



Science des matériaux de l'électrotechnique

III Propriétés diélectriques
6. Polarisation électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique
F.L.S. 2009-2010, 1231F Prof. dr.ing. Florin Ciuprina

Polarisation électrique

Structure du cours

Chapitre	Contenu
I Propriétés générales des cristaux	
1	Corps cristallins Etats des corps Réseaux cristallins Défauts des réseaux cristallins
2	Electrons dans les cristaux Modèles (classique et quantiques) de l'électron. Bandes d'énergie associées aux corps cristallins. Classification des matériaux en conducteurs, semi-conducteurs et isolants.
II Conduction électrique	
3	Conduction électrique des métaux. Conduction aux températures usuelles Supraconductivité électrique.
4	Conduction électrique des semi-conducteurs Mécanismes de conduction. Expressions des conductivités intrinsèque et extrinsèques.
5	Conduction électrique des isolants solides Conduction en champs faibles (Conduction électronique, Conduction ionique), Conduction en champs intenses (Claquage des isolants solides).
III Propriétés diélectriques	
6	Polarisation électrique Types de polarisation Polarisation en champs harmoniques. Pertes diélectriques.
IV Propriétés magnétiques	
7	Types de magnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6. Polarisation électrique

- 6.1 Notions générales
- 6.2 Types de polarisations
- 6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques
- 6.4 Pertes diélectriques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6. Polarisation électrique

- 6.1 Notions générales
- 6.2 Types de polarisations
- 6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques
- 6.4 Pertes diélectriques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.1 Notions générales

Polarisation électrique: $\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i (\mathbf{p}_i) \Delta V}{\Delta V}$ $\mathbf{P}_t = \epsilon_0 \chi_t \mathbf{E} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \mathbf{E}$

$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E} + \frac{\gamma}{\epsilon_0} \mathbf{P}$ - l'intensité du champ électrique locale (intérieur)

$\alpha = \frac{p}{E_0}$, α [Fm²] - facteur de polarisation

Types de polarisation:

- polarisation de déformation
 - électronique
 - ionique
- polarisation d'orientation
- polarisation de non-homogénéité (interfaciale)

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6. Polarisation électrique

- 6.1 Notions générales
- 6.2 Types de polarisations
- 6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques
- 6.4 Pertes diélectriques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.2 Types de polarisations

Types de polarisation:

- polarisation de déformation
 - électronique
 - ionique
- polarisation d'orientation
- polarisation de non-homogénéité (interfaciale)

Questions a analyser:

- En quoi consiste?
- Dans quels matériaux?
- Relation macro – micro?
- Variation avec la fréquence du champ électrique.
- Observations.

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.2 Types de polarisations

Polarisation de déformation électronique

$$p_e = \alpha_e E_0 \quad \alpha_e = 4\pi\epsilon_0 R^3$$

$$P_e = N_e p_e = N_e \alpha_e E_0$$

$$\chi_{ee} = \frac{N_e \alpha_e}{\epsilon_0 - \gamma N_e \alpha_e}$$

$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{N_e \alpha_e}{\epsilon_0 - \gamma N_e \alpha_e}$$

$$f > f_{0e} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ Hz} \Rightarrow P_e = 0$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.2 Types de polarisations

Polarisation de déformation ionique

$$p_i = \alpha_i E_0 \quad \alpha_i = 8\pi\epsilon_0 a^3$$

$$P_i = N_i p_i = N_i \alpha_i E_0$$

$$\chi_{ei} = \frac{N_i \alpha_i}{\epsilon_0 - \gamma N_i \alpha_i}$$

$$\epsilon_{ri} > \epsilon_{re}$$

$$\epsilon_r = 1 + \frac{N_i \alpha_i}{\epsilon_0 - \gamma N_i \alpha_i}$$

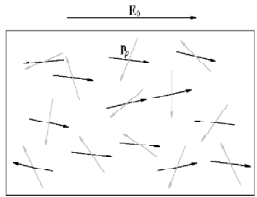
$$f > f_{0i} \approx 10^{13} - 10^{14} \text{ Hz} \Rightarrow P_i = 0$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.2 Types de polarisations

Polarisation d'orientation (de relaxation)



$$p_o = \alpha_o E_0 \quad \alpha_o = \frac{\text{const}}{T}$$

$$P_o = N_o p_o = N_o \alpha_o E_0$$

$$\chi_{eo} = \frac{N_o \alpha_o}{\epsilon_0 - \gamma N_o \alpha_o}$$

$$\epsilon_{ro} = 1 + \frac{N_o \alpha_o}{\epsilon_0 - \gamma N_o \alpha_o}$$

$\epsilon_{ro} > \epsilon_{ri} > \epsilon_{re}$

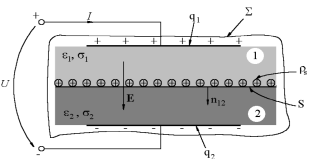
$f > f_{0o} \approx 10^6 - 10^8 \text{ Hz} \Rightarrow P_o = 0$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.2 Types de polarisations

Polarisation de non-homogénéité (interfaciale)



$$P_n = P - P_o$$

$$\frac{\epsilon_2}{\sigma_2} \neq \frac{\epsilon_1}{\sigma_1}$$

$$\tau_1 = \frac{\epsilon_1}{\sigma_1} \quad \tau_2 = \frac{\epsilon_2}{\sigma_2}$$

$f > f_{0n} \approx 10^2 \text{ Hz} \Rightarrow P_n = 0$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6. Polarisation électrique

