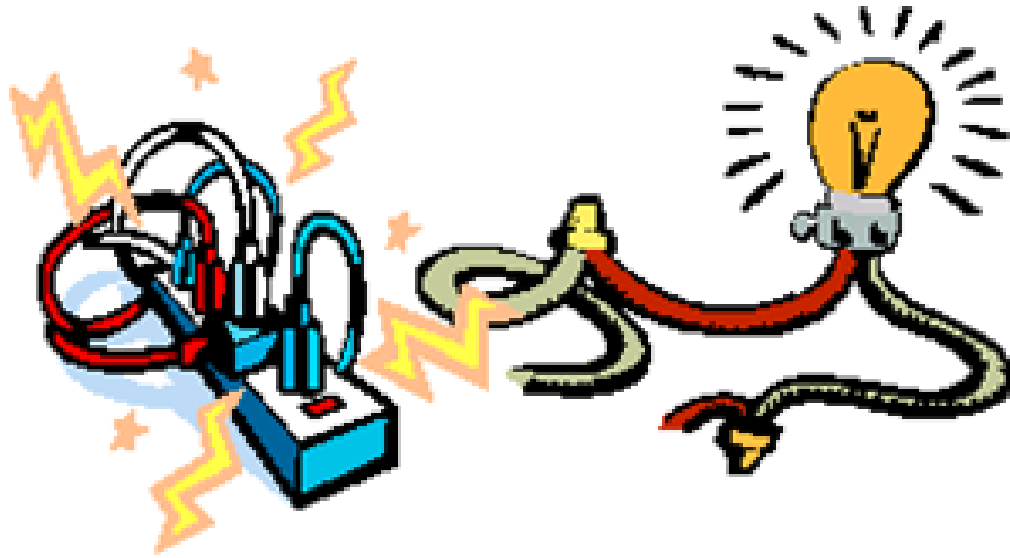


# PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS

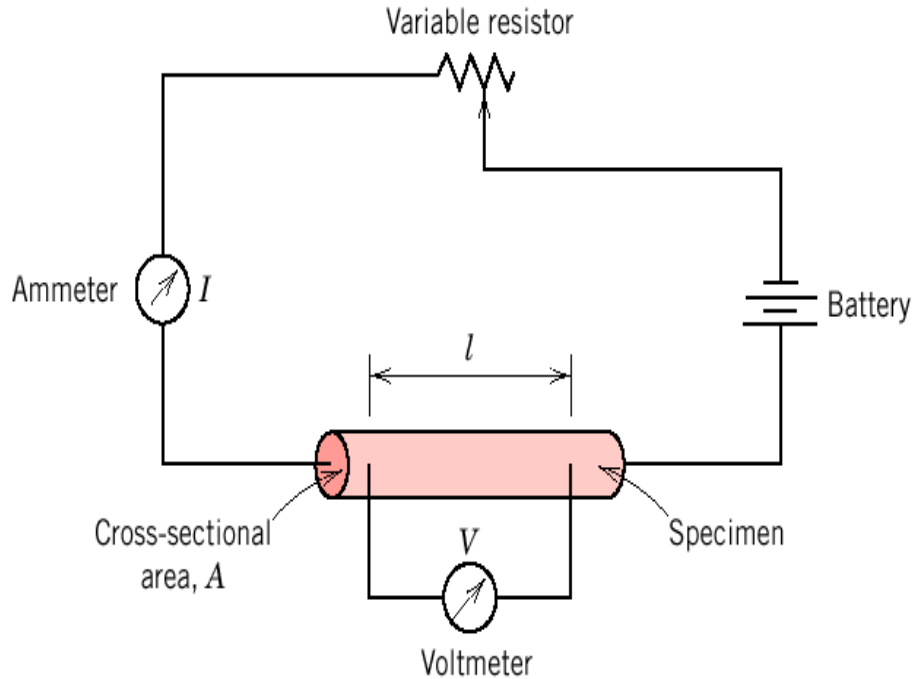


Vera L. Arantes

# Propriedades Elétricas

- Alguns materiais precisam ser altamente **condutores**. Ex.: fios para conexões elétricas.
- Ou precisam ser **isolantes**. Ex.: o encapsulamento desse fio.

# 1a. Lei de Ohm



- a intensidade da corrente elétrica  $I$  que percorre um circuito é diretamente proporcional à força eletromotriz (voltagem)  $V$  aplicada e inversamente proporcional à resistência total do circuito  $R$ .

# 1ª Lei de Ohm

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}}$$

- Onde **I** é a intensidade de corrente elétrica, medida em ampère – A (C/s) , **V** é a tensão elétrica aplicada, medida em volt – V (J/C) e **R** a resistência elétrica do circuito, medida em ohm -  $\Omega$  (V/A).

## 2a. Lei de Ohm

- A **resistividade**  $\rho$  apesar de independente da geometria da amostra está relacionada a **R** :

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{VA}{Il}$$

- $l$  é a distância entre os dois pontos onde é medida a voltagem
- $A$  é a área da seção reta perpendicular à direção da corrente e  $\rho$  é expresso em  $[\Omega.m]$ .

# Condutividade Elétrica

- Para se especificar a natureza elétrica de um material, muitas vezes usa-se a **condutividade elétrica**, que nada mais é do que o inverso da resistividade ou seja:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\Omega \cdot \mathbf{m})^{-1}$$

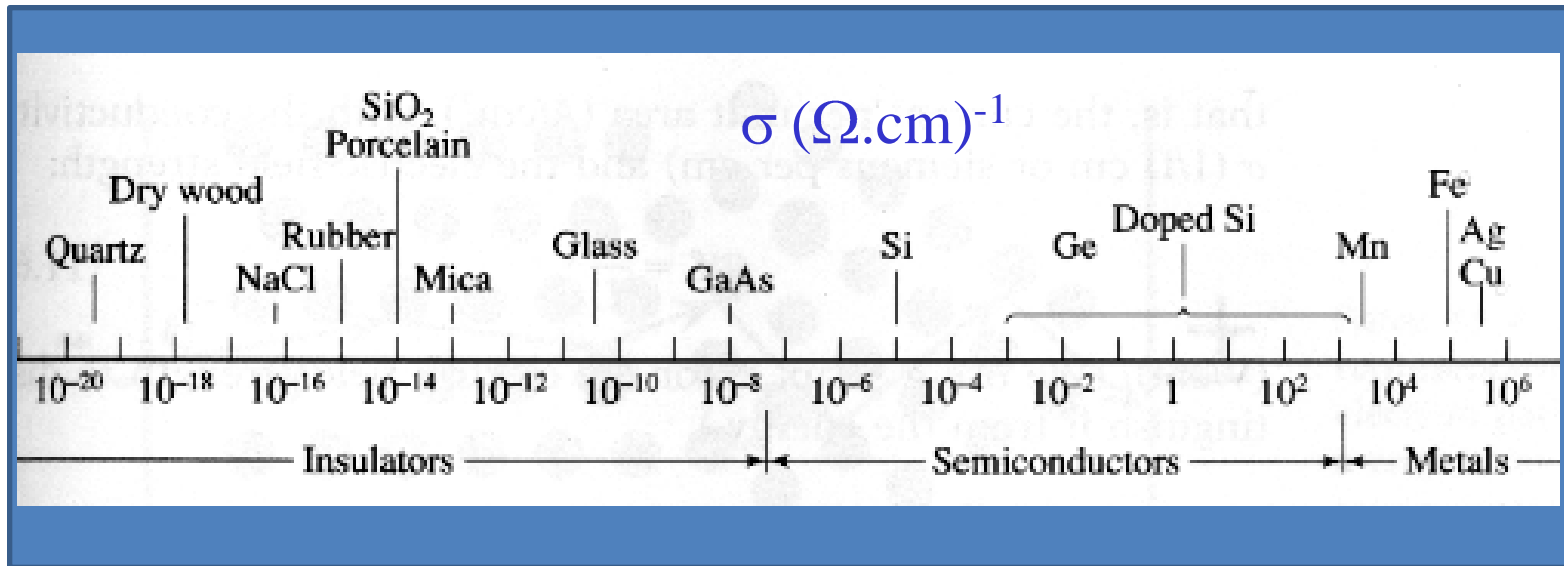
**Intensidade do campo elétrico**

$$E = V/l$$

**Densidade de corrente**

$$J = s E$$

# Classificação



- **Condutores** – condutividade da ordem de  $10^7(\Omega\text{m})^{-1}$ .
- **Semicondutores** – entre  $10^{-6}$  e  $10^4(\Omega\text{m})^{-1}$  e
- **Isolantes** – entre  $10^{-20}$  e  $10^{-10}(\Omega\text{m})^{-1}$ .

# Condução eletrônica

- O número de elétrons varia de material para material. Com isto existe uma variação no número de elétrons da última camada (camada de valência).
- No interior da maioria dos materiais sólidos uma corrente tem origem a partir do escoamento de elétrons – **condução eletrônica**.
- Resultado do movimento de partículas eletricamente carregadas em resposta a forças que atuam sobre elas a partir de um campo elétrico aplicado externamente.



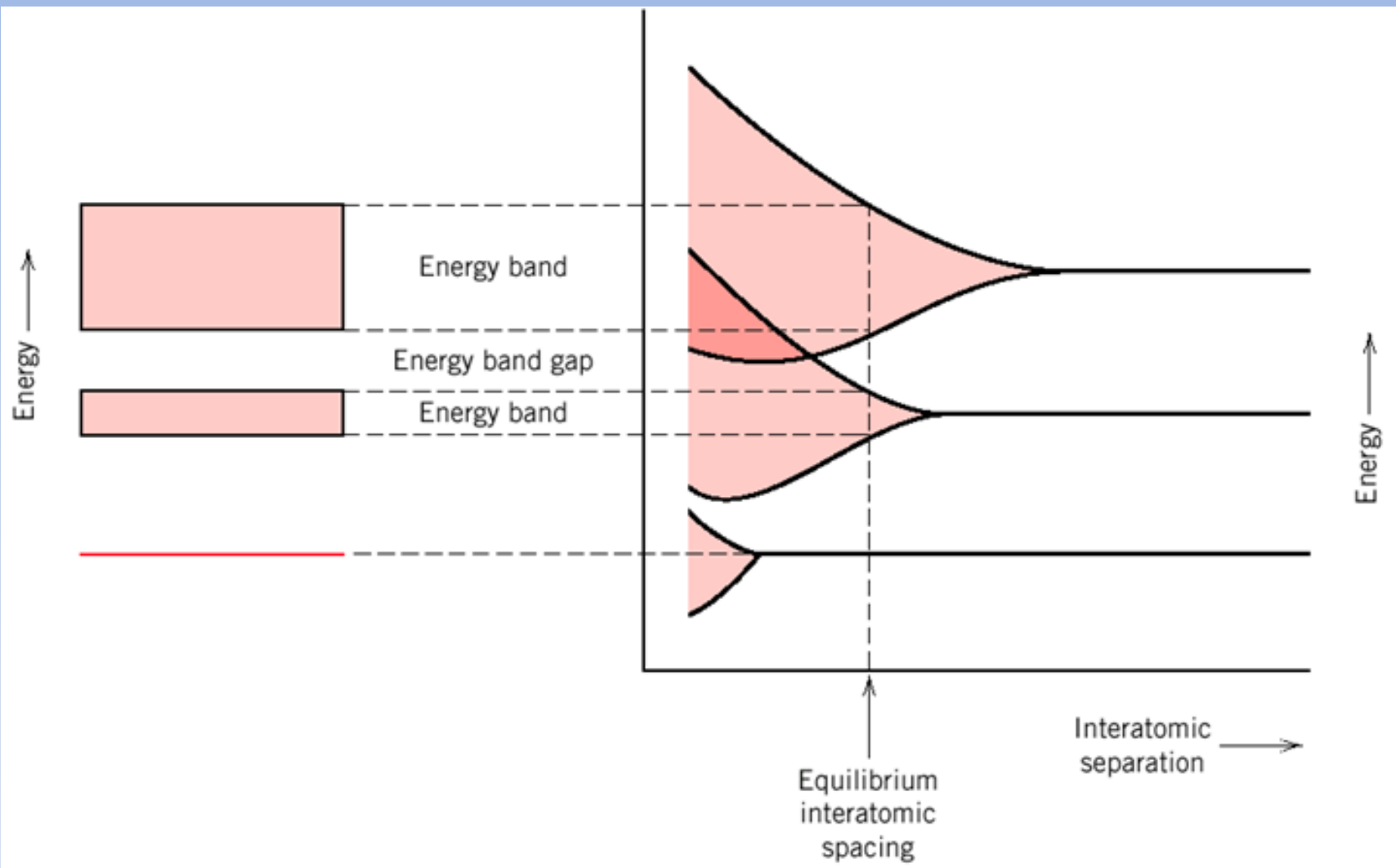
# Banda de energia nos sólidos

- A medida que átomos se agrupam na formação ordenada, cristalina de um sólido, os elétrons sentem a ação dos elétrons e núcleos dos átomos adjacentes.
- Esta influência é tal que cada estado atômico distinto pode se dividir em uma série de estados eletrônicos proximamente espaçados, para formar o que é conhecido como **banda de energia eletrônica**.
- Quatro tipos de **estruturas de banda** são possíveis a uma temperatura de 0 K.

