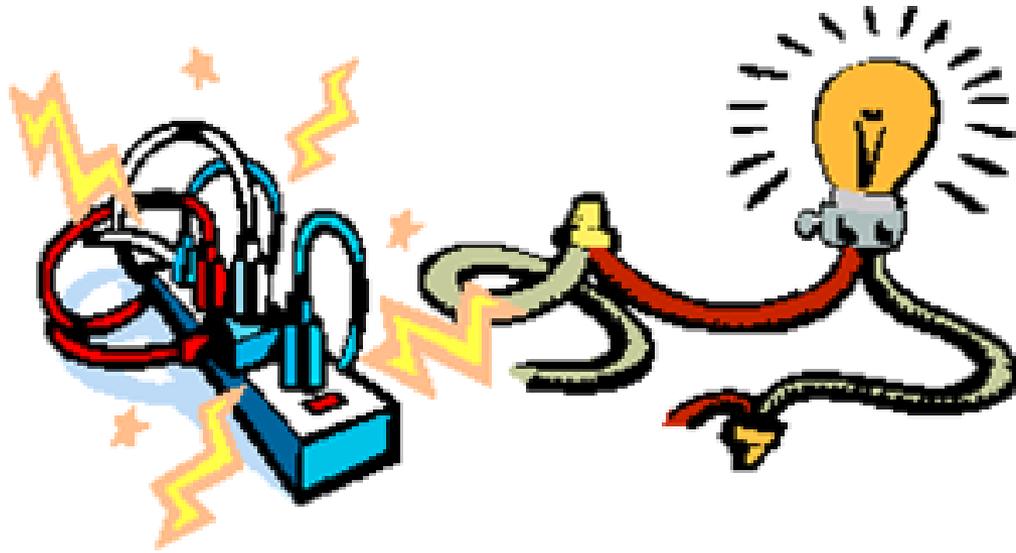


PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS

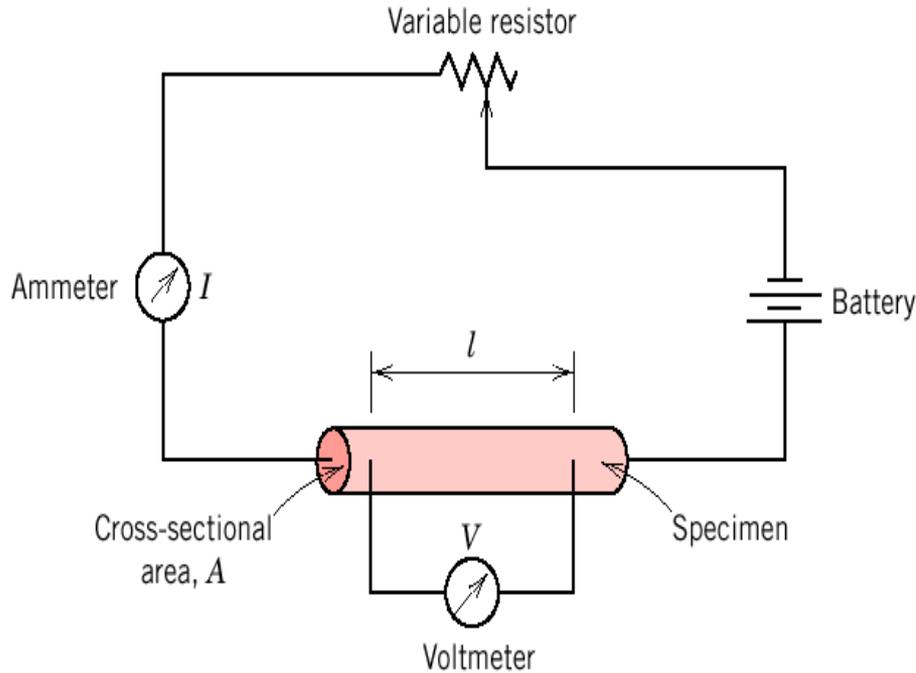


Vera L. Arantes

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 - Ω (V/A).

2a. Lei de Ohm

- A **resistividade** ρ 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 ρ 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:

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

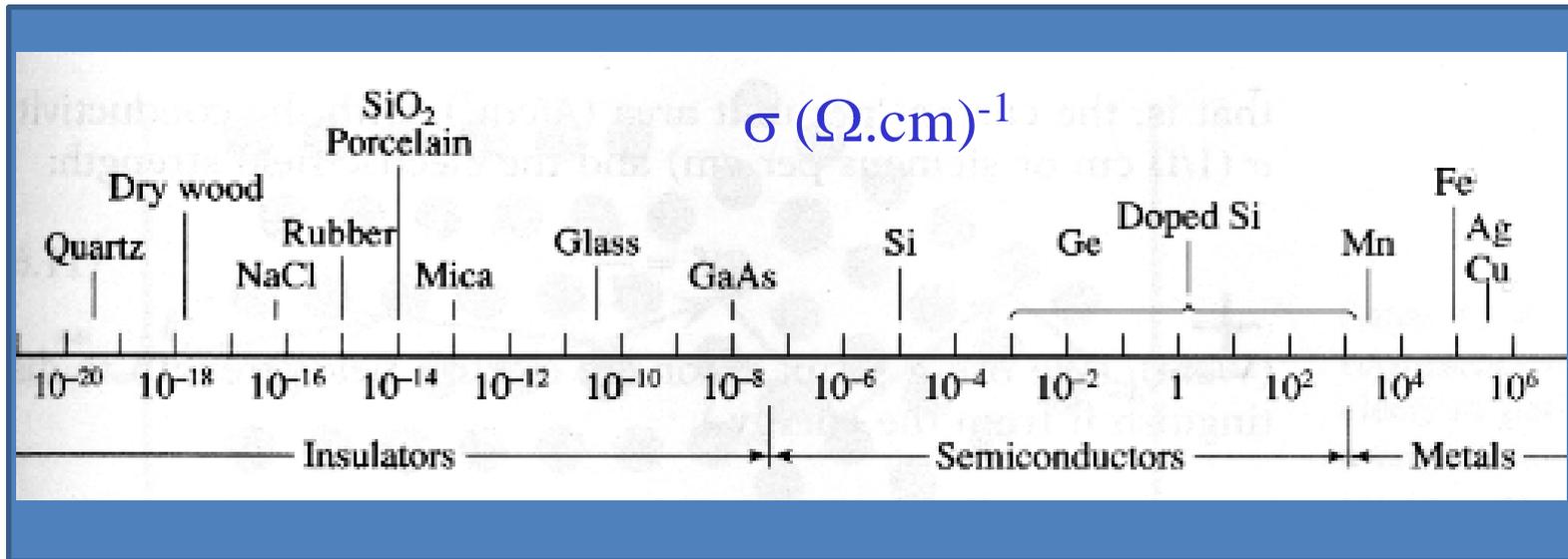
Intensidade do campo elétrico

$$E = V/l$$

Densidade de corrente

$$J = \sigma E$$

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.

