

Isolantes

- ❖ Condutividade elétrica $\sim 10^{-10}$ a $10^{-16} (\Omega\text{m})^{-1}$.
- ❖ A densidade de portadores de cargas livres é muito pequena
- ❖ Os portadores de carga nem sempre são das bandas de valência e condução \rightarrow impurezas (transporte iônico)
- ❖ Aplicação típica: capacitor de placas paralelas

Condutividade Elétrica

$$\sigma = \sigma_{\text{eletrônica}} + \sigma_{\text{iônica}}$$

$\sigma_{\text{iônica}} = n_i |q| \mu_i$

$$\mu_i = \frac{|q| D_i}{kT} \Rightarrow \text{difusão}$$

$D_i = D_0 \exp\{-Q/RT\}$, σ aumenta com a temperatura!

Material	ρ (Ω m)
Prata	$1,59 \times 10^{-8}$
Grafite (C)	$3-60 \times 10^{-5}$
Germânio	$1-500 \times 10^{-3}$
Silício	0,1-60
Vidro	$1-10000 \times 10^9$
Quartzo	$7,5 \times 10^{17}$
Borracha	$1-100 \times 10^{13}$

➤ Apresentam **estrutura de banda** similar a semicondutores com
➤ $E_g > 2$ eV.

➤ Em temperatura ambiente não há elétrons livres disponíveis – altas resistividades.

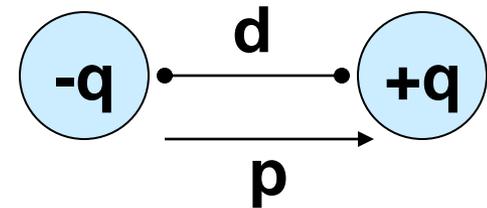
Dielétricos

Comportamento
dielétrico



Dipolos elétricos

separação de cargas elétricas
opostas em nível atômico e
molecular



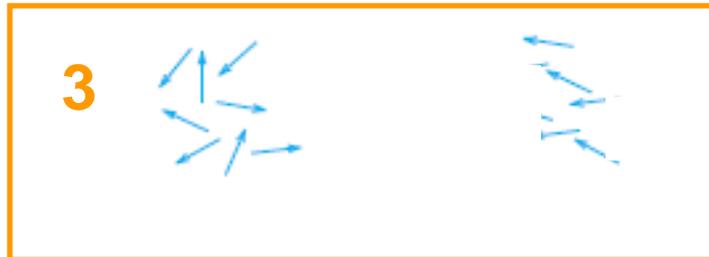
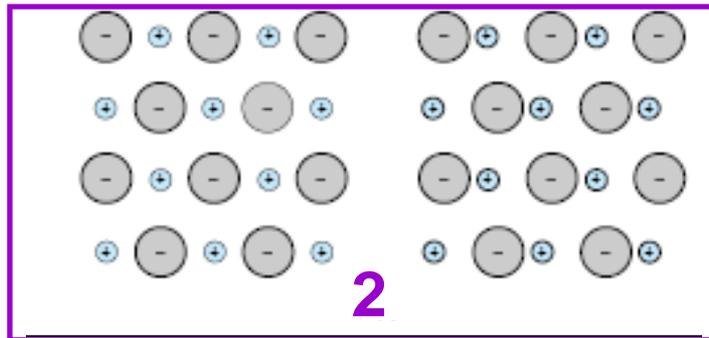
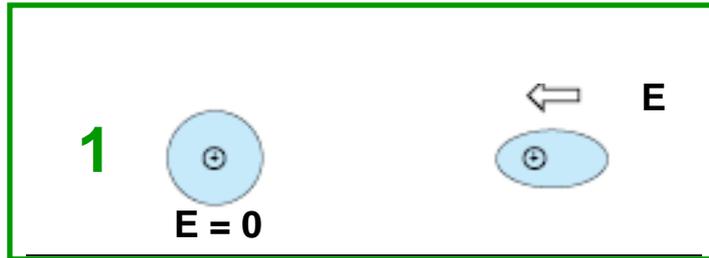
$$\mathbf{p} = q\mathbf{d}$$

\mathbf{p} é o momento de dipolo
elétrico;
 \mathbf{d} é a distância entre as cargas

O processo de alinhamento de dipolos é
chamado de polarização.

