

Тема 4. Діелектрики в електричному полі

Питання теми:

- 4.1. Поняття про провідники, напівпровідники і ізолятори.
- 4.2. Електричний диполь в електричному полі.
- 4.3. Поляризація діелектриків. Типи поляризації.
- 4.4. Вектор поляризації. Діелектрична сприйнятливість.
- 4.5. Електричне поле всередині діелектрика.
Діелектрична проникність.
- 4.6. Зміна електричного поля на границі двох діелектриків.

4.1. Поняття про провідники, діелектрики і напівпровідники

Речовини за величиною питомого опору ρ [Ом·м] поділяються на провідники, напівпровідники і ізолятори:

$10^{-8} \div 10^{-5} \dots$	$10^{-5} \div 10^8 \dots$	$10^8 \div 10^{17}$ [Ом·м]
<i>провідники</i>	<i>напівпровідники</i>	<i>ізолятори</i>

До ізоляторів відносяться діелектрики, які мають найменшу електропровідність. Однак в техніці зв'язку має застосування ще одна властивість діелектриків – здатність поляризуватися. **Поляризація** – це розділення зарядів. Ми й будемо вивчати це питання.

Натисніть
на символ



41diel.flv

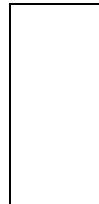
**Діелектрики мають
малу електропровідність,
тому використовуються
як ізолятори**

**В техніці зв'язку
має застосування ще одна
властивість діелектриків –
здатність поляризуватися.
Поляризація – це розділення
додатних і від'ємних зарядів**

Важливе значення при поляризації має наявність чи утворення електричних диполів. Тому це питання розглянемо детальніше.

4.2. Електричний диполь в електричному полі

Електричний диполь – це два точкових заряди різних знаків, які знаходяться на близькій відстані l (рис. 4.1).



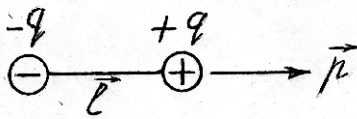


Рис. 4.1

Характеристикою диполя є електричний дипольний момент

$$p = ql. \quad (1)$$

Електричний дипольний момент – векторна величина. Він орієнтований від негативного (-) до позитивного (+) зарядів вздовж l .

Якщо помістити диполь в однорідне поле \vec{E} , то на заряди $+q$ і $-q$ будуть діяти рівні за величиною, але протилежні за знаком сили \vec{F}^+ і \vec{F}^- (рис. 4.2).

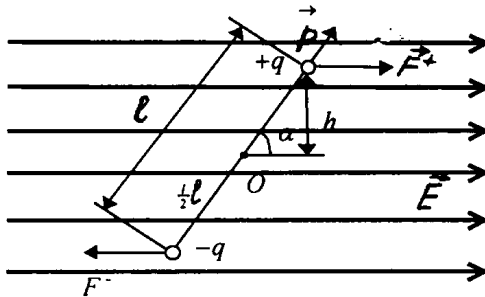


Рис. 4.2

Ці сили будуть повертати диполь навколо точки O . Виникає момент пари сил:

$$M = 2M' = 2Fh = 2F \frac{l}{2} \sin \alpha;$$

$$M = Fl \sin \alpha = Eq l \sin \alpha = Ep \sin \alpha,$$

де $p = ql$ – електричний дипольний момент.

Повертаючи диполь, електричне поле виконує роботу. У випадку поступального руху робота визначається добутком сили на шлях:

$$dA = Fds.$$

При обертальному русі робота дорівнює добутку моменту сили M на кут повороту:

$$dA = Md\alpha \quad (2)$$

або, враховуючи (1),

$$dA = Ep \sin \alpha d\alpha. \quad (3)$$

Енергія диполя зростає за рахунок поля:

$$dA = dW.$$

Повна енергія диполя в електричному полі

$$W = \int dW = \int pE \sin \alpha d\alpha = -pE \cos \alpha + const.$$

Прийmemo $const = 0$. Тоді

$$W = -pE \cos \alpha = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}. \quad (4)$$

Як бачимо, повна енергія диполя залежить від його орієнтації:

$$\alpha = 0 \quad \left(\begin{array}{c} \mathbf{u} \\ \mathbf{E} \uparrow \uparrow \mathbf{p} \end{array} \right) \quad W = -pE$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \left(\begin{array}{c} \mathbf{u} \\ \mathbf{E} \perp \mathbf{p} \end{array} \right) \quad W = 0,$$

$$\alpha = \pi \quad \left(\begin{array}{c} \mathbf{u} \\ \mathbf{E} \uparrow \downarrow \mathbf{p} \end{array} \right) \quad W = pE.$$

Тобто, енергія диполя найбільша тоді, коли його дипольний момент направлений проти поля. Момент пари сил, який діє на диполь, повертає його так, щоб дипольний момент був орієнтований паралельно до поля.