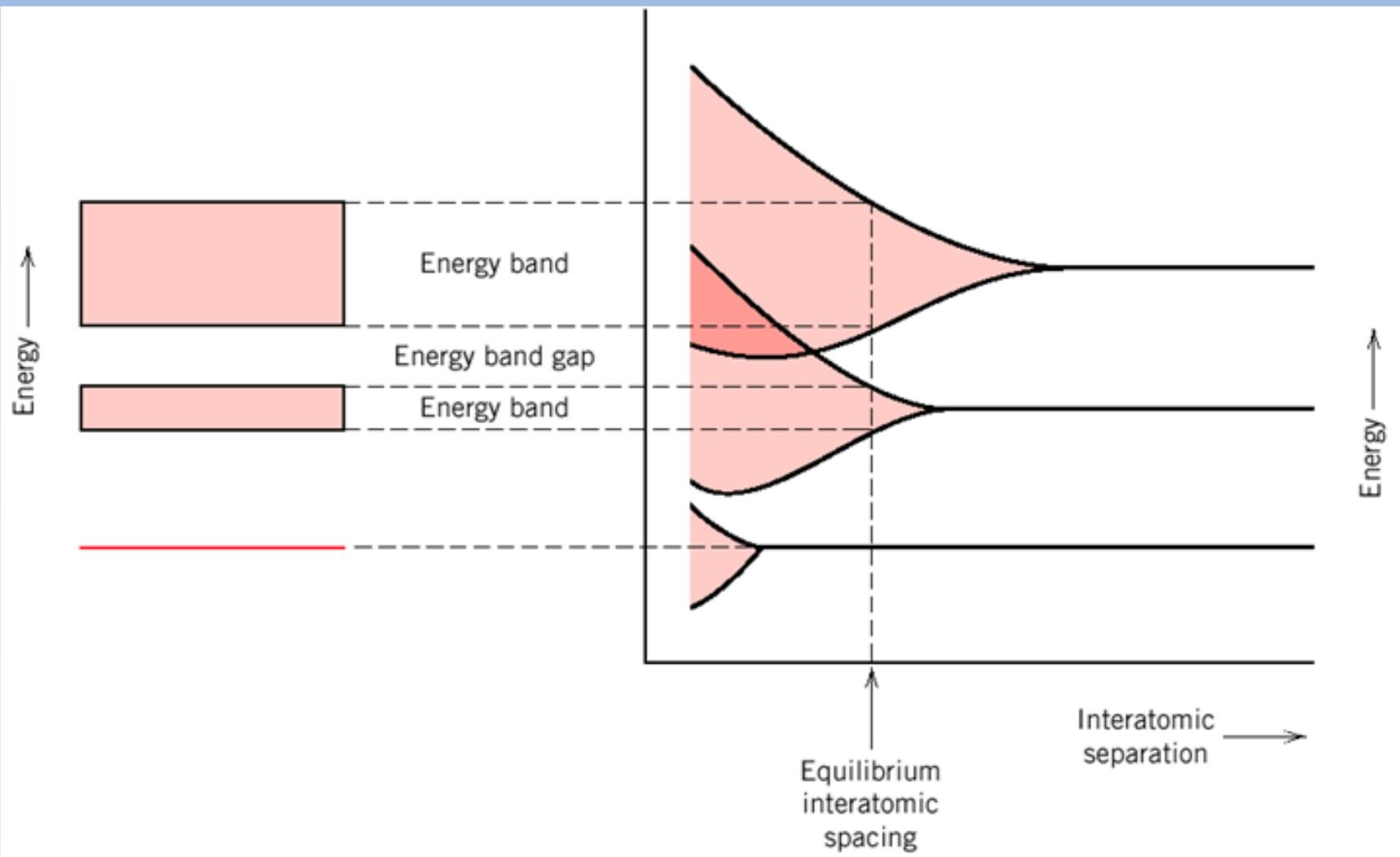
Banda de energia nos sólidos

- 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

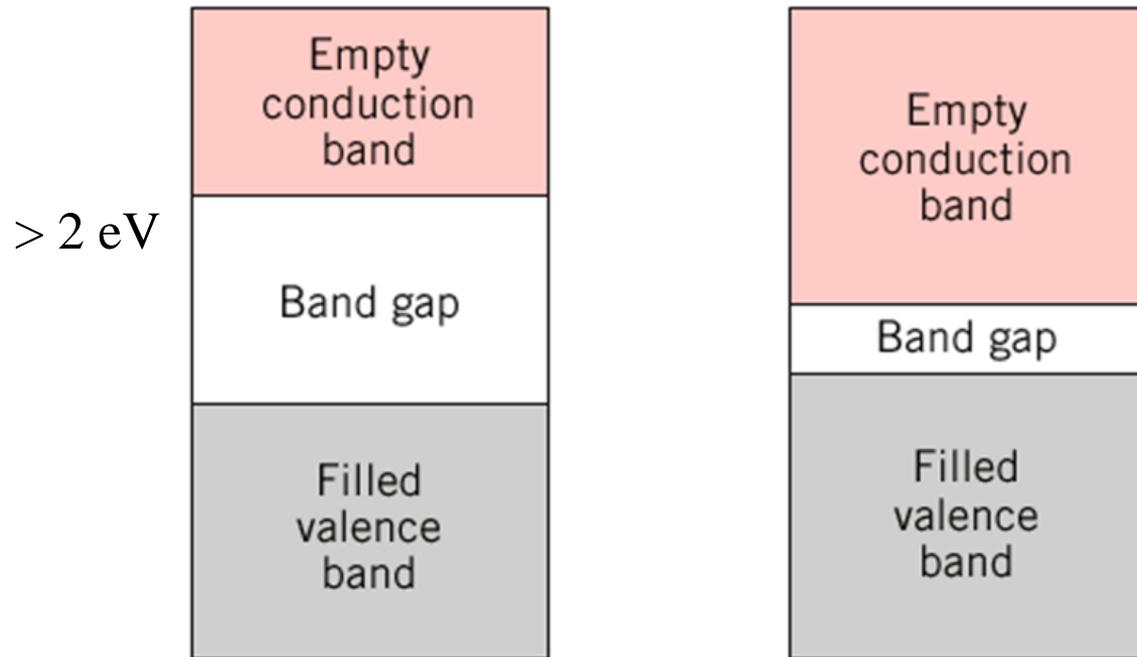
- **Energia de Fermi** – estado energético preenchido de maior energia.
- **Banda de condução** - banda de energia vazia ou parcialmente preenchida
- **Banda de valência** – banda de energia vazia ou parcialmente preenchida com elétrons de maiores estados energéticos

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

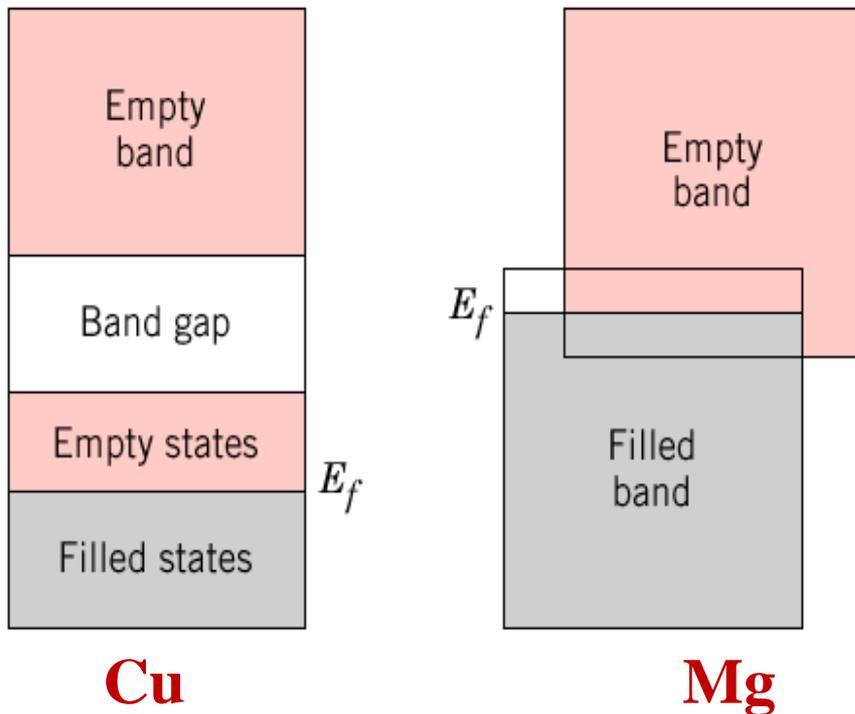
- O número de elétrons tecnicamente excitados (através de energia térmica) para a banda de energia depende da largura do espaçamento e da temperatura.
- **Quanto maior o espaçamento entre as bandas, para uma dada temperatura, menor a condutividade elétrica.**
- **Material isolante** – ligação iônica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

