

CHƯƠNG III

ĐIỆN MÔI

§ 1. Sự phân cực trong chất điện môi

§ 2. Vector phân cực điện môi

§ 3. Điện trường trong chất điện môi

§ 4. Vật liệu điện môi đặc biệt

§1. Sự phân cực trong chất điện môi

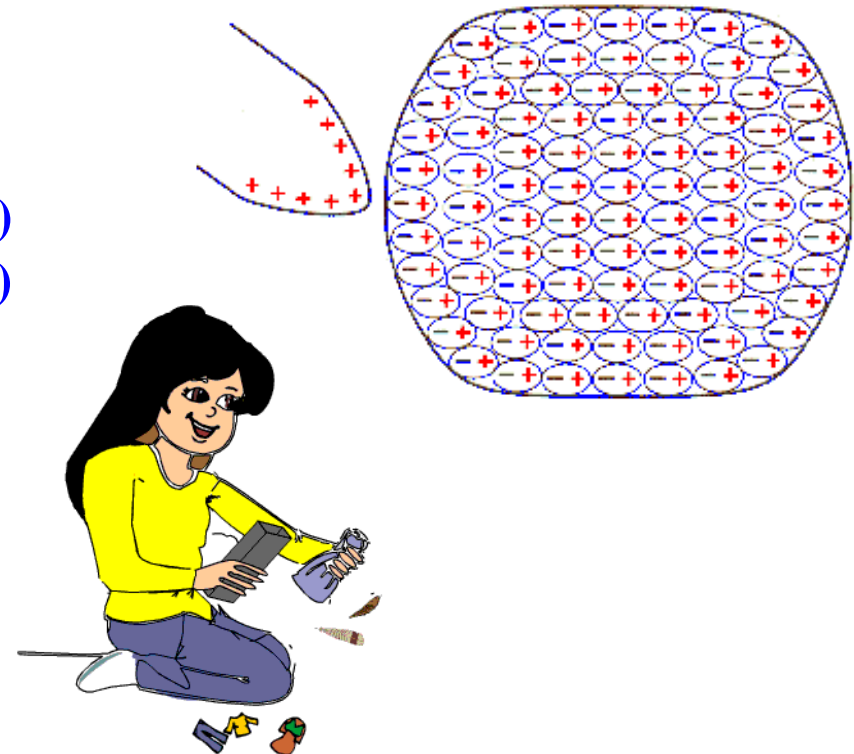
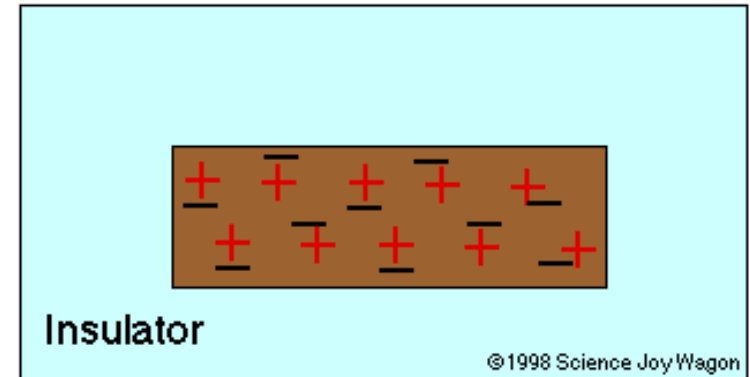
1. Hiện tượng phân cực điện môi

☞ **Chất điện môi:** Điện tử liên kết chặt với hạt nhân nguyên tử \Rightarrow phân bố điện tích đối xứng \Rightarrow khó tự do di chuyển suốt qua toàn bộ thể tích.

☞ Điện trường của thanh tích điện (+) hút các điện tử và đẩy hạt nhân \Rightarrow mất phân bố điện tích đối xứng.

☞ **Phân bố điện tích bề mặt:** điện tích (-) ở phía sát thanh tích điện và điện tích (+) ở phía đối diện \Rightarrow *Hiện tượng phân cực*

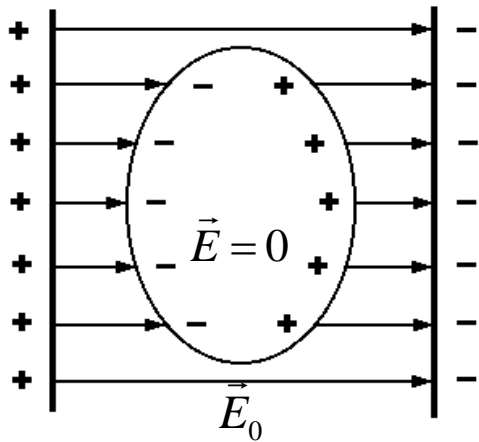
☞ Do điện trường thanh giảm theo khoảng cách với vật \Rightarrow lực hút sẽ lớn hơn lực đẩy \Rightarrow vật bị hút về thanh tích điện.



§1. Sự phân cực trong chất điện môi

1. Hiện tượng phân cực điện môi

Vật dẫn

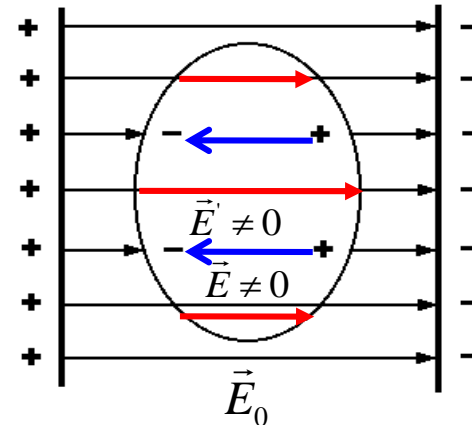


☞ Xuất hiện phân bố các điện tích tự do trên toàn bộ bề mặt \Rightarrow mật độ điện mặt σ .

☞ ~~không~~ thể xuyên qua vật dẫn \Rightarrow hiệu ứng Màn chắn tĩnh điện

☞ Vật dẫn trở lại trạng thái trung hòa điện khi $\vec{E}_0 = 0$

Điện môi



☞ Xuất hiện phân bố điện tích liên kết ở một số vùng trên bề mặt \Rightarrow mật độ điện tích liên kết mặt σ' .

☞ Hình thành điện trường phụ \vec{E}' ngược chiều \vec{E}_0

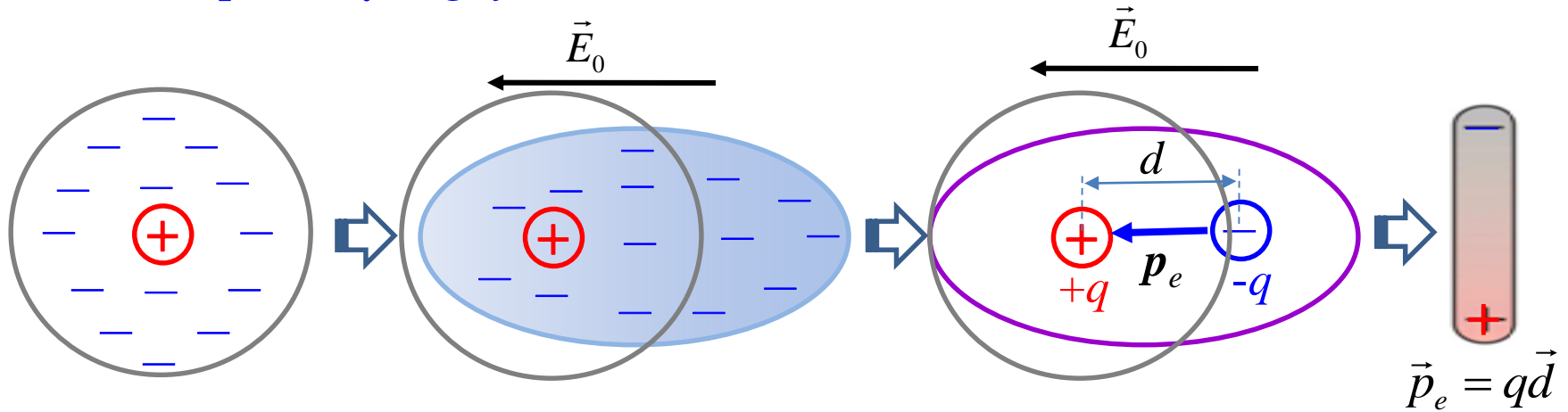
☞ Điện tích liên kết có thể vẫn tồn tại ngay cả sau khi $\vec{E}_0 = 0$

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

§1. Sự phân cực trong chất điện môi

1. Hiện tượng phân cực điện môi

Mô hình phân cực nguyên tử



☞ Nguyên tử có điện tử liên kết chặt với hạt nhân \Rightarrow phân bố điện tích đối xứng \Rightarrow trung hòa về điện.

☞ Điện trường ngoài \vec{E}_0 : Điện tử di chuyển ngược chiều trường ngoài \Rightarrow hình thành một “đám mây” điện tử lệch về một phía mà tâm của nó không trùng với hạt nhân nguyên tử \Rightarrow nguyên tử bị phân cực điện.

☞ Nguyên tử bị phân cực điện \Leftrightarrow lưỡng cực điện, với \vec{d} là vector hướng từ trọng tâm “đám mây điện tử” đến hạt nhân nguyên tử.