Розглянемо диполь в неоднорідному електричному полі (рис. 4.3).

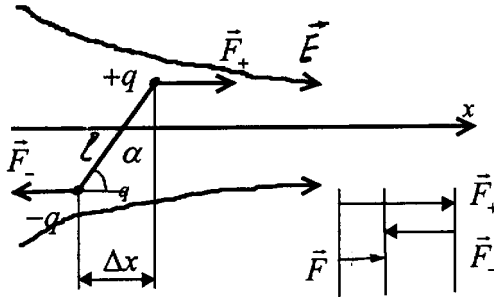


Рис. 4.3

Дві сили \vec{F}_+ і \vec{F}_- , як і у випадку однорідного поля, будуть повертати диполь, але вони за величиною вже не будуть рівні. Тому виникне деяка результуюча поступальна сила:

$$|F| = |F_+| - |F_-| = E_1 q - E_2 q = q(E_1 - E_2) = q\Delta E,$$

де E_1 і E_2 – значення напруженості поля в точках знаходження зарядів $+q$ і $-q$. Ця сила буде втягувати (або виштовхувати) диполь в область більш сильного поля. Оскільки ΔE залежить від відстані Δx , то можемо записати:

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x.$$

Натисніть
на символ



Тому

$$F = q\Delta E = q \frac{\partial E}{\partial x} l \cos \alpha$$

або

$$F = ql \frac{\partial E}{\partial x} \cos \alpha = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos \alpha. \quad (5)$$

Це сила, яка втягує або виштовхує диполь в неоднорідному електричному полі.

У змінному електричному полі (як однорідному, так і неоднорідному) диполь буде весь час повертатися з частотою поля і на цей рух буде витрачатися енергія поля. З цим пов'язані так звані діелектричні втрати, які значні на високих частотах, оскільки обертальний і поступальний рух диполів призводить до розігріву діелектрика.

Натисніть
на символ



**У змінному електричному
полі диполь повертається
з частотою поля
і на цей рух витрачається
енергія поля.
З цим пов'язані так звані
діелектричні втрати**

4.3. Поляризація діелектриків. Типи поляризації

Кожен діелектрик складається з атомів – додатних ядер і від’ємних електронів. Якщо діелектрик внести в електричне поле, то він **поляризується**, тобто **відбувається певне розділення зарядів**: позитивні ядра зміщуються в одну сторону, а негативні електрони – в іншу. В результаті на протилежних гранях з’являються заряди різних знаків (рис. 4.4).

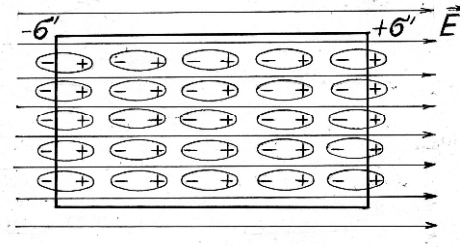


Рис. 4.4

За відсутності поля "центри" додатних і від’ємних зарядів можуть співпадати, або бути зсунутими один відносно іншого. В залежності від цього діелектрики можна розділити на дві великі групи: **полярні** і **неполярні**.

До **неполярних** належать діелектрики, які складаються з молекул, у яких "центри" додатних і від’ємних зарядів співпадають (ебоніт, каучук, сірка, фторопласт, поліетилен та інші. Під дією зовнішнього поля заряди неполярної молекули зміщуються один відносно іншого на деяку відстань l і виникає електричний дипольний момент (рис. 4.5): $\vec{p} = q\vec{l}$.