# Efeitos quânticos

❖ **Princípio da incerteza de Heisenberg:** a confinamento dos elétrons em um pequeno volume aumenta as energias dos mesmos (*promotion*)

❖ **Princípio da exclusão de Pauli:** limita o número de elétrons com mesmos estados energéticos



# Estruturas de banda de energia

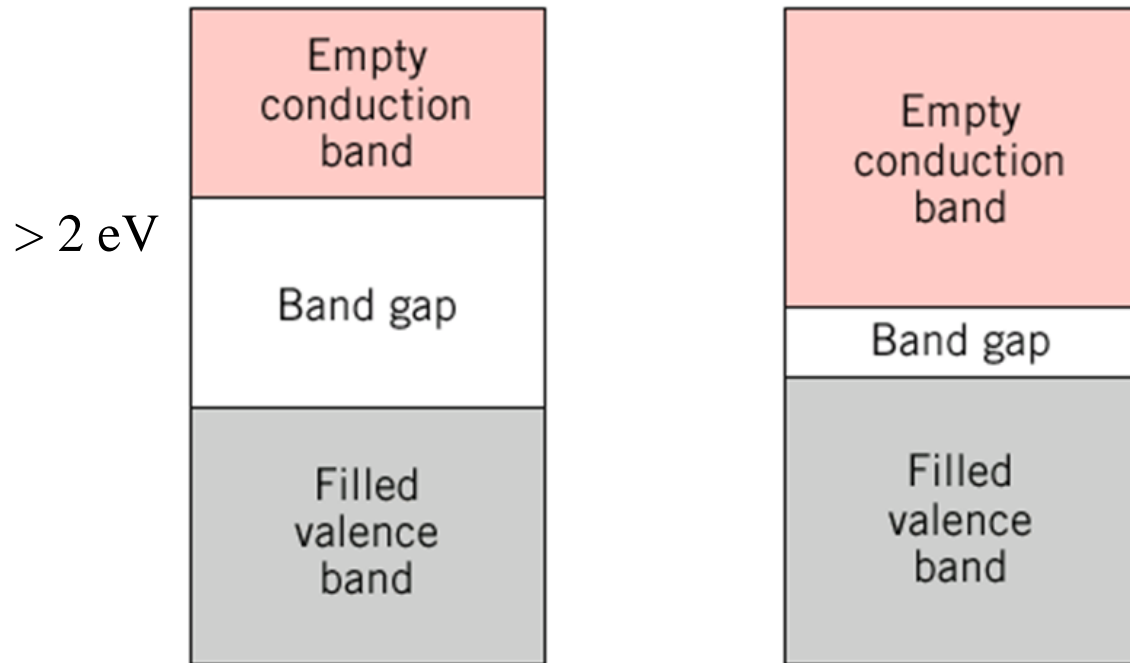
- **Energia de Fermi** – estado energético preenchido de maior energia.
- **Banda de condução** - banda de energia vazia ou parcialmente preenchida
- **Banda de valência** – banda de energia vazia ou parcialmente preenchida com elétrons de maiores estados energéticos

# Estruturas de banda de energia

- Somente elétrons que possuem energia maior do que a energia de Fermi podem sentir a ação e serem acelerados na presença de um campo elétrico. São chamados de **elétrons livres**.
- Nos semicondutores e isolantes uma entidade eletrônica conhecida como **buraco** também participa da condução elétrica e tem energia menor que a energia de Fermi.

# Estruturas de banda de energia

## Semicondutores



**Isolantes**

**Semicondutores**

banda de valência que está completamente preenchida está separada da banda de condução vazia entre elas por um espaçamento entre bandas de energia (**GAP**)

A energia de Fermi está localizada dentro do espaçamento (**gap de energia**).

# Isolantes e Semicondutores

- O número de elétrons tecnicamente excitados (através de energia térmica) para a banda de energia depende da largura do espaçamento e da temperatura.
- **Quanto maior o espaçamento entre as bandas, para uma dada temperatura, menor a condutividade elétrica.**
- **Material isolante** – ligação iônica ou fortemente covalente.
- **Material semicondutor** – ligação predominantemente covalente e relativamente fraca.

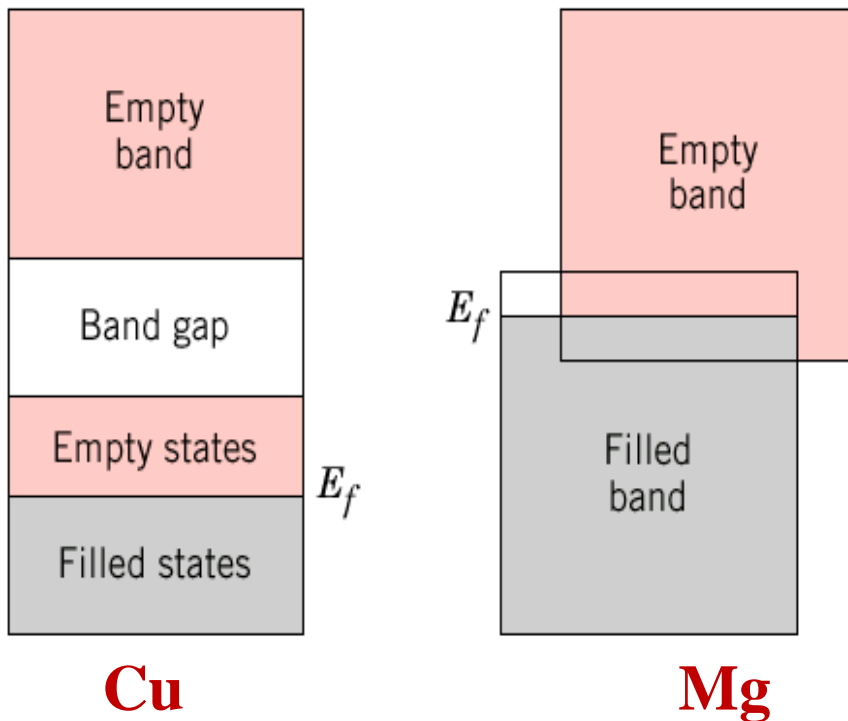
# Semicondutores

- A energia necessária para superar o **gap** de energia pode ser de natureza térmica ou luminosa.
- A probabilidade de que um elétron salte da banda de valência para a banda de condução é  $(-E_g/2kT)$  onde  **$E_g$**  corresponde a energia do “gap”.
- Quando um elétron é promovido para a banda de condução, deixa, na banda de valência, um buraco, de carga positiva, que também pode participar da condução.

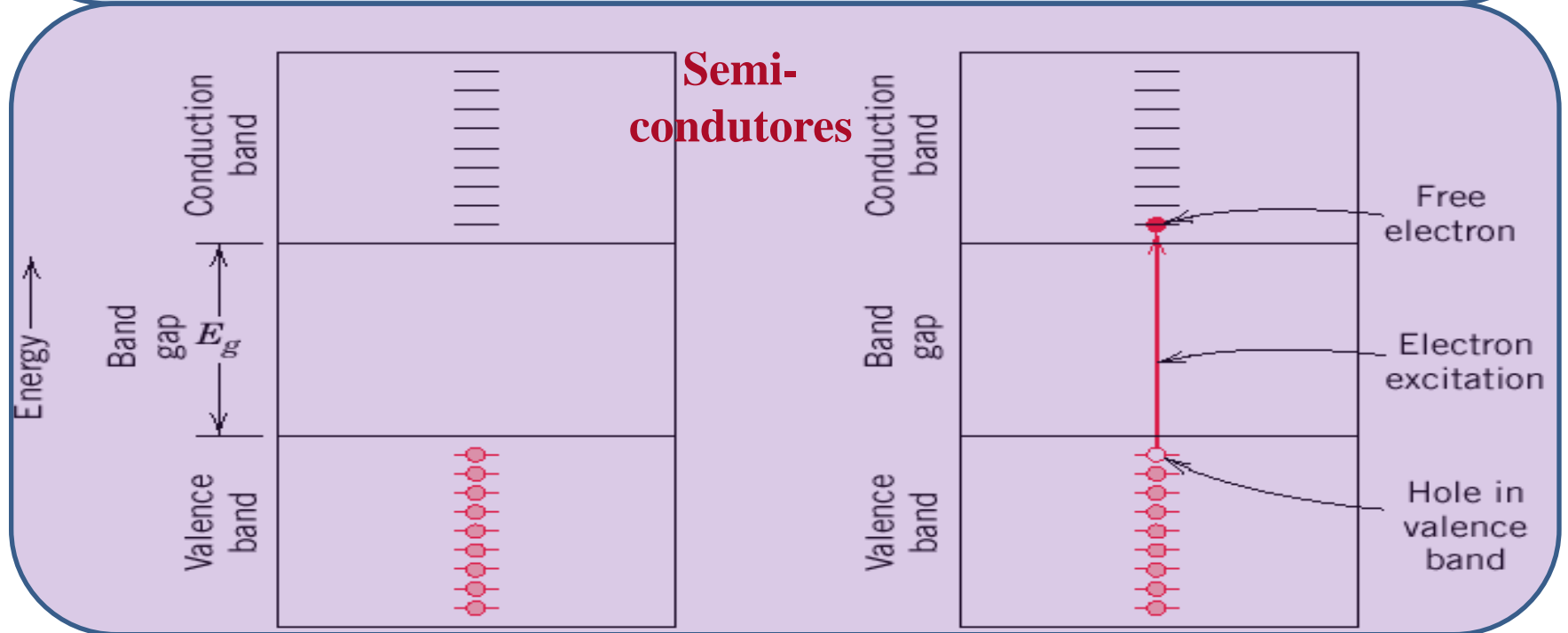
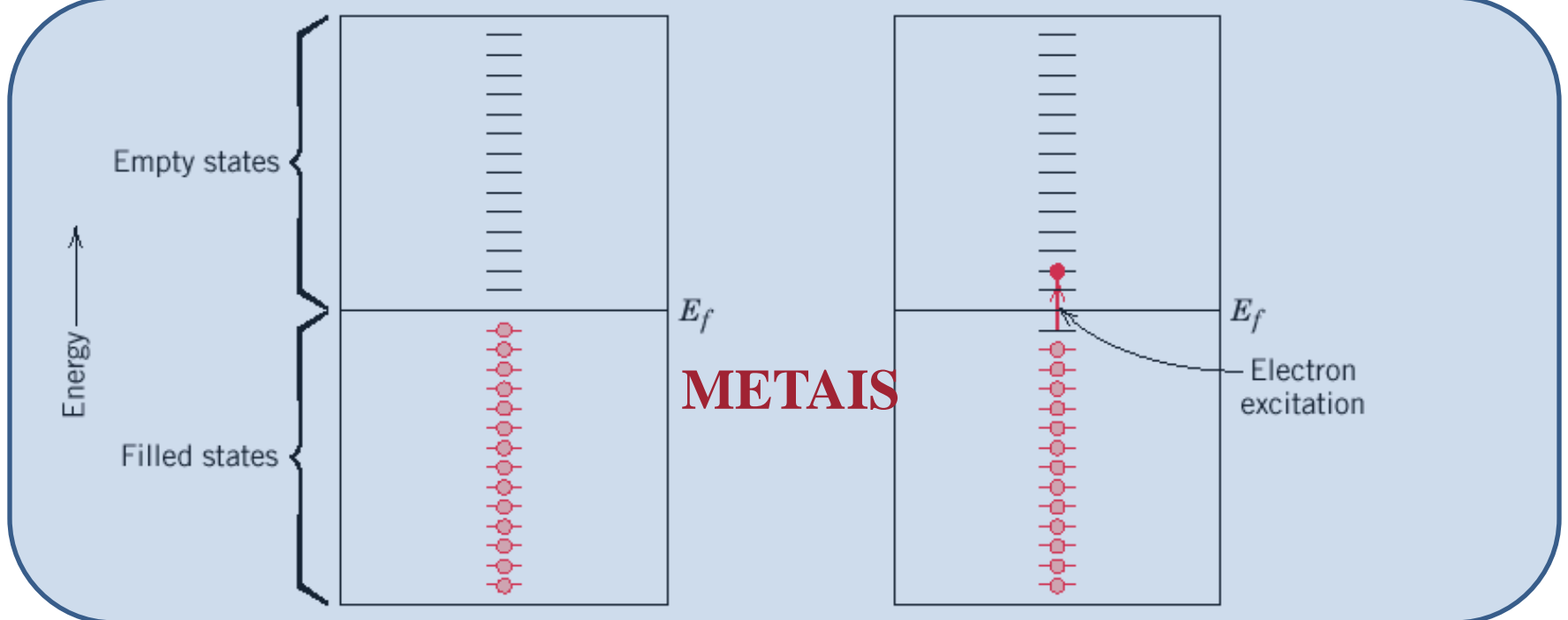