§1. Sự phân cực trong chất điện môi

1. Hiện tượng phân cực điện môi

Phân tử tự phân cực (phân cực tự phát)

☞ Phân tử có phân bố điện tích không đối xứng \Rightarrow trọng tâm điện tích (+) và (-) cách nhau một khoảng \vec{d} khi $\vec{E}_0 = 0$, nghĩa là:

$$\vec{p}_e \neq 0$$

☞ Điện trường ngoài không ảnh hưởng đến độ lớn của $\vec{p}_e \Rightarrow$ phân tử là lưỡng cực cứng.

☞ Ví dụ: H_2O , NH_3 , HCl , CH_3Cl ...

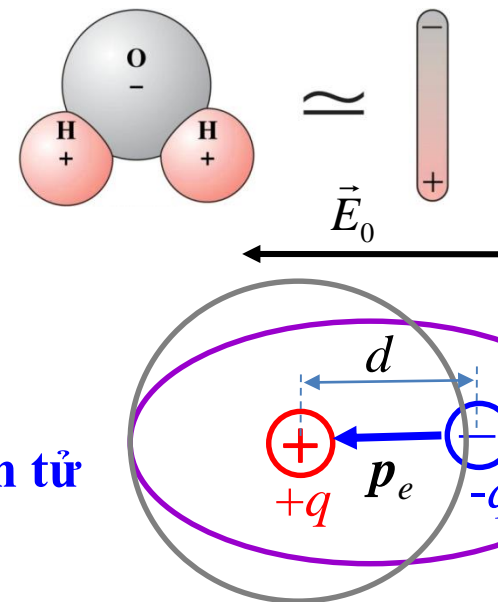
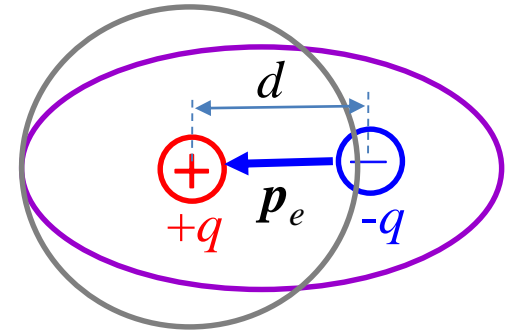
Phân tử không tự phân cực (phân cực cảm ứng)

☞ $\vec{p}_e = 0$ khi $\vec{E}_0 = 0$ và $\vec{p}_e \neq 0$ khi $\vec{E}_0 \neq 0$

☞ Có: $\vec{p}_e = \epsilon_0 \cdot \alpha \cdot \vec{E}$

với α : độ phân cực phân tử, ϵ thể tích phân tử

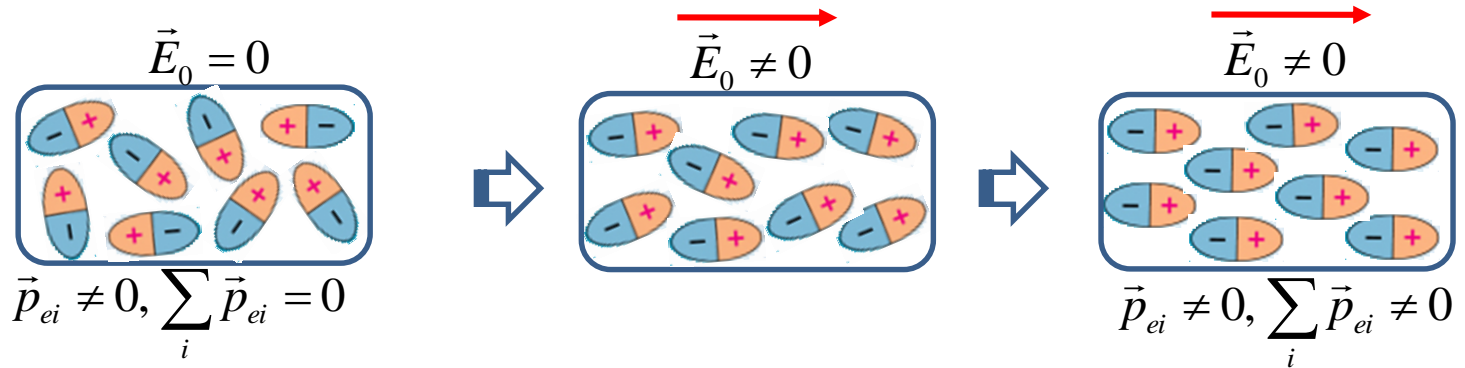
☞ Phân tử là lưỡng cực đàn hồi



§1. Sự phân cực trong chất điện môi

2. Các dạng phân cực điện môi

Điện môi cấu tạo bởi các phân tử tự phân cực: Phân cực định hướng



☞ Khi không có trường ngoài \Rightarrow từng phân tử có $\vec{p}_{ei} \neq 0$ nhưng mỗi \vec{p}_{ei} có phương ngẫu nhiên $\Rightarrow \sum_i \vec{p}_{ei} = 0$

☞ Khi có trường ngoài \Rightarrow các \vec{p}_{ei} quay dần theo phương trường ngoài cho đến khi toàn bộ các \vec{p}_{ei} có phương trùng phương trường ngoài $\sum_i \vec{p}_{ei} \neq 0$

☞ Hình thành lớp điện tích tại bề mặt điện môi \Rightarrow không phải là điện tích tự do mà là điện tích liên kết.

§1. Sự phân cực trong chất điện môi

2. Các dạng phân cực điện môi

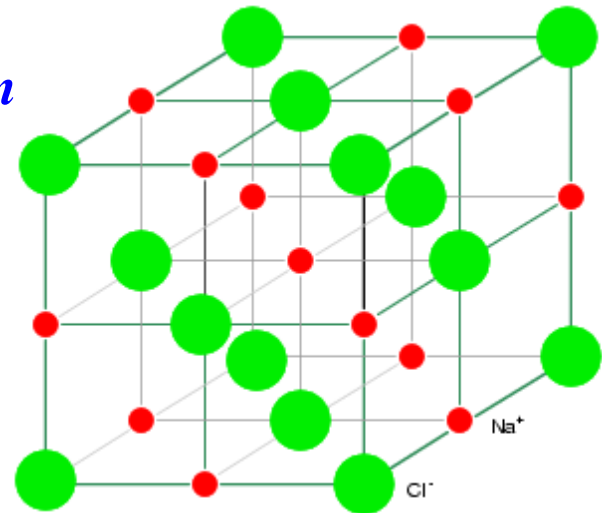
Điện môi cấu tạo bởi các phân tử không tự phân cực: Phân cực điện tử

☞ Khi không có trường ngoài \Rightarrow từng phân tử có $\vec{p}_{ei} = 0$ do trọng tâm điện tích (+) và (-) trùng nhau $\Rightarrow \sum_i \vec{p}_{ei} = 0$

☞ Khi có trường ngoài \Rightarrow các lớp vỏ điện tử của từng phân tử bị biến dạng \Rightarrow trọng tâm điện tích (+) và (-) không trùng nhau, nên $\vec{p}_{ei} \neq 0$ và đều cùng phương trường ngoài $\Rightarrow \sum_i \vec{p}_{ei} \neq 0$

Điện môi có cấu trúc tinh thể: Phân cực i-ôn

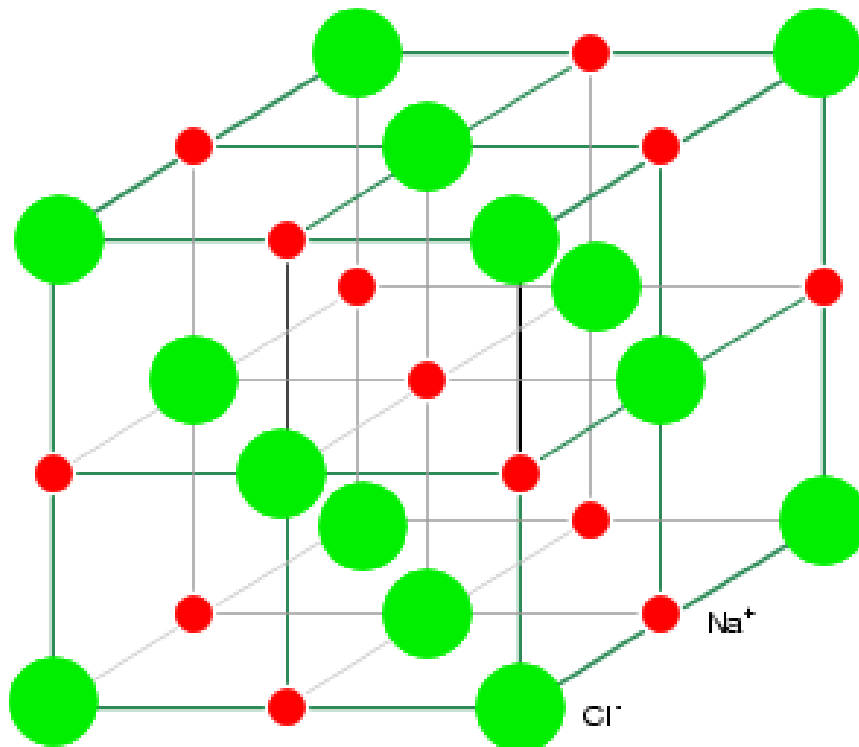
☞ Khối tinh thể được coi là như một phân tử khổng lồ có các mạng i-ôn (+) và (-) đan xen nhau.



