

## MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE

### Rezystywność dielektryków

- „dielektryk” - „materiał izolacyjny”,
- rezystywność większa od  $10^8 \Omega\text{m}$ ,
- szerokość pasma zabronionego większa od 5 eV,
- rezystywność określa się przy napięciu stałym,
- po przyłożeniu napięcia prąd po nagłym wzroście powoli maleje,
- zbliża się bardzo wolno do wartości ustalonej,
- prąd przewodzenia tworzą cząstki swobodne obdarzone ładunkiem.

### Rezystywność skrośna dielektryków stałych

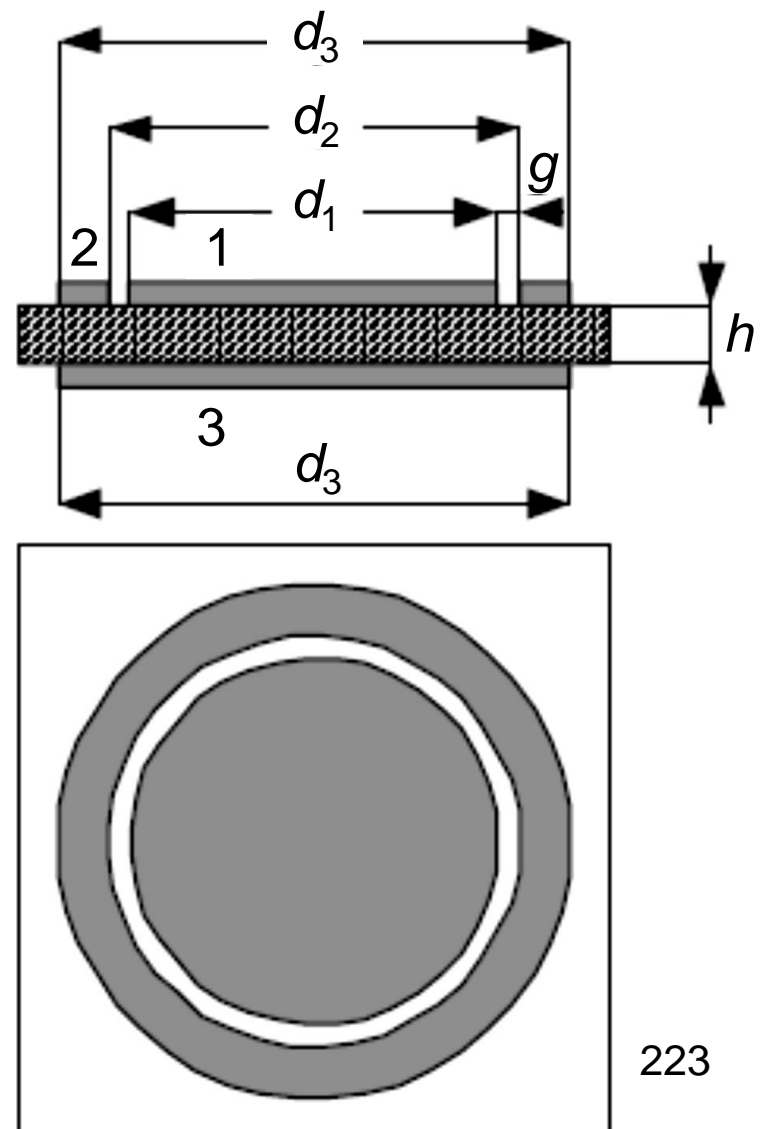
- wyznaczona z wartość napięcia i prądu przepływającego wewnątrz dielektryka znajdującego się między elektrodami,
- prąd tworzą przede wszystkim jony (**przewodnictwo jonowe**).
- źródła energii potrzebnej do uwolnienia jonów:
  - duża wartość natężenia pola elektrycznego,
  - promieniowanie zewnętrzne o odpowiednio dużej energii,
  - wysoka temperatura dielektryka.

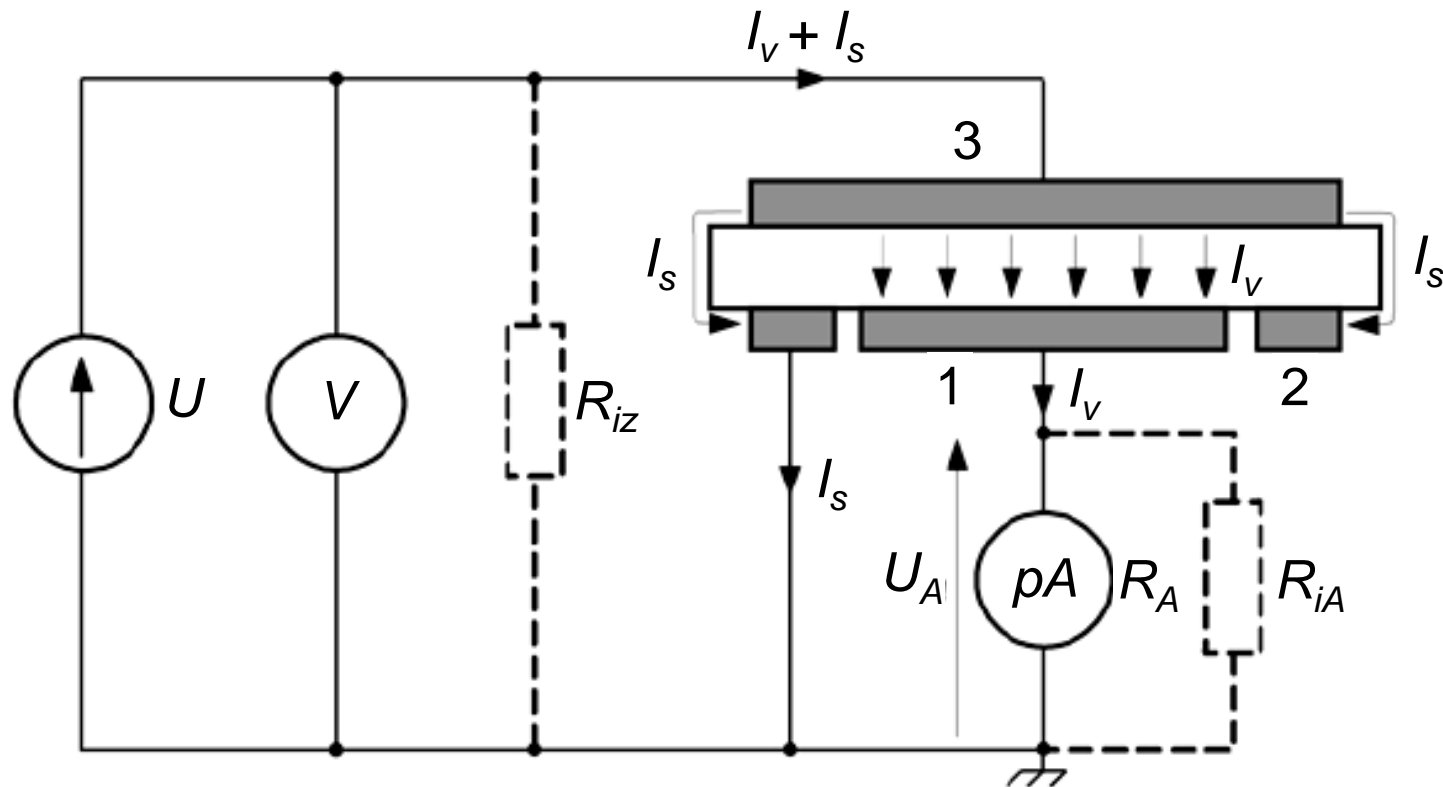
źródła swobodnych jonów w dielektrykach:

- domieszki (zanieczyszczenia),
- domieszki dysocjujące (w dielektrykach organicznych),
- ze wzrostem temperatury rezystywność dielektryków maleje (*TWR ujemny* – odwrotnie niż w przypadku przewodników),
- wyższa temperatura sprzyja oswobodzaniu jonów
- przykładowe wartości rezystywności skrośnej:
  - polietylen – rzędu  $10^{16} \Omega\text{m}$ ,
  - bakelit – rzędu  $10^{12} \Omega\text{m}$ .

Układ trójelektrodowy do badania rezystywności dielektryków:

- 1 - elektroda pomiarowa,
- 2 - elektroda ochronna w pomiarach rezystywności skrośnej, elektroda napięciowa w pomiarach rezystywności powierzchniowej,
- 3 - elektroda napięciowa w pomiarach rezystywności skrośnej, elektroda ochronna w pomiarach rezystywności powierzchniowej.





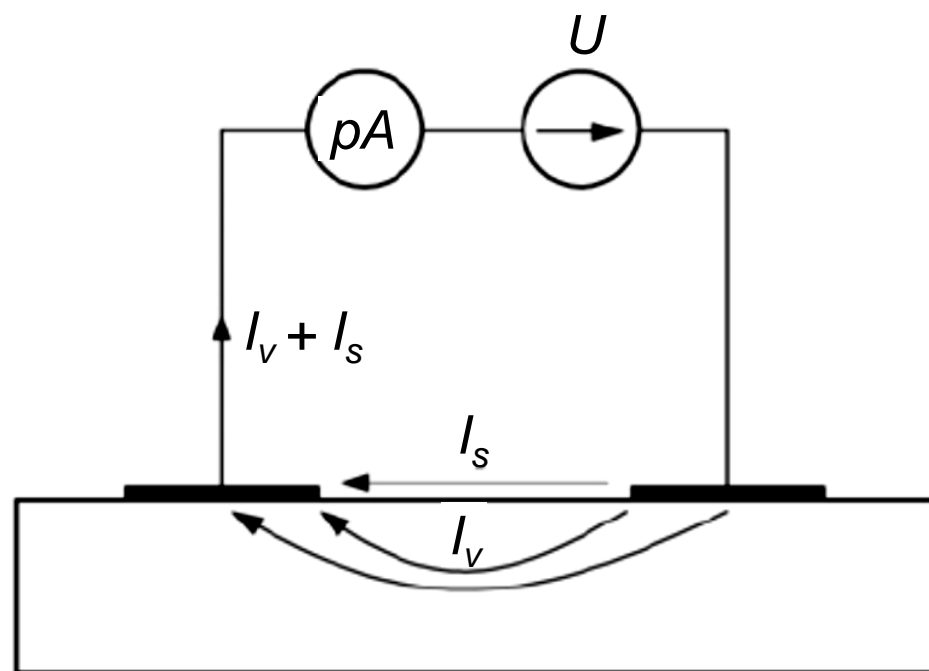
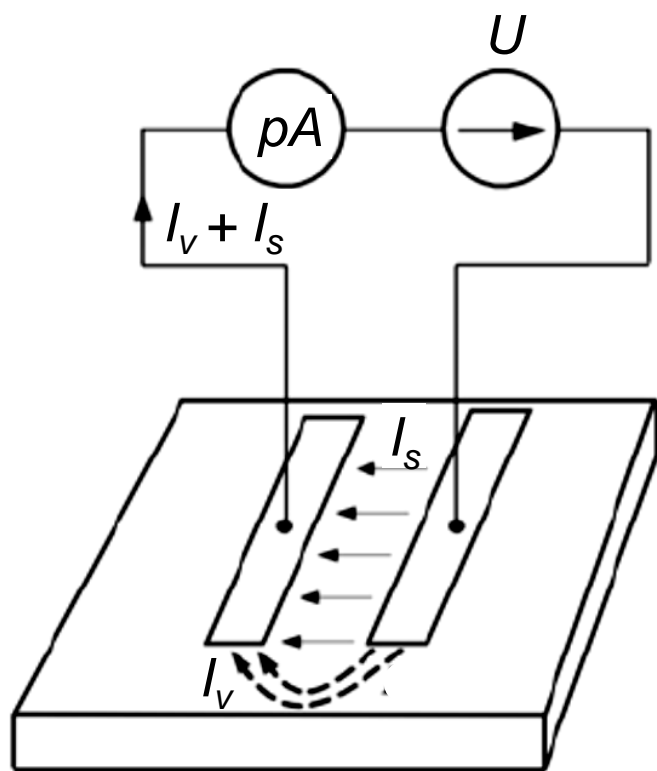
Schemat układu do pomiaru rezystywności skrośnej w układzie trójelektrodowym; elektrody:  
1 - pomiarowa, 2 - ochronna, 3 - napięciowa.