# Estruturas de banda de energia

## Metais



- ✓ Nos metais, a banda de valência encontra-se parcialmente preenchida ou há uma superposição de bandas.
- ✓ A condução ocorre pela promoção de ao “estados” condutores, acima do nível de Fermi.
- ✓ A energia associada a presença do campo elétrico é suficiente para excitar os elétrons →
- ✓ **Altos valores de condutividade**

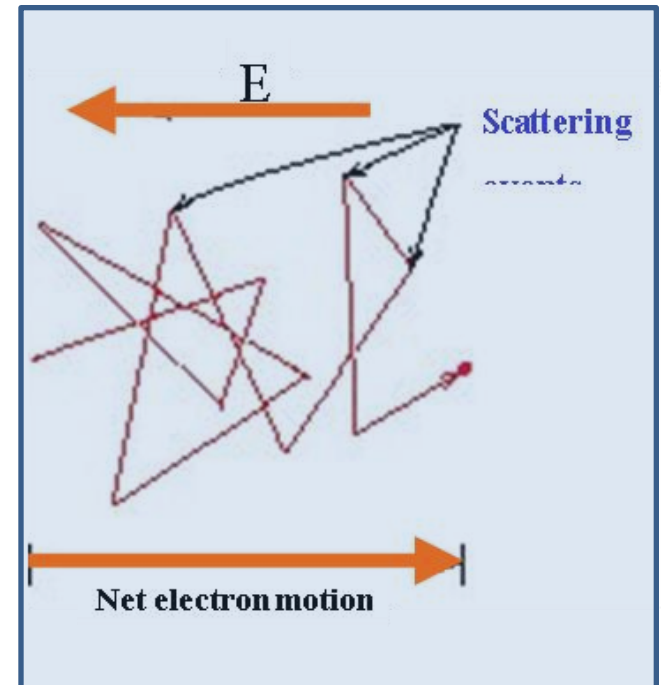


# Mobilidade Eletrônica

- Ao se aplicar um campo elétrico, é esperado que todos elétrons livres sejam acelerados enquanto durar este campo, dando origem a uma corrente elétrica que aumenta ao longo do tempo. No entanto isto não ocorre, a corrente elétrica atinge um valor constante no instante em que o campo é aplicado, indicando que existem forças que contrapõem esse campo.

# Mobilidade Eletrônica

- Essas forças resultam do espalhamento dos elétrons pelas imperfeições no retículo cristalino, incluindo os átomos de impurezas, lacunas, átomos intersticiais, discordância e vibrações térmicas, fazendo com que o átomo perca energia cinética e mude de direção. No entanto, existe um movimento líquido dos elétrons na direção oposta ao campo – a corrente elétrica.



# Mobilidade Eletrônica

- O espalhamento é manifestado como uma resistência à passagem de uma corrente.
- Para descrevê-lo, usa-se a velocidade de arraste  $v_e$ , proporcional ao campo elétrico  $\mathcal{E}$  e a mobilidade eletrônica  $\mu_e$  - uma constante de proporcionalidade, onde:

$$v_e = \mu_e \mathcal{E}$$

# Mobilidade Eletrônica

- A constante de proporcionalidade  $\mu_e$  indica a frequência de eventos de espalhamentos em  $[m^2 / V.s]$ .
- Para maioria dos materiais a condutividade é proporcional ao número de elétrons e a mobilidade, podendo ser expressa por:

$$\sigma = n|e|\mu_e$$

- Onde  $n$  é o número de elétrons livres e  $|e|$  é a magnitude absoluta da carga elétrica de um elétron,  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

<b>(m) = Metal (s) = Semicon</b>	<b>Mobility (RT) <math>\mu</math> (m<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Carrier Density N<sub>e</sub> (m<sup>-3</sup>)</b>
<b>Na (m)</b>	<b>0.0053</b>	<b>2.6 x 10<sup>28</sup></b>
<b>Ag (m)</b>	<b>0.0057</b>	<b>5.9 x 10<sup>28</sup></b>
<b>Al (m)</b>	<b>0.0013</b>	<b>1.8 x 10<sup>29</sup></b>
<b>Si (s)</b>	<b>0.15</b>	<b>1.5 x 10<sup>10</sup></b>
<b>GaAs (s)</b>	<b>0.85</b>	<b>1.8 x 10<sup>6</sup></b>
<b>InSb (s)</b>	<b>8.00</b>	

# Resistividade elétrica dos metais

- Em função dos metais possuírem alta condutividade, discute-se esta em termos da resistividade.
- Defeitos cristalinos servem como centros de espalhamento. A concentração das imperfeições depende da temperatura, da composição e do grau de deformação a frio.
- **Os mecanismos de espalhamento atuam de forma independente um do outro, assim, a resistividade é a soma das parcelas que contribuem.**
- Esta é chamada **regra de Matthiessen**

$$\rho_{\text{total}} = \rho_{\text{thermal}} + \rho_{\text{impurity}} + \rho_{\text{deformation}}$$



# Resistividade elétrica dos metais

- A resistividade aumenta com a temperatura.

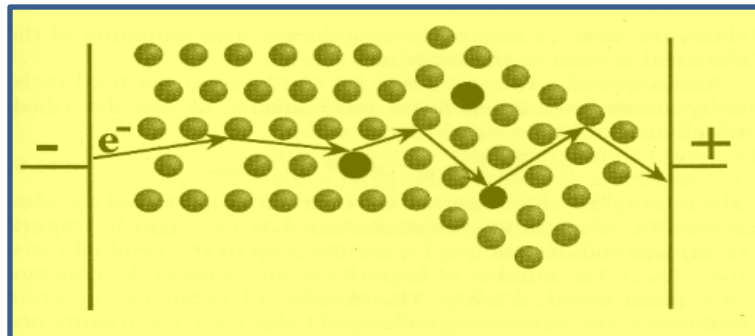
$$\rho_t = \rho_0 + \alpha T$$

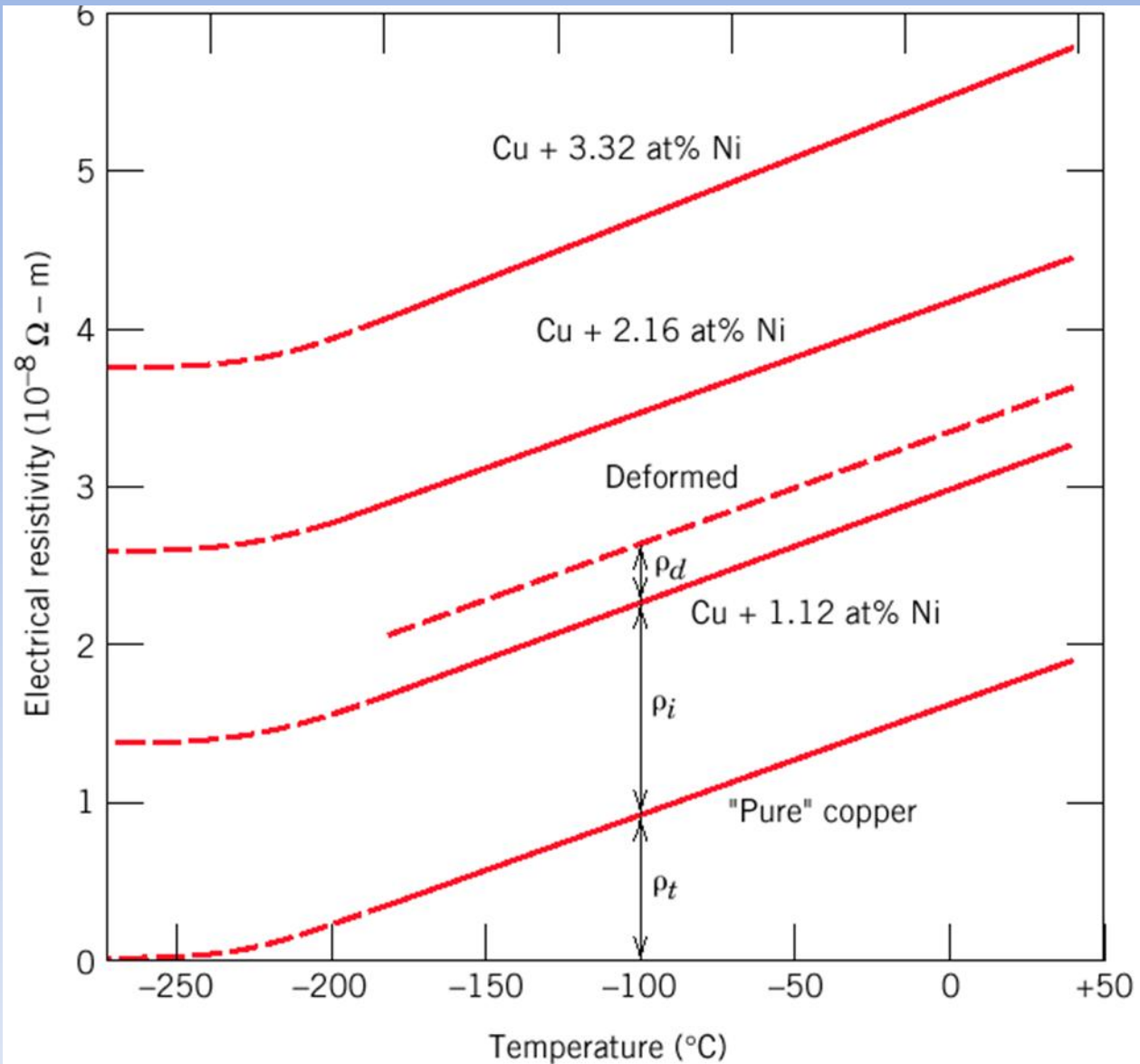
- A resistividade está relacionada a concentração de impurezas.

$$\rho_i = A c_1 (1 - c_2)$$

$$\rho_i = \rho_a \cdot V_a + \rho_b \cdot V_b$$

- A resistividade aumenta com a deformação plástica como resultado do maior número de discordâncias.