Semicondutores

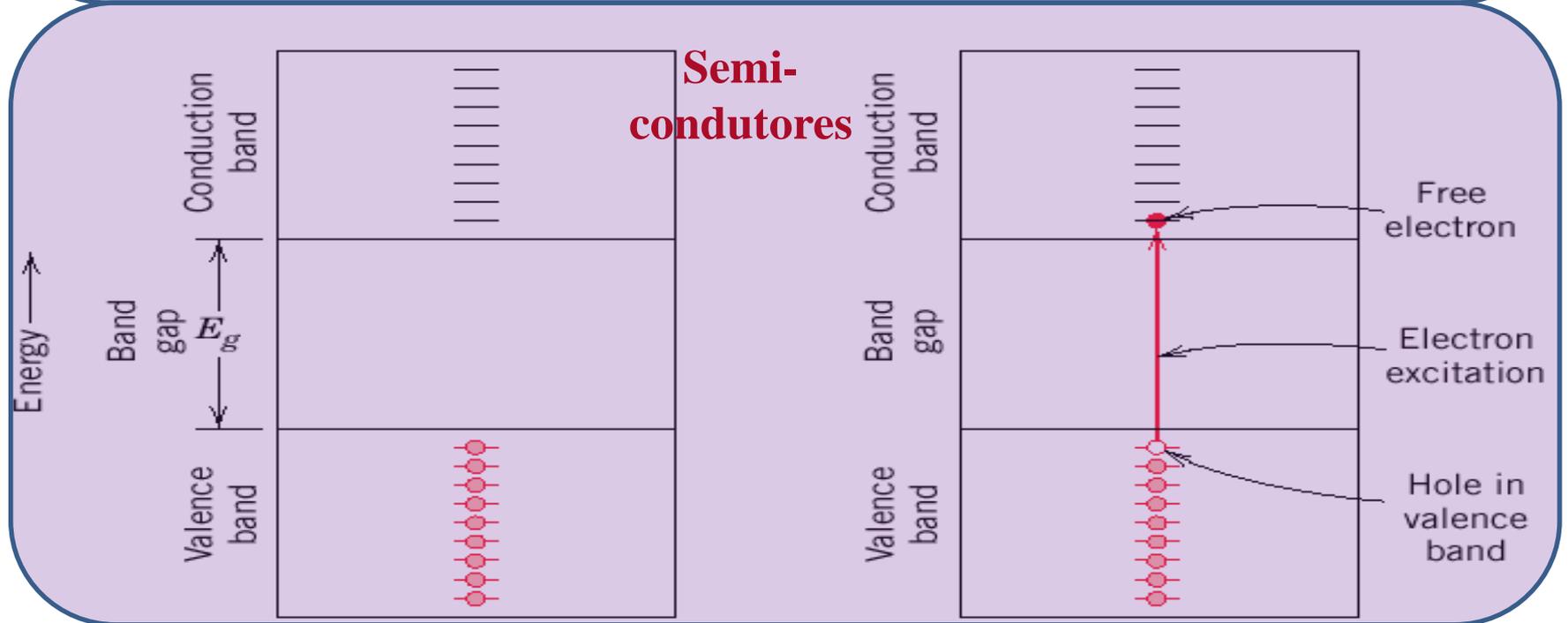
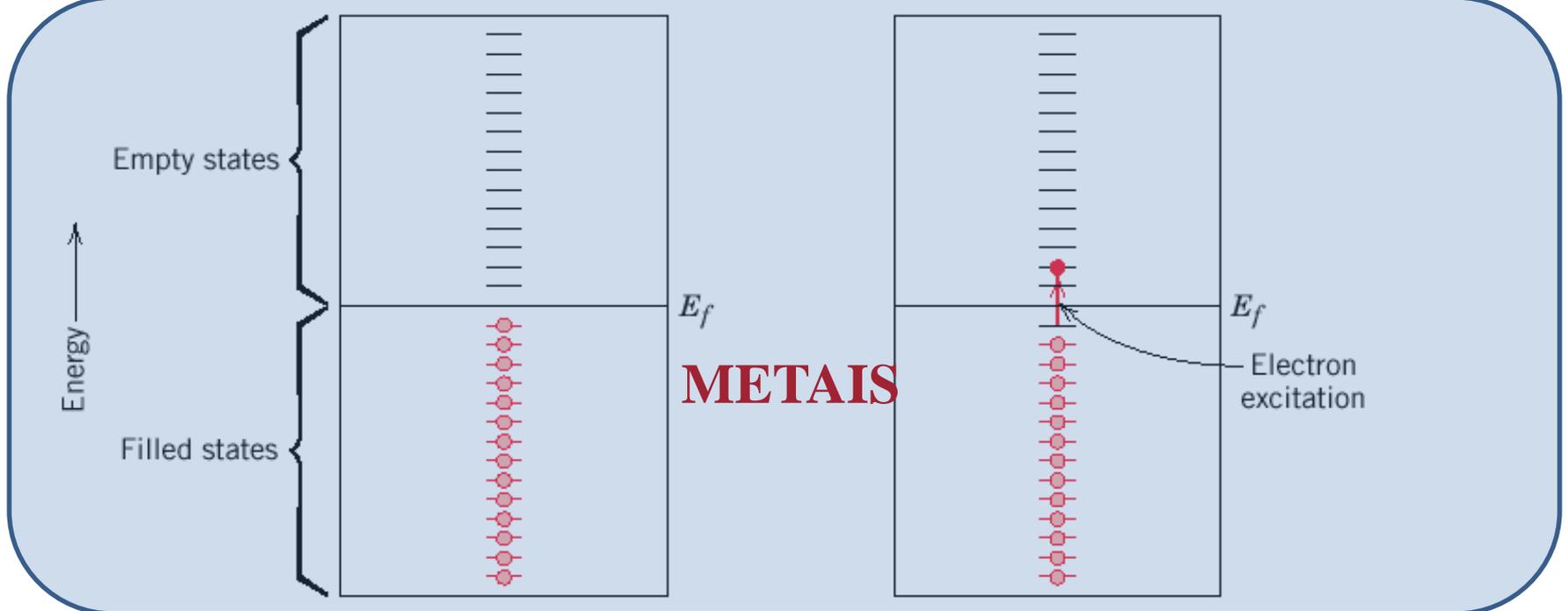
- A energia necessária para superar o **gap** de energia pode ser de natureza térmica ou luminosa.
- A probabilidade de que um elétron salte da banda de valência para a banda de condução é $(-E_g/2kT)$ onde **E_g** corresponde a energia do “gap”.
- Quando um elétron é promovido para a banda de condução,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

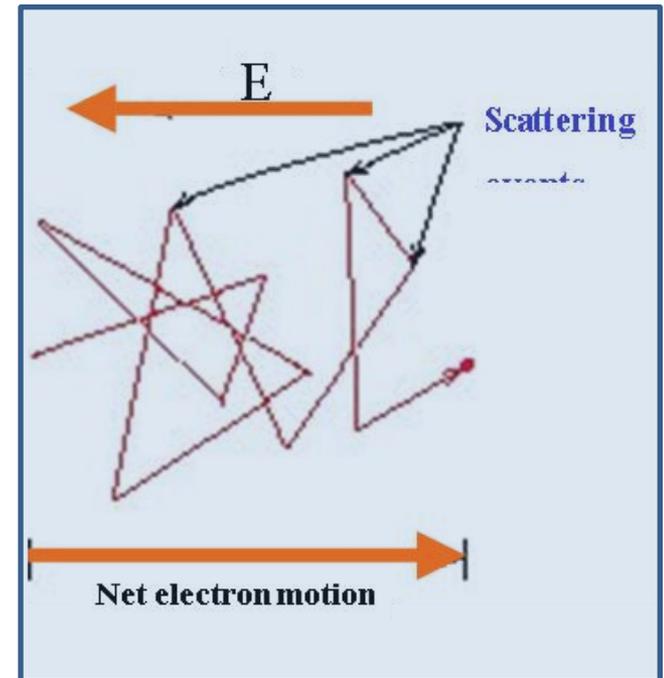


Mobilidade Eletrônica

- 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 μ_e - uma constante de proporcionalidade, onde:

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

Mobilidade Eletrônica

- A constante de proporcionalidade μ_e indica a frequência de eventos de espalhamentos em $[\text{m}^2 / \text{V.s}]$.
- 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.