Натисніть
на символ



19Nepol.swf

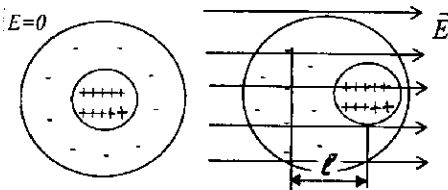


Рис. 4.5

Чим більша напруженість поля, тим більше зміщення. Це зміщення має пружний характер: електронні оболонки атомів деформуються і така поляризація називається **деформаційною**.

До деформаційної поляризації відносяться електронна та йонна поляризації.

Електронна поляризація є у всіх речовинах без винятку. Вона відбувається дуже легко, бо електрони – легкі частинки і встигають зміщуватись за зміною поля практично миттю ($10^{-15} \div 10^{-16} \text{ c}$). Тому діелектрики з електронною поляризацією можна застосовувати, наприклад, в конденсаторах, на високих частотах без значних втрат енергії.

Переважає електронна поляризація в полістиролі, поліетилені, фторопласті і вона характеризується найнижчим значенням $\epsilon \approx 1 \div 2$.

Натисніть
на символ



19Nepol.swf

**Діелектрики з електронною
поляризацією можна
застосовувати
на високих частотах
без значних втрат енергії**

Іонна поляризація властива для іонних кристалів, які складаються з додатних і від'ємних іонів. В електричному полі відбувається зміщення додатних і від'ємних іонів у різні сторони і таким чином заряди розділяються – додатні на одній грані, від'ємні – на протилежній (рис. 4.6).

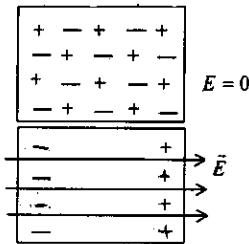


Рис. 4.6

Для іонної поляризації $\epsilon \approx 10$ і з нею пов'язані помітні діелектричні втрати, оскільки переміщуються іони – важкі частинки. Час встановлення поляризації $10^{-12} \div 10^{-13}$ с, через що іонні діелектрики не можна застосовувати на дуже високих частотах.

Іонні діелектрики не можна застосовувати на дуже високих частотах

До полярних діелектриків відносяться речовини, молекули яких мають асиметричну будову (вода, аміак, ефір, ацетон, вініпласт, папір, гетинакс). У таких молекулах "центри" додатних і від'ємних зарядів не співпадають і вони за своєю природою є електричними диполями, тому діелектрики часто називають

ДИПОЛЬНИМИ.

Як приклад на рис. 4.7 і 4.8 представлені дипольні молекули води і аміаку.

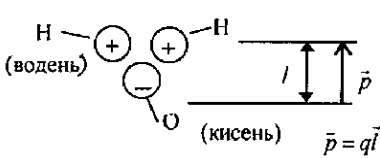
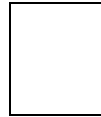


Рис. 4.7

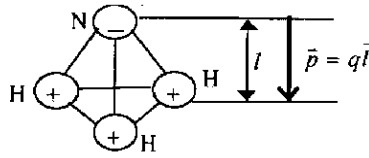


Рис. 4.8

Такі диполі за відсутності поля розкидані хаотично, тоді як в електричному полі повертаються, так що їхні електричні моменти $\vec{p} = q\vec{l}$ орієнтуються за полем (рис. 4.9).

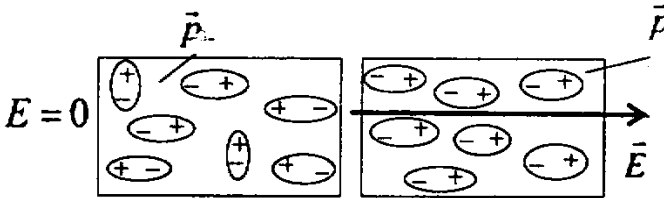
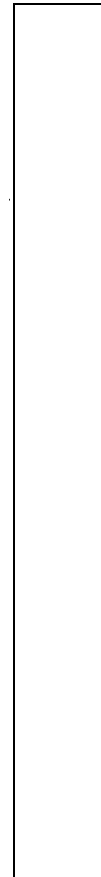


Рис. 4.9

Поляризація в дипольних діелектриках називається орієнтаційною, а оскільки встановлення цієї поляризації пов'язане з переорієнтацією, то вона має релаксаційний характер, тобто відбувається протягом деякого часу.