---

<i>Metal</i>	<i>Electrical Conductivity</i> [ $(\Omega\text{-m})^{-1}$ ]
Silver	$6.8 \times 10^7$
Copper	$6.0 \times 10^7$
Gold	$4.3 \times 10^7$
Aluminum	$3.8 \times 10^7$
Iron	$1.0 \times 10^7$
Brass (70 Cu–30 Zn)	$1.6 \times 10^7$
Platinum	$0.94 \times 10^7$
Plain carbon steel	$0.6 \times 10^7$
Stainless steel	$0.2 \times 10^7$

---

# Materiais elétricos metálicos mais utilizados

➤ Prata

➤ **Cobre:** barato, abundante, alta  $\rho$ , porém macio

São empregadas ligas endurecidas por precipitação: ligas Cu-Be

➤ **Alumínio:** apresenta valores de condutividade 50% do valor da  $\rho$  do cobre, porém apresentam resistência a corrosão bem superior.

➤ **Elementos de aquecimento:** altos valores de resistividade e boa resistência a oxidação em altas temperaturas.

# Semicondutores

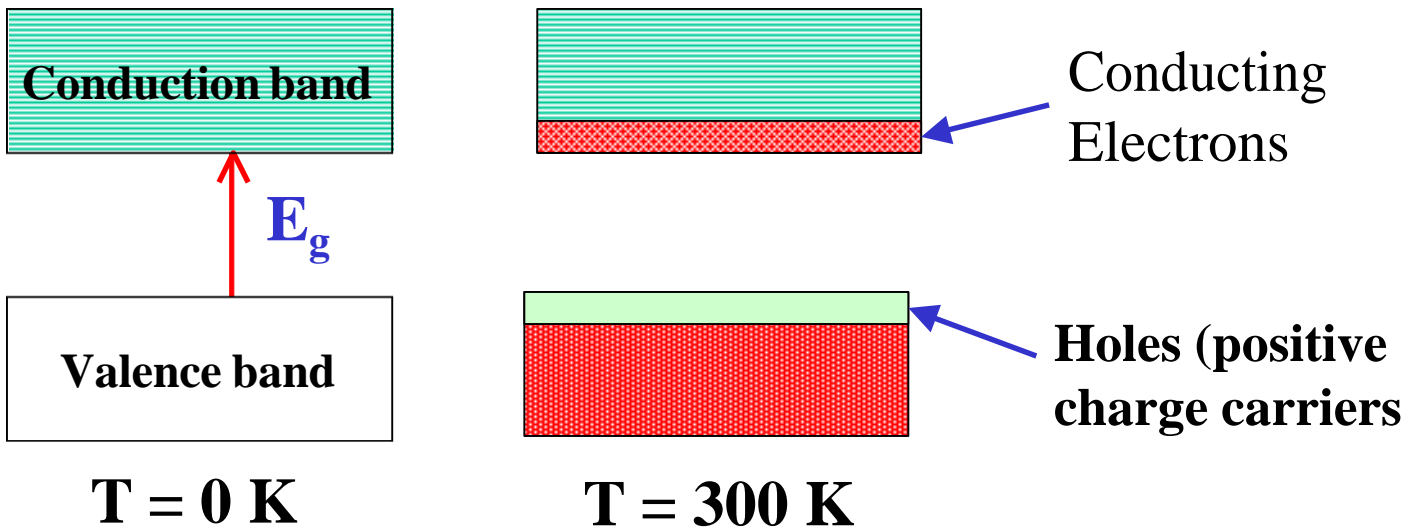
- Os materiais semicondutores são materiais que possuem resistividade intermediária entre a dos materiais condutores e isolantes. Os principais materiais semicondutores utilizados na eletrônica são o Germânio (Ge) e o Silício (Si), sendo este último o mais utilizado.
- Nos materiais semicondutores, a camada de valência possui 4 elétrons, como o material tende a possuir oito elétrons na camada de valência, e o elemento semicondutor só possui quatro, este acomoda os seus átomos, simetricamente entre si, constituindo uma estrutura cristalina, através de ligações covalentes.

# Semicondutores

- **Semicondutores intrínsecos** – aqueles em que o comportamento elétrico está baseado na estrutura eletrônica inerente ao metal puro.
- **Semicondutores extrínsecos** – as características elétricas são devidas aos átomos de impurezas.

# Semi-condutores intrínsecos

- $N_e \equiv n = C T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$



Si ( $E_g = 1.1 \text{ eV}$ ): um em cada  $10^{13}$  átomos, contribui com 1 elétron para a banda de condução, a temperatura ambiente

# Semi-condutores intrínsecos

$$\rho = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

$$n = p$$

$$\rho = n|e|(\mu_e + \mu_h) = p|e|(\mu_e + \mu_h)$$

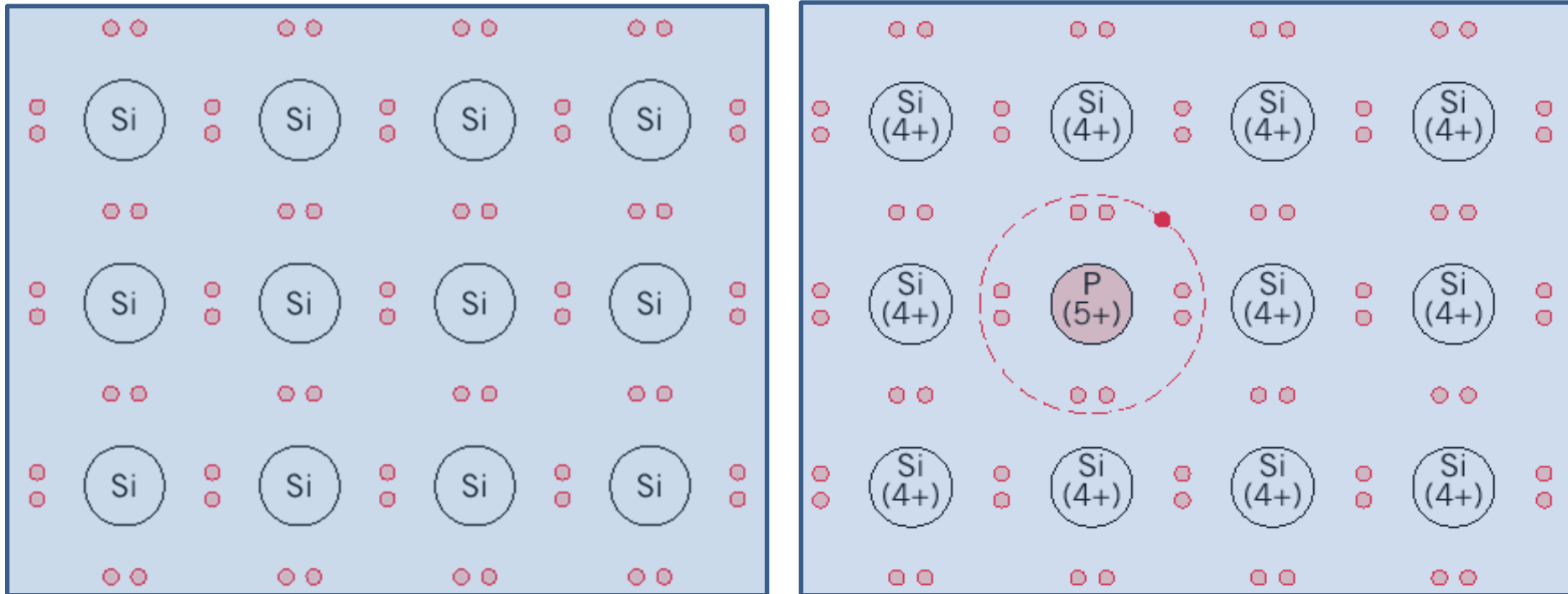
**Obs.: A condutividade elétrica dos semi-condutores aumenta com o aumento da temperatura (ao contrário de metais!!!)**



# Semicondutores tipo n

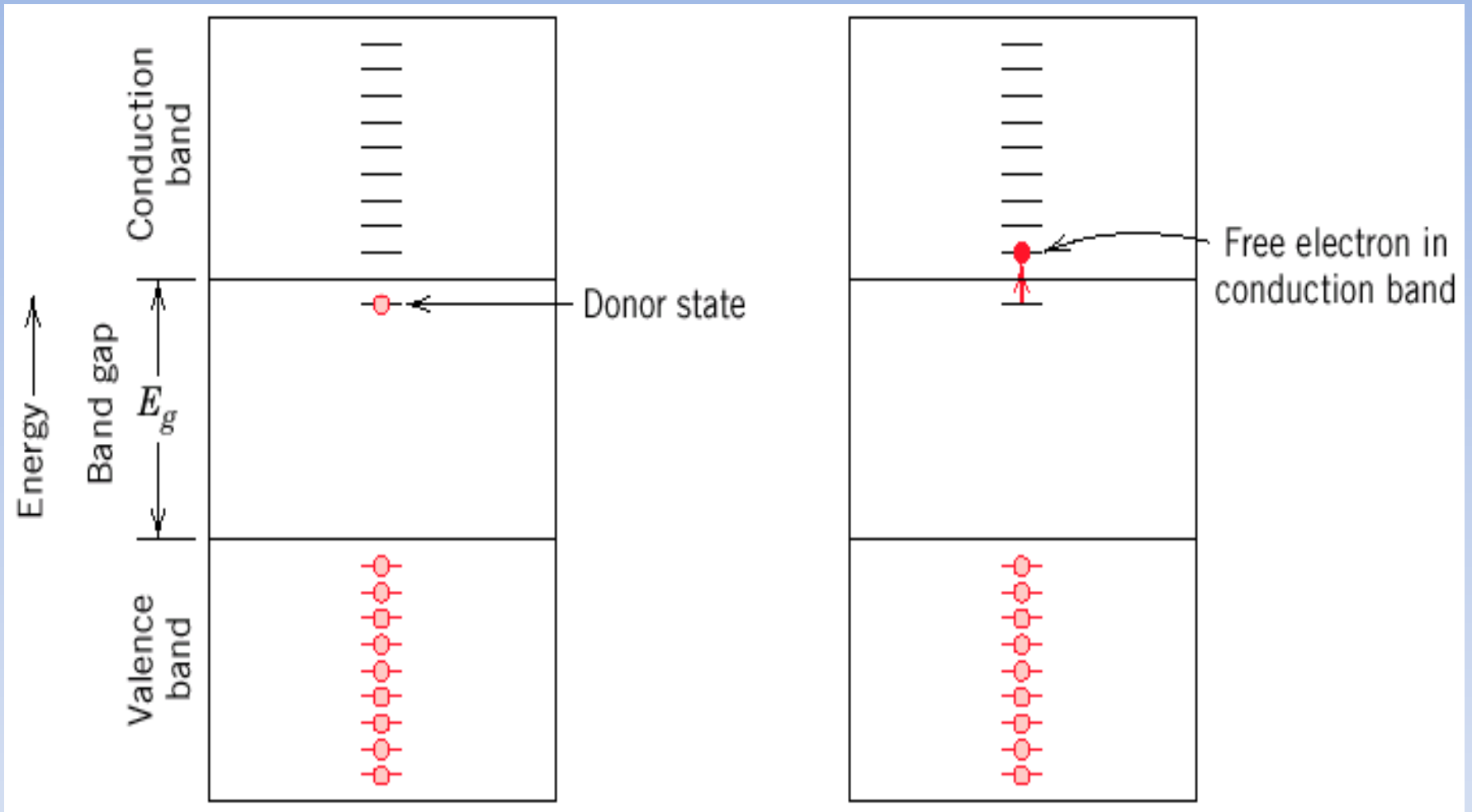
- Ao associarmos um elemento com cinco elétrons na última camada como o Antimônio, o Fósforo, ou Arsênio, ao material semicondutor, os mesmos irão formar ligações covalentes, porém haverá um elétron que poderá mover-se pela estrutura com maior facilidade, está formado o material com carga negativa.