(m) = Metal (s) = Semicon	Mobility (RT) μ (m²V⁻¹s⁻¹)	Carrier Density N_e (m⁻³)
Na (m)	0.0053	2.6 x 10²⁸
Ag (m)	0.0057	5.9 x 10²⁸
Al (m)	0.0013	1.8 x 10²⁹
Si (s)	0.15	1.5 x 10¹⁰
GaAs (s)	0.85	1.8 x 10⁶
InSb (s)	8.00	

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.

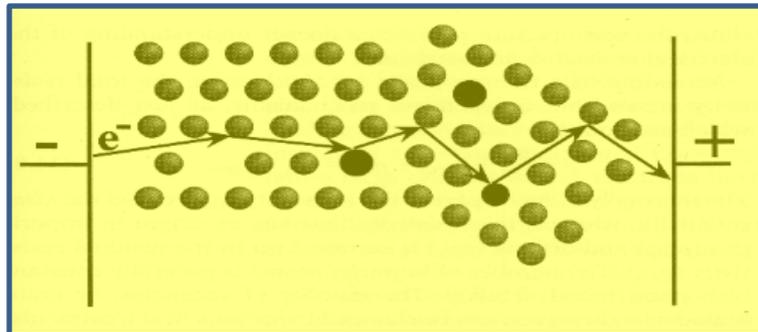
$$\rho_t = \rho_0 + \alpha T$$

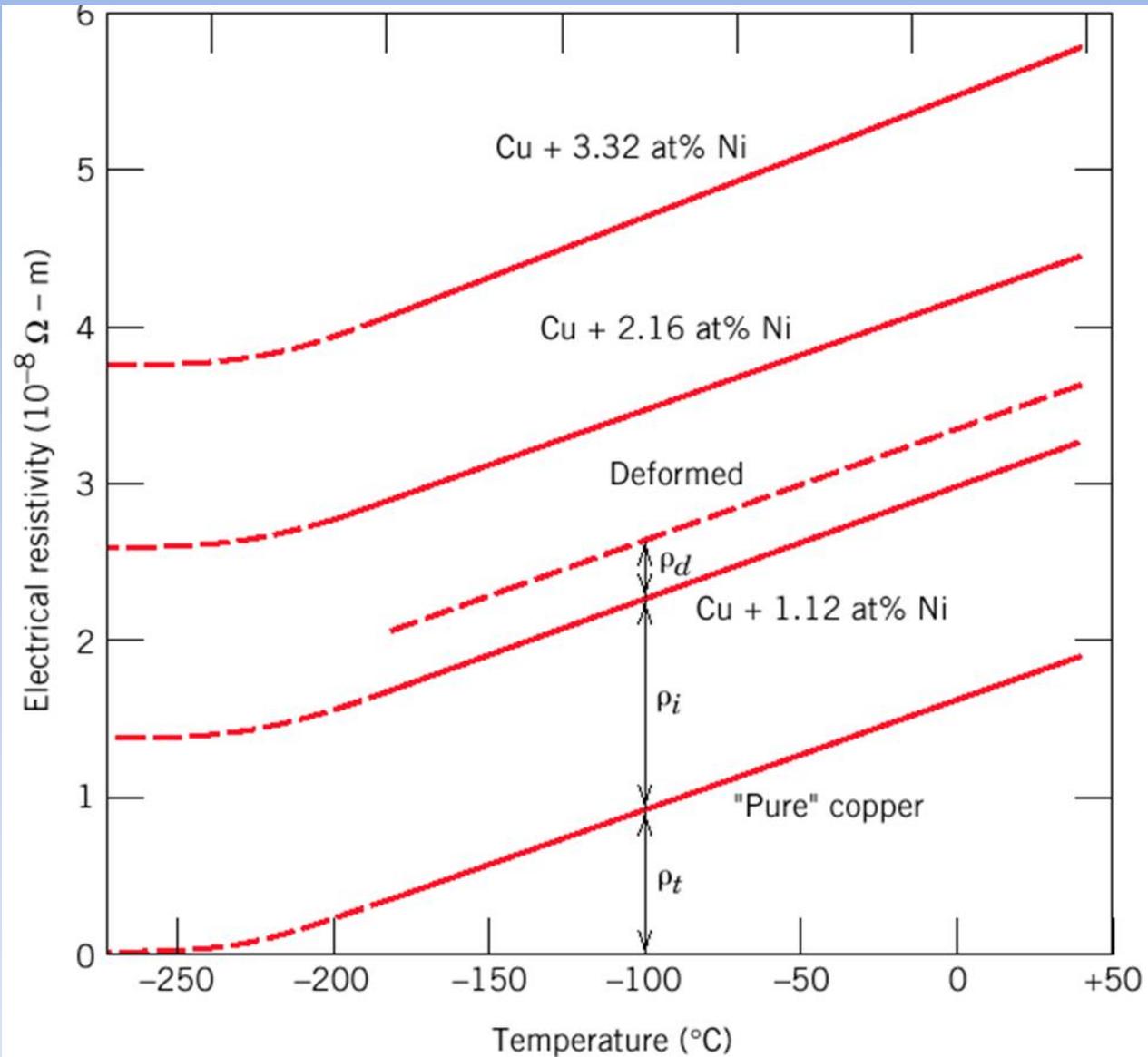
- A resistividade está relacionada a concentração de impurezas.

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

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

- 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	6.8×10^7
Copper	6.0×10^7
Gold	4.3×10^7
Aluminum	3.8×10^7
Iron	1.0×10^7
Brass (70 Cu–30 Zn)	1.6×10^7
Platinum	0.94×10^7
Plain carbon steel	0.6×10^7
Stainless steel	0.2×10^7

Materiais elétricos metálicos mais utilizados

➤ Prata

➤ **Cobre:** barato, abundante, alta ρ , porém macio

São empregadas ligas endurecidas por precipitação: ligas Cu-Be

➤ **Alumínio:** apresenta valores de condutividade 50% do valor da ρ 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

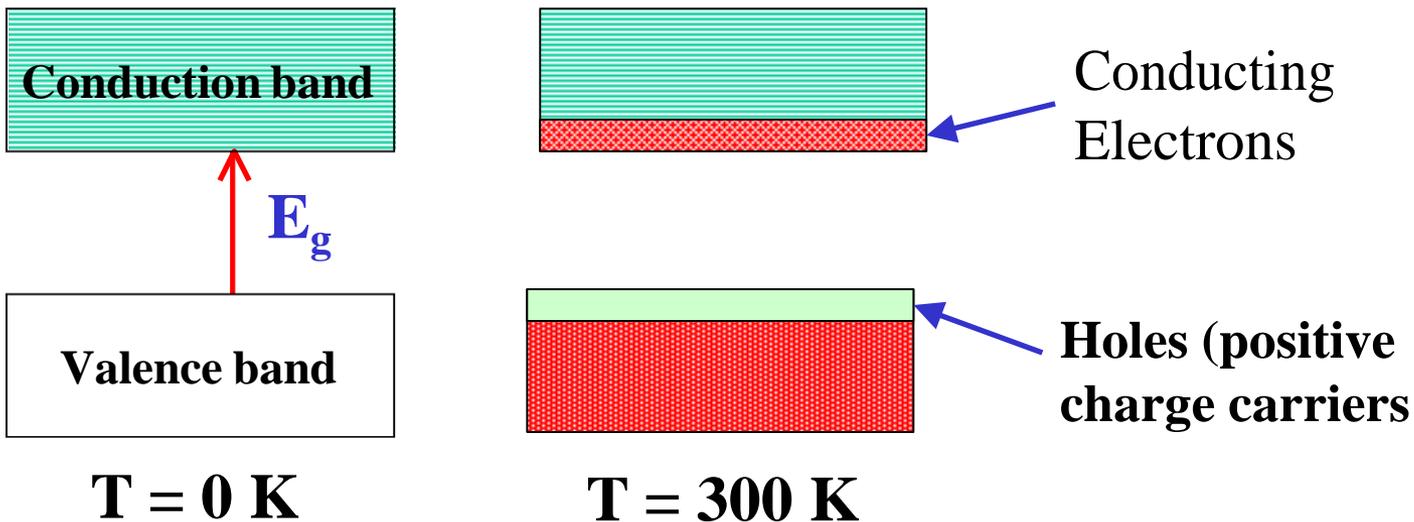
- Os materiais semicondutores são materiais que possuem resistividade intermediária entre a dos materiais condutores e isolantes. Os principais materiais semicondutores utilizados na eletrônica são o Germânio (Ge) e o Silício (Si), sendo este último o mais utilizado.
- Nos materiais semicondutores, a 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

