

ДІЕЛЕКТРИКИ ТА ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

ЛЕКЦІЯ 6

ПЛАН

1. Діелектрики та їх типи.
2. Поляризація діелектриків. Види поляризації. Вектор поляризації. Діелектрична сприйнятливість.
3. Електричне поле в діелектрику. Діелектрична проникність та її фізичний зміст. Зв'язок діелектричної проникності з діелектричною сприйнятливістю.
4. Провідники. Провідники в електричному полі. Електростатична індукція. Розподіл надлишкового заряду в провіднику. Електростатичне поле зарядженого провідника.
5. Електроємність відокремленого провідника. Конденсатори, їх типи та електроємність.
6. Енергія та об'ємна густина енергії електричного поля.

НА САМОСТІЙНЕ ОПРАЦЮВАННЯ

1. Опрацювати зміст лекції та відповідні розділи у підручниках.
2. Сегнетоелектрики. Електрети.
3. Електроємність при з'єднанні конденсаторів.
4. Електростатичний захист.
5. Двопровідна лінія в системах зв'язку.

Діелектрики

Термін "діелектрик" (від гр. «діа» -крізь і англ. electric - електричний) вперше ввів М. Фарадей у 1837 р. для характеристики речовин, в які проникає електричне (електромагнітне) поле. Зазвичай під діелектриками розуміють речовини, практично не проводять електричний струм (в ідеальному випадку - зовсім не проводять). Це зумовлено внутрішньою будовою атомів і молекул діелектриків і, насамперед, відсутністю в них таких зарядів, які б могли під дією поля вільно переміщатись на великі відстані.

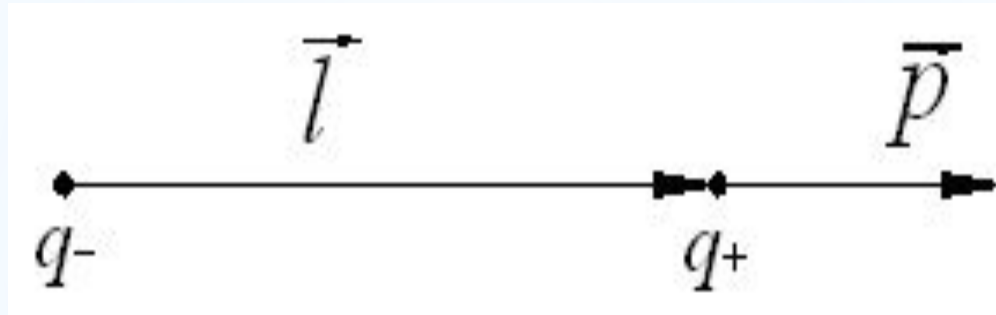
Види діелектриків

За характером просторового розміщення заряджених частинок у молекулах діелектрики поділяють на

- 1)** **Неполярні** (наприклад, гази N_2 , H_2 , O_2 , CO_2) - це діелектрики, які мають симетричну будову, тобто у них центри позитивних і негативних зарядів за відсутності електричного поля співпадають.
- 2)** **Полярні** (наприклад, гази CO , H_2O , NH_3 , SO_2) - це діелектрики, центри позитивних і негативних зарядів у яких за відсутності електричного поля не співпадають (молекули - електричні диполі).
- 3)** **Іонні** (наприклад, $NaCl$, KCl) - це тверді діелектрики, іонні кристали яких є просторовими ґратками з правильним чергуванням іонів різних знаків.

Електричний диполь

Електричний диполь – це система з двох рівних за модулем, але протилежних за знаком точкових зарядів, розміщених на невеликій фіксованій відстані l один від одного.



Плечем диполя називається вектор \vec{l} , напрямлений від негативного до позитивного заряду.

Характеристикою електричного диполя також є **дипольний момент**, що визначається добутком модуля заряду на плече диполя

$$\vec{p} = q \cdot \vec{l}$$

Діелектрики в електростатичному полі

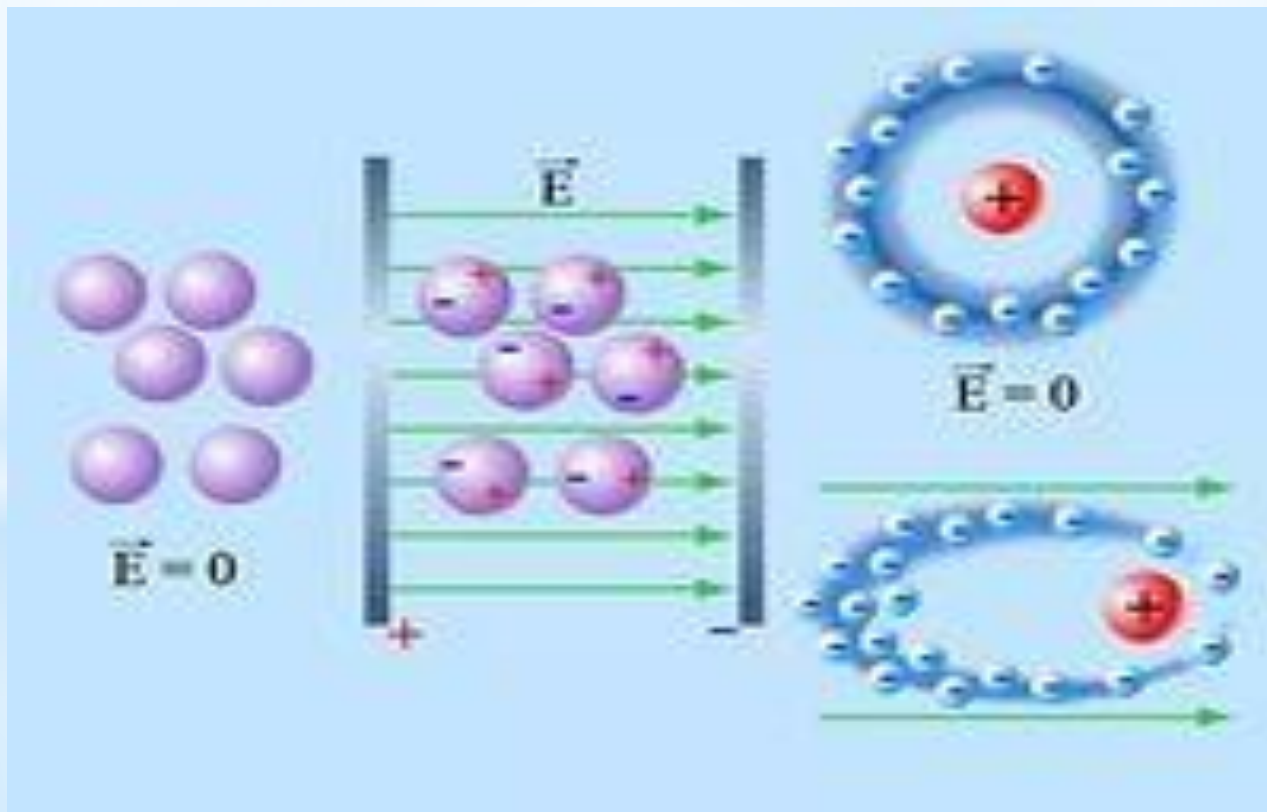
У зовнішньому електростатичному полі діелектрики поляризуються.