Tipos de Polarização

E = campo elétrico



1. Eletrônica
ocorre para
todo átomo

2. Iônica
ocorre somente
para materiais
iônicos

3. Orientacional
ocorre somente
em substâncias
que apresentam
dipolos
permanentes

Capacitância – C (F - farads)

$$C = \frac{Q}{V}$$

Capacidade de armazenar cargas

Q - carga estocada em uma das placas

V é a voltagem aplicada

Capacitor de placas paralelas

A - área da placa; L - distância entre as placas

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{L}$$

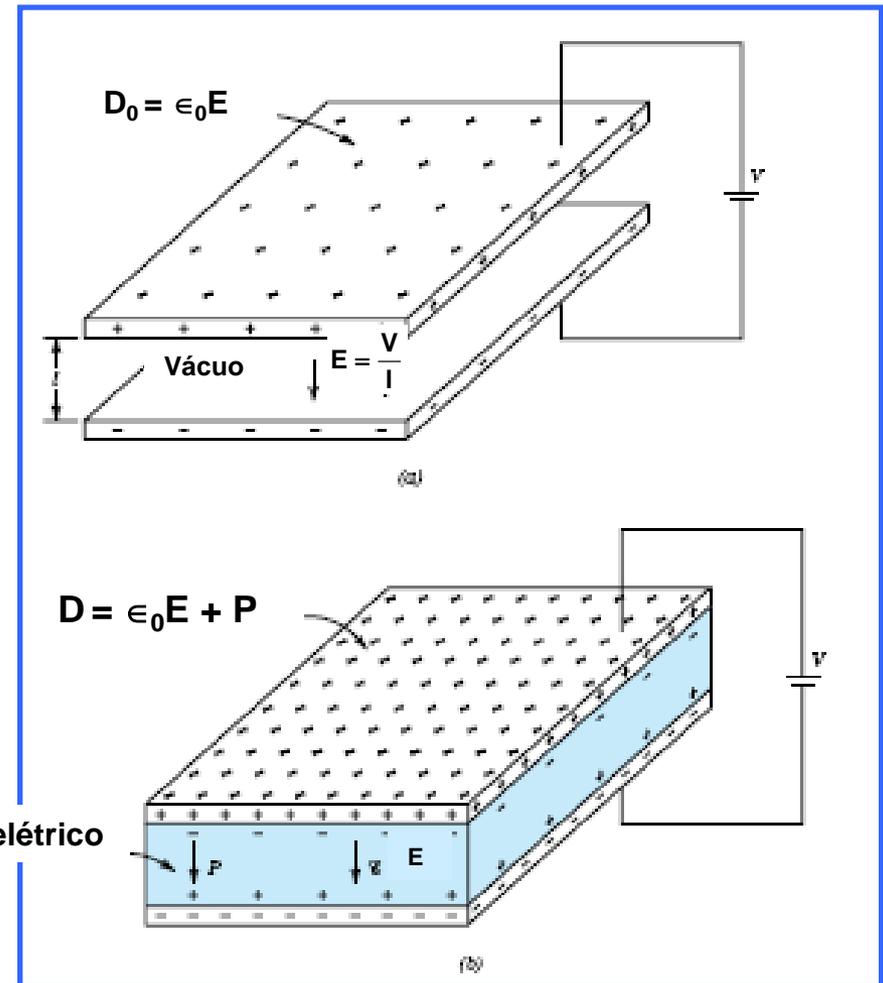
$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,
permissividade elétrica - vácuo.