### Rezystywność powierzchniowa dielektryków stałych

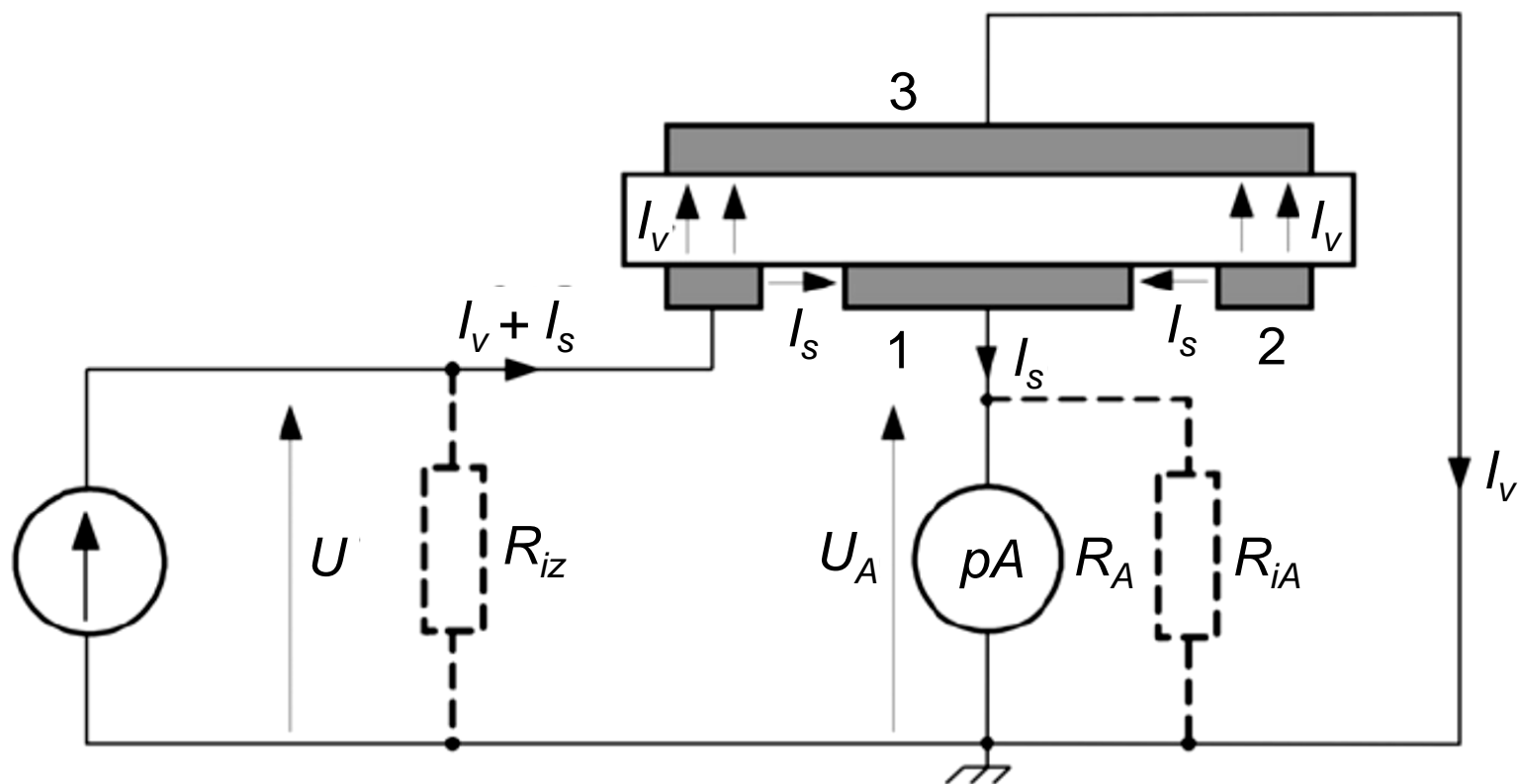
- wyznaczona z wartość napięcia i prądu przepływającego między elektrodami po powierzchni dielektryka,
- jednostką rezystywności powierzchniowej jest  $1 \Omega$ ,
- prąd przewodzenia tworzą głównie jony:
  - woda na powierzchni dielektryka,
  - dysocjacja związków chemicznych (zanieczyszczeń).

Rezystywność powierzchniowa zależy od własności dielektryka:

- dielektryki hydrofilowe rozpuszczalne w wodzie:
  - szkło sodowe -  $\rho_s$  około  $10^8 \Omega$ ,
- dielektryki hydrofobowe:
  - polietylen, parafina -  $\rho_s$  około  $10^{16} \Omega$ .



Rozptyw prądów podczas pomiaru rezystancji powierzchniowej w układzie dwuelektrodowym



Schemat układu do pomiaru rezystancji powierzchniowej w układzie trójelektrodowym; elektrody:

1 - pomiarowa, 2 - napięciowa, 3 - ochronna

## ***Rezystywność dielektryków ciekłych i gazowych***

### Dielektryki ciekłe

- przewodnictwo jonowe elektrolityczne,
- dysocjacja zanieczyszczeń w śladowych ilościach rozpuszczalników,
- rezystywność zależy od stopnia czystości dielektryków,
- **TWR ujemny** - wzrost temperatury ułatwia ruch jonów w cieczy,
- rezystywność oleju izolacyjnego mineralnego technicznie czystego jest rzędu  $10^{12} \Omega\text{m}$ .

### Dielektryki gazowe

- przewodnictwo jonowe i elektronowe,
- powietrze atmosferyczne:
  - w  $1 \text{ cm}^3$  -  $2,77 \cdot 10^{19}$  cząstek (1013 hPa, 293 K),
  - około 1000 elektronów i jonów,
  - w ciągu sekundy w  $1 \text{ cm}^3$  powietrza powstaje i zanika średnio około 10 jonów i elektronów,
  - jonizacja powietrza - ciała promieniotwórcze w ziemi,
  - rezystywność powietrza - około  $10^{17} \Omega\text{m}$ ,
  - rezystywność technicznie osiągalnej próżni - rzędu  $10^{20} \Omega\text{m}$  (około  $10^9$  cząstek w  $1 \text{ cm}^3$ ).

## Przenikalność elektryczna dielektryków

### *Polaryzacja elektryczna*

Cząstki tworzące strukturę dielektryka:

- elektrycznie obojętne,
- trwałe dipole elektryczne,

W polu elektrycznym cząstki elektrycznie obojętne stają się dipolami indukowanymi.

Ładunki swobodne:

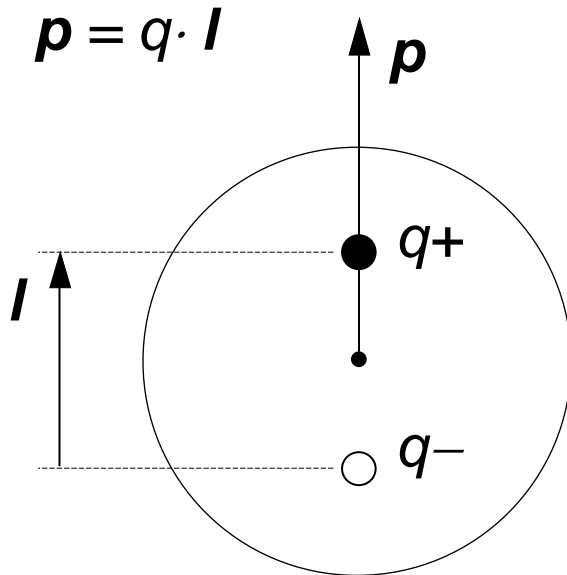
- jony i elektrony mogące poruszać w całej przestrzeni dielektryka (tworzą prąd przewodzenia).