Поляризація - це процес орієнтації диполів чи поява під дією електричного поля зорієнтованих за полем диполів.

Відповідно до трьох типів діелектриків (неполярних, полярних та іонних) розрізняють також три види поляризації - електронну, орієнтаційну та іонну.

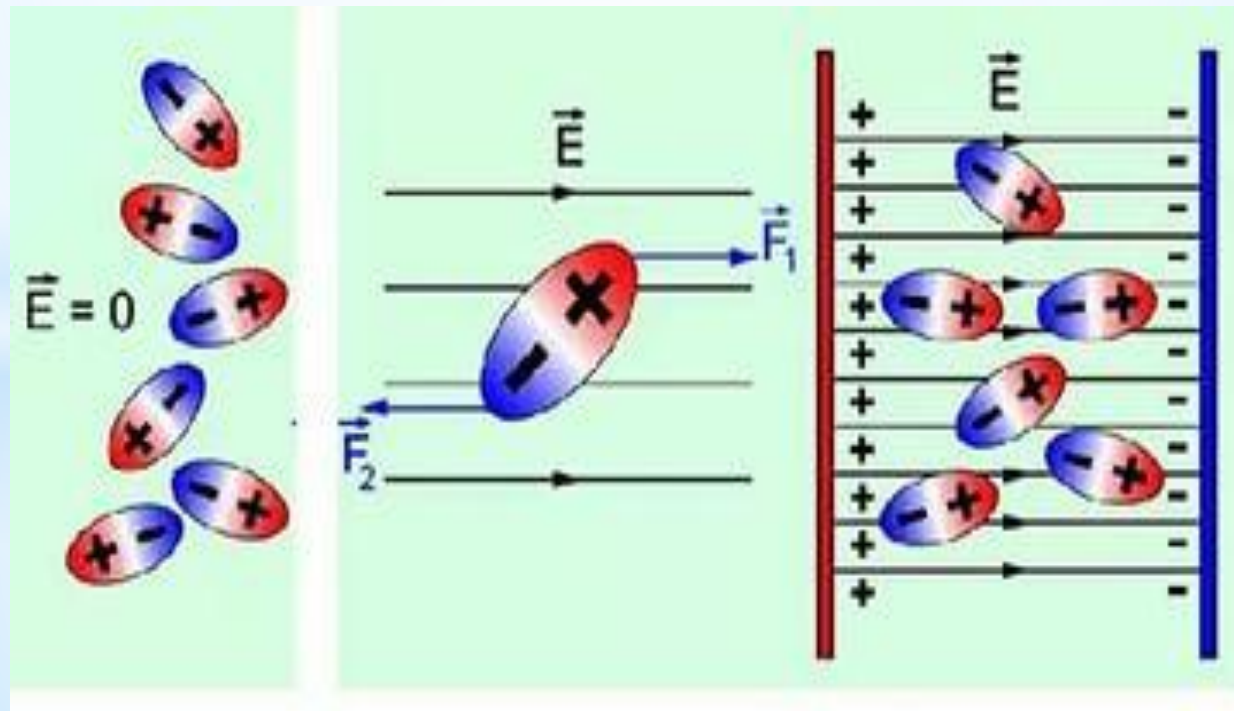
Види поляризації

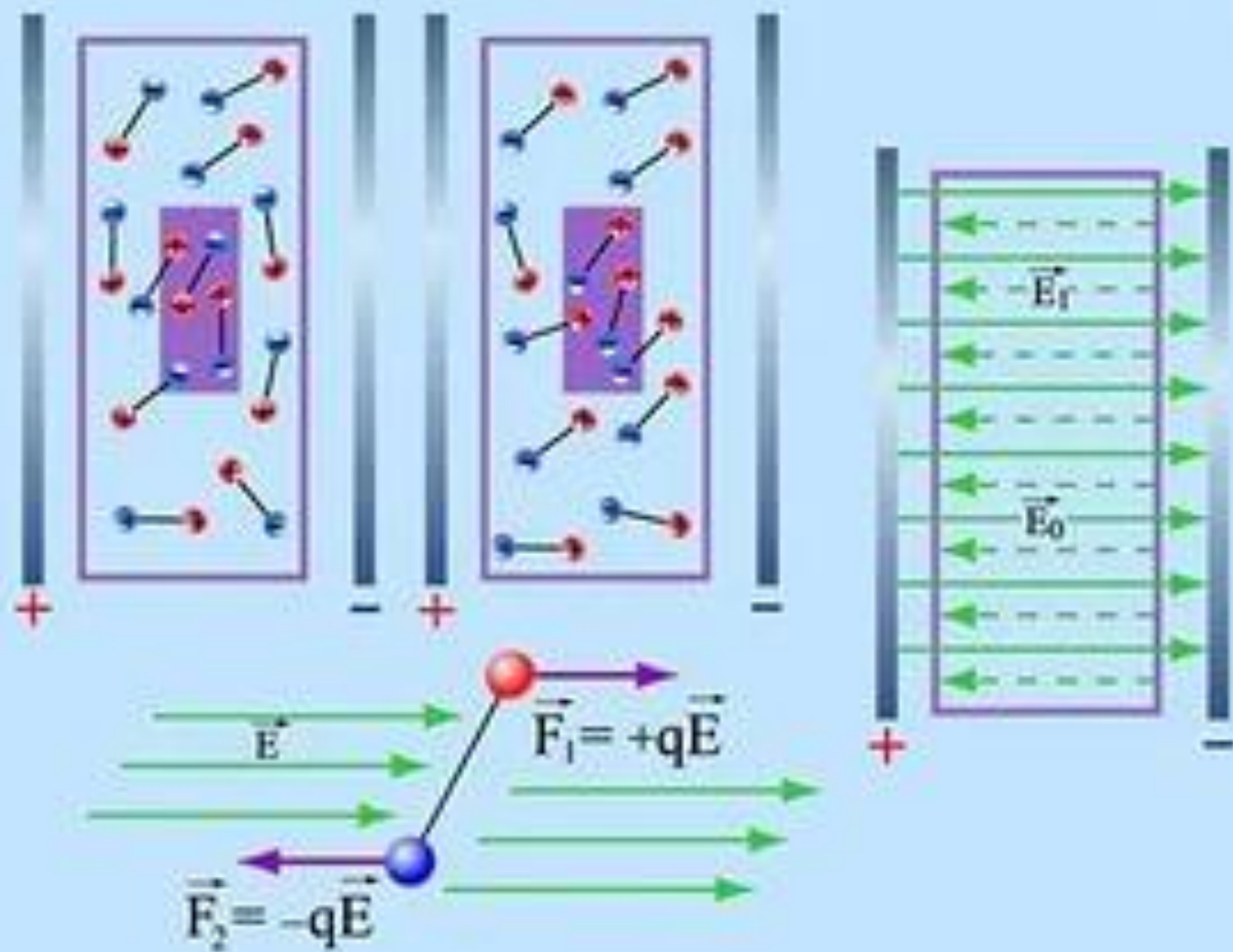