Com material
dielétrico:

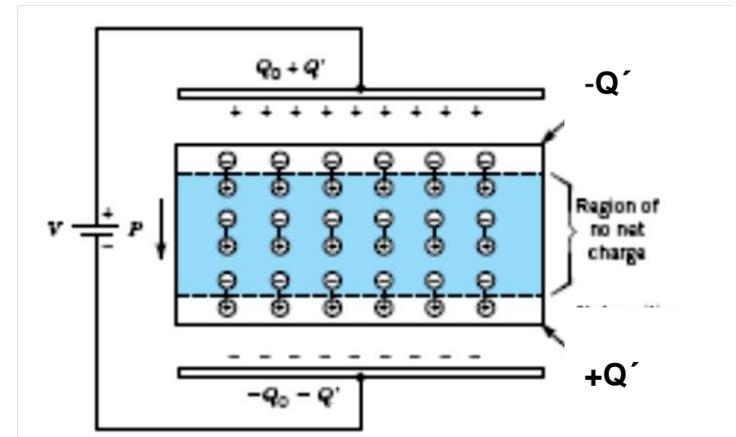
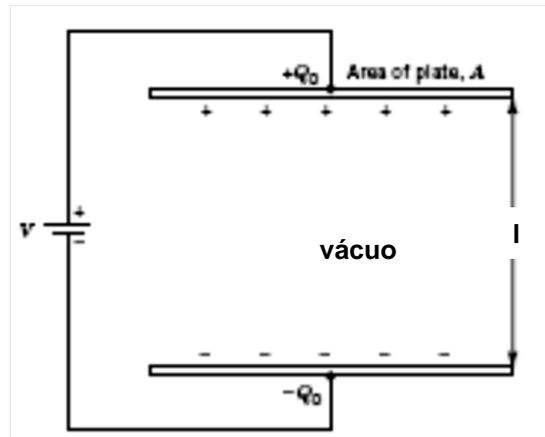
$$\Rightarrow C = \epsilon \frac{A}{L}$$

Constante dielétrica =
Permissividade relativa

$$\kappa = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$



Vetores de Campo e Polarização



Carga por unidade de área (C/m^2) \propto campo elétrico (E)

