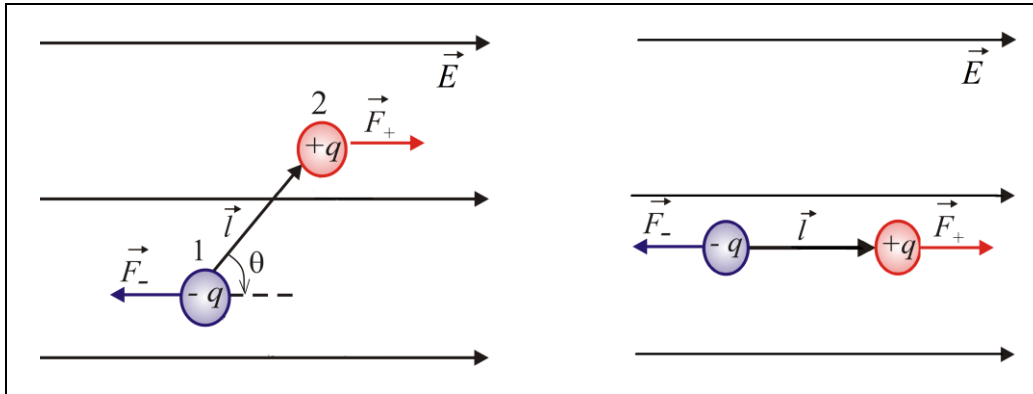
Радиус-векторът \vec{l} , прекаран от отрицателния към положителния заряд и равен на разстоянието между тях, се нарича **рамо на дипола**.



Ако големината на вектора \vec{l} е пренебрежимо малка в сравнение с разстоянието от дипола до точката на наблюдение, диполът се нарича **точков дипол**.

Електричният дипол като цяло е електронеутрален, но създава електрично поле. На фигурата с непрекъснати линии са означени силовите линии, а с пунктирани линии - екипотенциалните повърхнини.

Когато електричният дипол се постави във външно еднородно електрично поле \vec{E} , то ще му действа с две равни по големина и противоположно насочени електрични сили \vec{F} . Двете сили ще завъртят дипола докато се урівновесят и тогава диполът ще се ориентира по посока на полето.



5. Диелектрици

Диелектриците са вещества, които при прилагане на напрежение практически не провеждат електричен ток.

Диелектриците имат специфична проводимост приблизително 10^{20} пъти по-малка от тази на металите. Те нямат свободни носители на заряд (които да провеждат електричен ток), тъй като техните заряди са свързани в молекули или атоми.

Диелектриците се делят на три вида:

- **Неполярни диелектрици** – изградени са от молекули, които не притежават диполен момент, т.е. центровете на положителните и отрицателните заряди съвпадат.

Следователно, при отсъствие на външно електрично поле резултантният диполен момент на неполярния диелектрик е нула.

Пример: Молекулите на водорода (H_2), азота (N_2), кислорода (O_2), тетрахлорметана (CCl_4), въглеродния диоксид (CO_2), метана (CH_4) и др.

- **Полярни диелектрици** – молекулите им могат да се моделират като електричен дипол, 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 полярните диелектрици не притежават собствен диполен момент.

Пример: Молекулите на водата (H_2O), метиловия алкохол (CH_3OH), етиловия алкохол (C_2H_5OH) и др.

- **Йонни кристали** – това са кристални структури, изградени от положителни и отрицателни йони, които образуват две подрешетки. Без външно електрично поле йонните кристали не притежават собствен диполен момент.

Пример: Кристалите на натриевия хлорид ($NaCl$), калиевия хлорид (KCl), калциевия дихлорид ($CaCl_2$) и др.

6. Поляризация на диелектрика

При внасяне на диелектрик във външно електрично поле, той се поляризира, т.е. придобива диполен момент.

Количествена характеристика е векторната величина **поляризация** – диполният момент на единица обем:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{p}_i. \quad (3)$$

Сумирането се извършва за всички диполи в обема ΔV . \vec{P} е векторът на поляризацията, а \vec{p}_i е диполният момент на i -тата молекула от обема ΔV .

Уравнението може да се запише и така:

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

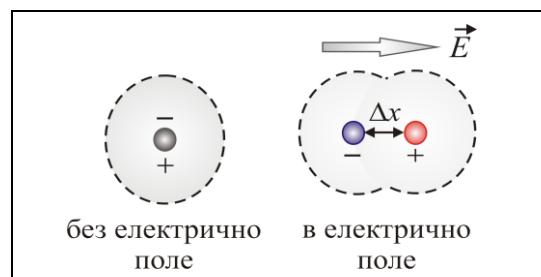
където n_0 е концентрацията на молекулите (брой молекули в единица обем), а \vec{p} е диполният момент на една молекула, който е еднакъв за всички молекули в единица обем.

Явлението, при което под действие на външно електрично поле в диелектрика се появяват диполи, ориентирани предимно в една посока, се нарича поляризация на диелектрика.