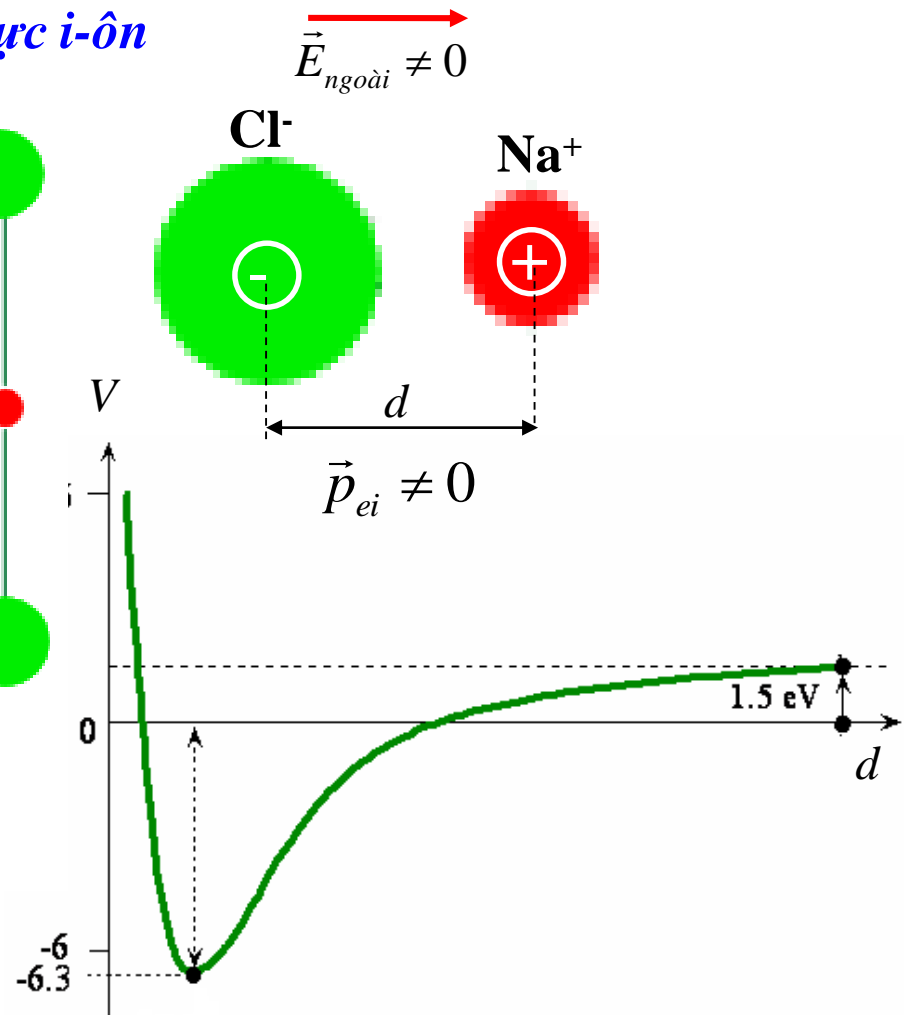
§1. Sự phân cực trong chất điện môi

2. Các dạng phân cực điện môi

Điện môi có cấu trúc tinh thể: Phân cực i-ôn



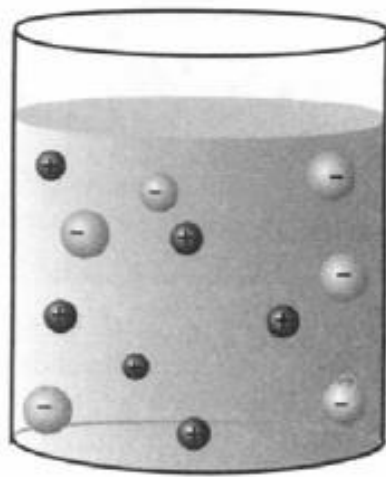
Cấu trúc tinh thể NaCl



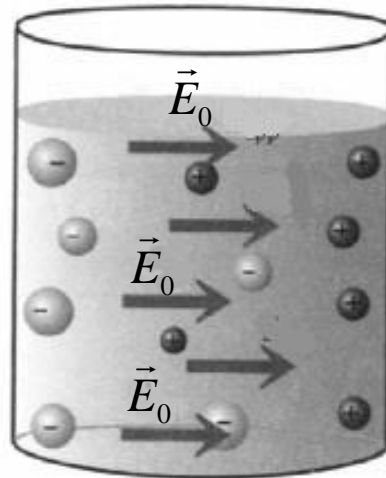
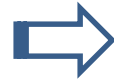
§1. Sự phân cực trong chất điện môi

2. Các dạng phân cực điện môi

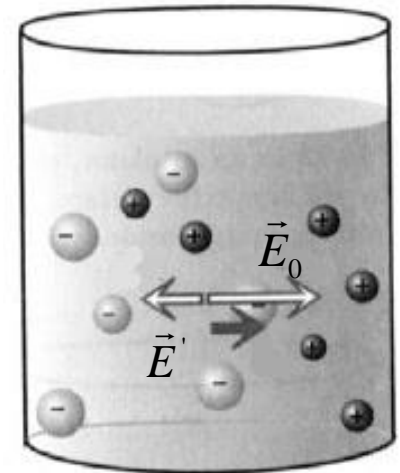
Điện môi có cấu trúc tinh thể: Phân cực i-ôn



$$\vec{E}_0 = 0$$



$$\vec{E}_0 \neq 0$$



$$\vec{E}_0 \neq 0$$

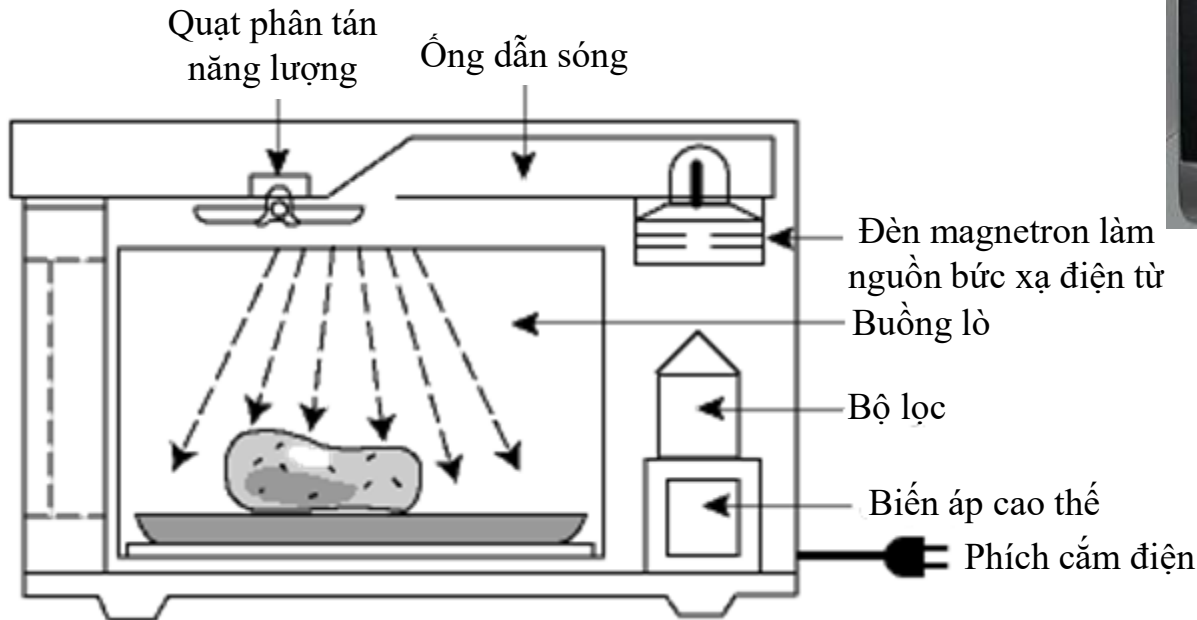
$$\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}_0$$

☞ Đối với cả 3 loại điện môi \Rightarrow sự phân cực biến mất khi bỏ đi điện trường ngoài.

§1. Sự phân cực trong chất điện môi

3. Ứng dụng hiện tượng phân cực điện môi trong kỹ thuật

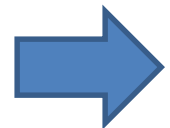
Lò vi sóng (Microwave Oven)



☞ Nguyên lý hoạt động: quá trình quay các moment lưỡng cực (phân tử nước) trong điện trường xoay chiều tần số cao \Rightarrow sinh ra nhiệt do sự va chạm của các moment lưỡng cực trong quá xoay.