No vácuo: $D_0 = \epsilon_0 E = Q_0/A$

No dielétrico: $D = \epsilon E$ \longrightarrow

$$D = \epsilon_0 E + P$$

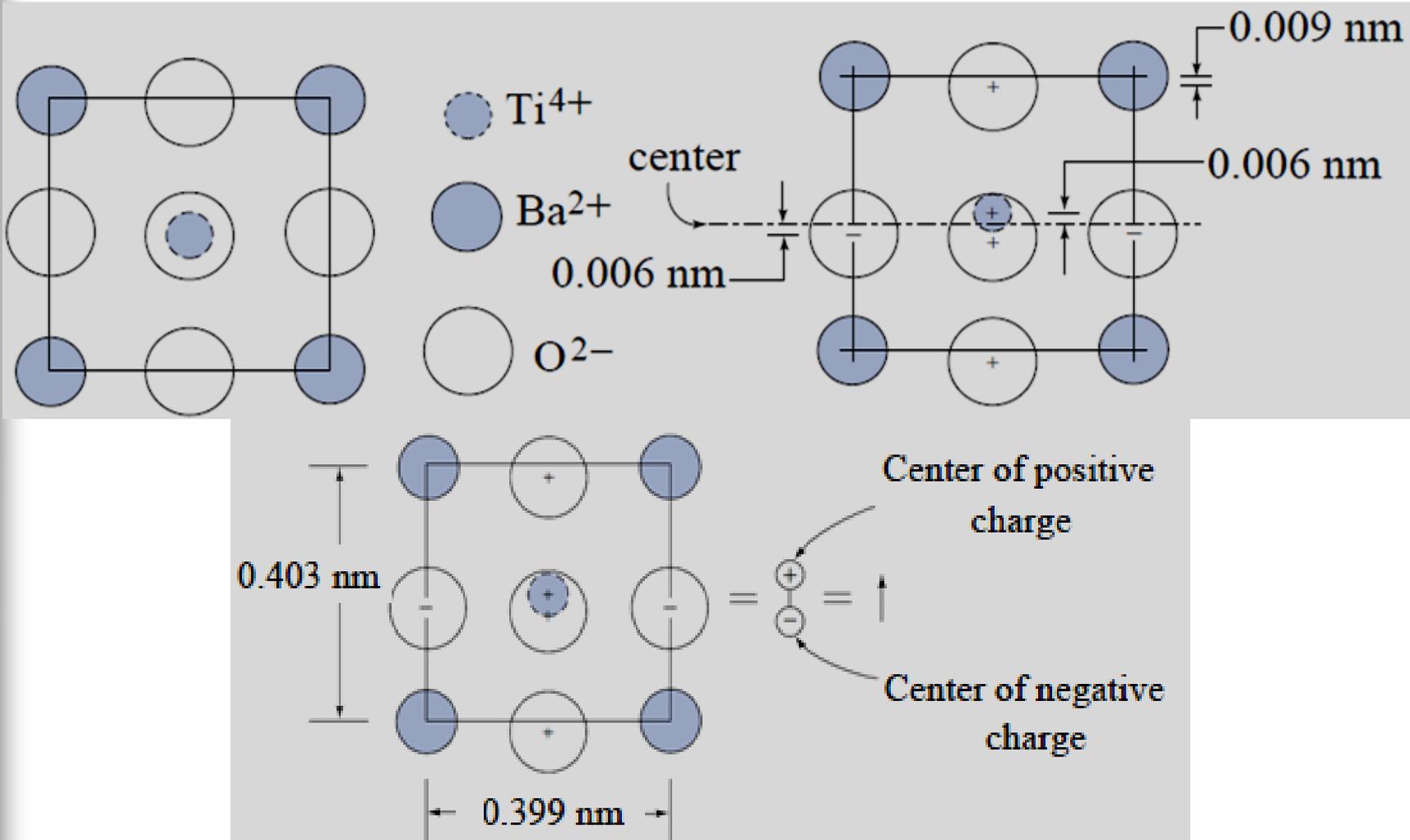
D_0, D - o deslocamento dielétrico
 P - polarização: $P = Q'/A$

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1)E$$

Ferroeletricidade

Polarização espontânea – dipolos elétricos permanentes

Titanato de Bário - $\text{BaTiO}_3 \rightarrow$ Temperatura de Curie Ferroelétrica = $120\text{ }^\circ\text{C}$



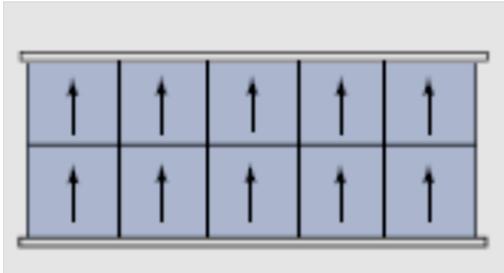


Outros Materiais Ferroelétricos

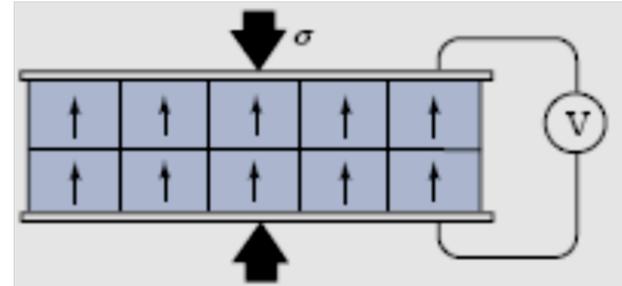
- Sal de Rochelle – $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_{6.4}\text{H}_2\text{O}$
 - Fosfato di-hidrogenado de potássio- KH_2PO_4
 - Niobato de Potássio - KNbO_3
 - Zirconato-Titanato de chumbo - $\text{Pb}[\text{ZrO},\text{TiO}_3]$
- $\epsilon_r > 5000 \rightarrow$ capacitores muito menores.

Piezoelétricidade

$$\sigma = 0$$



$$\sigma \rightarrow V$$



Aplicação de tensão em um material piezelétrico causa o aparecimento de uma diferença de potencial V .