# Semicondutores tipo n



- ❖ 1/5 dos elétrons do P encontra-se fracamente ligado ( $\sim 0.01$  eV) e pode ser facilmente promovido a banda de condução.
- ❖ Dopantes que produzem elétrons “extra” são chamados de doadores :

$$ND = N(\text{Fósforo}) \sim n$$

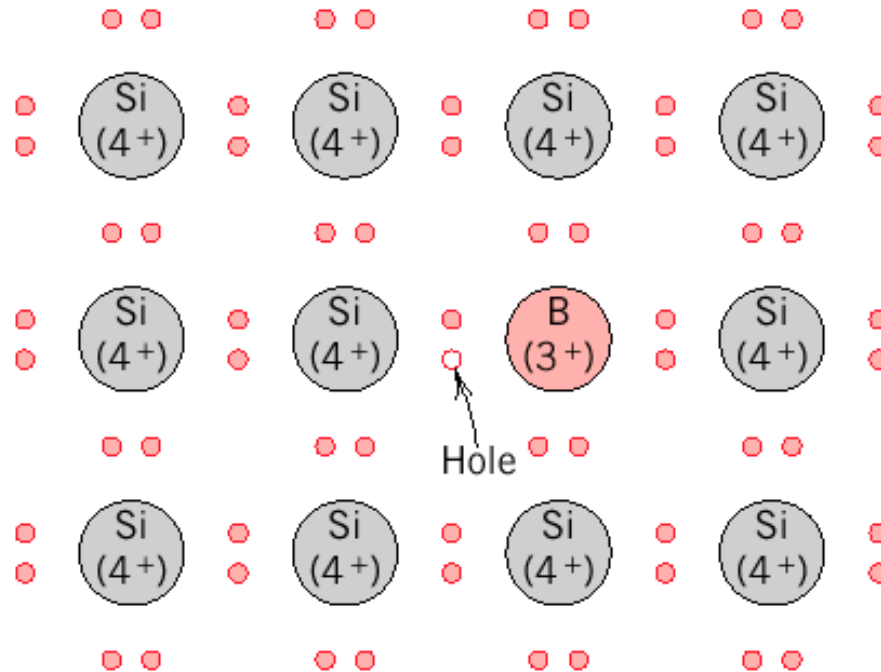


$$\sigma \sim n|e|\mu_e \sim N_D |e|\mu_e$$

# Semicondutores tipo p

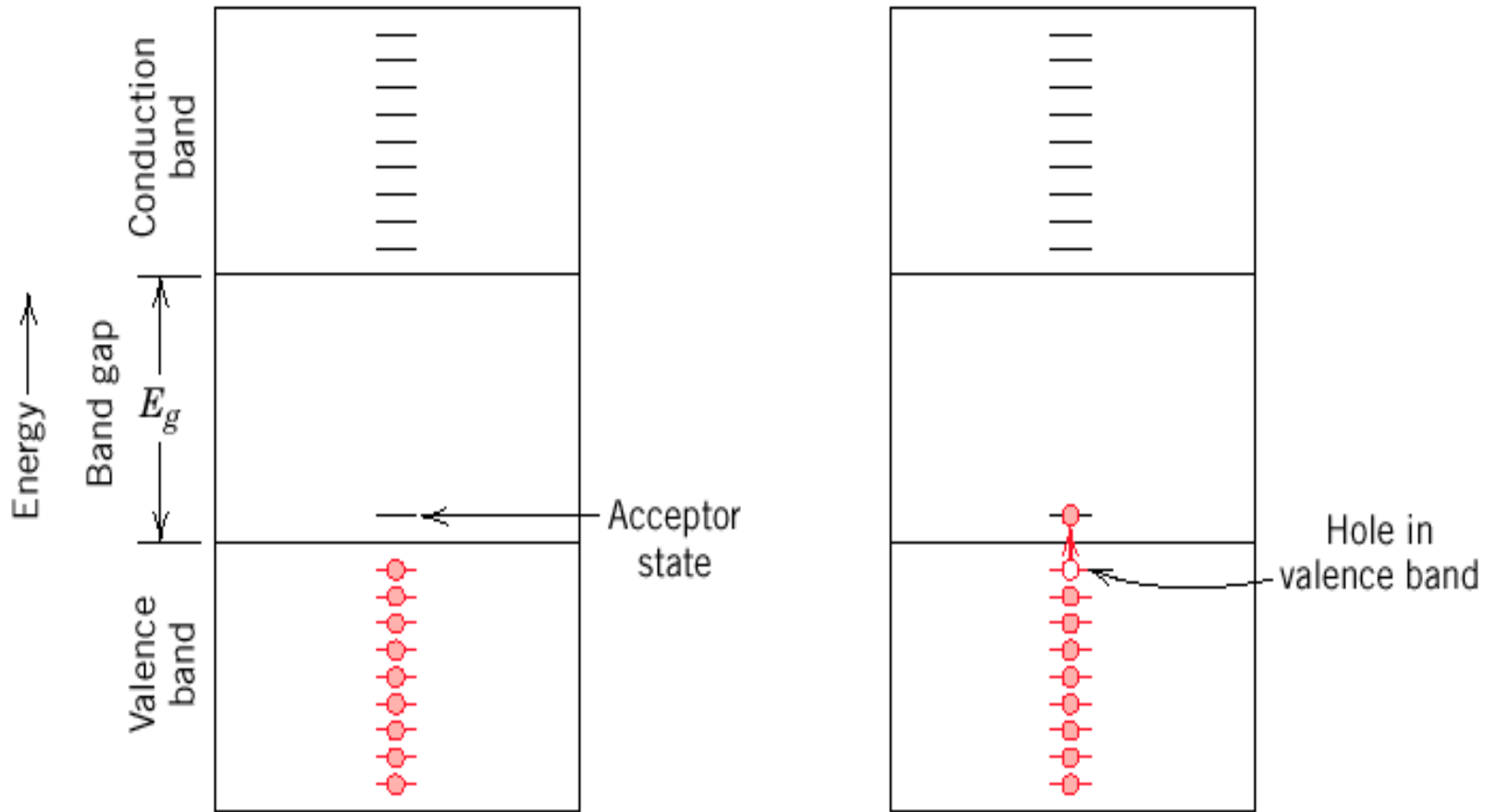
- Ao realizar a dopagem do material semiconductor (Silício ou Germânio) através da introdução de impurezas com três elétrons na camada de valência como o Alumínio, o Índio, o Boro ou o Gálio, temos a formação de ligação covalente entre o material semiconductor e a impureza. Ao introduzirmos um elemento deste tipo, numa das ligações faltará um elétron, pois o elemento contribuiu com apenas três elétrons. Esta falta de elétrons comporta-se como um buraco apto a receber elétrons de outra união.

# Semicondutores tipo p



- ❖ Nesse caso, ocorre um excesso de buracos, produzidos pela adição de impurezas com número de valência inferior ao da matriz.
- ❖ Nesse caso, as impurezas são chamadas de receptoras.

$$N_A = N_{\text{Boron}} \sim p$$

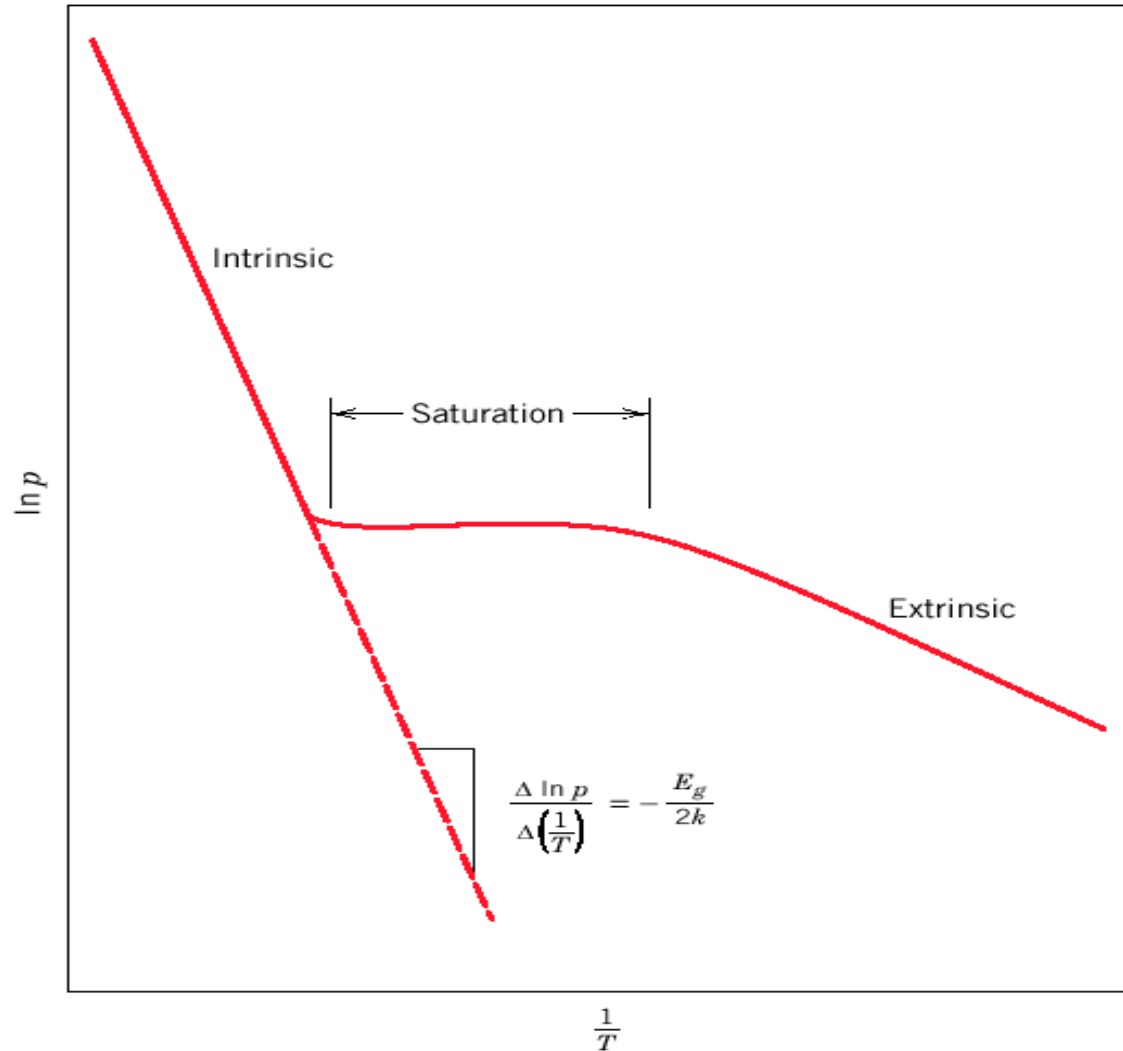


$$\sigma \sim p|e|\mu_p \sim N_A |e|\mu_p$$

# Influência da temperatura

$$n = p \cong A \exp(-E_g / 2 kT)$$

$$\sigma \cong C \exp(-E_g / 2 kT)$$



- **T baixas**: todos os portadores se devem a excitações intrínsecas
- **T intermediárias**: a maior parte dos dopantes encontram-se ionizados (região de saturação)
- **T altas**: contribuição da semicondutividade extrínseca