1) *електронна (деформаційна)* - характерна для неполярних діелектриків, полягає у виникненні у атомів індукованого дипольного моменту за рахунок деформації електронних орбіт;



Види поляризації

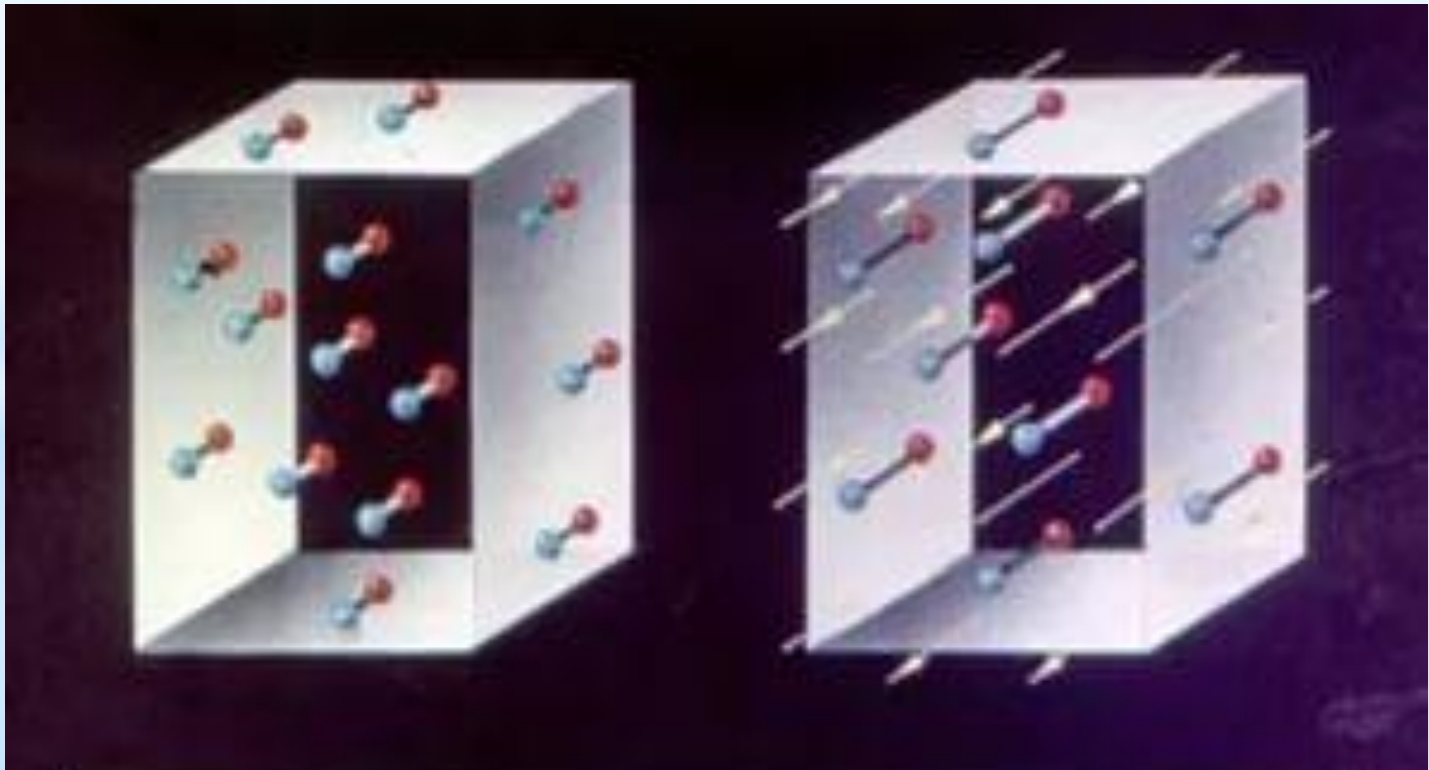
2) *орієнтаційна (дипольна)* - характерна для полярних діелектриків, полягає в орієнтації наявних диполів за полем. Ця орієнтація тим сильніша, чим більша напруженість електричного поля і чим нижча температура;