Ładunki związane:

- bieguny dipoli trwałych i indukowanych,
- jony i elektrony mogące poruszać się tylko w części przestrzeni dielektryka nie docierając do elektrod.

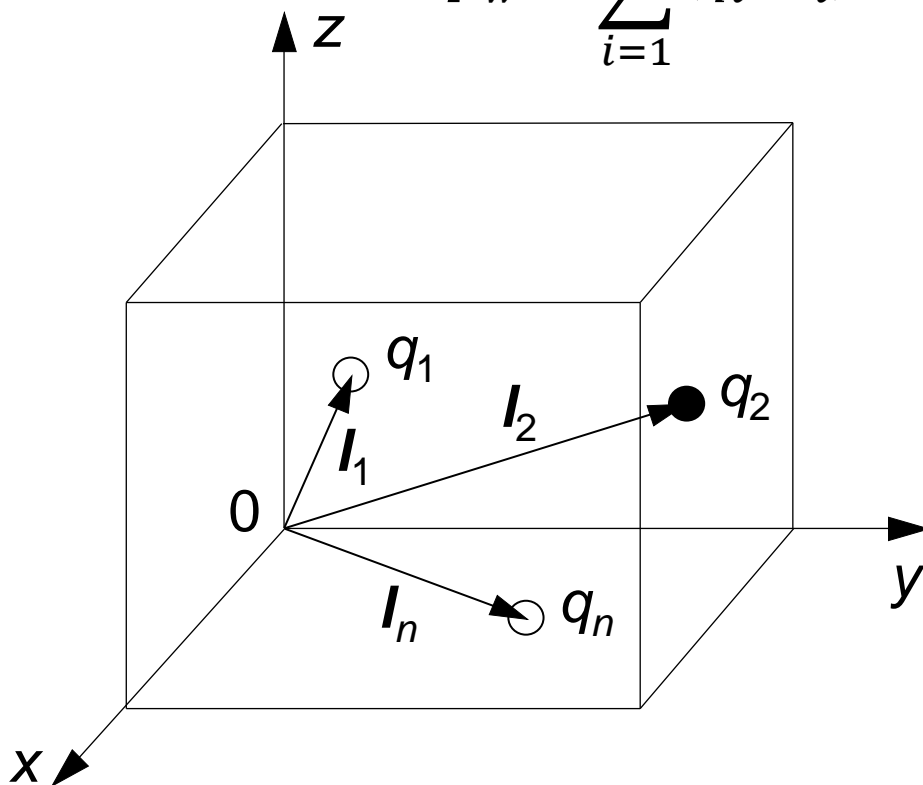
Pole elektryczne zewnętrzne działa na ładunki związane. Zjawisko to nazywa się polaryzacją elektryczną dielektryka.

## Moment dipolowy (wielkość charakteryzująca dipol elektryczny)



Sposób wyznaczania momentu dipolowego cząstki materialnej;  
 $\mathbf{p}$  - moment dipolowy,  $\mathbf{l}$  - wektor odstępu między ładunkami;  
 $q_+$ ,  $q_-$  - wartości ładunków związanych dodatniego i ujemnego

$$\mathbf{p}_w = \sum_{i=1}^n (q_i \cdot \mathbf{l}_i)$$

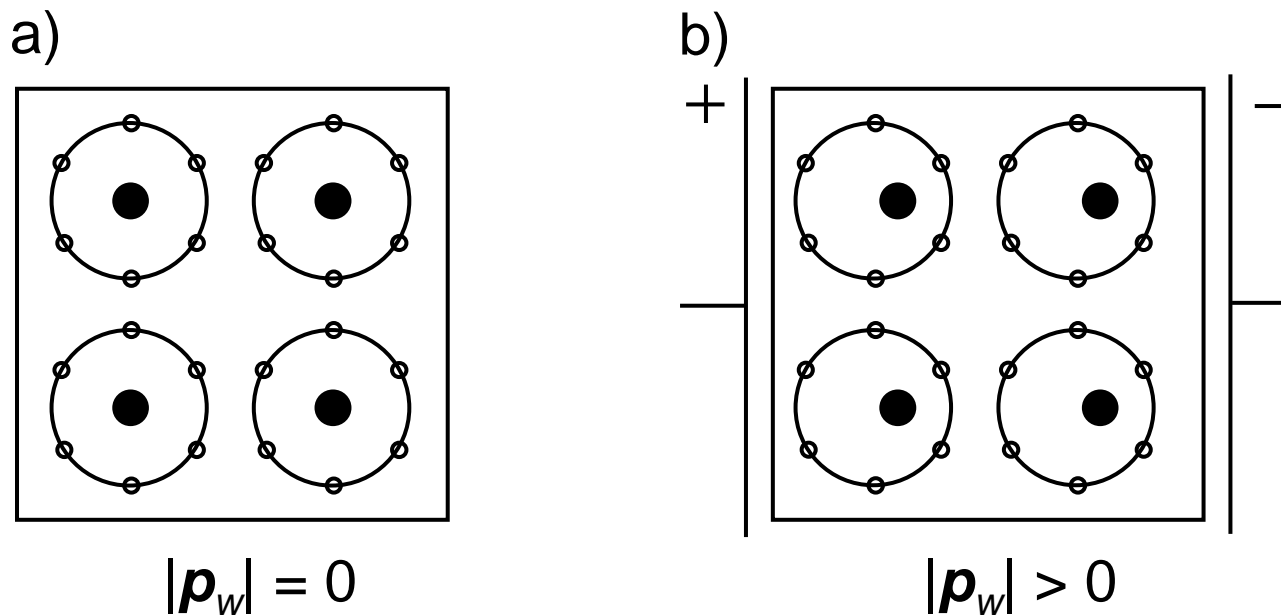


Sposób wyznaczania wypadkowego momentu dipolowego próbki dielektryka:  
 $q_1, q_2, q_n$  - wartości ładunków związanych dodatnich  $\bullet$  i ujemnych  $\circ$ ,  
 $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_n$  - wektory położenia ładunków w układzie  $x, y, z$ .