- Microfones
- Geradores de ultra-som
- Extensômetros

DEPENDÊNCIA DA POLARIZAÇÃO COM A FREQUÊNCIA

- O dipolo elétrico (eletrônico, iônico ou orientacional) inverte a direção da polarização em campo alternado.
- Existe um tempo mínimo necessário, t_{\min} , para inverter esta polarização.
- Se a frequência de oscilação do campo aplicado $f > 1/t_{\min}$, ou seja, se o tempo em que o campo muda de sentido é menor que t_{\min} . → **Dipolo não muda de orientação**
- Cada tipo de polarização: eletrônica, iônica ou orientacional, tem resposta diferente à frequência. Logo, ϵ_r variará muito para um mesmo material, dependendo da frequência.

$$\blacksquare \epsilon_r = \epsilon_r^{el} + \epsilon_r^{iônica} + \epsilon_r^{orient}$$

- Em altas frequências, $f \gg 10^{14} - 10^{15}$ Hz (luz visível)

Somente polarização eletrônica $\epsilon_r = \epsilon_r^{el}$

- Neste caso \rightarrow
– n é o índice de refração.

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r^{el}}$$

- **Água** : $\epsilon_r = 80$ (kHz e MHz, ondas de rádio)
 $n = 1,33$ nas frequências óticas (luz visível).

Se: $n^2 = \epsilon_r^{el} = 1,7$

O $\epsilon_r^{orient} = \epsilon_r - \epsilon_r^{el} = 80 - 1,7 = 78,3$ é advindo da polarização orientacional da molécula de H_2O .

MATERIAIS POLARES E NÃO POLARES

	<i>Material</i>	n^2 ($10^{14} - 10^{15}$ Hz)	ϵ_r	<i>Frequência de medição de ϵ_r (Hz)</i>
Não Polar	C (diamante)	5,66	5,68	10^8
	H ₂ (líquido)	1,232	1,228	10^7
Polar Fraca	Polietileno	2,28	2,30	10^2 - 10^{10}
	Parafina	2,19	2,20	10^3
	Politetra- fluoretileno	1,89	2,10	10^2 - 10^9
Polar ϵ_i^{ion} é relevante	NaCl	2,25	5,90	10^3
	TiO ₂ (rutilo)	6,8	94	10^3
	SiO ₂ (quartzo)	2,13	3,85	10^3
	Soda glass	2,30	7,60	10^3
	Rubi (Al ₂ O ₃)	3,13	4,31	10^3
	Metanol	1,85	24,3	
	Acetona	1,84	20,7	

RIGIDEZ DIELÉTRICA

- Altos campos elétricos aplicados ao material
- Número grande de elétrons na banda de condução
- Aumento significativo da corrente elétrica
($P = RI^2$)
- Fusão local; queima ou vaporização do material
- FENÔMENO = ROMPIMENTO DIELÉTRICO
- A **RIGIDEZ DIELÉTRICA** é o valor da tensão V_d necessária para causar o rompimento dielétrico.

RIGIDEZ DIELECTRICA

TABLE 19.4 Dielectric Constants and Strengths for Some Dielectric Materials

Material	Dielectric Constant		Dielectric Strength (V/mil) ^a
	60 Hz	1 MHz	
Ceramics			
Titanate ceramics	—	15–10,000	50–300
Mica	—	5.4–8.7	1000–2000
Steatite (MgO–SiO ₂)	—	5.5–7.5	200–350
Soda–lime glass	6.9	6.9	250
Porcelain	6.0	6.0	40–400
Fused silica	4.0	3.8	250
Polymers			
Phenol-formaldehyde	5.3	4.8	300–400
Nylon 6,6	4.0	3.6	400
Polystyrene	2.6	2.6	500–700
Polyethylene	2.3	2.3	450–500
Polytetrafluoroethylene	2.1	2.1	400–500

^a One mil = 0.001 in. These values of dielectric strength are average ones, the magnitude being dependent on specimen thickness and geometry, as well as the rate of application and duration of the applied electric field.