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

$$n = p$$

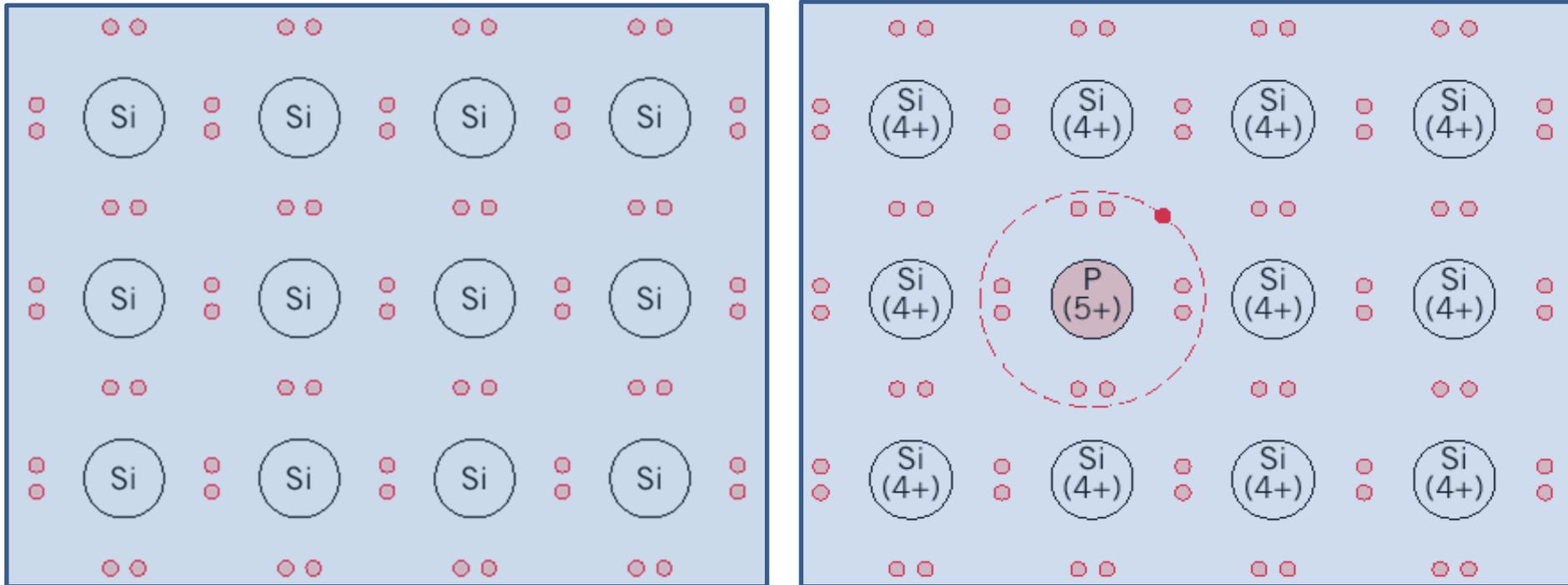
$$\rho = n|e|(\mu_e + \mu_h) = p|e|(\mu_e + \mu_h)$$

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

Semicondutores tipo n

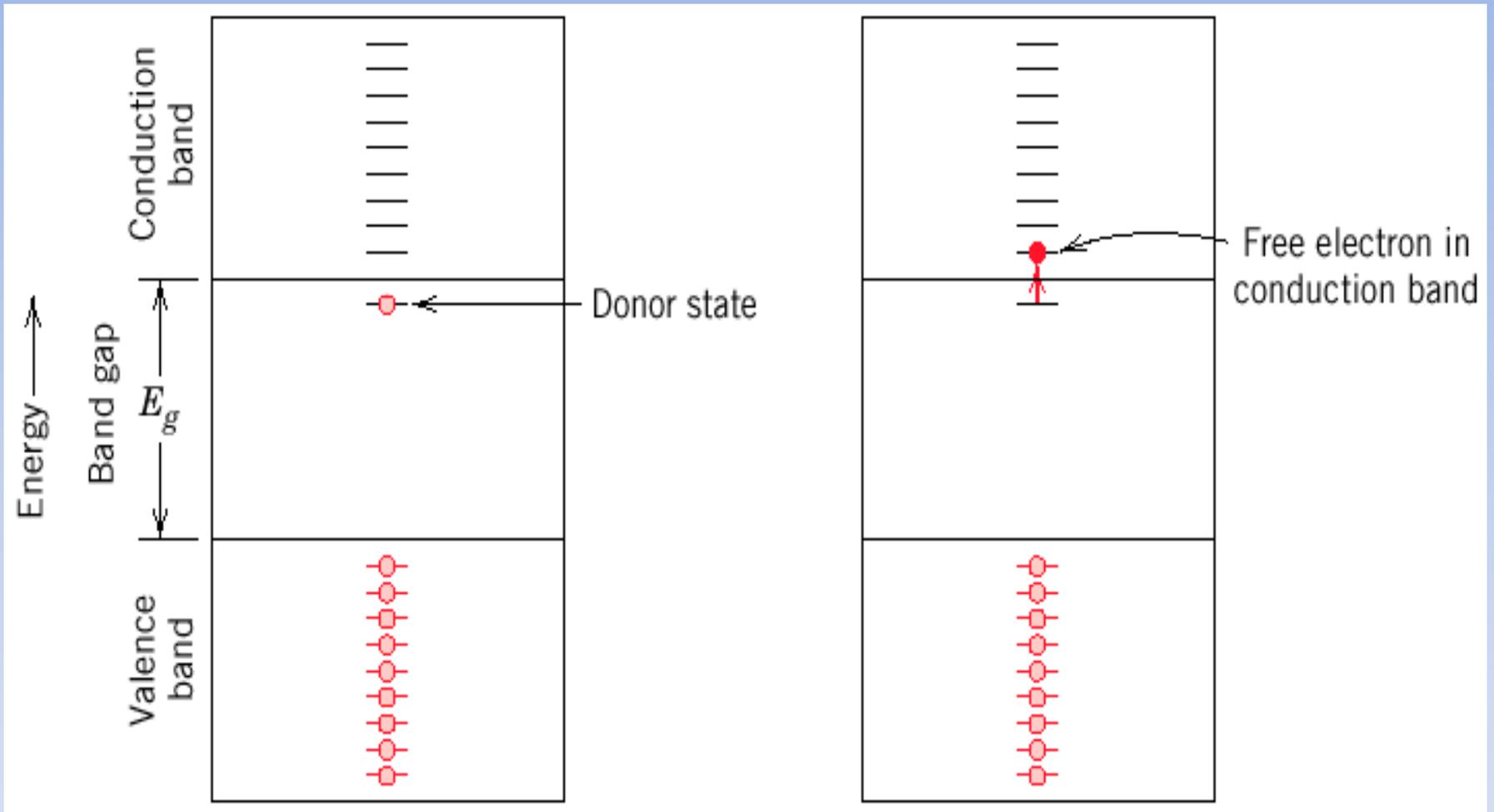
- Ao associarmos um elemento com cinco elétrons na última camada como o Antimônio, o Fósforo, ou Arsênio, ao material semicondutor, os mesmos irão formar ligações covalentes, porém haverá um elétron que poderá mover-se pela estrutura com maior facilidade, está formado o material com carga negativa.