☞ Mật độ năng lượng điện trường trong quá trình tạo nhiệt của \vec{p}_{ei} :

$$w_E = \omega \cdot \epsilon'' \cdot \epsilon_0 \cdot E^2$$



§2. Vector phân cực điện môi

1. Định nghĩa

♦ Đại lượng vật lý đo bằng tổng các mô men lưỡng cực điện của các phân tử có trong một đơn vị thể tích của khối điện môi:

$$\vec{P}_e = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_{ei}}{\Delta V}$$

☞ Điện môi không tự phân cực và điện môi tinh thể

khi $\vec{E} \neq 0$ mọi phân tử đều có cùng \vec{p}_{ei}

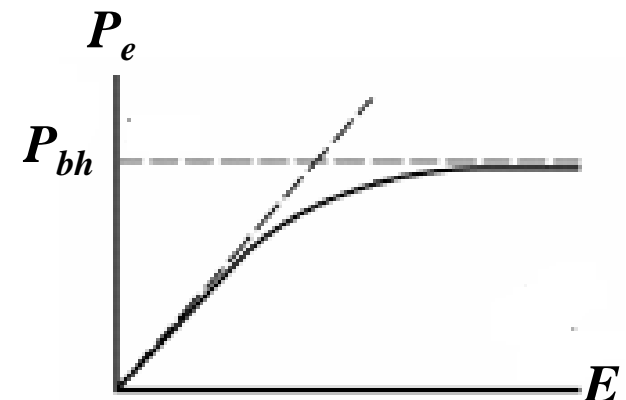
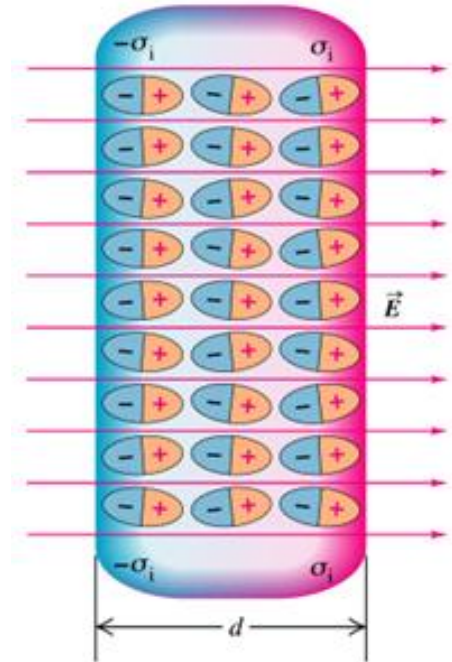
$$\text{Có: } \vec{P}_e = \frac{n \cdot \vec{p}_{ei}}{\Delta V} = n_0 \vec{p}_{ei} = n_0 \epsilon_0 \alpha \vec{E}$$

$$\text{Hay } \vec{P}_e = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (\chi_e: \text{Độ cảm điện môi})$$

☞ Điện môi tự phân cực

$$\vec{E} \text{ thấp} \Rightarrow \vec{P}_e = \frac{n_0 \cdot p_e^2}{3kT} \vec{E} \quad \text{với } \chi_e = \frac{n_0 \cdot p_e^2}{3\epsilon_0 kT}$$

\vec{E} đủ lớn $\Rightarrow \vec{P}_e$ đạt trạng thái bão hòa



§2. Vector phân cực điện môi

2. Vector phân cực điện môi và mật độ điện mặt liên kết

☞ Xét điện môi phân cực với điện tích trên ΔS là $\pm\sigma'\Delta S$

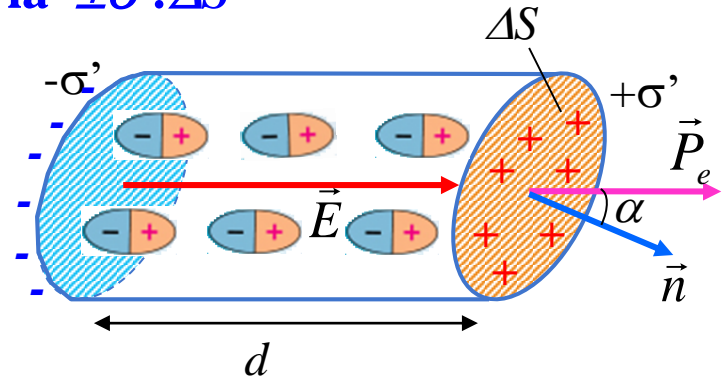
$$\text{có: } P_e = |\vec{P}_e| = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \vec{p}_{ei} \right|}{\Delta V}$$

$$\text{Trong đó: } \left| \sum_{i=1}^n \vec{p}_{ei} \right| = \sigma' \Delta S \cdot d \quad \text{và}$$

$$\Delta V = \Delta S \cdot d \cdot \cos \alpha$$

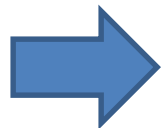
$$\text{Vì thế: } P_e = \frac{\sigma' \Delta S \cdot d}{\Delta S \cdot d \cdot \cos \alpha} = \frac{\sigma'}{\cos \alpha}$$

$$\Rightarrow \sigma' = P_e \cdot \cos \alpha = P_{en}$$



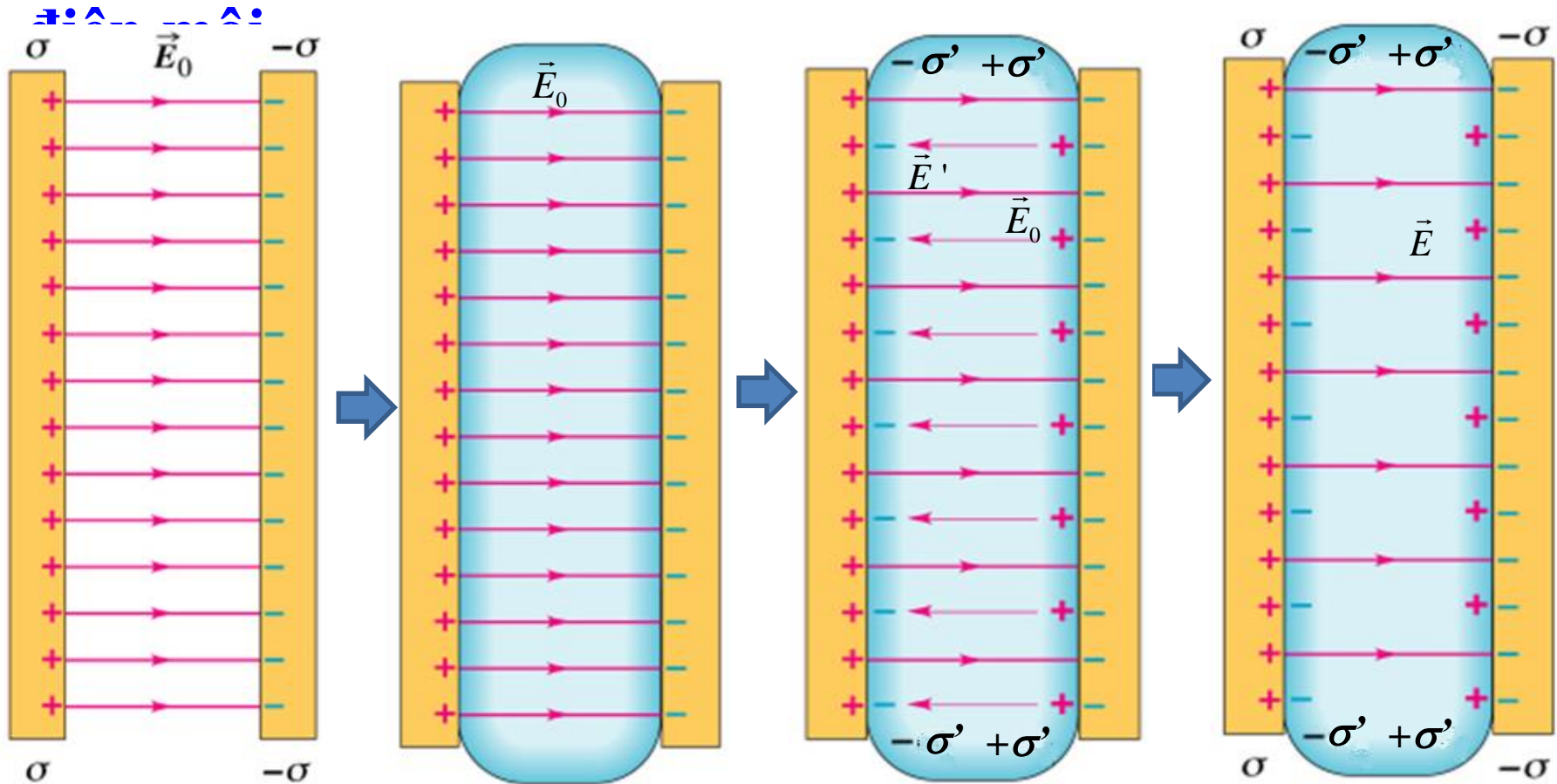
♦ Mật độ điện mặt các điện tích liên kết của khối điện môi có giá trị bằng hình chiếu của vector phân cực trên pháp tuyến của mặt giới hạn đó.