Орієнтаційна поляризація пов'язана зі значними втратами енергії поля, бо при цьому відбувається переорієнтація молекул, що еквівалентно розігріву діелектрика і на високих частотах може дати значні втрати – діелектричні втрати.

Орієнтаційна поляризація на високих частотах дає значні діелектричні втрати

4.4. Вектор поляризації. Діелектрична сприйнятливість

Якщо діелектрик помістити в електричне поле, то він поляризується, тобто відбувається розділення зарядів через їх зміщення чи переорієнтацію.

Всередині діелектрика додатні і від'ємні заряди компенсуються, а на гранях утворюються від'ємні і додатні зв'язані заряди з деякою поверхневою густиною σ' (рис. 4.10).

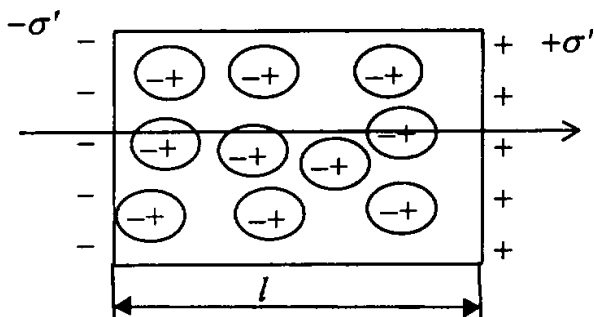


Рис. 4.10

Для кількісної характеристики ступеня поляризації застосовується **вектор поляризації** \vec{P} . Це сумарний дипольний момент всіх молекул одиниці об'єму діелектрика:

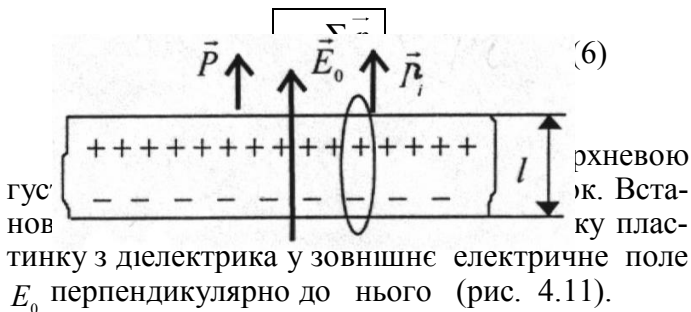


Рис. 4.11

Під дією поля пластинка поляризується і весь об'єм діелектрика $V = Sl$ можна розглядати як диполь із зарядами $+\sigma'S$ і $-\sigma'S$ на відстані l .

Електричний момент диполя

$$\sum_i \vec{p}_i = ql = \sigma' Sl = \sigma' V,$$

звідки

$$\sigma' = \frac{\sum_i p_i}{V} = P, \quad (7)$$

де \vec{P} – вектор поляризації діелектрика, який чисельно дорівнює поверхневій густині зв'яза-

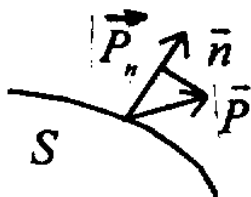


Рис. 4.12

, що заряди всередині нсуються).

В загальному випадку, коли вектор \vec{E} не перпендикулярний до поверхні діелектрика, густина зарядів S' чисельно рівна проекції вектора поляризації на нормаль (рис. 4.12):

$$\sigma' = P_n \quad (8)$$

У діелектриків будь-якого типу (крім сегнетоелектриків) вектор поляризації \vec{P} пропорційний напруженості поля \vec{E} всередині діелектрика:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}. \quad (9)$$

Величина χ називається діелектричною сприйнятливістю діелектрика.

4.5. Електричне поле всередині діелектрика. Діелектрична проникність

Розрахуємо поле, яке виникає всередині плоскої пластини, що знаходиться у зовнішньому полі \vec{E}_0 (рис. 4.13).

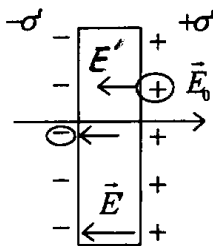


Рис. 4.13

Пластина поляризується і на її гранях виникають заряди $+\sigma'$ і $-\sigma'$. Так як \vec{E}_0 і \vec{E} напрямлені назустріч, то результуюче поле всередині діелектрика

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0}. \quad (10)$$

Як бачимо, електричне поле всередині діелектрика послаблюється.