# Dispositivos semicondutores

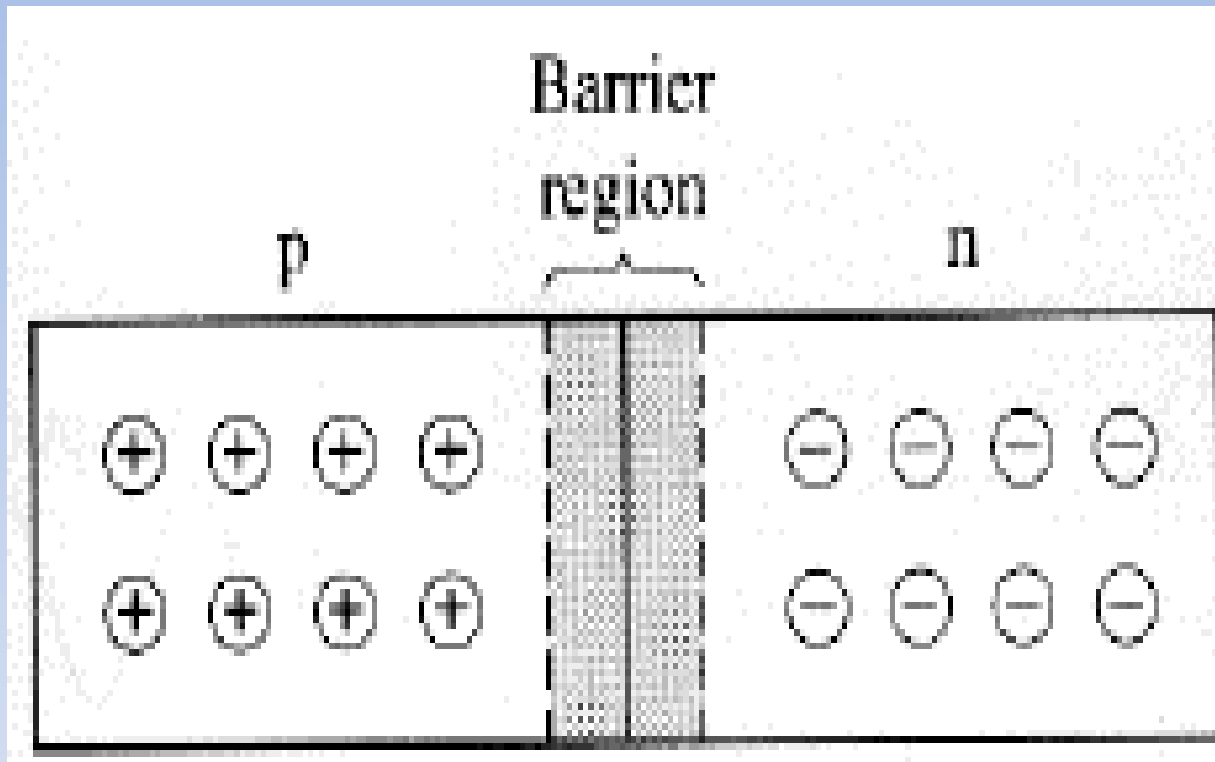
- Diodos
- Transistores
- Capacitores

A invenção dos dispositivos semicondutores possibilitou a construção de circuitos miniaturizados propiciando o grande desenvolvimento tecnológico que conhecemos.

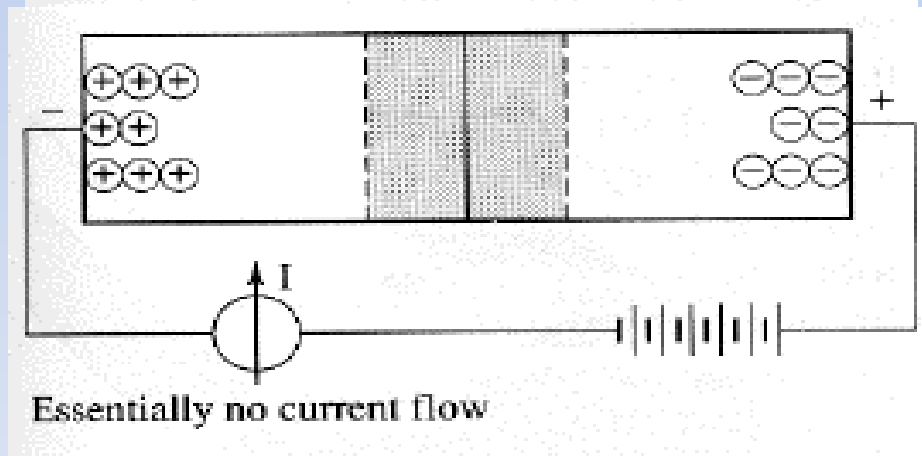
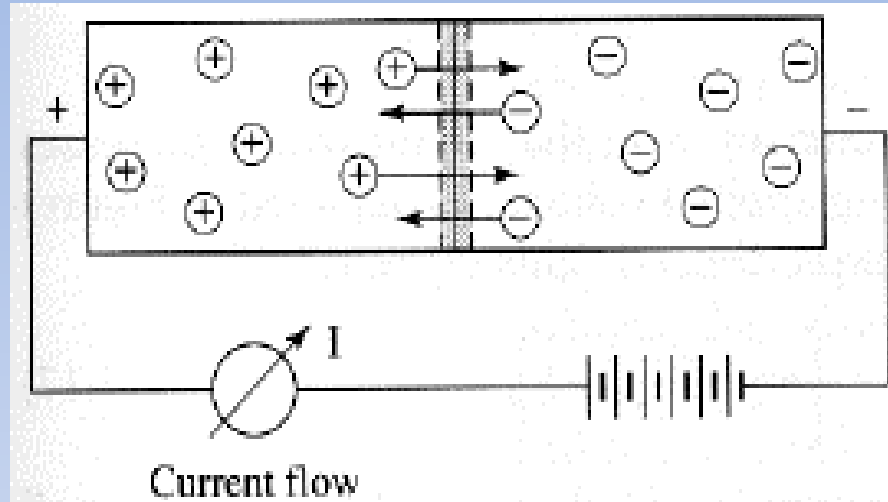
# Diodos

- O diodo semicondutor é um dispositivo básico numa grande variedade de circuitos que vão dos mais simples aos mais complexos.
- O diodo de junção semicondutor é formado unindo os materiais do tipo N e P construídos a partir da mesma base de silício ou germânio.
- Os materiais do tipo N e do tipo P são eletricamente neutros. Quando são unidos formam um dispositivo chamado diodo de junção.