## Rodzaje (mechanizmy) polaryzacji

Polaryzacja elektronowa: (rezonansowa, bezstratna,  $f_{rez} \cong 10^{15}$  Hz)



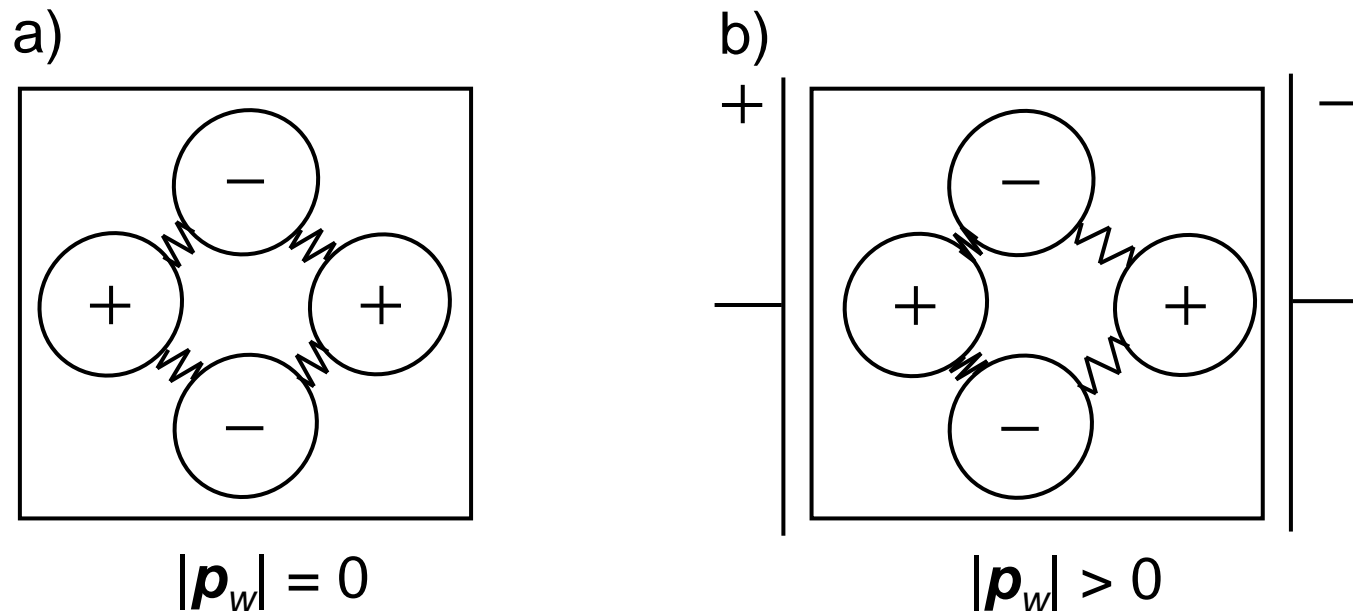
Mechanizm polaryzacji elektronowej: a) dielektryk z wybranymi reprezentatywnymi atomami, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami; ● – jądro atomu, ○ – elektron

Bez zewnętrznego pola elektrycznego: środki ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych w atomach pokrywają się - brak polaryzacji.

Dielektryk w polu elektrycznym: elastyczne przesunięcie ładunków dodatnich i ujemnych w atomach względem siebie - powstają dipole elektryczne.

Indukowanie dipoli jest w rezonansie ze zmianami pola elektrycznego do częstotliwości  $10^{15}$  Hz.

Polaryzacja atomowa: (rezonansowa, bezstratna,  $f_{rez} \cong 10^{13}$  Hz)



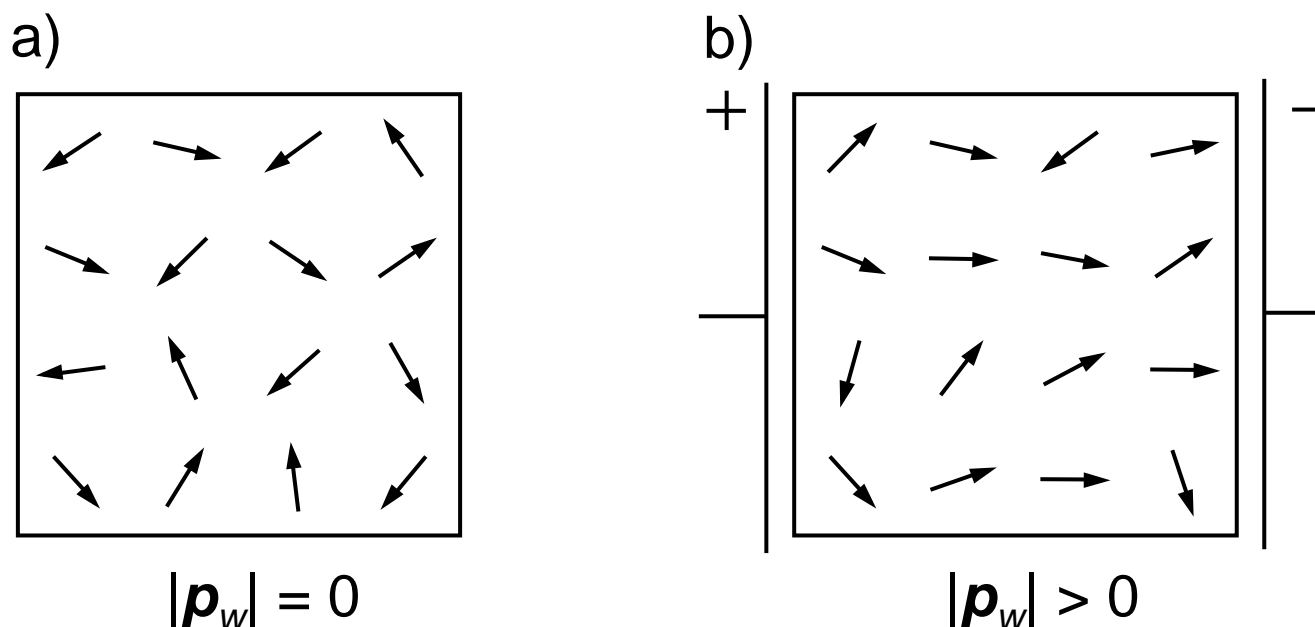
Mechanizm polaryzacji dipolowej: a) dielektryk reprezentowany przez jedną cząsteczkę, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

Bez zewnętrznego pola elektrycznego: środki ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych w cząsteczkach pokrywają się - brak polaryzacji.

Dielektryk w polu elektrycznym: elastyczne przesunięcie ładunków dodatnich i ujemnych w cząsteczkach względem siebie - powstają dipole elektryczne.

Indukowanie dipoli jest w rezonansie ze zmianami pola elektrycznego do częstotliwości  $10^{13}$  Hz.