Внаслідок поляризації електричне поле всередині діелектрика послаблюється

Оскільки, згідно з формулою (6),

$$\sigma' = P = \chi \epsilon_0 E,$$

то

$$E = E_0 - \frac{\chi \epsilon_0 E}{\epsilon_0} = E_0 - \chi E,$$

$$E + \chi E = E_0,$$

звідки
$$E = \frac{E_0}{1 + \chi}. \quad (11)$$

Позначимо
$$1 + \chi = \varepsilon. \quad (12)$$

Тоді формулу (11) запишемо:
$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

або
$$\boxed{\varepsilon = \frac{E_0}{E}}. \quad (13)$$

Величина ε називається діелектричною проникністю.

Діелектрична проникність ε показує, у скільки разів поле E всередині діелектрика менше, ніж зовнішнє поле E_0 .

**Діелектрична
проникність показує,
у скільки разів поле
всередині діелектрика
менше, ніж зовнішнє поле**

Діелектрики різних типів поляризуються по різному і мають різні значення ϵ . Так, для електронної поляризації характерне значення $\epsilon < 2$, для дипольних діелектриків $\epsilon = 6 \div 100$. Є діелектрики, для яких $\epsilon \approx 10^3$. Це так звані **сегнетоелектрики**.

Для опису електричного стану діелектрика вводиться також поняття **електричного зміщення (електричної індукції)**:

$$\boxed{D = \epsilon \epsilon_0 E} \quad (14)$$

Враховуючи, що $E = \frac{E_0}{\epsilon}$, маємо:

$$D = \epsilon \epsilon_0 E = \epsilon \epsilon_0 \frac{E_0}{\epsilon} = \epsilon_0 E_0 = D_0 - \quad (15)$$

електричне зміщення всередині діелектрика співпадає з електричним зміщенням зовнішнього поля у вакуумі:

$$\boxed{D_0 = D = \epsilon_0 E_0} \quad (14)$$

Такий висновок маємо, коли $D = D_n$, бо $E = E_n$, тобто коли пластинка перпендикулярна до \vec{E}_0 .

4.6. Зміна електричного поля на границі двох діелектриків

Встановимо закон зміни \vec{E} і \vec{D} при переході з одного діелектрика в інший.

Нехай $\epsilon_1 < \epsilon_2$. Лінії вектора \vec{E} заломлюються на границі (рис. 4.14).

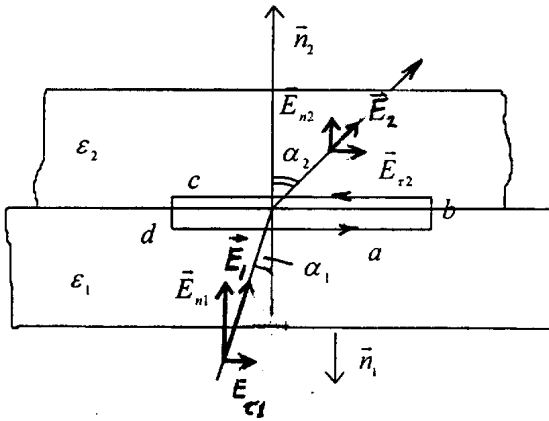


Рис. 4.14

Розкладемо вектор \vec{E} на складові \vec{E}_n і \vec{E}_t . Проведемо прямокутний контур $abcd$ і запишемо циркуляцію вектора \vec{E} вздовж цього контура.

Оскільки поле потенціальне, то циркуляція повинна бути рівна нулеві:

$$\oint E_1 dl = E_{t1} a + E'_n b - E_{t2} c - E'_n d = 0$$

Якщо спрямувати b і d до нуля, то їх вкладом у циркуляцію можна знехтувати:

$$E'_{n1} b \approx 0; E'_{n2} d \approx 0.$$

Тоді

$$\oint_1 E_1 dl = E_{t1} a - E_{t2} c = 0,$$

звідки, врахувавши, що $a = c$,

$$\boxed{E_{t1} = E_{t2}} \quad (15)$$

– складова напруженості поля, паралельна до границі діелектриків, не змінюється.