- 6.1 Notions générales
- 6.2 Types de polarisations
- 6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques
- 6.4 Pertes diélectriques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques

$E(t) = \hat{E} \sin \omega t$

↓

$\underline{E}, \underline{E}_0, \underline{P}, \text{ et } \underline{D}$

↓

$\underline{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$

The graph shows the frequency dependence of the real part of the relative permittivity, ϵ'_r . It features four distinct resonance peaks corresponding to different polarization mechanisms:

- Electronic polarization:** Occurs at very high frequencies, with a resonance frequency f_{0n} in the ultraviolet range.
- Ionic polarization:** Occurs at frequencies in the radio range, with a resonance frequency f_{0i} .
- Orientation polarization:** Occurs at frequencies in the microwave range, with a resonance frequency f_{0l} .
- Interfacial polarization:** Occurs at very low frequencies, with a resonance frequency f_{0c} .

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6. Polarisation électrique

- 6.1 Notions générales
- 6.2 Types de polarisations
- 6.3 Permittivité des diélectriques en champs électriques harmoniques
- 6.4 Pertes diélectriques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.4 Pertes diélectriques

- Pertes par hystérésis diélectrique (P_h) – seulement en c.a. (par polarisation électrique)
- Pertes par conduction électrique (P_c) – en c.c et en c.a (par effet Joule)

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.4 Pertes diélectriques

Pertes par hystérésis diélectrique

The graph shows three curves starting from the origin at time \$t_0\$. The top curve is \$E(t)\$, the middle is \$D(t)\$, and the bottom is \$P(t)\$. \$E(t)\$ is a step function. \$D(t)\$ and \$P(t)\$ show hysteresis loops. The area between \$D(t)\$ and \$E(t)\$ is shaded, representing energy loss.

$$E(t) = E_m \sin \omega t$$

$$D(t) = D_m \sin(\omega t - \delta_h)$$

The phasor diagram shows \$E\$ on the horizontal axis and \$D\$ on the vertical axis. The angle between them is \$\delta_h\$. The magnitude of \$E\$ is \$E_m\$ and the magnitude of \$D\$ is \$D_m\$.

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.4 Pertes diélectriques

Pertes par hystérésis diélectrique

$$E(t) = E_m \sin \omega t \rightarrow \underline{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E$$

$$D(t) = D_m \sin(\omega t - \delta_h) \rightarrow \underline{D} = \frac{D_m}{\sqrt{2}} \exp(-j\delta_h) = \frac{D_m}{\sqrt{2}} (\cos \delta_h - j \sin \delta_h)$$

$$\underline{\epsilon} = \frac{\underline{D}}{\underline{E}} = \frac{D_m}{E_m} (\cos \delta_h - j \sin \delta_h) = \epsilon_m (\cos \delta_h - j \sin \delta_h) = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\epsilon' = \epsilon_m \cos \delta_h \rightarrow \text{tg } \delta_h = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

$$\epsilon'' = \epsilon_m \sin \delta_h$$

$$p_h(t) = \frac{dw_e}{dt} = E \frac{dD}{dt} = E J_D$$

$$\underline{S}_h = \underline{E} \underline{J}_D = \underline{E} (j\omega \underline{D})^* = \underline{E} (j\omega \underline{\epsilon} \underline{E})^* = E^2 (-j) \omega (\epsilon' + j\epsilon'') = \omega \epsilon'' E^2 - j\omega \epsilon' E^2$$

$$= p_h + j q_h \rightarrow \boxed{p_h = \omega \epsilon'' E^2} \quad q_h = -\omega \epsilon' E^2$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.4 Pertes diélectriques

Pertes par conduction électrique

Effet Joule: $p = EJ \rightarrow \underline{S}_c = \underline{E} \underline{J}^* = \sigma E^2 = p_c$

$$\boxed{p_c = \sigma E^2}$$

Pertes totales

$$p_t = p_h + p_c = \omega \epsilon'' E^2 + \sigma E^2 = (\omega \epsilon'' + \sigma) E^2$$

$$= (\omega \epsilon' \text{tg } \delta_h + \sigma) E^2 = \omega \epsilon' (\text{tg } \delta_h + \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}) E^2 \rightarrow \boxed{p_t = \omega \epsilon' E^2 \text{tg } \delta}$$

$$\text{tg } \delta_c = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}$$

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_h + \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} = \text{tg } \delta_h + \text{tg } \delta_c$$

$$q_t = -\omega \epsilon' E^2$$

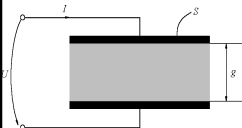
$$\text{tg } \delta = \frac{p_t}{|q_t|}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Polarisation électrique

6.4 Pertes diélectriques

Condensateur réel (avec pertes)

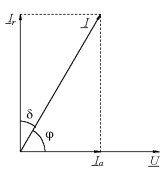


$$Q = q_0 V = -\omega \epsilon' E^2 S g = -\omega \epsilon' \frac{S}{g} U^2$$

$$Q = \frac{U^2}{X_C} = \frac{U^2}{-\frac{1}{\omega C}} = -\omega C U^2 \quad \left. \vphantom{Q} \right\} \rightarrow C = \frac{\epsilon' S}{g}$$

$$P = p_r V = \omega \epsilon' E^2 S g \operatorname{tg} \delta = \omega \epsilon' \frac{S}{g} U^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{|Q|} \rightarrow \operatorname{tg} \delta = 1 / (\operatorname{tg} \varphi)$$


Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F