Polaryzacja dipolowa: relaksacyjna, stratna,  $t_{rel} = 10^{-10} \dots 10^{-6}$  s



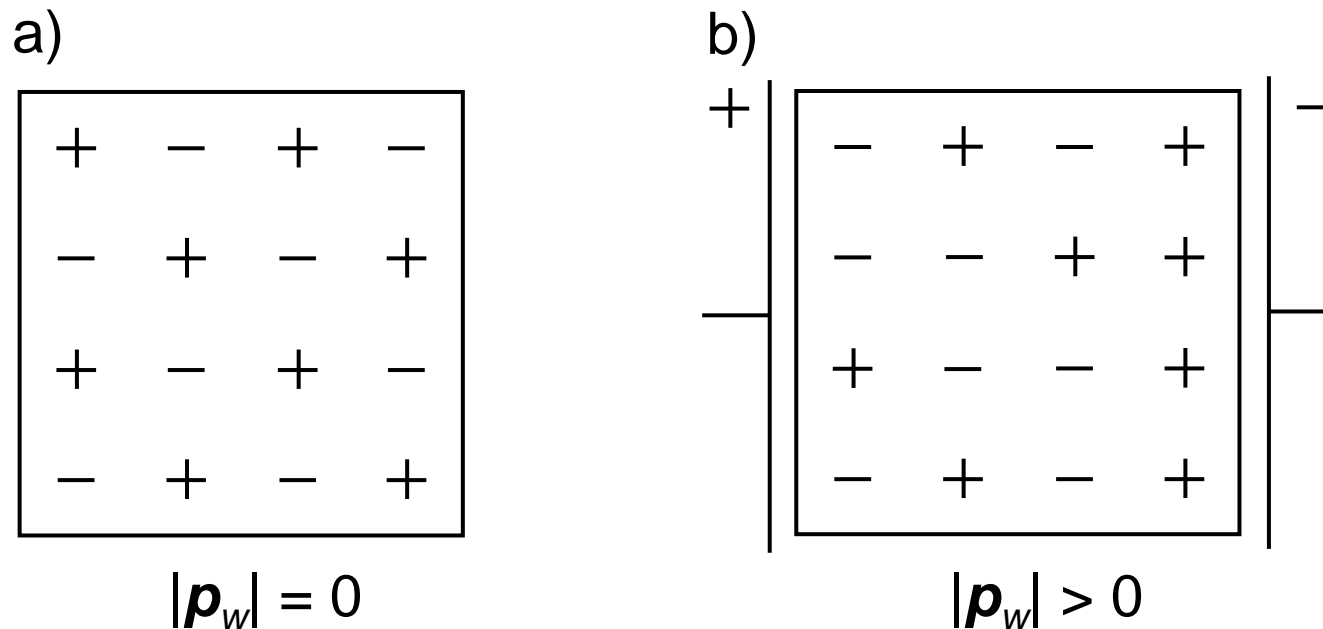
Mechanizm polaryzacji dipolowej: a) dielektryk z reprezentatywnymi dipolami elektrycznymi, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

Bez zewnętrznego pola elektrycznego: naturalne dipole elektryczne zorientowane przypadkowo.

Dielektryk w polu elektrycznym: koordynacja orientacji dipoli elektrycznych zgodnie z zewnętrznym polem elektrycznym.

Zmiana orientacji dipoli za zmianami pola elektrycznego jest opóźniona od  $10^{-10}$  s do  $10^{-6}$  s zależnie od rodzaju dielektryka.

Polaryzacja makroskopowa: relaksacyjna, stratna,  
 $t_{rel} = 10^{-2}$  s ... godziny



Mechanizm polaryzacji makroskopowej: a) dielektryk z reprezentatywnymi jonami związanymi + i -, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

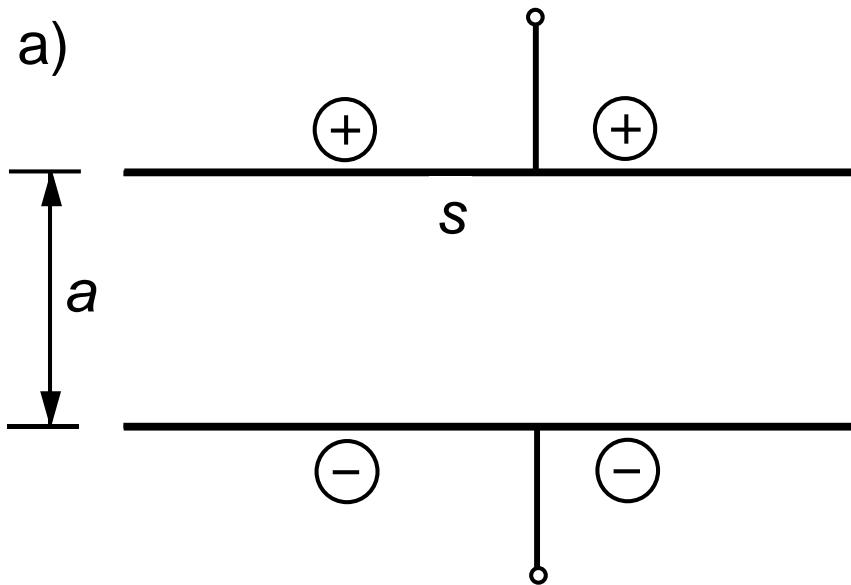
Bez zewnętrznego pola elektrycznego: związane ze strukturą jony są rozmieszczone przypadkowo.

Dielektryk w polu elektrycznym: zmiana rozmieszczenia jonów wymuszona zewnętrznym polem elektrycznym.

Zmiana położenia jonów za zmianami pola elektrycznego jest opóźniona od  $10^{-2}$  s do wielu godzin, zależnie od rodzaju dielektryka.