♦ Đơn vị của P_e : C/m^2



§3. Điện trường trong chất điện môi

1. Cường độ điện trường trong chất



Điện trường tổng hợp trong chất điện môi: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$

§3. Điện trường trong chất điện môi

1. Cường độ điện trường trong chất điện môi

☞ Chiều theo chiều của \vec{E}_0 có: $E = E_0 - E'$

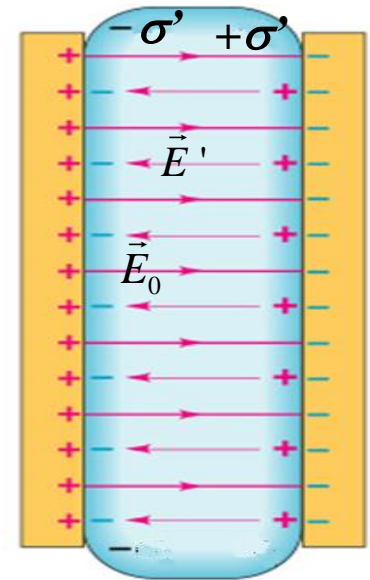
♦ E' là điện trường gây bởi 2 mặt phẳng vô hạn mang điện tích trái dấu với mật độ $-\sigma'$ và $+\sigma'$, và:

$$\left. \begin{array}{l} E' = \sigma' / \epsilon_0 \\ \text{với: } \sigma' = P_{en} = \epsilon_0 \chi_e E_n = \epsilon_0 \chi_e E \end{array} \right\} E' = \chi_e E$$

☞ $E = E_0 - \chi_e E$ hay: $E = \frac{E_0}{1 + \chi_e} = \frac{E_0}{\epsilon}$

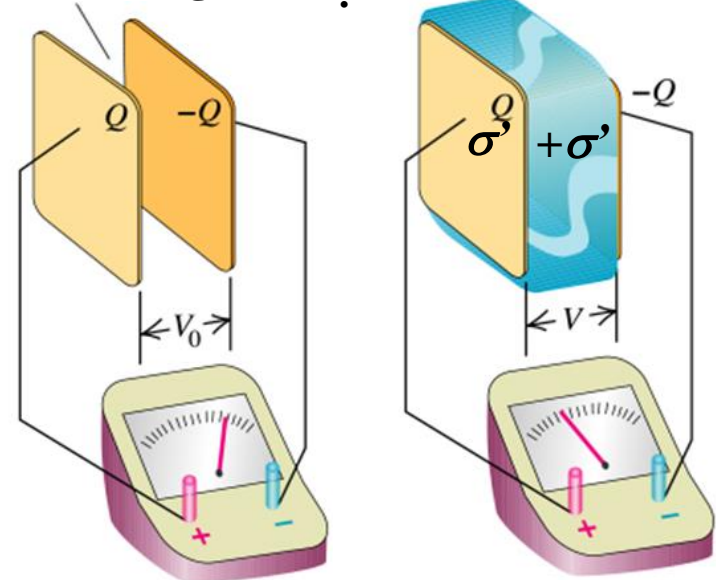
♦ $\epsilon = 1 + \chi_e$ là hằng số điện môi, đặc trưng cho tính chất của môi trường

♦ Cường độ điện trường trong chất điện môi đồng chất và đẳng hướng giảm đi ϵ lần so với cường độ điện trường trong chân không.



Chân không

Điện môi

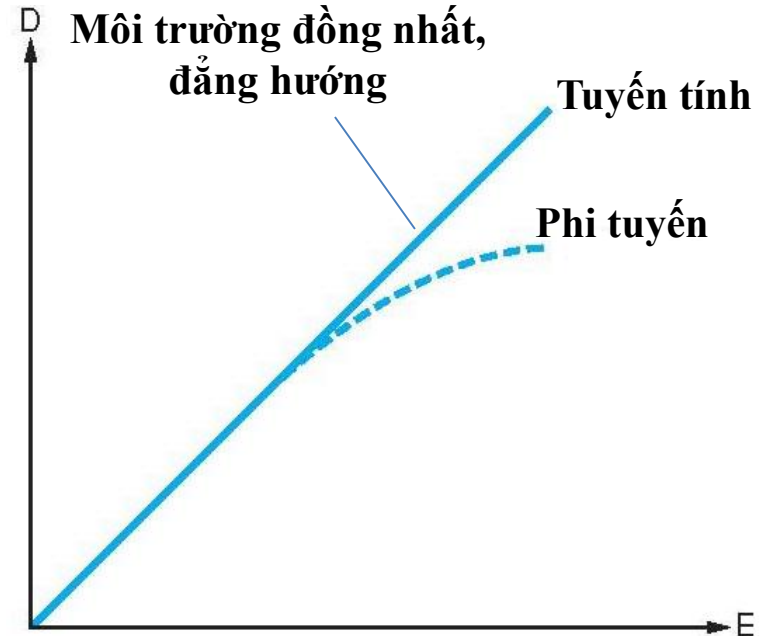


§3. Điện trường trong chất điện môi

2. Điện cảm trong chất điện môi

☞ có: $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$ $\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \\ \epsilon = 1 + \chi_e \end{array} \right. \begin{array}{l} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_e \vec{E} = \\ \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e \end{array}$

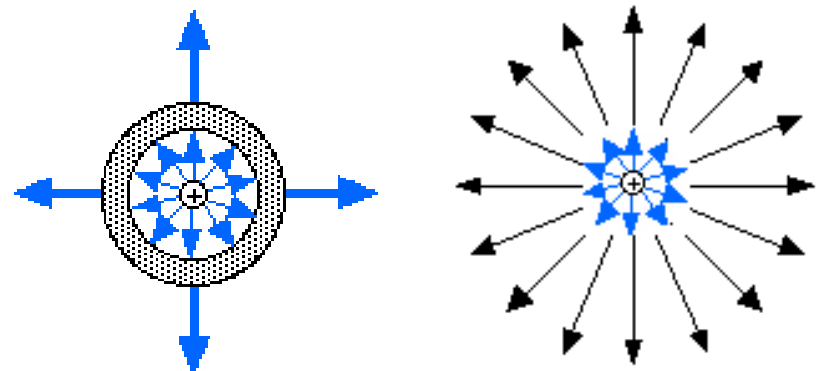
☞ Điện cảm \vec{D} trong môi trường không đồng nhất, không cùng phương, cùng chiều với \vec{E}



3. Đường sức trường qua mặt phân cách 2 môi trường

☞ Đường sức điện trường gián đoạn khi qua mặt phân cách 2 môi trường.

☞ Đường sức điện cảm không gián đoạn khi qua mặt phân cách 2 môi trường.



§3. Điện trường trong điện môi

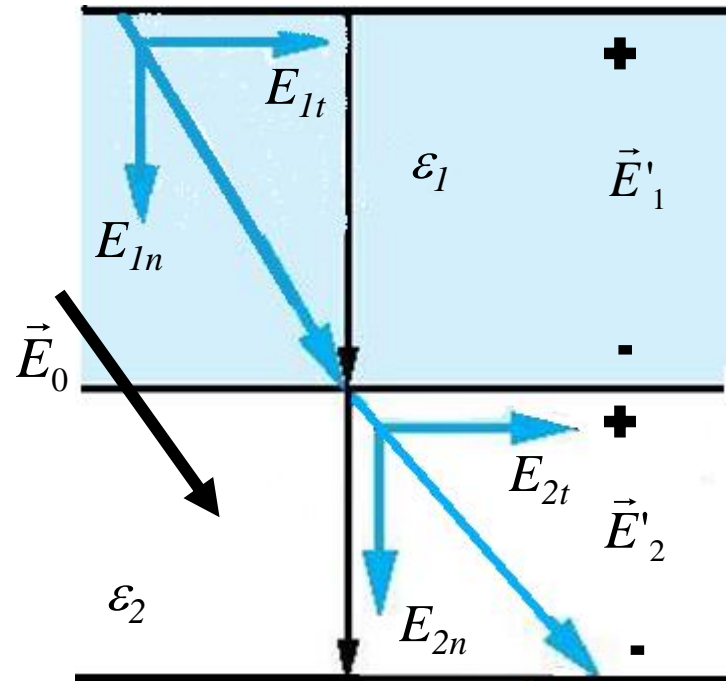
3. Đường sức điện trường qua mặt phân cách 2 môi trường

☞ Điện trường \vec{E}_0 đi qua mặt phân cách hai môi trường có hằng số điện môi ϵ_1 và ϵ_2 .

☞ Trên các mặt giới hạn xuất hiện các điện tích liên kết \Rightarrow xuất hiện các điện trường phụ \vec{E}'_1 và \vec{E}'_2 (\perp mặt phân cách).

☞ Điện trường tổng hợp trong các lớp điện môi:

$$\begin{cases} \vec{E}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}'_1 \\ \vec{E}_2 = \vec{E}_0 + \vec{E}'_2 \end{cases}$$



☞ Chiếu lên phương pháp tuyến và tiếp tuyến, có:

$$\begin{cases} E_{1n} = E_{0n} + E'_{1n} \\ E_{1t} = E_{0t} + E'_{1t} \end{cases} \quad \text{và} \quad \begin{cases} E_{2n} = E_{0n} + E'_{2n} \\ E_{2t} = E_{0t} + E'_{2t} \end{cases}$$

§3. Điện trường trong điện môi

3. Đường sức điện trường qua mặt phân cách 2 môi trường

☞ Vì: $E'_{1t} = E'_{2t} = 0$

☞ $E_{1t} = E_{2t}$

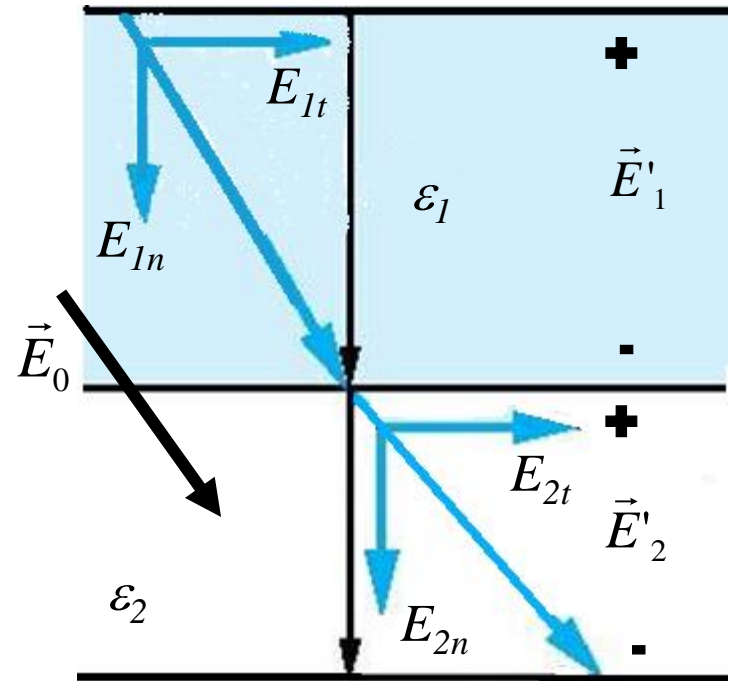
☞ Thành phần tiếp tuyến của vector cường độ điện trường tổng hợp biến thiên liên tục khi đi qua mặt phân cách 2 lớp điện môi.