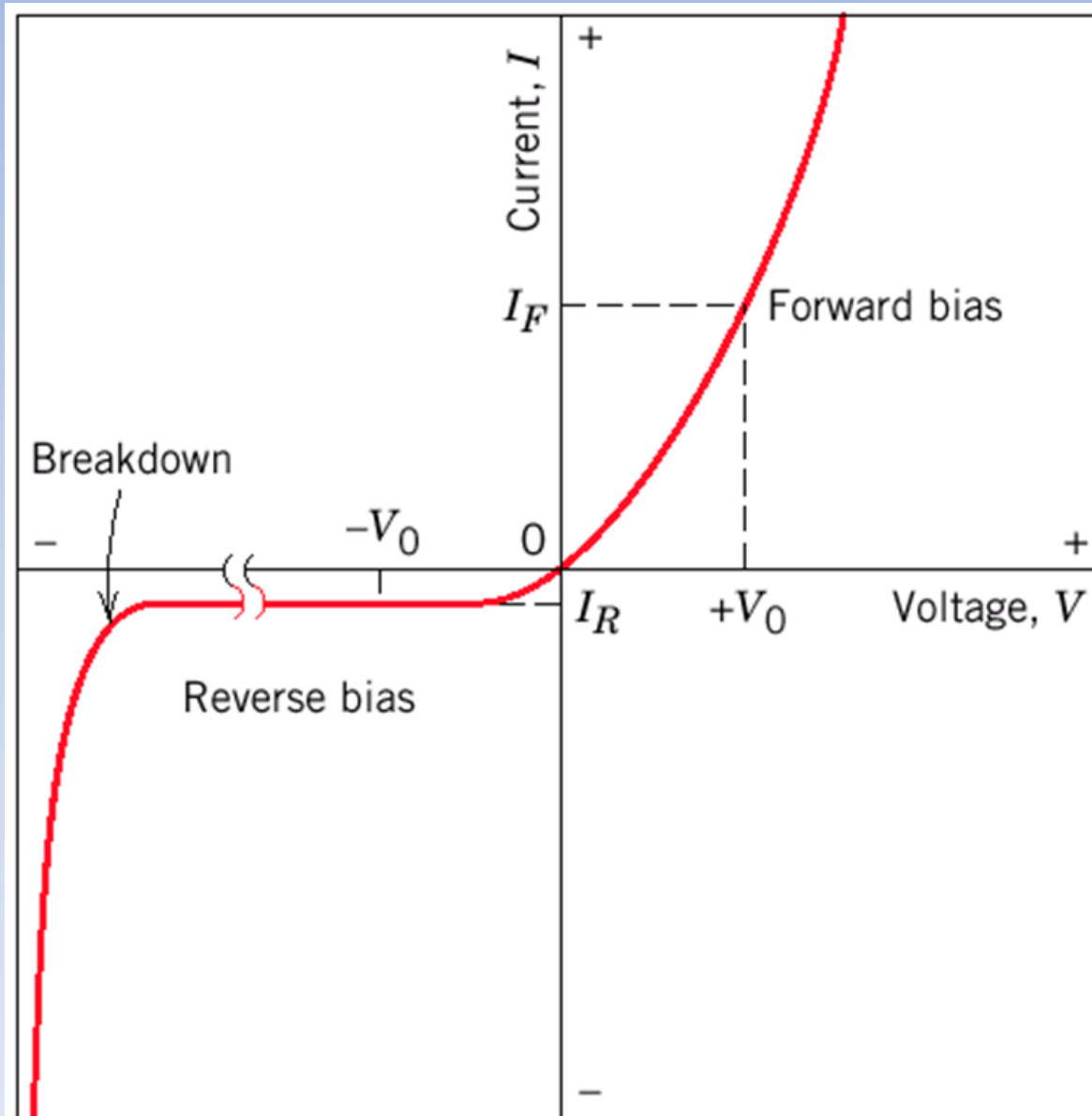
# Diodos



# Diodos

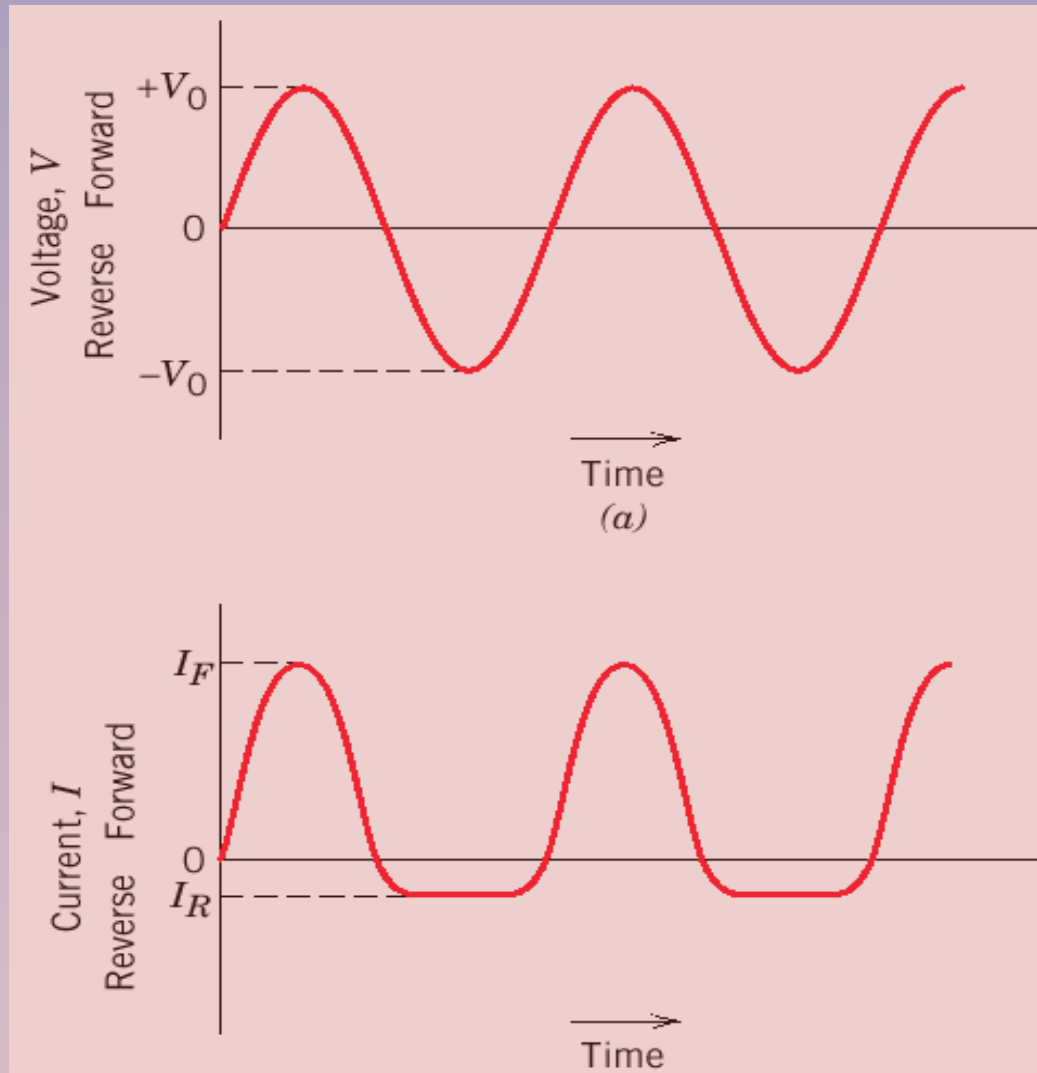


# Diodos

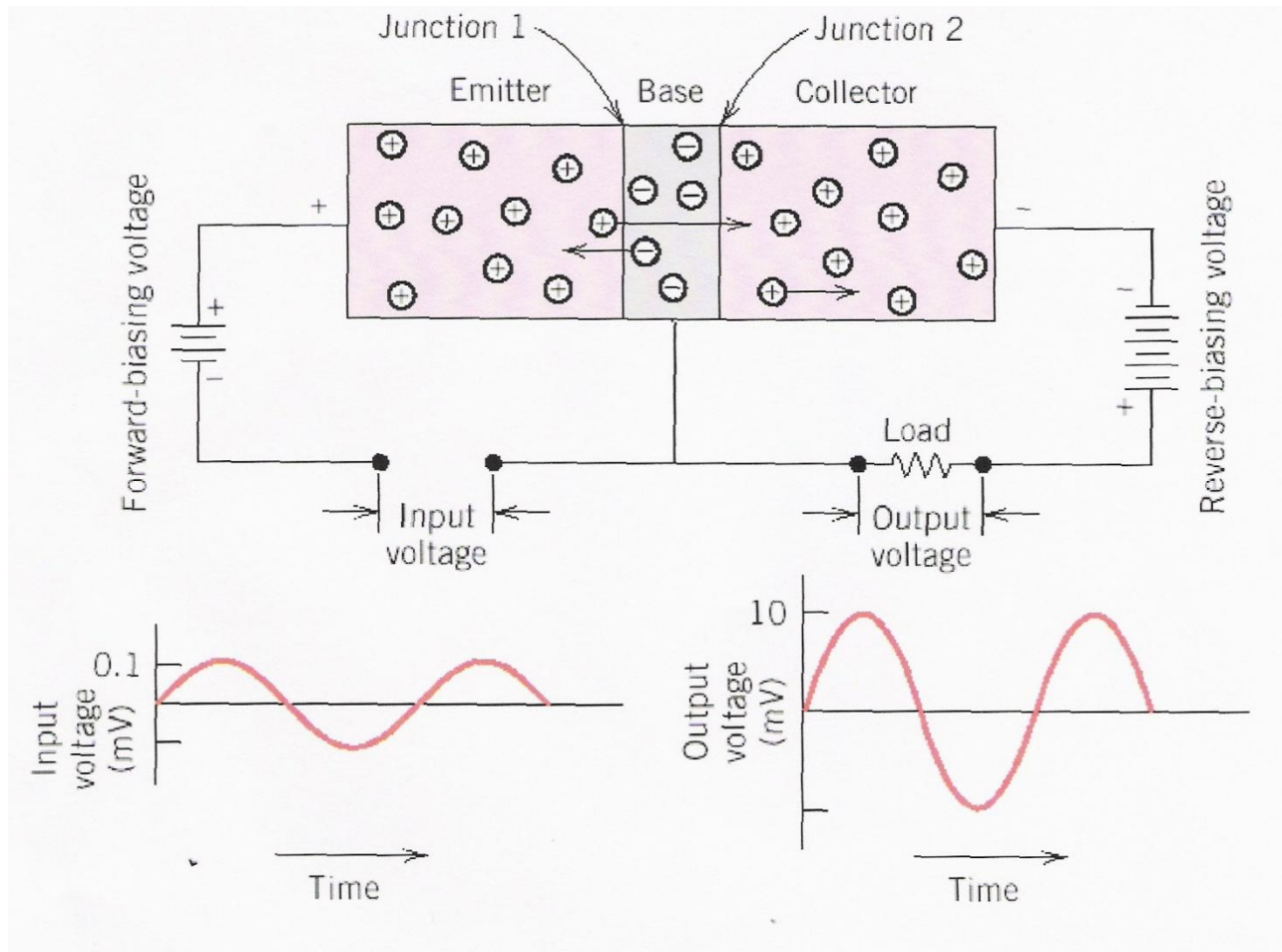


# Diodos

## Retificação

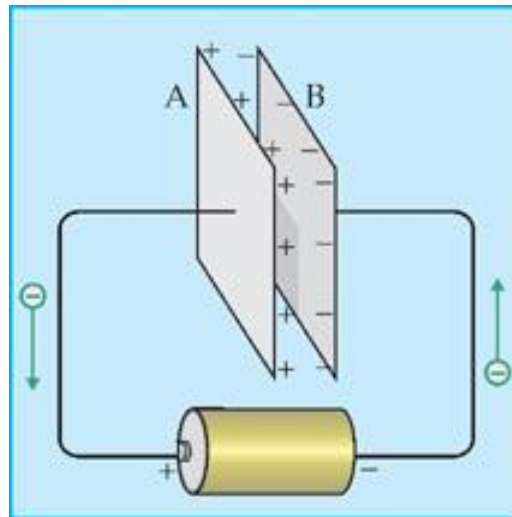


# Transistores



# Capacitores

- Dielétrico – material isolante elétrico que exibe ou pode exibir uma estrutura de dipolo elétrico. Estes materiais são usados em capacitores.



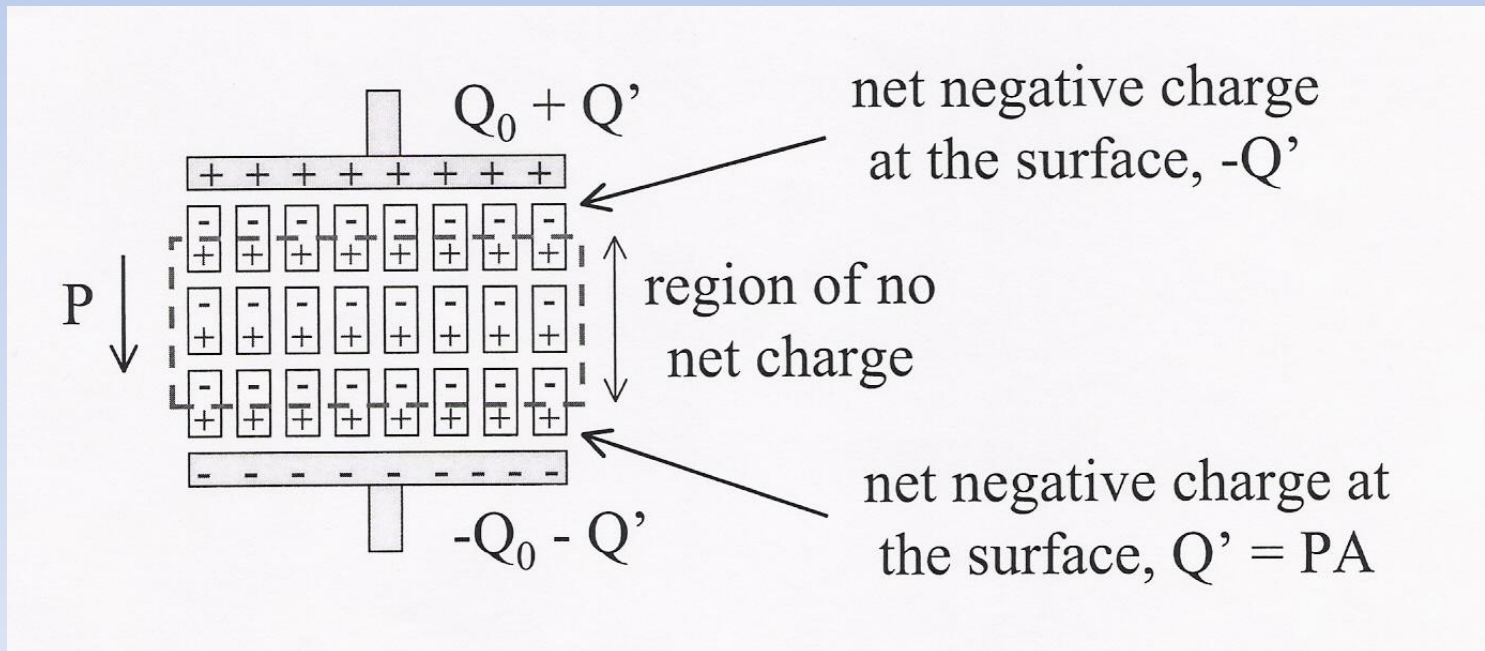
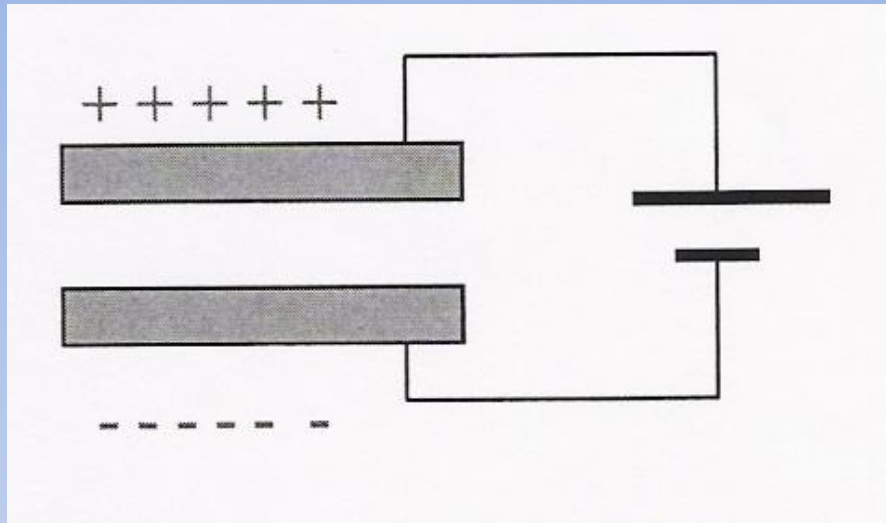