Съществуват няколко основни вида поляризация.

а) индуцирана поляризация

Ако се постави неполярна молекула (атом) във външно електрично поле \vec{E} , нейният положителен ($+q$) и отрицателен ($-q$) заряд се отместват на разстояние Δx и се индуцира диполен момент $\vec{p} = q\Delta\vec{x}$.



Зарядите $+q$ и $-q$ ще спрат движението си (при отместване Δx), когато електричната сила $\vec{F} = q\vec{E}$ се уравни от пораждащата се сила на еластична деформация $\vec{F}' = k\Delta\vec{x}$, при което ще се индуцира диполен момент. Математически това се записва по следния начин:

$$\vec{F} = \vec{F}' \Rightarrow q\vec{E} = k\Delta\vec{x} \rightarrow \Delta\vec{x} = \frac{q\vec{E}}{k}$$
$$\vec{p} = q\Delta\vec{x} \Rightarrow \vec{p} = \frac{q^2}{k} \vec{E}.$$

Индуцираният диполен момент може да се запише и така:

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}, \quad (4)$$

където α е поляризуемост на молекулата (атома).

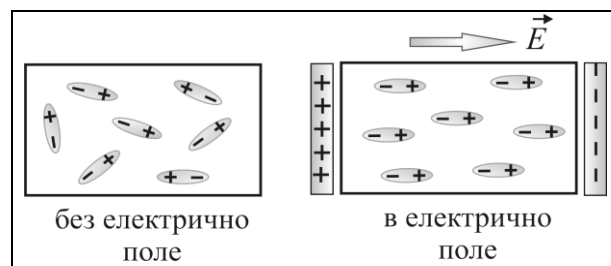
Електричното поле има двойна роля – отмества центровете на положителните и отрицателните заряди в атома или молекулата и ориентира създадения дипол.

Ако n_0 е броят на молекулите в единица обем, т.е. концентрацията на молекулите, то поляризацията на неполярния диелектрик е:

$$\vec{P} = n_0 \vec{p} = n_0 \varepsilon_0 \alpha \vec{E} = \varepsilon_0 \varkappa \vec{E},$$

където \varkappa е диелектрична възприемчивост; безразмерна величина, независеща от интензитета \vec{E} и се дефинира като $\varkappa = n_0 \alpha$.

б) ориентационна поляризация



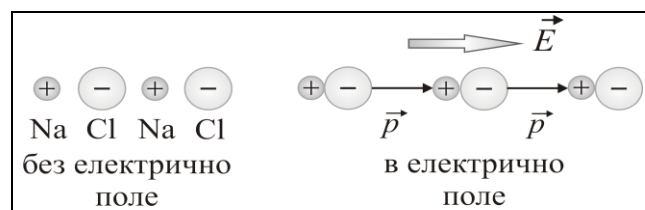
Ако полярен диелектрик се постави във външно електрично поле \vec{E} , диполните моменти на молекулите ще се ориентират по посока на интензитета \vec{E} , а топлинното им взаимодействие ще има дезориентиращ ефект. В резултат на това ще се получи една частична ориентация на диполите и поляризацията на полярния диелектрик ще се запише така:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \varkappa \vec{E}. \quad (5)$$

Диелектричната възприемчивост при ориентационната поляризация зависи обратно пропорционално от температурата и е:

$$\varkappa = \frac{n_0 p^2}{3 \varepsilon_0 k T}.$$

в) йонна поляризация

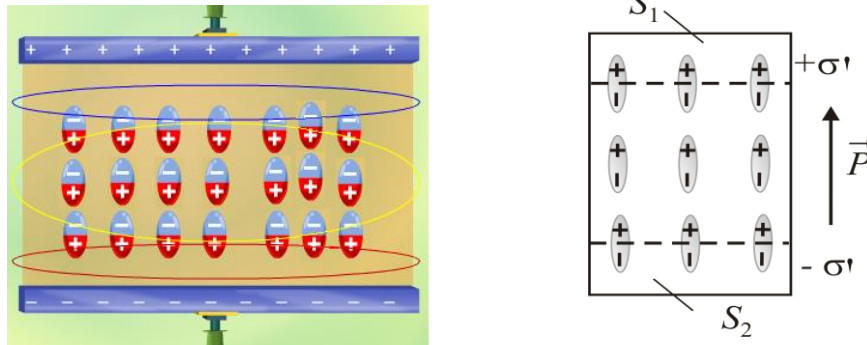


Наблюдава се в диелектрици с кристална структура (напр. NaCl), изградени от две подрешетки на положителните и отрицателните йони, които във външно електрично поле \vec{E} се отместват една спрямо друга. Тогава всяка молекула на кристала получава диполен момент \vec{p} , а векторът на поляризация е:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \varkappa \vec{E}. \quad (6)$$

7. Свързан заряд

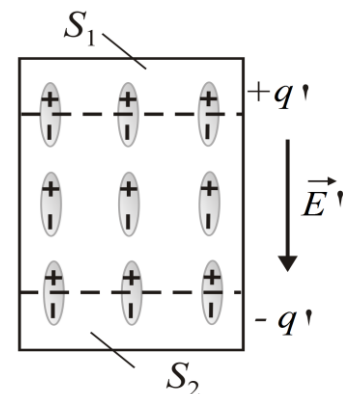
Електрични заряди, които се появяват при поляризацията на диелектриците се наричат *свързани заряди*, т.к. те са част от заряда на поляризираните молекули на диелектрика.