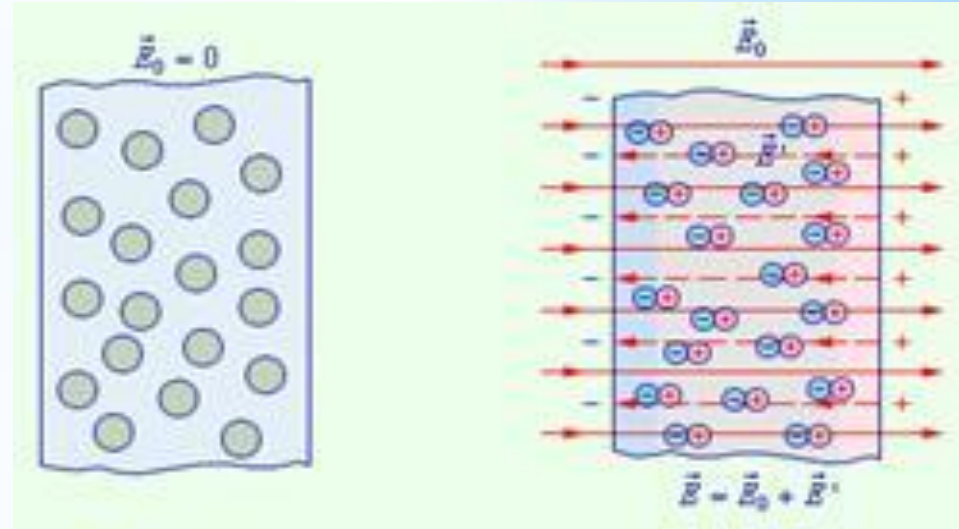
Види поляризації

3) *іонна поляризація* - полягає у зміщенні підґратки позитивних іонів вздовж поля, а негативних - проти поля, що і призводить до виникнення дипольних моментів.

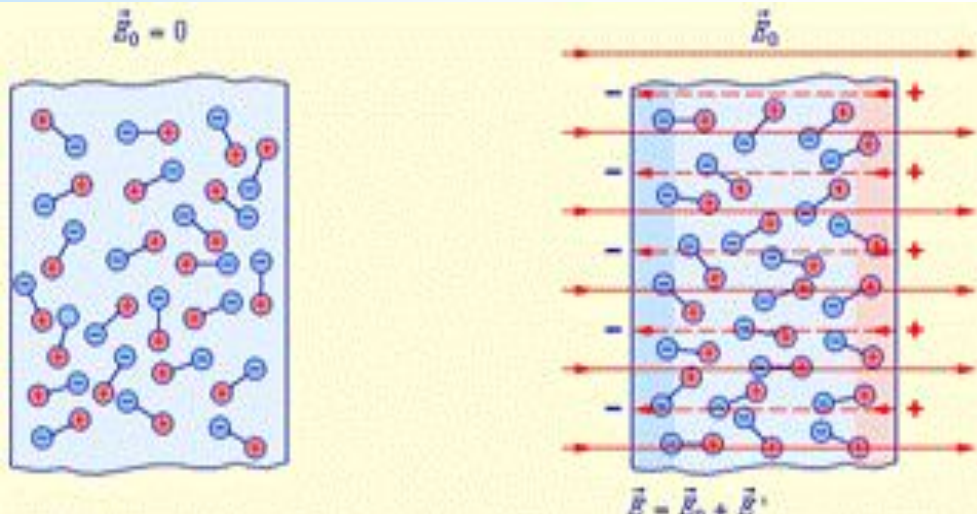


Види поляризації

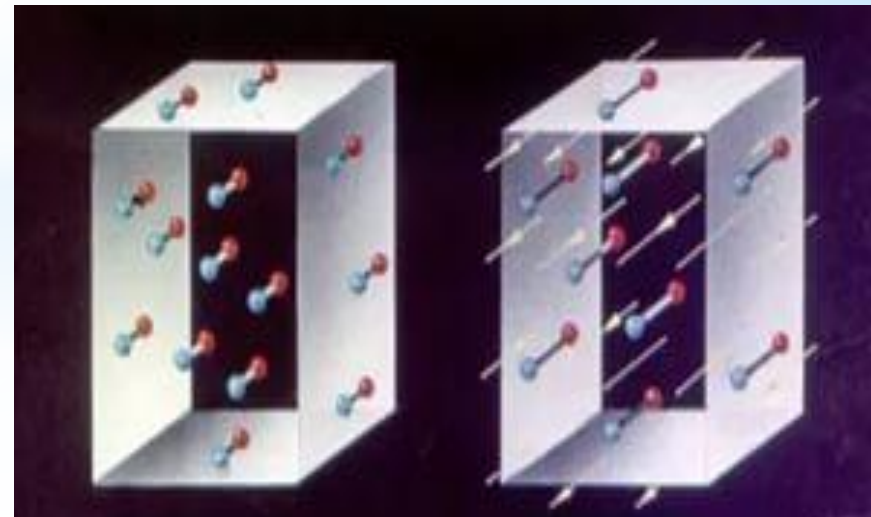
Електронна
(деформаційна)



Орієнтаційна
(дипольна)



Іонна



Поляризованість

***Поляризованість** - це векторна величина, яка визначається дипольним моментом одиниці об'єму діелектрика:

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

де \vec{p}_i - дипольний момент однієї молекули.