# Capacitores

- Capacitores ou condensadores são elementos elétricos capazes de armazenar carga elétrica e, conseqüentemente, energia potencial elétrica.
- Podem ser esféricos, cilíndricos ou planos, constituindo-se de dois condutores denominados armaduras que, ao serem eletrizados, num processo de indução total, armazenam cargas elétricas de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

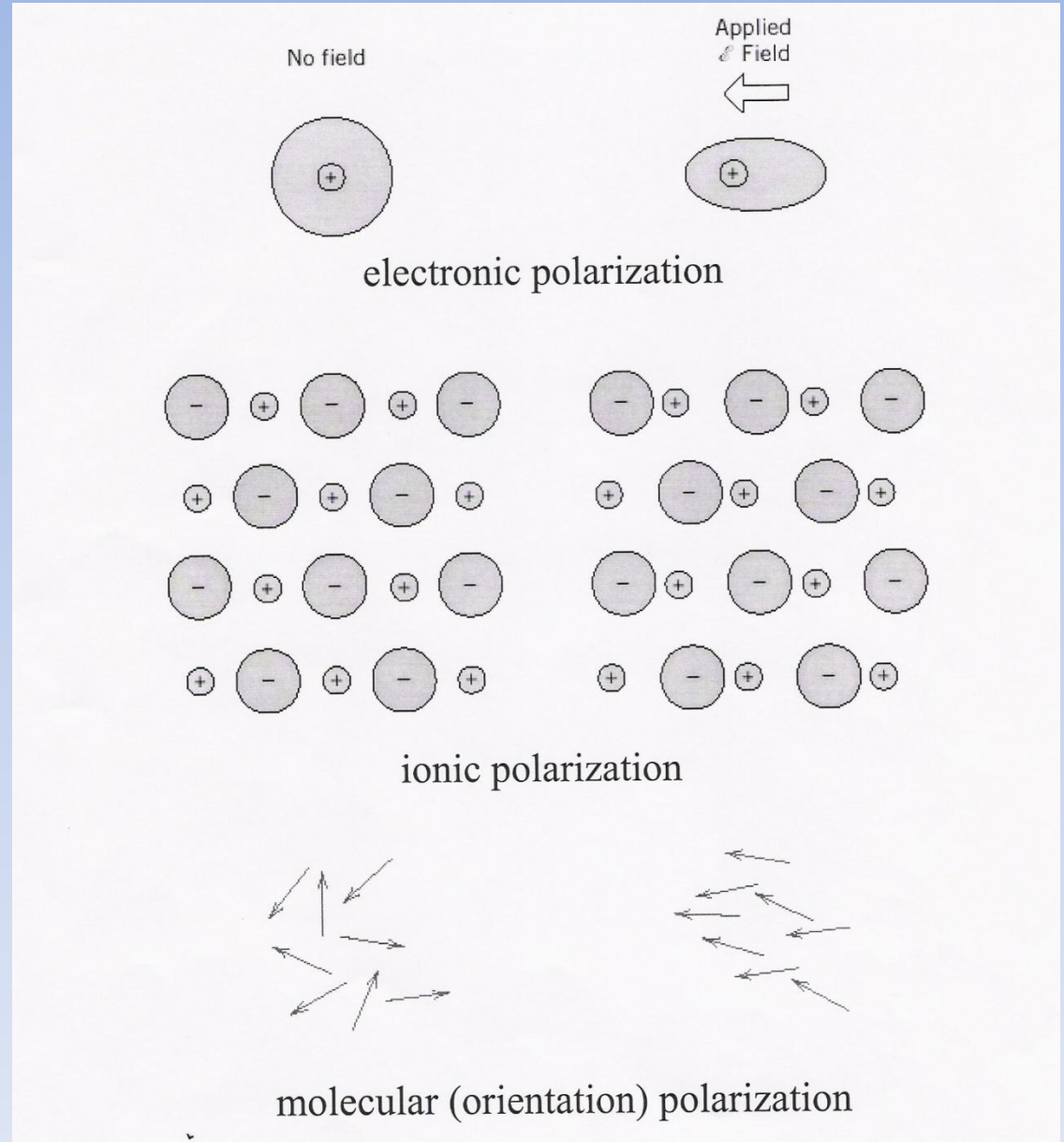
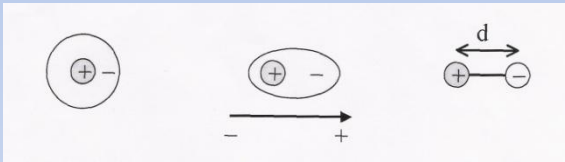
# Capacitores

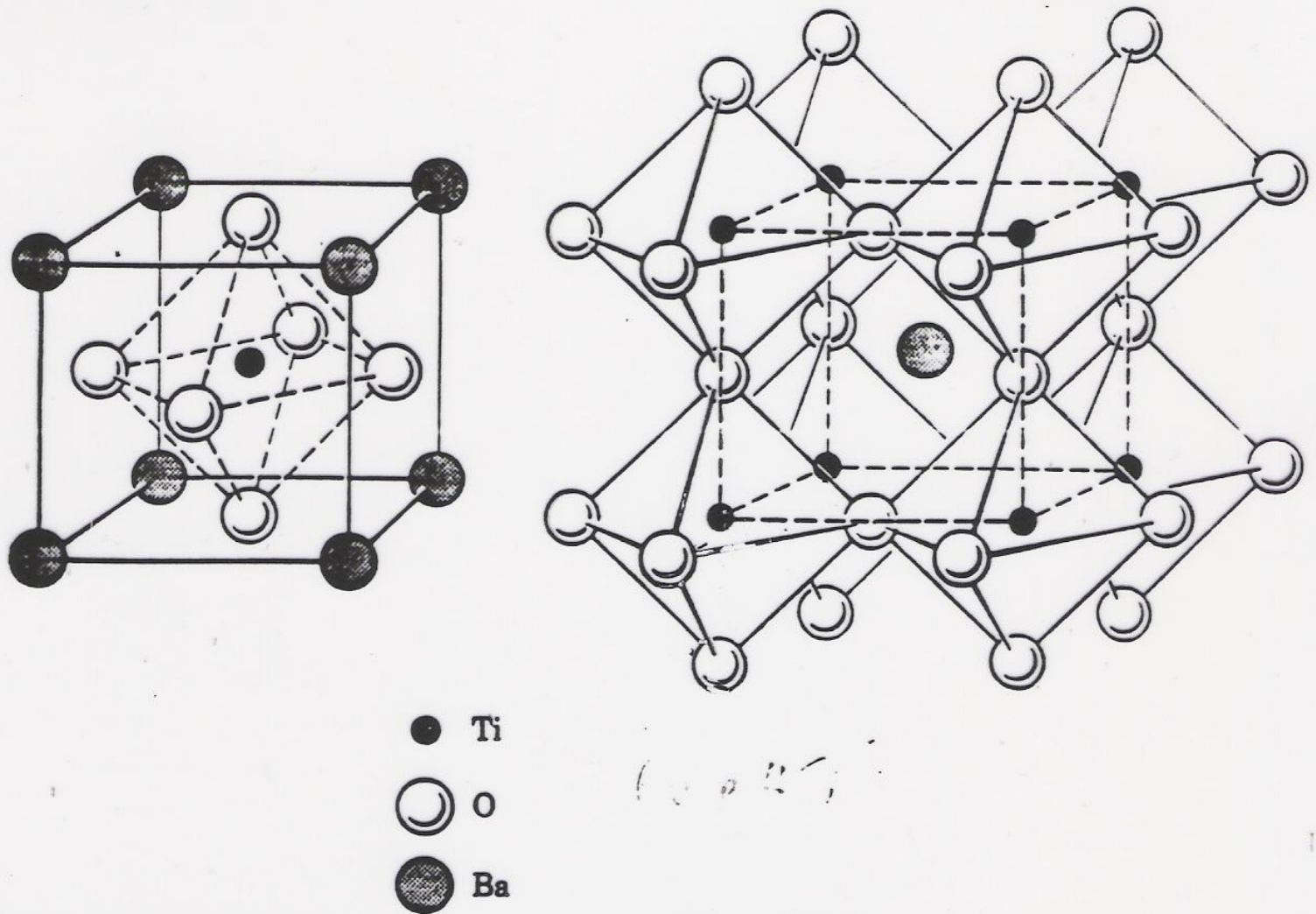
- O capacitor tem inúmeras aplicações na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo. Na eletrônica, para pequenas variações da diferença de potencial, o capacitor pode fornecer ou absorver cargas elétricas, pode ainda gerar campos elétricos de diferentes intensidades ou muito intensos em pequenos volumes.



# Mecanismos de polarização

## Dipolos





**Fig. 1.27** Ion positions in ideal cubic perovskite structure.

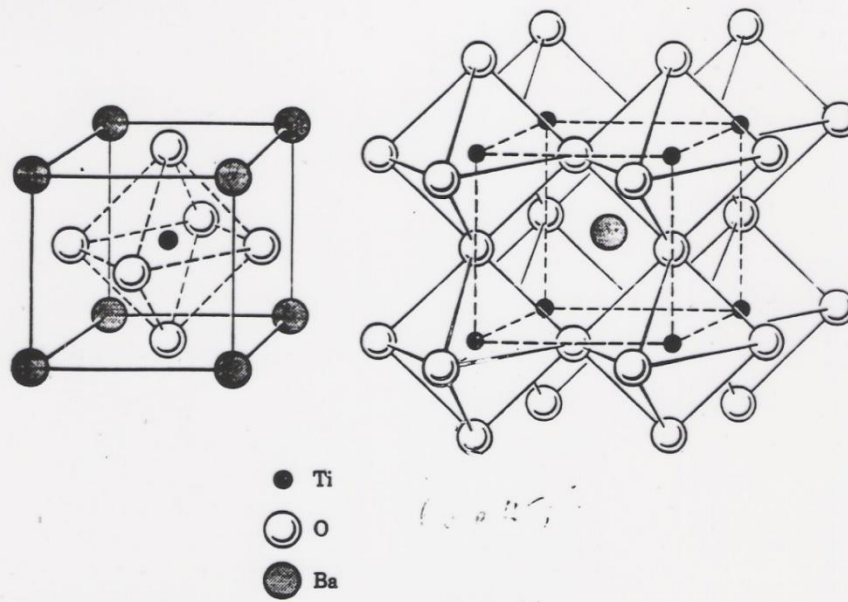


Fig. 1.27 Ion positions in ideal cubic perovskite structure.

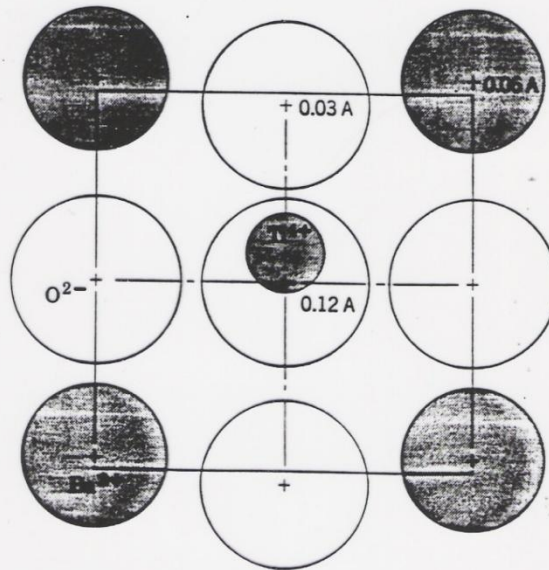


Fig. 1.28 Ion positions in tetragonal BaTiO<sub>3</sub>. [From G. Shirane, F. Jona, and R. Pepinsky, *Proc. I.R.E.*, 42, 1738 (1955).]