☞ Mặt khác: $E'_{1n} = \chi_{e1} E_{1n}$
 $E'_{2n} = \chi_{e2} E_{2n}$

☞
$$\left. \begin{aligned} E_{1n} &= E_{0n} / (1 + \chi_{e1}) = E_{0n} / \epsilon_1 \\ E_{2n} &= E_{0n} / (1 + \chi_{e2}) = E_{0n} / \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n} \Rightarrow E_{1n} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_{2n}$$

☞ Thành phần pháp tuyến của vector cường độ điện trường tổng hợp biến thiên không liên tục khi đi qua mặt phân cách 2 lớp điện môi.

☞ Đường sức điện trường là không liên tục khi đi qua mặt phân cách



§3. Điện trường trong điện môi

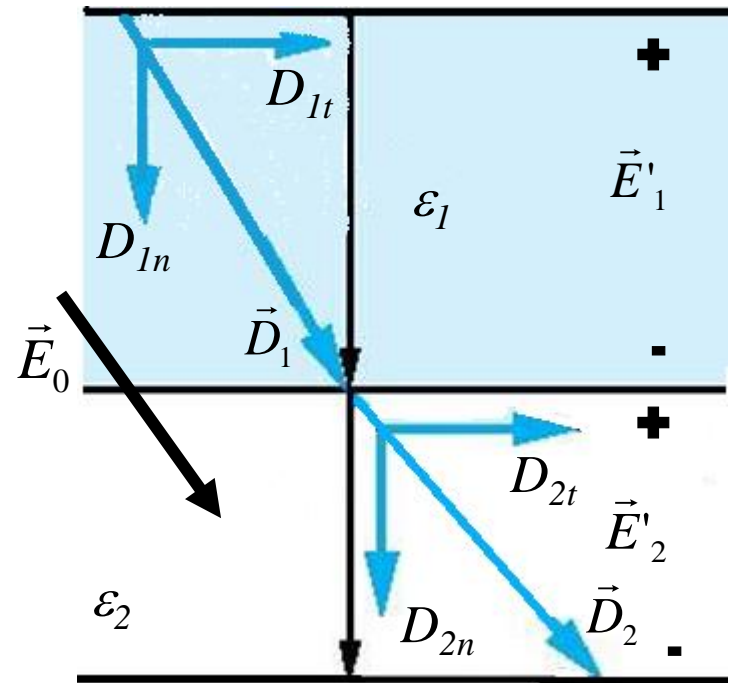
3. Đường sức điện cảm qua mặt phân cách 2 môi trường

☞ có:
$$\begin{cases} \vec{D}_1 = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}_1 \\ \vec{D}_2 = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}_2 \end{cases}$$

☞ Chiếu lên phương tiếp tuyến, có:

$$\begin{cases} D_{1t} = \epsilon_0 \epsilon_1 E_{1t} \\ D_{2t} = \epsilon_0 \epsilon_2 E_{2t} \end{cases}$$

☞ Vì: $E_{1t} = E_{2t}$ nên: $D_{1t} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} D_{2t}$



☞ Thành phần tiếp tuyến của vector cảm ứng điện biến thiên không liên tục khi đi qua mặt phân cách 2 lớp điện môi.

§3. Điện trường trong điện môi

3. Đường sức điện cảm qua mặt phân cách 2 môi trường

☞ Chiều lên phương pháp tuyến, có:

$$\begin{cases} D_{1n} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{1n} \\ D_{2n} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{2n} \end{cases}$$

Vì: $\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$

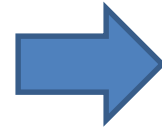
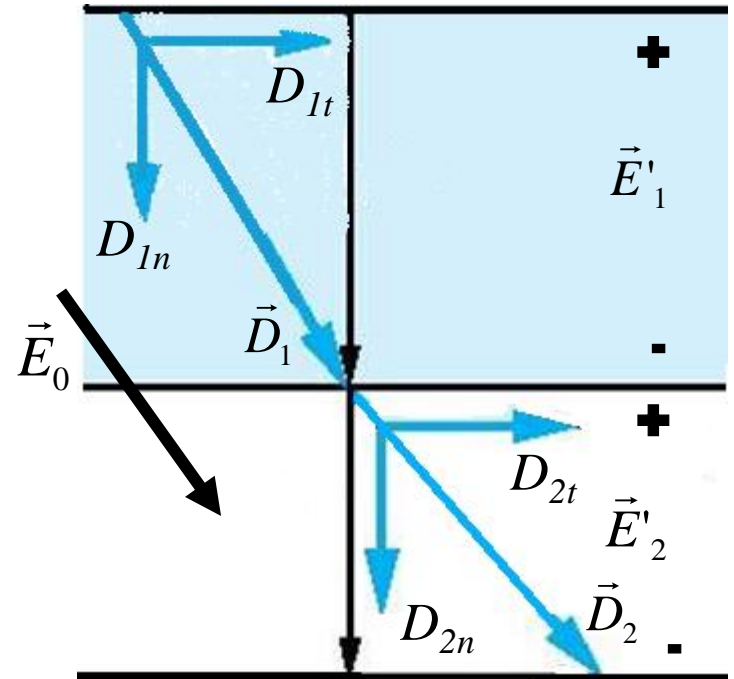
☞ $D_{1n} = D_{2n}$

☞ Thành phần pháp tuyến của vector cảm ứng điện biến thiên liên tục khi đi qua mặt phân cách 2 lớp điện môi.

☞ Thông lượng cảm ứng điện theo định nghĩa:

$$\Phi_e = \int_{(S)} D_n dS$$

☞ Đường sức cảm ứng điện đi liên tục trong các môi trường điện môi



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

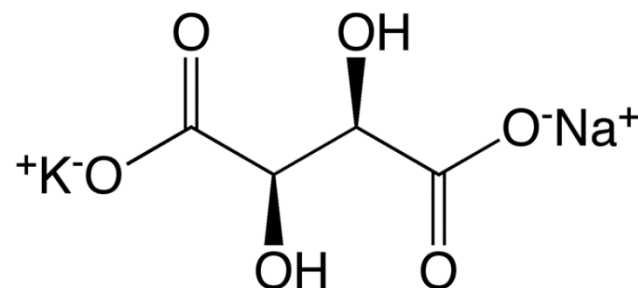
1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

Tinh thể muối Séc-nhét

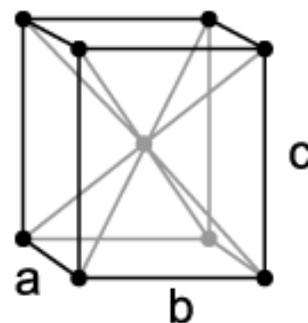
- ☞ Công thức: $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- ☞ Tên gọi: Kali Natri táctrát ngậm nước – (**Potassium sodium tartrate Tetrahydrate**).
- ☞ Lịch sử: được tổng hợp lần đầu tiên (khoảng 1675) bởi dược sỹ Pierre Seignette (La Rochelle, Pháp) \Rightarrow còn gọi là muối **Rochelle**.