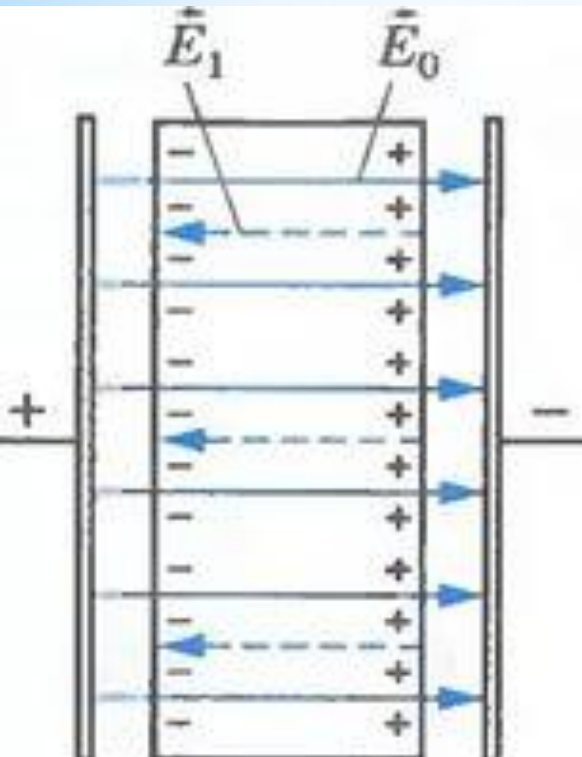
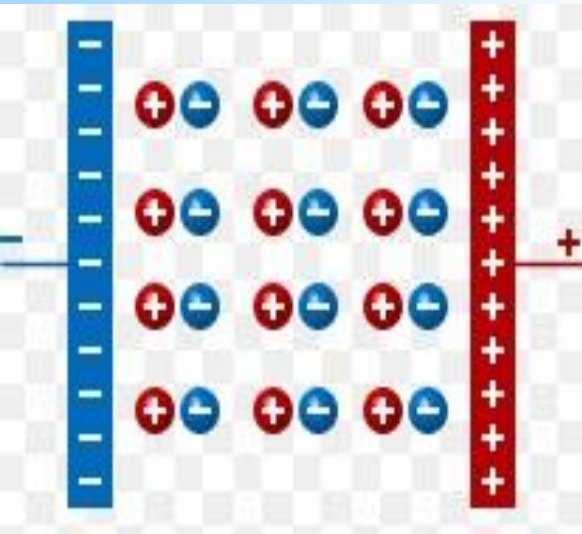
Дослідні дані свідчать, що для великого класу ізотропних діелектриків (крім сегнетоелектриків) поляризованість лінійно залежить від напруженості електричного поля :

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

де χ - коефіцієнт пропорційності, який називається **діелектричною сприйнятливістю діелектрика**.

χ - величина безрозмірна, притому $\chi > 0$ для більшості діелектриків (наприклад, для спирту $\chi = 25$, для води $\chi = 80$).

Діелектрик в електростатичному полі



* При внесенні пластини з діелектрика в однорідне електричне поле, створене двома нескінченними різнойменно зарядженими пластинами він *поляризується*, тобто в ньому відбувається зміщення зарядів: позитивні заряди зміщуються за полем, негативні - проти поля. В результаті цього на поверхні діелектрика з'являться некомпенсовані зв'язані заряди, поле яких \vec{E}_1 протилежно напрямлене по відношенню до зовнішнього поля \vec{E}_0 , а отже послаблює його.

Діелектрична проникність

Отже, напруженість результуючого поля всередині діелектрика може бути визначена за принципом суперпозиції як

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1$$

або у скалярному вигляді $E = E_0 - E_1$

Врахувавши, що поверхнева густина зв'язаних зарядів чисельно дорівнює поляризації діелектрика, а поляризація залежить від напруженості зовнішнього поля, після математичних перетворень дістанемо:

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon}$$

Тут позначено $1 + \chi = \epsilon$ - **діелектрична проникність середовища**. Вона показує, у скільки разів поле послаблюється діелектриком і таким чином кількісно характеризує властивість діелектрика поляризуватись в електричному полі.

Вектор електричного зміщення

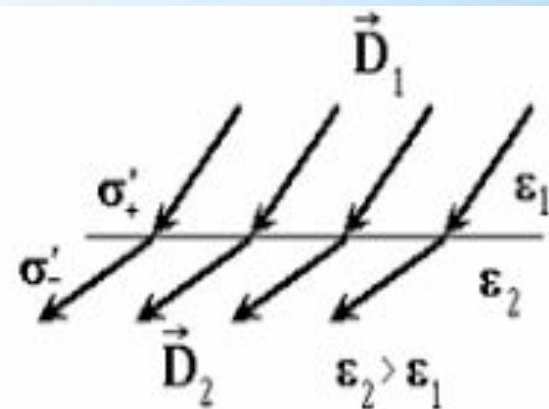
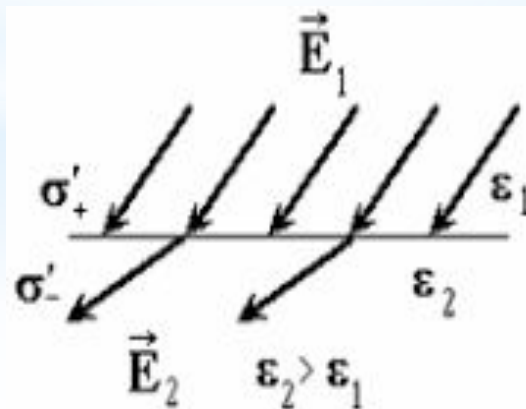
Отже напруженість електростатичного поля залежить від властивостей середовища. Внаслідок цього вектор напруженості \vec{E} при переході через границю розділу діелектриків стрибкоподібно змінюється, лінії напруженості розриваються - виникають незручності під час розрахунків електростатичних полів. Тому крім вектору напруженості електричного поля вводять нову величину - **вектор електричного зміщення (електростатичної індукції) \vec{D}** , значення якого не залежить від властивостей середовища.