На фигурата е показан поляризиран диелектрик. Вследствие на поляризацията \vec{P} върху повърхностите S_1 и S_2 на двете срещуположни страни на диелектрика се натрупват електрични заряди $-q'$ и $+q'$ с повърхностна плътност на заряда съответно $-\sigma'$ и $+\sigma'$. Тези заряди са свързани с молекулите, на които принадлежат и са разпределени по повърхностите S_1 и S_2 , без да могат да променят положението си по S_1 и S_2 . Затова зарядът q' се нарича *свързан заряд*.

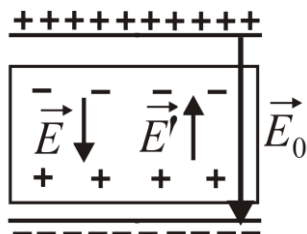
Вътре в обема на диелектрика положителните и отрицателните заряди взаимно се компенсират и затова обемната плътност на заряда е равна на нула.

Поляризацията на диелектрика води до появяването на свързан повърхностен заряд, който създава собствено електрично поле \vec{E}' , такова каквото създават и свободните електрични заряди.



8. Диелектрична проницаемост

Ще разгледаме полетата в диелектрик, поставен между две успоредни разноименно заредени плочи (кондензатор).



Външното електрично поле \vec{E}_0 , създадено между плочите, ще поляризира диелектрика и се нарича поляризиращо поле.

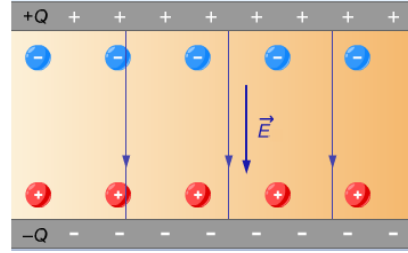
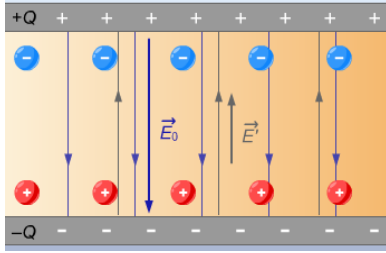
Собственото електрично поле \vec{E}' , създадено от свързаните заряди на поляризирания диелектрик е деполяризиращо поле, тъй като е обратно насочено на външното поле \vec{E}_0 .

Интензитетът на пълното електрично поле в диелектрика съгласно принципа на суперпозицията е векторна сума от интензитетите на двете полета:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' .$$

Големината на интензитета на пълното електрично поле е:

$$E = E_0 - E' . \quad (7)$$



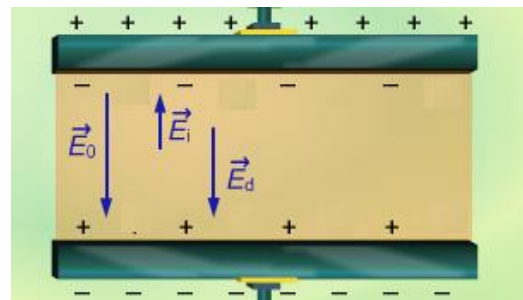
Полето в диелектрика E отслабва ($E < E_0$), защото полето на индуцираните заряди E' частично компенсират външното поле \vec{E}_0 .

Отношението $\boxed{\varepsilon = \frac{E_0}{E}}$, което показва колко пъти интензитетът на електричното поле намалява, когато в него се постави диелектрик се нарича диелектрична проницаемост на средата.

Следователно, интензитетът на полето в диелектрика намалява ε пъти спрямо това на външното поле: $E = \frac{E_0}{\varepsilon}$.

Задача

Диелектрик е поставен между две успоредни разноименно заредени плочи, създаващи поле с интензитет E_0 . Големината на интензитета на индуцираното електрично поле E_i , създадено във вътрешността на диелектрика в резултат поляризацията му е три пъти по малък от E_0 . Каква е диелектричната константа на диелектрика?



1. 3
2. 1,5
3. 6

Задача

Като знаем, че потенциалната разлика (напрежението) U_0 между две заредени плочи, поставени във вакуум на разстояние d , е свързано с интензитета на електричното поле E_0 така: $E_0 = \frac{U_0}{d}$, определете как ще се измени потенциалната разлика U_d между плочите при вкарването на диелектрик между тях?

Част от фигурите са взимствани от сайта <http://start.e-edu.bg/>, на който можете да наблюдавате и пълните анимации на някои от физичните явления.