Так як

$$D = \epsilon \epsilon_0 E,$$

то

$$D_{\tau1} = \epsilon_1 \epsilon_0 E_{\tau1},$$

$$D_{\tau2} = \epsilon_2 \epsilon_0 E_{\tau2}$$

і

$$\boxed{\frac{D_{\tau1}}{D_{\tau2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}. \quad (16)$$

Знайдемо нормальні складові. Для цього границю розділу (рис. 4.15) оточимо замкненою поверхнею і застосуємо теорему Остроградського-Гаусса:

$$\oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^k q_i = 0. \quad (17)$$

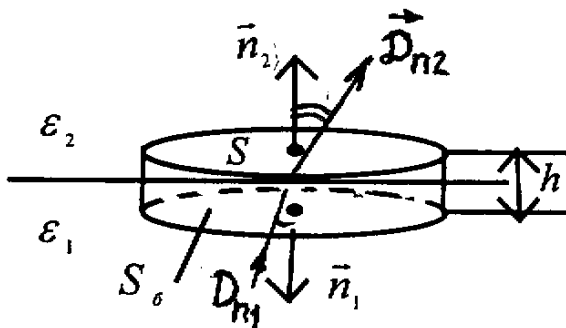


Рис. 4.15

Згідно з формулою (17), алгебраїчна сума зарядів всередині замкненої поверхні дорівнює нулеві.

Представимо інтеграл по замкненій поверхні як суму:

$$-D_{n1}S + D_{n2}S + DS_{\sigma} = 0.$$

При $h \rightarrow 0$ потік через бічну поверхню стає малим і ним можна знехтувати. Тоді можемо записати:

$$\boxed{D_{n1} = D_{n2}} \quad (18)$$

– нормальна складова вектора електричного зміщення не змінюється.

$$\text{Так як } D_{n1} = \epsilon_1 \epsilon_0 E_{n1}, \quad D_{n2} = \epsilon_2 \epsilon_0 E_{n2},$$

$$\text{то, згідно з (18),} \quad \epsilon_1 \epsilon_0 E_{n1} = \epsilon_2 \epsilon_0 E_{n2}$$

і

$$\boxed{\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}. \quad (19)$$

Як бачимо, при переході через границю має місце стрибок E_n .

Знайдемо відношення тангенсів кутів:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{\frac{E_{\tau_1}}{E_{n_1}}}{\frac{E_{\tau_2}}{E_{n_2}}} = \frac{E_{\tau_1}}{E_{\tau_2}} \cdot \frac{E_{n_2}}{E_{n_1}} = \frac{E_{n_2}}{E_{n_1}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Оскільки $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, то й $\alpha_2 > \alpha_1$. Тобто, чим більше значення ε , тим більший кут заломлення лінії вектора \vec{E} .

Зрештою відмітимо, що графічно напруженість поля \vec{E} характеризується густотою ліній (також і вектор \vec{D}). Але чим більше значення ε , тим менше поле в діелектрику. Тому для вектора \vec{E} графічне представлення буде таким, що в одному і другому діелектрику густота ліній різна (рис. 4.16). Оскільки $D_1 = D_2$, то лінії електричної індукції розриву мати не будуть (рис. 4.17).

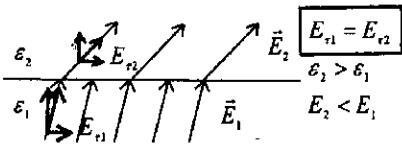


Рис. 4.16

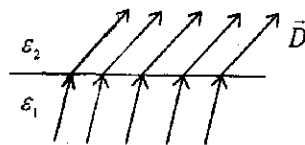


Рис. 4.17

Питання для контролю

1. Що таке діелектрики, напівпровідники, провідники ?
2. Що таке електричний диполь і як він поводить себе в електричному полі ?
3. В чому полягає явище поляризації діелектриків ?
4. Які типи поляризації ви знаєте ?
5. Що таке вектор поляризації ?
6. Що таке діелектрична проникність ?
7. Що таке електричне зміщення (електрична індукція) ?
8. Як змінюється електричне поле на границі двох діелектриків ?

Допоміжна література

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики, т.2.
– Москва: Наука, 1978, § 15-21.