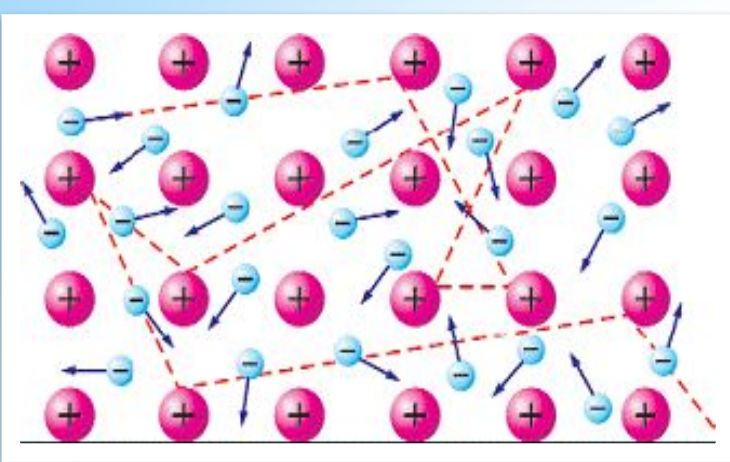
$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \quad \text{або} \quad \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$$

Одиниця електричного зміщення $[D] = 1 \text{ Кл/м}^2$.

Лінії електричного зміщення

**Лінії електричного зміщення - це лінії, дотичні до яких в кожній точці співпадають з напрямком вектора \vec{D} . Напрямок і густина цих ліній визначають так само, як і для ліній вектору \vec{E} . Лінії напруженості можуть починатись і закінчуватись на будь-яких зарядах - вільних і зв'язаних; в той же час лінії вектору електричного зміщення - лише на вільних зарядах. Внаслідок цього через області поля, де знаходяться зв'язані заряди, лінії вектору проходять не перериваючись.*





Провідники

Провідники - це речовини, що проводять електричний струм.

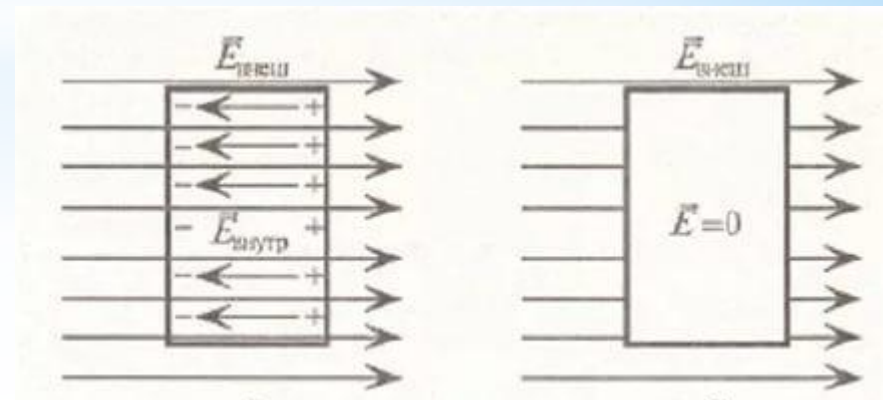
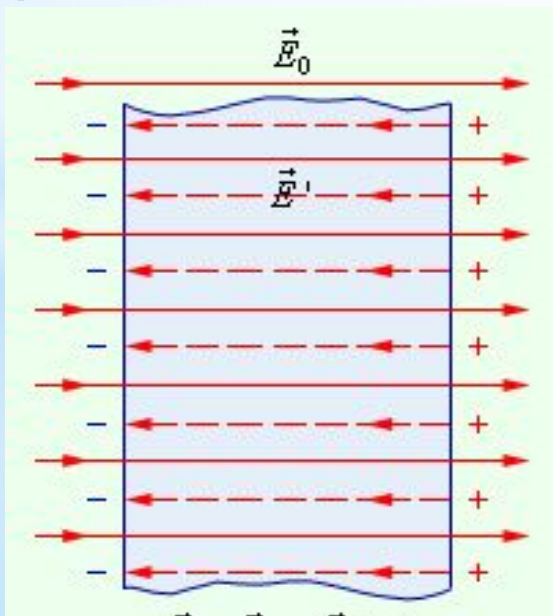
У провідників є достатня кількість *вільних зарядів-частинок*, що можуть вільно переміщатися по всьому об'єму провідника.

Провідники першого роду - метали, в них перенесення зарядів (вільних електронів) *не супроводжується хімічними перетвореннями*.

Провідники другого роду - розплавлені солі, розчини кислот, в них перенесення зарядів (позитивних і негативних іонів) *веде до хімічних змін*.

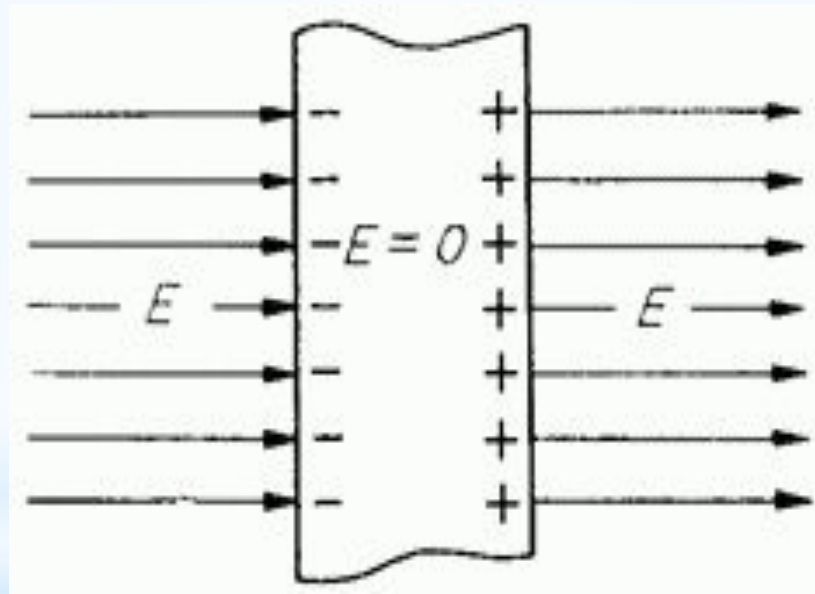
Провідники в електростатичному полі

Під дією зовнішнього електростатичного поля заряджені частинки можуть вільно переміщуватись. Рух заряджених частинок провідника, внесеного в постійне електростатичне поле, викликає появу короточасного струму - він триває доки не встановиться рівноважний розподіл зарядів, за якого електростатичне поле всередині провідника зникне.