☞ Tính chất vật lý:

- ☞ Trong suốt hoặc vàng nhạt;
- ☞ Dễ dàng tan trong nước;
- ☞ Cấu trúc orthorhombic;
- ☞ Trọng lượng riêng = 1.79;
- ☞ Nhiệt độ nóng chảy = 75 °C.



$$a \neq b \neq c$$



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

Nhóm điện môi Séc-nhét (tự nhiên)

↪ Tourmaline: $\text{Ca,K,Na (Al,Fe,Li,Mg,Mn)}_3$;

↪ Quartz: SiO_2 ;

↪ Topaz: $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F,OH})_2$;

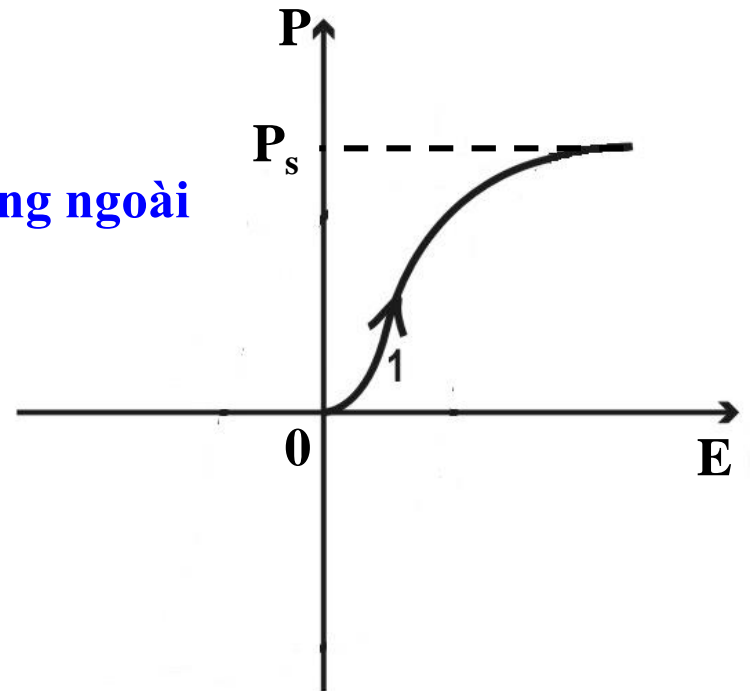
↪ Tinh thể đường

Tính chất phân cực phụ thuộc điện trường ngoài

☞ Vector P không có sự phụ thuộc tuyến tính với vector E .

☞ Khi E tăng đến giá trị nào đó $\Rightarrow P$ đạt trạng thái bão hòa (P_s).

☞ Hằng số điện môi (ϵ) của các Séc-nhét phụ thuộc vào $E_{\text{ngoài}}$.



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

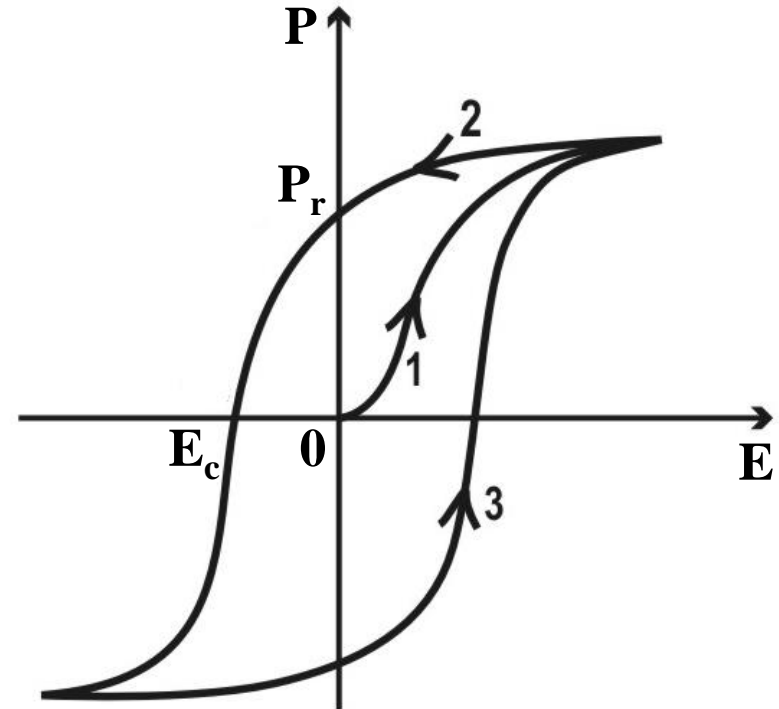
Hiện tượng điện trễ

☞ Khi $E_{\text{ngoài}}$ giảm $\rightarrow 0 \Rightarrow$ vật liệu vẫn còn bị phân cực \Rightarrow có $P = P_r$: hiện tượng phân cực dư hay điện trễ (hysteresis).

☞ Khi $E_{\text{ngoài}}$ thay đổi, các trị số của P thay đổi chậm hơn so với $E \Rightarrow P$ được xác định không những bởi giá trị của E tại thời điểm đang xét mà còn phụ thuộc vào các trị số của E có trước đó \Leftrightarrow phụ thuộc vào lịch sử của chất điện môi.

☞ $P = 0$ khi $E = -E_c$ (lực kháng điện - coercive force).

☞ Tiếp tục thay đổi $E \Rightarrow$ thu được một chu trình điện trễ.



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

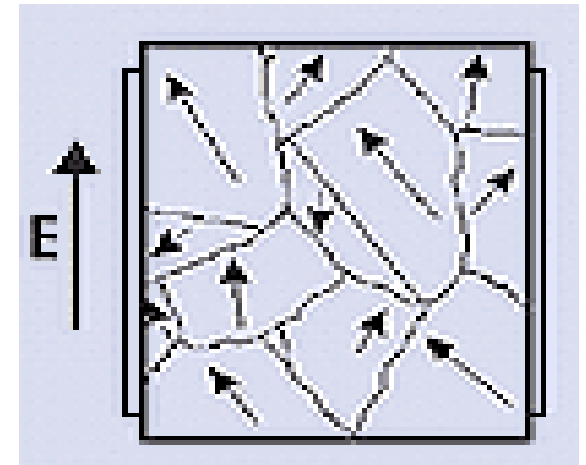
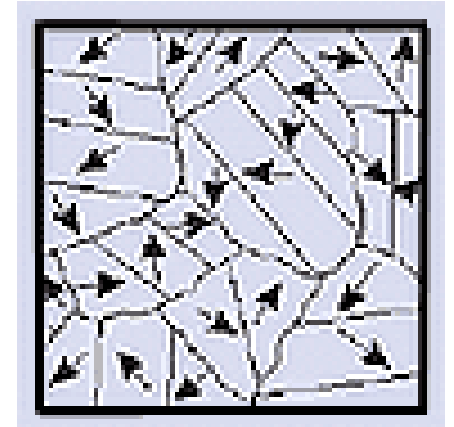
1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

Cơ chế hiện tượng trễ (Thuyết miền phân cực tự nhiên)

☞ Cấu trúc tinh thể có những miền trong đó có sự định hướng giống nhau của các mômen lưỡng cực \Rightarrow phân cực tự phát tạo ra vectơ phân cực tự phát trong 1 miền \Rightarrow các đômen (domain).

☞ Hướng của vectơ phân cực của từng miền khác nhau từ miền này qua miền khác \Rightarrow vectơ phân cực tổng cộng của tinh thể $= 0$.

☞ Khi $E_{\text{ngoài}} \neq 0$, các mômen của các domain quay như các lưỡng cực đơn và sắp xếp theo hướng của điện trường.



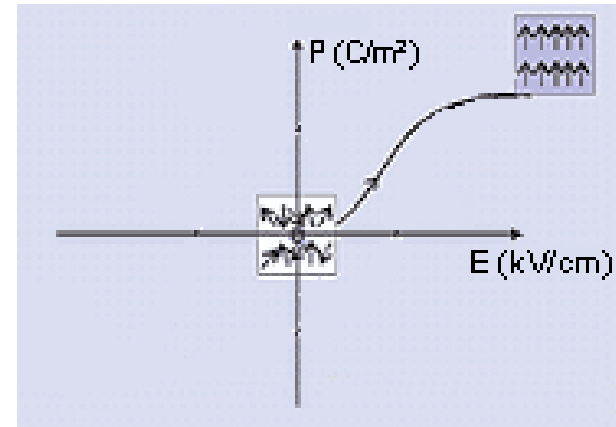
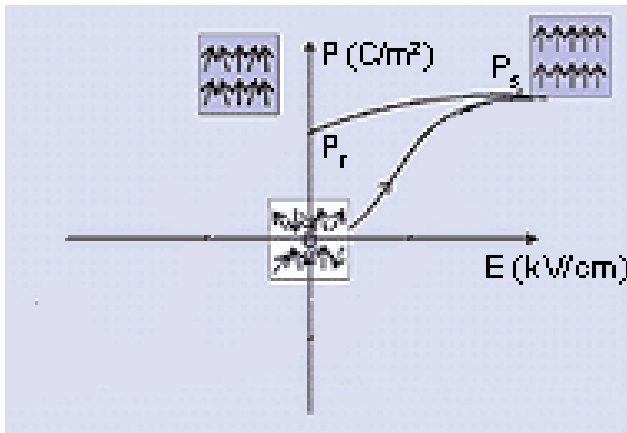
§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

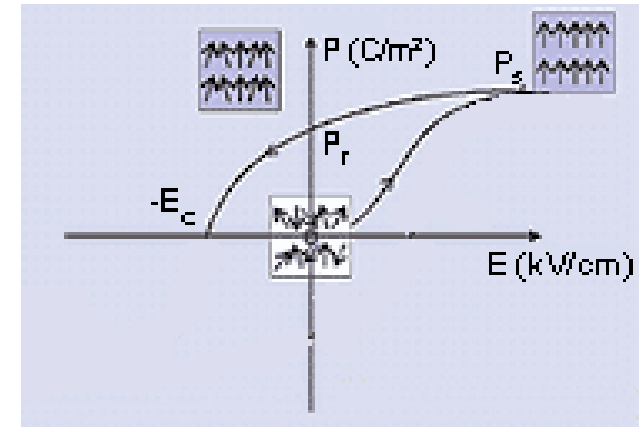
Cơ chế hiện tượng trễ

↪ Tăng dần $E_{\text{ngoài}}$ cho tới khi tất cả các vector phân cực tổng cộng của từng miền song song với nhau \Rightarrow trạng thái bão hòa (P_s).