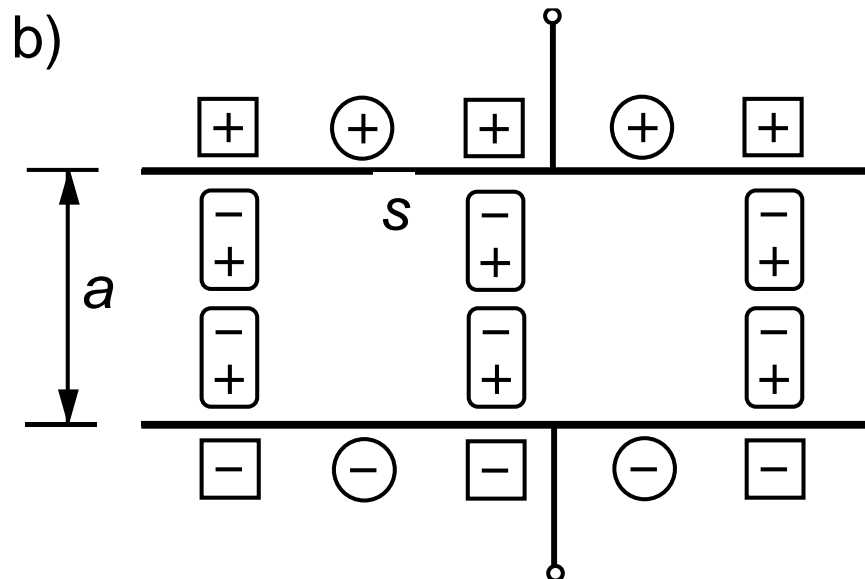
## Związek polaryzacji z przenikalnością elektryczną

Układ izolacyjny bez dielektryka i z dielektrykiem



Takie same wartości ładunku oznaczonego symbolami:

⊕ ⊖ ładunki na elektrodach bez dielektryka



⊕ ⊖ ładunki związane z polaryzacją dielektryka

⊖ ⊕ ładunki dipoli elektrycznych w dielektryku

Ładunek „przesunięty” ze źródła napięcia na elektrody układu izolacyjnego: a) próżniowego, b) z dielektrykiem stałym;  $a$  - odstęp elektrod,  $s$  - powierzchnia elektrody

Układ izolacyjny bez dielektryka:

$$C = C_0 = \varepsilon_0 \frac{s}{a} = \frac{Q_0}{U_0} \quad \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad [(1/36\pi) \cdot 10^{-9}]$$

przenikalność elektryczna próżni

Układ izolacyjny z dielektrykiem:

$$C = \varepsilon \frac{s}{a} = \frac{Q_0 + Q_a}{U_0} = \frac{Q_0 + 1,5 Q_0}{U_0} = \frac{2,5 Q_0}{U_0} = 2,5 \varepsilon_0 \frac{s}{a} = 2,5 C_0$$

$\varepsilon$  - przenikalność elektryczna dielektryka,

$Q_a$  - ładunek przesunięty (zaadsorbowany) ze źródła dla zrównoważenia ładunku dipoli w dielektryku.

### **Przenikalność elektryczna dielektryków**

Przenikalność względna dielektryka:  $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$

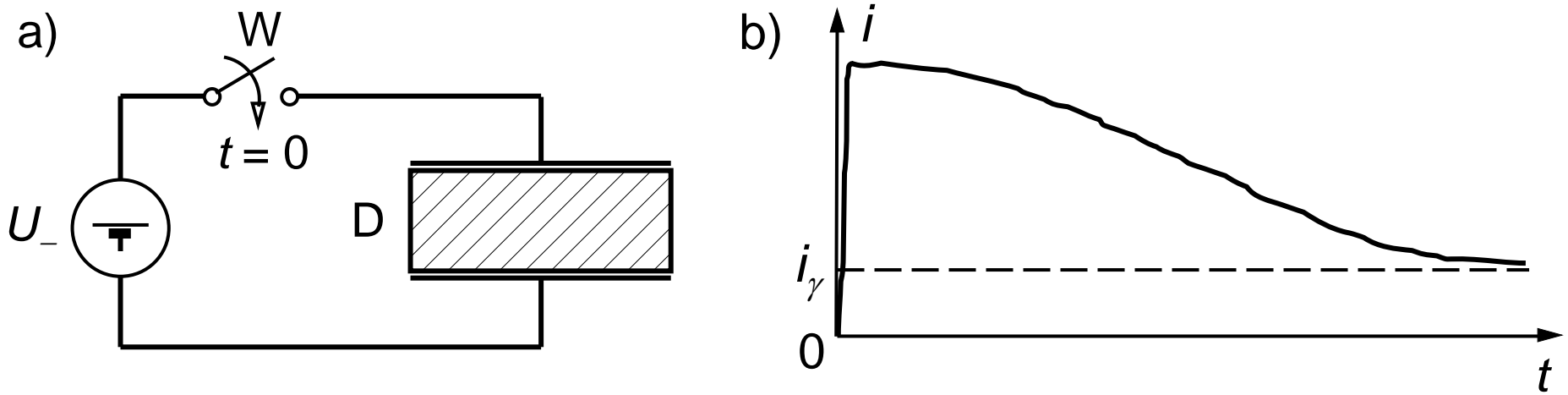
Dla przykładu przedstawionego na rysunku:

$$Q_a = 1,5 Q_0, \quad C = 2,5 C_0$$

$$\text{stąd: } \varepsilon = 2,5 \varepsilon_0, \text{ czyli: } \varepsilon_r = 2,5$$

Najczęściej stosowane dielektryki ciekłe i stałe:  $\varepsilon_r = 2 \dots 8$ .

Dielektryki gazowe:  $\varepsilon_r \cong 1$ .

Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe

Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe: a) schemat obwodu, b) przebieg prądu w obwodzie;  $U_-$  - źródło napięcia stałego,  $W$  - wyłącznik,  $D$  - dielektryk,  $i_\gamma$  - prąd przewodzenia dielektryka

Prądy płynące w obwodzie:

- ustalony prąd przewodzenia  $i_\gamma$ ,
- pojemnościowy prąd ładowania układu elektrod (bez dielektryka),
- pojemnościowy prąd absorpcji związany z polaryzacją dielektryka,
- czynny prąd absorpcji związany ze stratami polaryzacyjnymi w dielektryku.

Trzy ostatnie, to prądy dodatkowe tworzące tzw. prąd przesunięcia (elektrony przemieszczają się ze źródła napięcia do elektrod i z powrotem).

Przy napięciu stałym prąd przesunięcia zanika po upływie czasu relaksacji polaryzacji stratnych właściwych dla danego dielektryka.

Przy napięciu przemiennym:

- prąd przesunięcia ma charakter ciągły,
- składowa czynna prądu absorpcji jest w fazie z napięciem,
- pozostałe składowe prądu przesunięcia wyprzedzają napięcie o  $90^\circ$ .

### ***Stratność elektryczna dielektryków***

- własność materiałów izolacyjnych,
- zmiana energii pola elektrycznego na ciepło,
- wzrost temperatury dielektryka.