Електростатична індукція

Таким чином, напруженість електричного поля у всіх точках всередині провідника дорівнюватиме нулю, а електричний заряд буде розподілений по поверхні провідника.

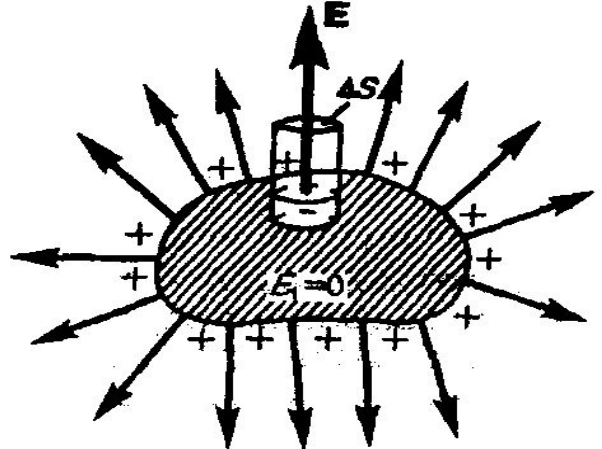


Явище перерозподілу поверхневих зарядів на провіднику в зовнішньому електростатичному полі називається електростатичною індукцією.

Еквіпотенціальність поверхні провідника

*Оскільки всередині провідника $\vec{E} = 0$, то це означає, що потенціал у всіх точках всередині провідника постійний ($\varphi = const$), тобто *поверхня провідника в електростатичному полі є еквіпотенціальною.*

Звідси ж таки випливає, що *вектор \vec{E} на зовнішній поверхні провідника напрямлений по нормалі до кожної точки його поверхні.* Якби це було не так, то заряди почали б переміщуватись по поверхні провідника, що протирічить рівноважному розподілу зарядів.



Залежність між вектором напруженості та поверхневою густиною заряду

Застосувавши теорему Остроградського-Гауса для електростатичного поля в діелектрику можна показати, що поблизу поверхні провідника вектор електричного зміщення \vec{D} чисельно дорівнює поверхневій густині заряду σ .

$$D = \sigma$$

Врахувавши зв'язок $D = \epsilon\epsilon_0 E$, отримаємо: $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$

де ϵ - діелектрична проникність середовища, яке оточує провідник.

Електрична ємність відокремленого провідника

Відокремлений провідник - це провідник, який віддалений від інших провідників, тіл та зарядів.

Потенціал такого провідника прямо пропорційний його заряду q , як показують досліди, різні провідники, маючи однаковий заряд, можуть мати різні потенціали. Тому для відокремленого провідника можна записати таку залежність:

$$q = C\varphi$$

Величина $C = \frac{q}{\varphi}$ - електроємність відокремленого провідника

$$C \equiv \frac{q}{\varphi}$$

Електрична ємність*

відокремленого провідника

Ємність відокремленого провідника чисельно дорівнює заряду, надання якого провіднику змінює його потенціал на одиницю.

Ємність провідника залежить від його розмірів і форми і не залежить від матеріалу, форми і розміру порожнини всередині провідника; вона не залежить також від заряду провідника і від його потенціалу.

Одиниця ємності [C] = 1Ф (фарад . 1 Фарад - це ємність такого відокремленого провідника, потенціал якого змінюється на 1 В при наданні йому заряду 1 Кл.

Ємність Землі приблизно становить 0,7 мФ.

Конденсатори

Відокремлені провідники мають дуже малу ємність. На практиці ж виникає потреба в пристроях, які могли б, маючи невеликі розміри та при невеликому відносно оточуючих тіл потенціалі накопичувати на собі (так би мовити "конденсувати") значні за величиною заряди, тобто мати велику ємність. Такі пристрої називають *конденсаторами*.

Принцип дії конденсаторів ґрунтується на тому факті, що ємність провідника зростає у випадку наближення до нього інших тіл - внаслідок виникнення на провіднику зарядів, індукованих іншими тілами. Саме тому на практиці застосовуються конденсатори - системи з провідників, розміщених близько один відносно одного.

Конденсатори

Конденсатором називають систему з двох металевих електродів (обкладинок) з однаковими за модулем, але протилежними за знаком зарядами розміщених на близькій відстані один від одного і розділених шаром діелектрика.

Щоб електричне поле в конденсаторах не змінювалось (або точніше майже не змінювалось) під дією зовнішніх полів, це поле намагаються зосередити у просторі між обкладинками. Цій вимозі задовольняють дві пластини, розміщені близько одна від одної, два коаксіальних циліндри і дві концентричні сфери - за формою обкладинок конденсатори можуть бути *плоскі, циліндричні та сферичні.*

За природою діелектрика між обкладинками конденсатори можуть бути: *повітряні, паперові, слюдяні, керамічні та електролітичні.*

Електроємність конденсаторів

Ємність конденсаторів визначають за формулою:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

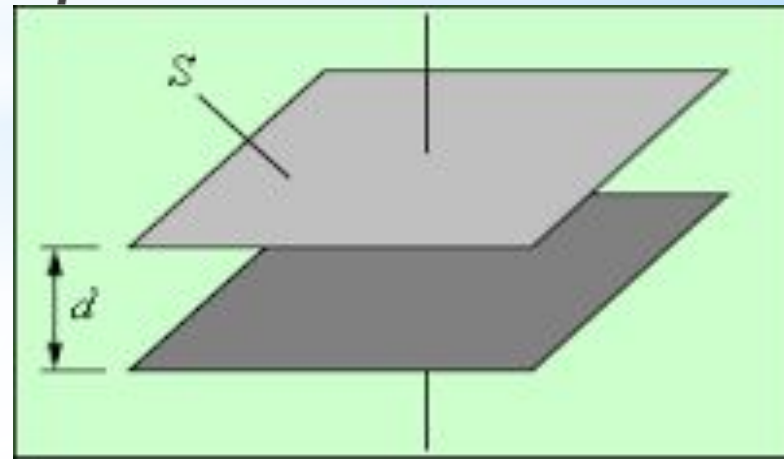
де q - заряд однієї з обкладинок конденсатора; $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ - різниця потенціалів (напруга) між ними.