Semicondutores tipo n



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

$$ND = N(\text{Fósforo}) \sim n$$

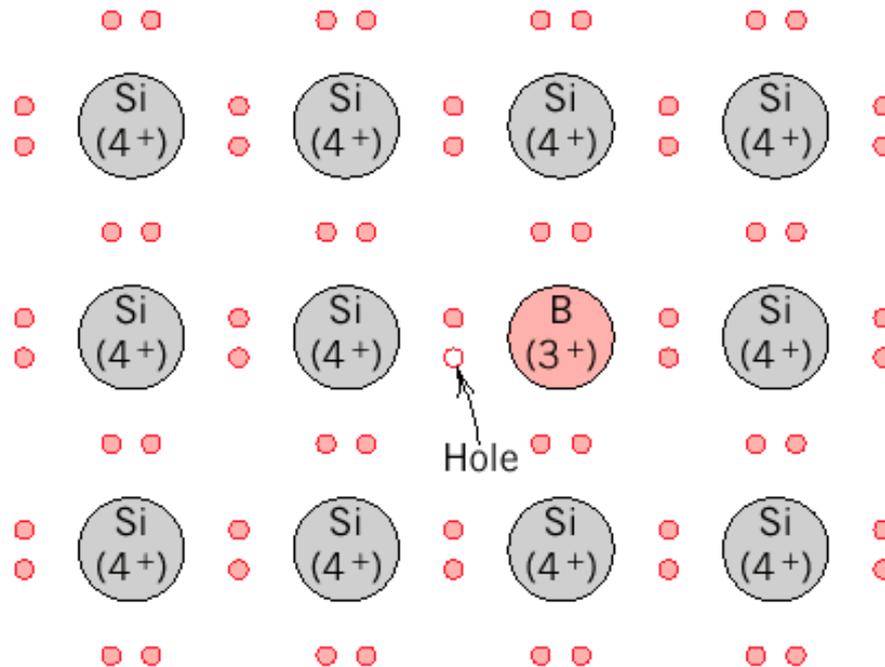


$$\sigma \sim n|e|\mu_e \sim N_D |e|\mu_e$$

Semicondutores tipo p

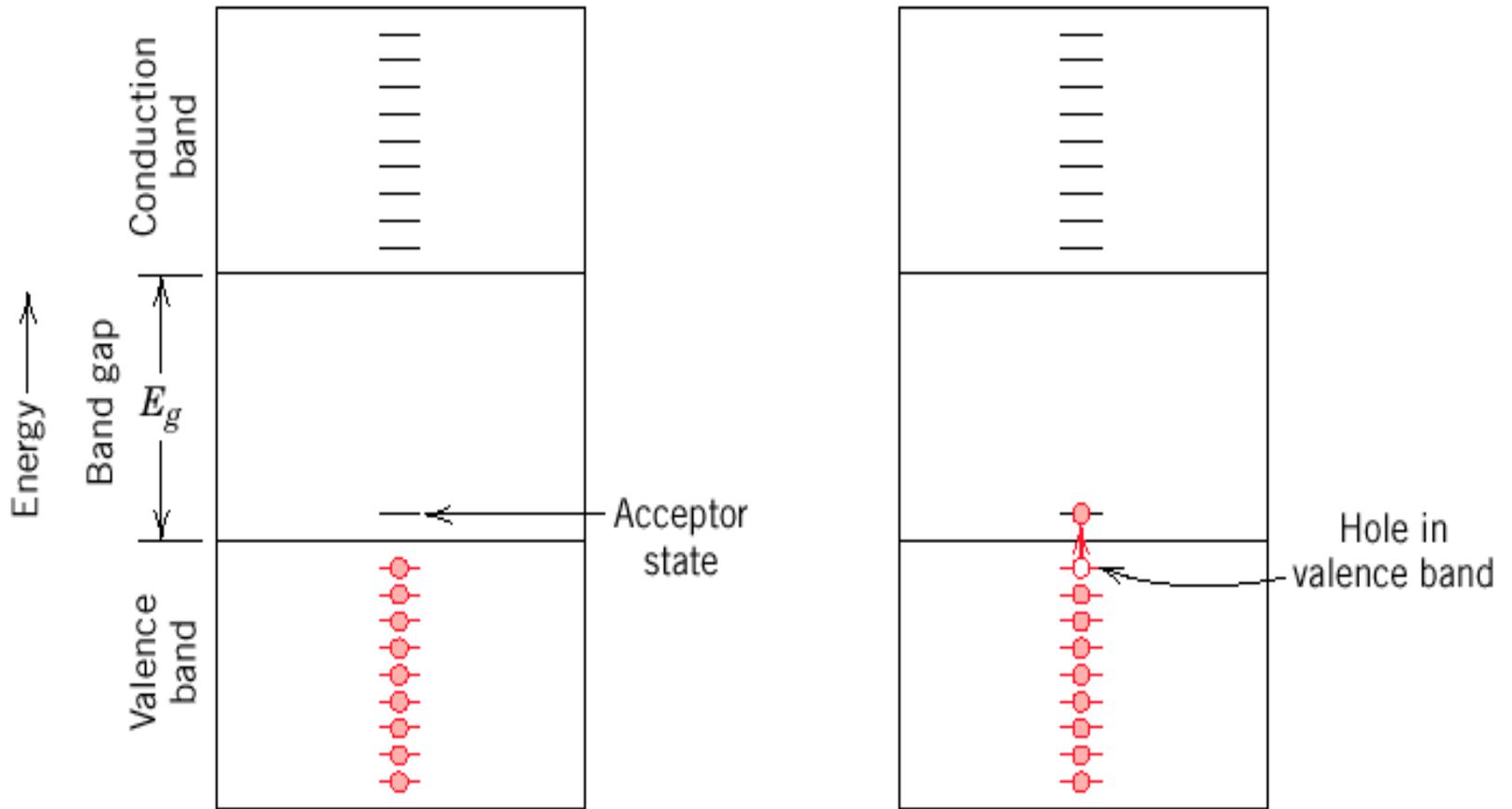
- Ao realizar a dopagem do material semicondutor (Silício ou Germânio) através da introdução de impurezas com três elétrons na camada de valência como o Alumínio, o Índio, o Boro ou o Gálio, temos a formação de ligação covalente entre o material semicondutor e a impureza. Ao introduzirmos um elemento 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.