↪ Khi $E_{\text{ngoài}}$ giảm $\rightarrow 0$, mômen phân cực của một số domain không xoay kịp trở lại \Rightarrow tạo ra hiện tượng phân cực dư \Rightarrow có giá trị P_r .



↪ Đảo chiều và tăng $E = -E_c$ véc tơ phân cực của từng miền trở lại vị trí như ban đầu \Rightarrow véc tơ phân cực tổng cộng $= 0$.



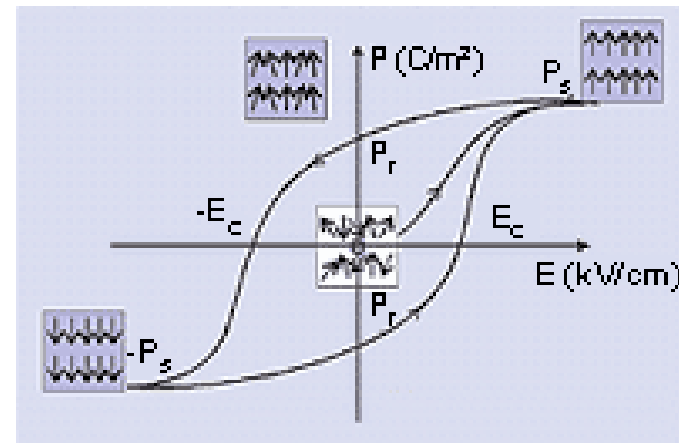
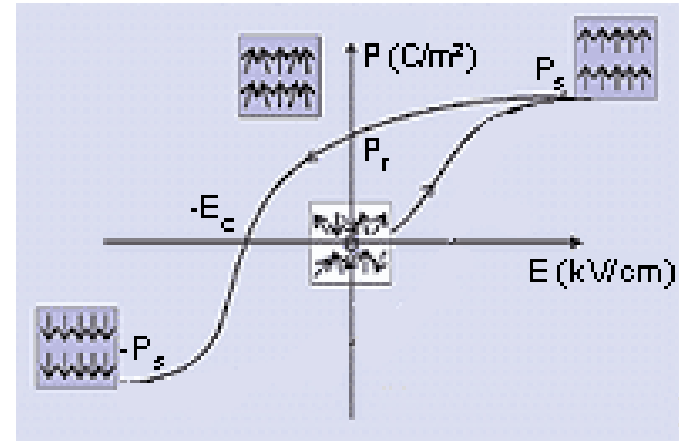
§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

Cơ chế hiện tượng trễ

☞ Tiếp tục tăng dần $E_{\text{ngoài}}$ cho tới khi tất cả các vector phân cực tổng cộng của từng miền song song với nhau \Rightarrow đạt trạng thái bão hòa ($-P_s$) lần nữa (đối xứng với P_s qua gốc 0).

☞ Nếu đưa $E_{\text{ngoài}} \rightarrow 0 \Rightarrow$ lại tạo ra hiện tượng phân cực dư (trị P_r) và $P = 0$ khi $E = E_c$ cũng như tiếp tục đạt giá trị P_s ban đầu khi tăng dần $E \Rightarrow$ tạo thành chu trình kín.



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

1. Điện môi Séc-nhét (Seignette)

Vật liệu sắt điện (ferroelectric materials)

- ☞ Vật liệu có sự phân cực phụ thuộc trường ngoài và có tính chất trễ \Rightarrow vật liệu sắt điện
- ☞ Có hằng số điện môi lớn (từ vài chục \rightarrow hàng ngàn đơn vị)
- ☞ Tính chất sắt điện phụ thuộc nhiệt độ
- ☞ Tại nhiệt độ xác định tính chất sắt điện biến mất \Rightarrow trở thành vật liệu điện môi thông thường \Rightarrow nhiệt độ Curie (điểm Curie) - T_c .
 - ☞ Muối $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ chỉ có tính chất sắt điện với $-15^\circ\text{C} < T < 22^\circ\text{C} \Rightarrow$ có 2 điểm Curie, $T_c = -15^\circ\text{C}$ và 22°C .
- ☞ Vật liệu sắt điện tổng hợp
 - ☞ BaTiO_3
 - ☞ PZT
 - ☞ AlN

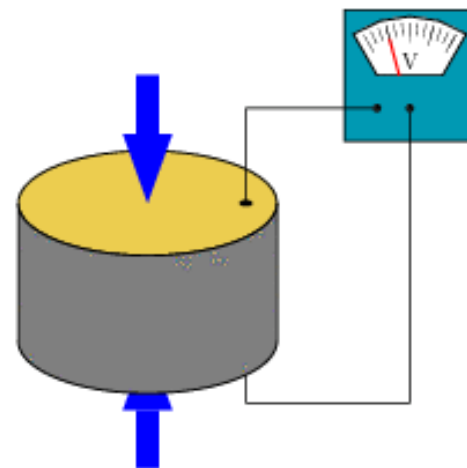
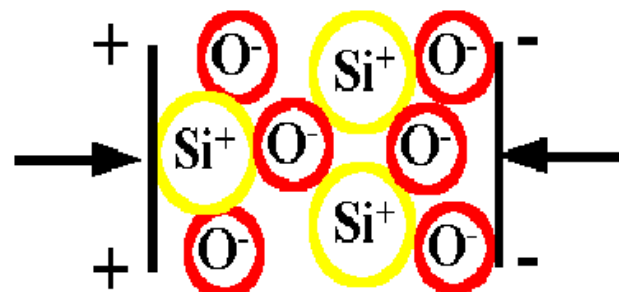
§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

2. Hiệu ứng áp điện (piezoelectric effect)

☞ Trên các mặt của tinh thể thạch anh (SiO_2) xuất hiện các điện tích trái dấu tương tự như các điện tích xuất hiện trong hiện tượng phân cực điện môi khi có một ứng suất cơ học (lực kéo hoặc lực nén) tác dụng lên các mặt này.

☞ Độ lớn của các điện tích cảm ứng tỉ lệ với ứng suất đặt vào, thay đổi dấu theo ứng suất và biến mất khi ngoại lực ngừng tác dụng.

☞ Hiệu ứng áp điện thuận



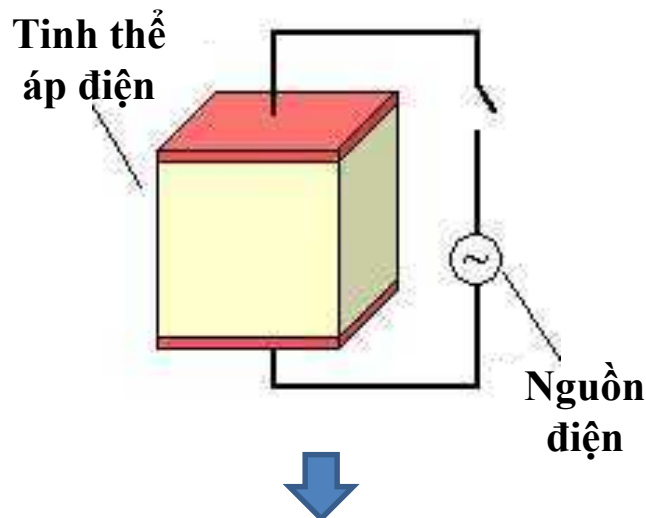
Lực nén $\sim 1 \text{ N} \Rightarrow$ trên các mặt đối diện của tinh thể thạch anh xuất hiện một hiệu điện thế $\sim 1 \text{ mV}$.

§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

2. Hiệu ứng áp điện (piezoelectric effect)

☞ Khi đặt điện áp lên 2 mặt của tinh thể áp điện \Rightarrow sẽ bị biến dạng (dãn hoặc nén) \Rightarrow hiệu ứng áp điện nghịch.

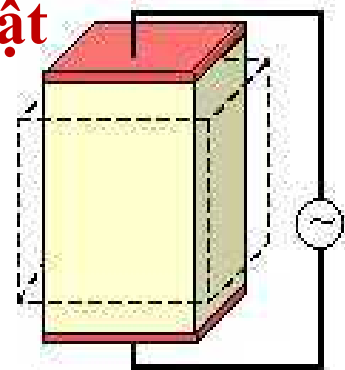
☞ Khi đặt điện áp xoay chiều lên 2 mặt của tinh thể áp điện \Rightarrow tinh thể sẽ bị dãn nén liên tiếp và tạo ra dao động theo tần số của điện áp đặt vào.



3. Ứng dụng hiệu ứng áp điện trong kỹ thuật

☞ Chế tạo các vi cảm biến (microsensor) đo áp suất, gia tốc, khối lượng hoặc nhận biết khí độc...

☞ Chế tạo các dụng cụ vi chấp hành (microactuator) làm máy phát điện, máy phát siêu âm (ultrasound),...



§4. Vật liệu điện môi đặc biệt

3. Ứng dụng hiệu ứng áp điện trong kỹ thuật

☞ Cảm biến vi cân tinh thể thạch anh (Quartz Crystal Microbalance - QCM):
linh kiện đo khối lượng chính xác đến μg và nano gram.