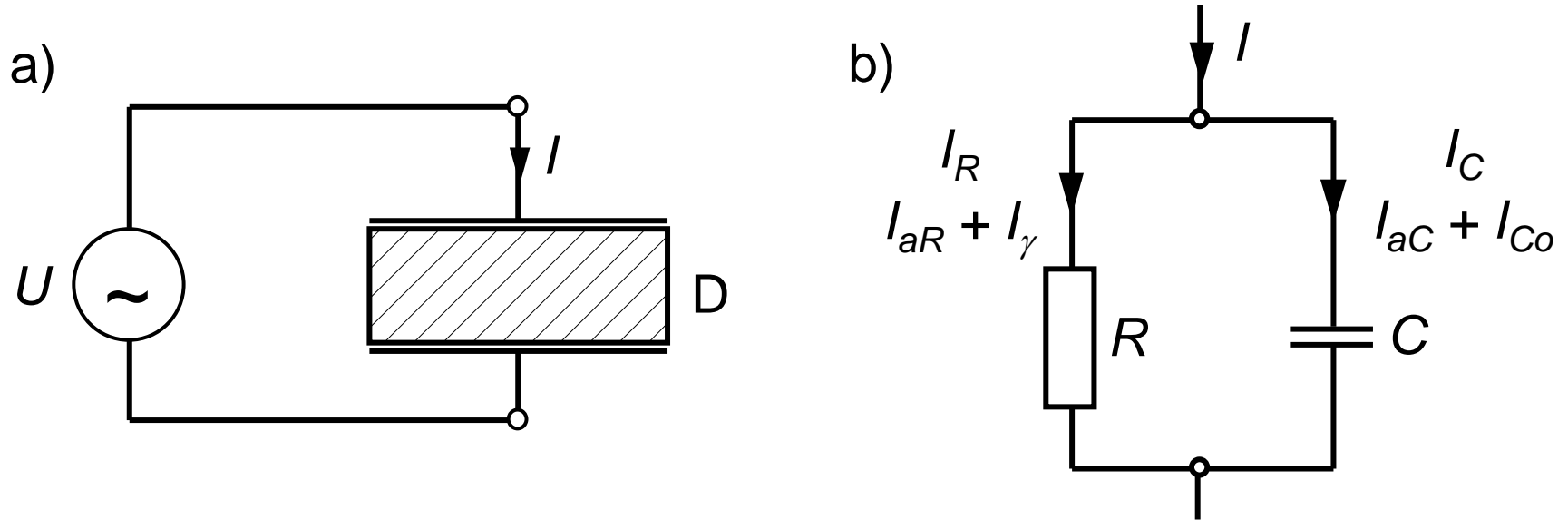
Mechanizmy strat elektrycznych w dielektrykach:

- straty polaryzacyjne - tylko przy napięciu zmiennym,
- straty przewodzenia - przy napięciu stałym i zmiennym.

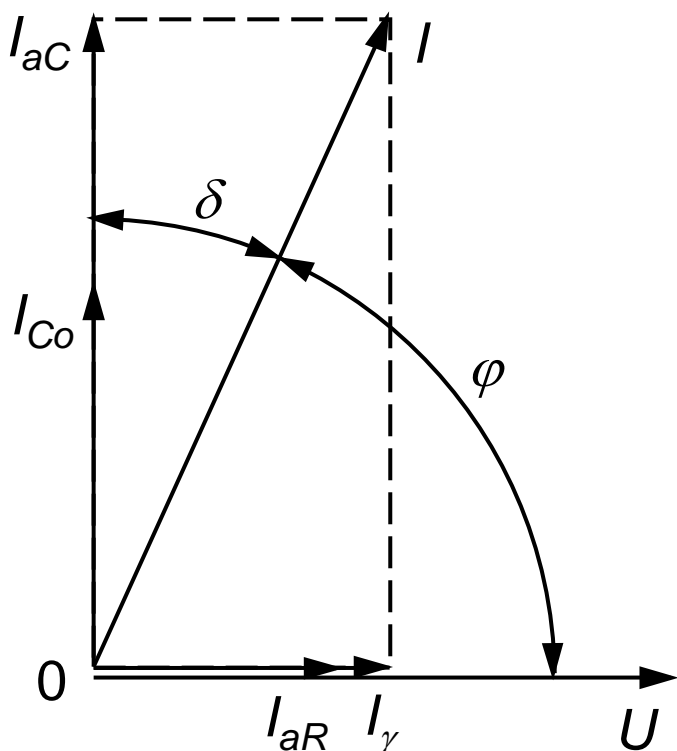
Stratność elektryczna dielektryków:

- współczynnik  $tg\delta$  (miara stratności elektrycznej),
- kąt  $\delta$  - dopełnienie kąta fazowego  $\varphi$  do kąta prostego.





Dielektryk włączony pod napięcie przemiennie: a) schemat obwodu elektrycznego, b) model obwodowy dielektryka;  $U$  - źródło napięcia,  $D$  - dielektryk,  $R$  - rezystancja uwzględniająca straty w dielektryku,  $C$  - pojemność układu elektrod z dielektrykiem



$I_{\gamma}$  - prąd przewodzenia dielektryka,  
 $I_{aR}$  - prąd absorpcji związany ze stratami polaryzacyjnymi w dielektryku,  
 $I_{Co}$  - prąd ładowania układu elektrod (bez dielektryka),  
 $I_{aC}$  - prąd absorpcji związany z polaryzacją dielektryka.

Wykres wektorowy napięcia i prądów dla obwodowego modelu dielektryka

W oparciu o schemat zastępczy i wykres wektorowy można napisać:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{I_{aR} + I_\gamma}{I_{aC} + I_{C_0}} \quad \operatorname{tg}\delta = \frac{I_R \cdot U}{I_C \cdot U} = \frac{P}{Q_C}$$

gdzie:

$P$  - moc czynna (moc strat elektrycznych) w dielektryku,

$Q_C$  - moc bierna pojemnościowa układu izolacyjnego.

Obwód prądu sinusoidalnego o częstotliwości  $f$  i pulsacji  $\omega = 2\pi f$ :

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \cdot \omega C$$

gdzie:  $\frac{1}{\omega C}$  - reaktancja pojemnościowa układu izolacyjnego.

Po podstawieniu zależności na  $I_C$  do wzoru na  $\operatorname{tg}\delta$ :

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R \cdot U}{I_C \cdot U} = \frac{P}{U^2 \cdot \omega C} \quad \text{stąd: } P = \operatorname{tg}\delta \cdot Q_C = \operatorname{tg}\delta \cdot \omega C \cdot U^2$$

$Q_C$  - moc charakterystyczna dla układów izolacyjnych,

$P$  - moc tracona w układzie izolacyjnym,

$\operatorname{tg}\delta$  - współczynnik strat elektrycznych materiału izolacyjnego.

Dielektryki ciekłe i stałe:  $\operatorname{tg}\delta = 10^{-5} \dots 10^{-2}$

Dielektryki gazowe:  $\operatorname{tg}\delta \cong 0$