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

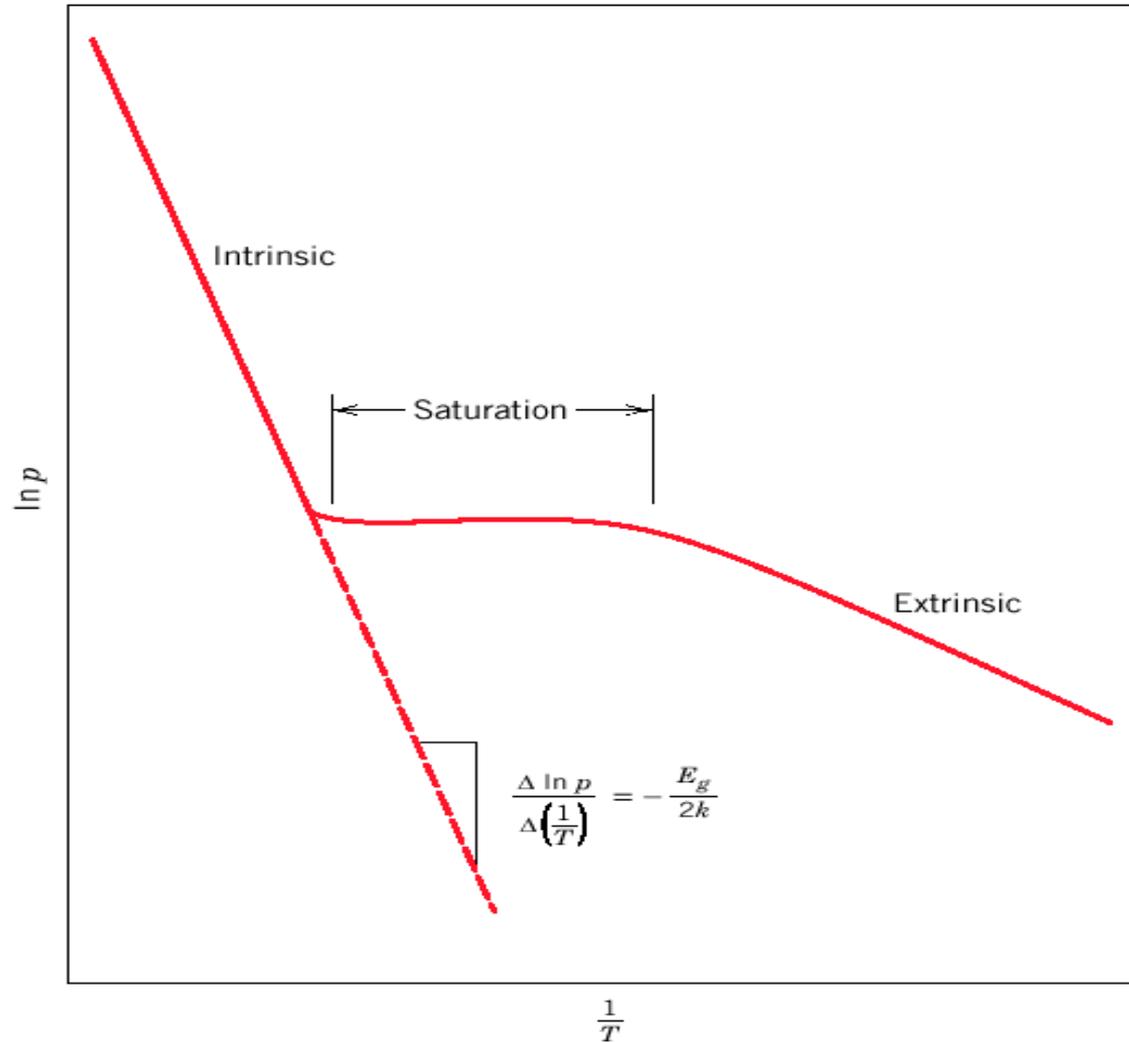


$$\sigma \sim p|e|\mu_p \sim N_A |e|\mu_p$$

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

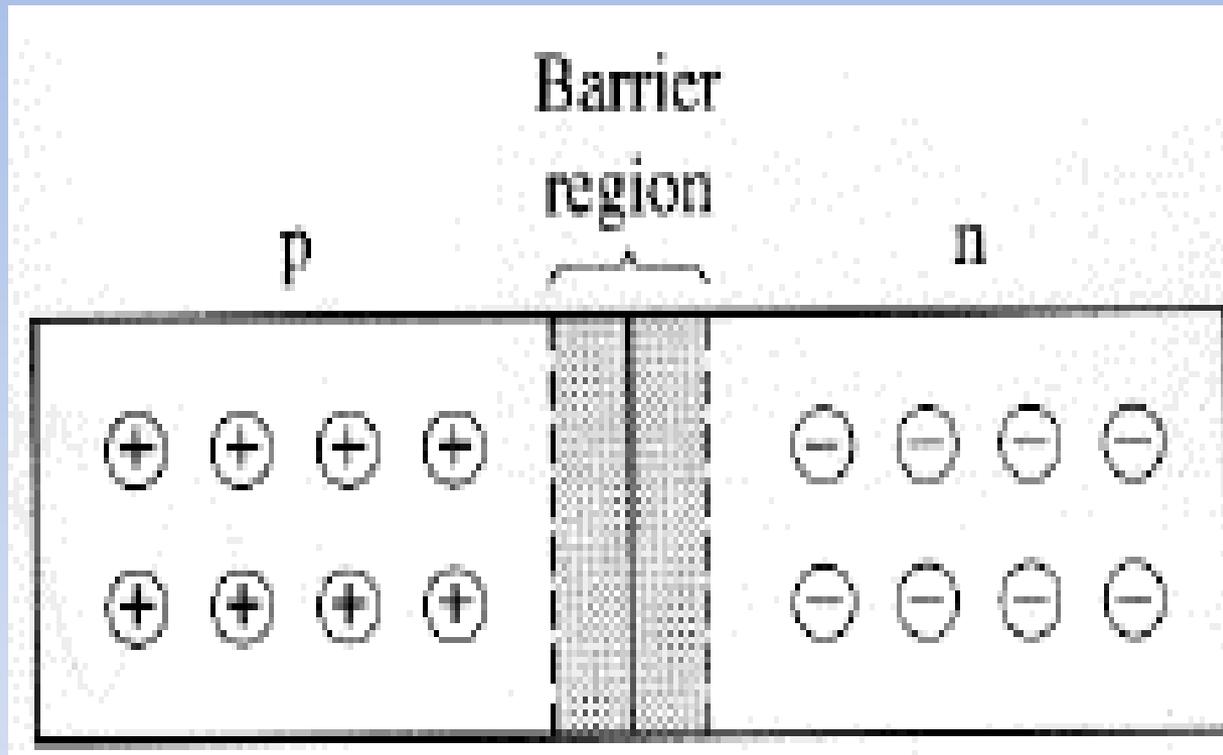
- Diodos
- Transistores
- Capacitores

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

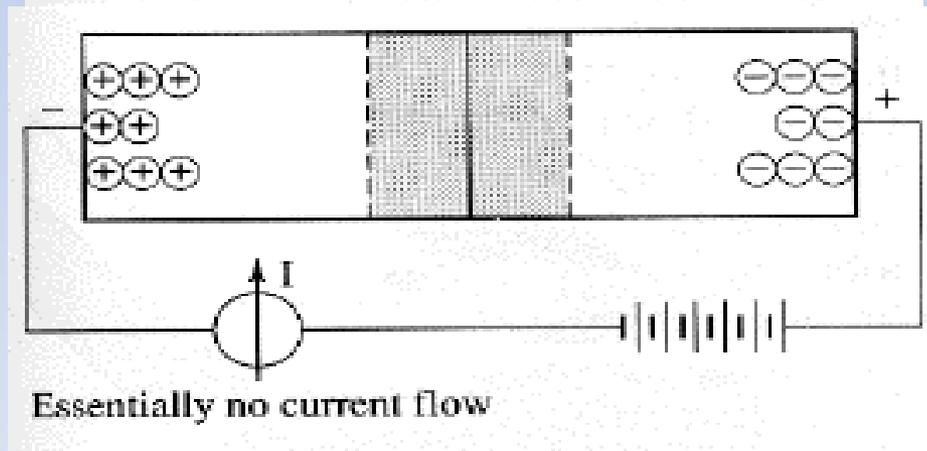
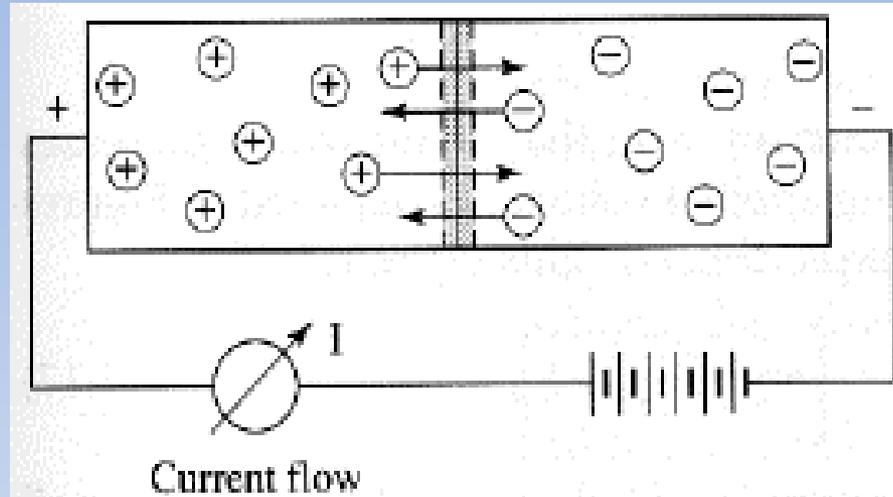
Diodos

- 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.