1) *Ємність плоского конденсатора.* Плоский конденсатор складається з двох паралельних металевих пластин площею S кожна, які розташовані на відстані d одна від одної і мають заряди $+q$ і $-q$.

Його ємність обчислюється

за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$



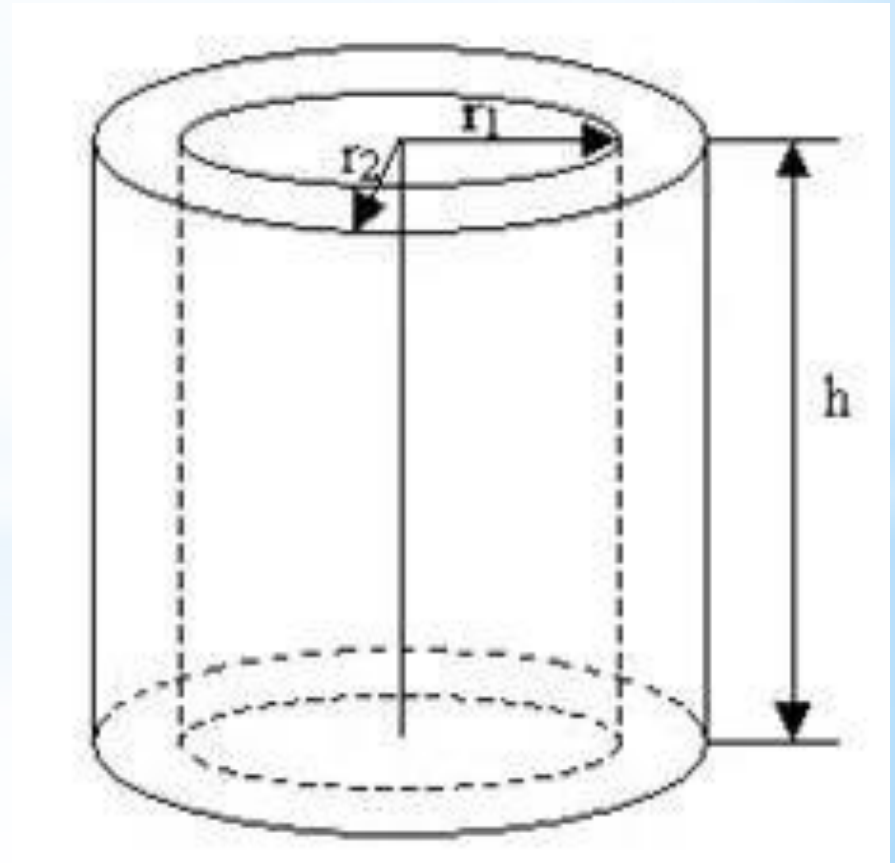
Електроємність конденсаторів

2) Ємність циліндричного конденсатора.

Циліндричний конденсатор складається з двох порожнистих коаксіальних циліндрів з радіусами r_1 і r_2 ($r_2 > r_1$), вставлених один в другий

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

h -



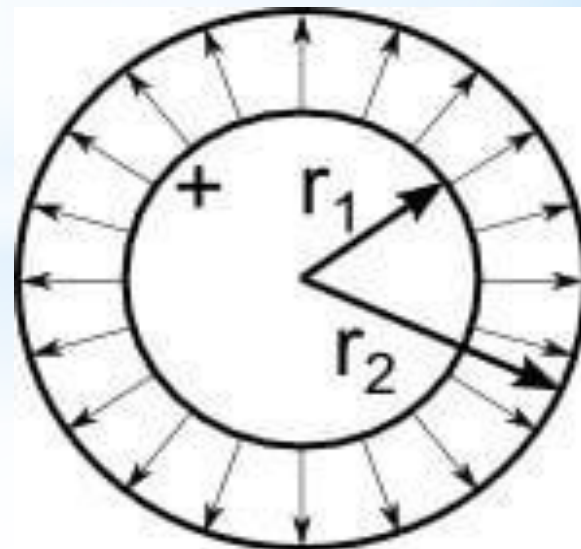
Електроємність конденсаторів

3) *Ємність сферичного конденсатора.* Такий конденсатор складається з двох концентричних обкладинок, розділених сферичним шаром діелектрика

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

У випадку малої величини зазору порівняно з радіусом сфери ($d = r_2 - r_1 \ll r_1$) вирази для ємності сферичного і плоского конденсаторів співпадають

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r^2}{d}$$



Енергія відокремленого провідника

Робота з перенесення елементарного заряду із нескінченності на відокремлений провідник, який має потенціал, дорівнює

$$dA = \varphi dq$$

Елементарний заряд може бути визначено як

$$dq = C d\varphi, \text{ тоді}$$

$$dA = C\varphi d\varphi$$

Повна робота, необхідна для зарядки провідника до потенціалу φ і визначає енергію зарядки

$$A = W = \int_0^{\varphi} C\varphi d\varphi = \frac{C\varphi^2}{2}$$

$$A = W = \int_0^{\varphi} C \varphi d\varphi = \frac{C\varphi^2}{2}$$

Енергія відокремленого провідника і конденсатора

* Використовуючи формулу єлектроємності $C = \frac{q}{\varphi}$, для енергії відокремленого провідника можна отримати також наступні формули:

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

А щоб отримати формули для енергії конденсатора достатньо потенціал φ замінити на різницю потенціалів $\Delta\varphi = U$

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

Густина енергії електростатичного поля

Вважаючи, що енергія конденсатора зосереджена в просторі між обкладинками та застосувавши формулу енергії плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$, отримаємо:

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d}$$

Врахуємо зв'язок різниці потенціалів та напруженості електростатичного поля $U = Ed$, тоді

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 S d E^2}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} S d = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V$$

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V$$

Густина енергії електростатичного поля

* Густиною енергії називається фізична величина, яка чисельно дорівнює енергії, що припадає на одиницю об'єму:

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Використовуючи зв'язок вектору напруженості з вектором електричної індукції $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$, отримаємо наступні формули для обчислення густини енергії:

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$