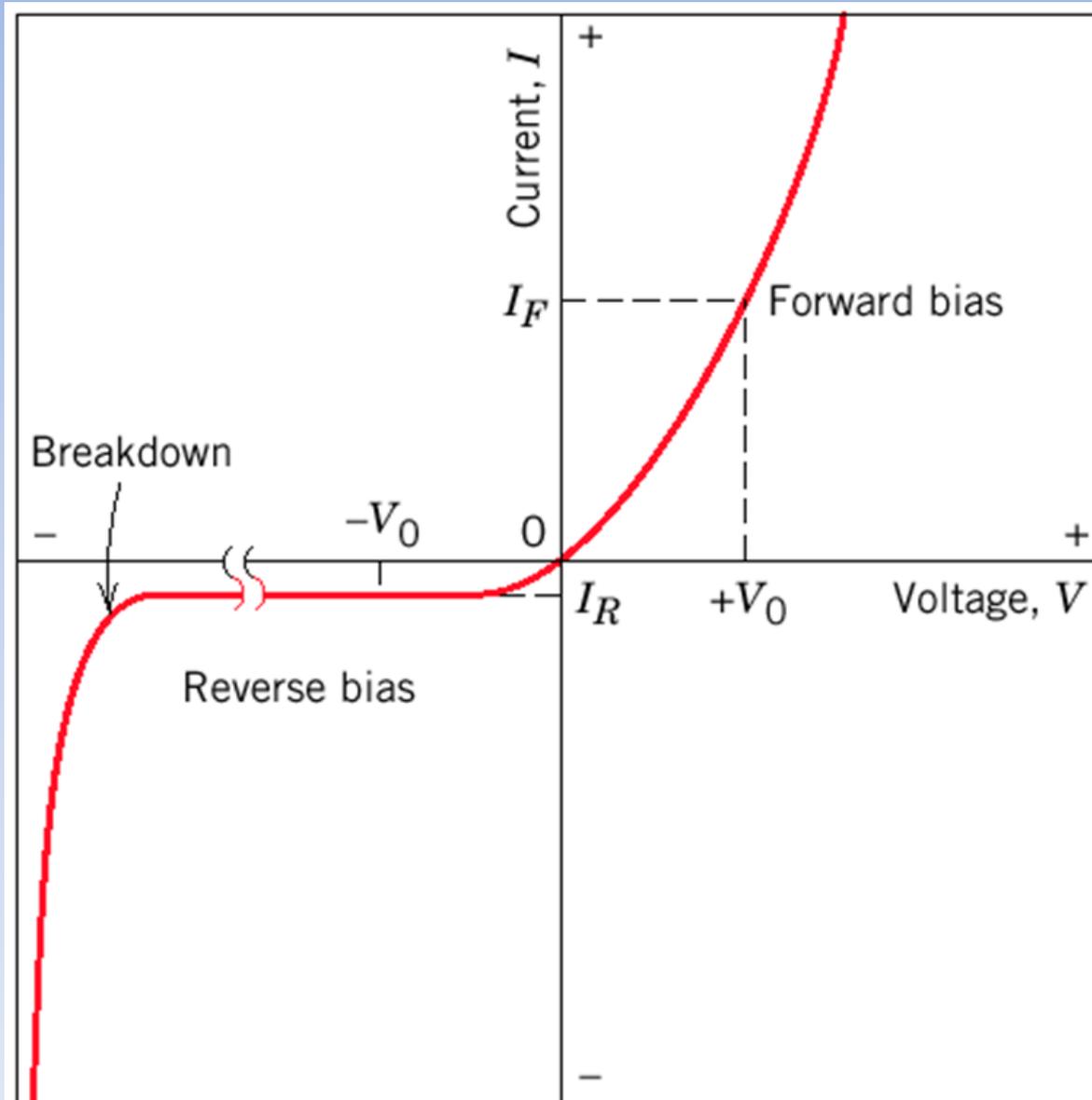
Diodos



Diodos

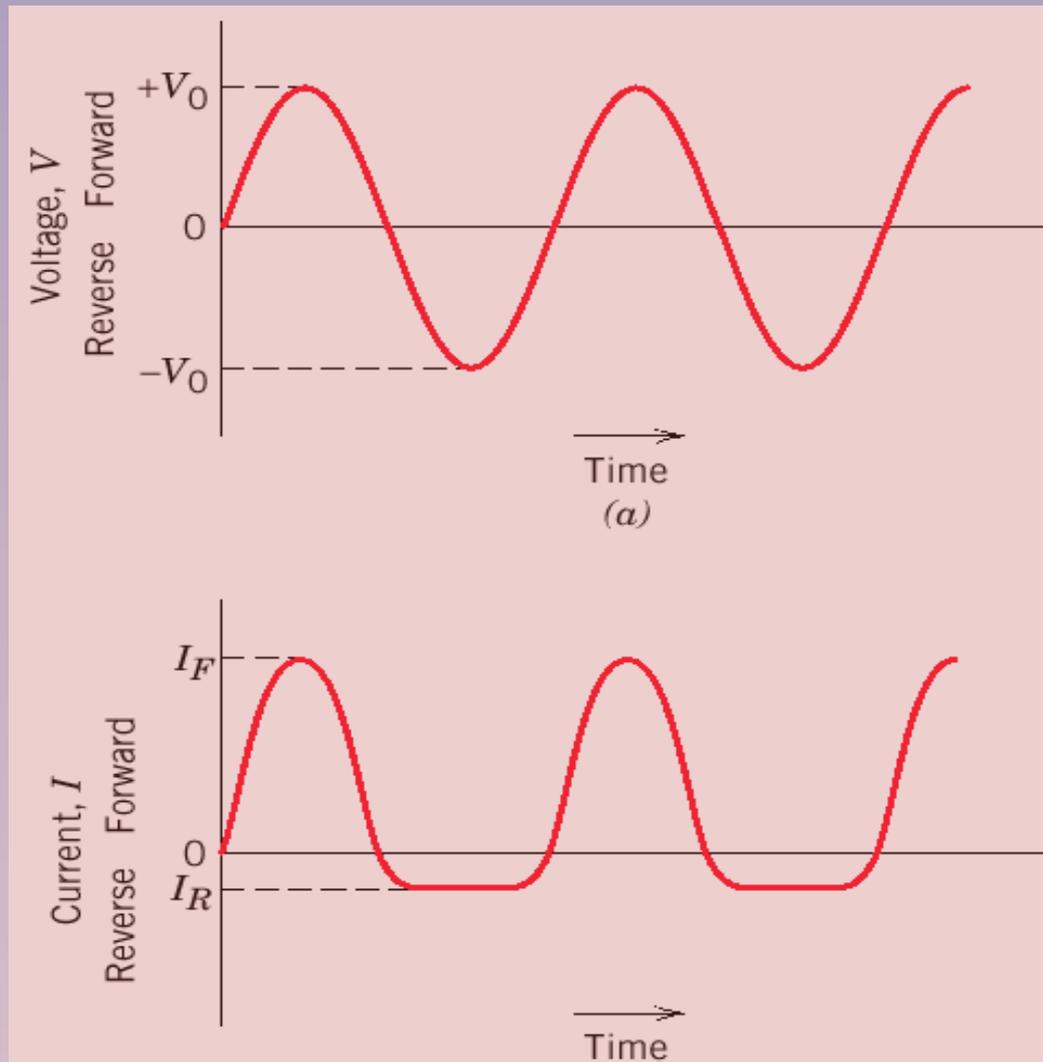


Diodos

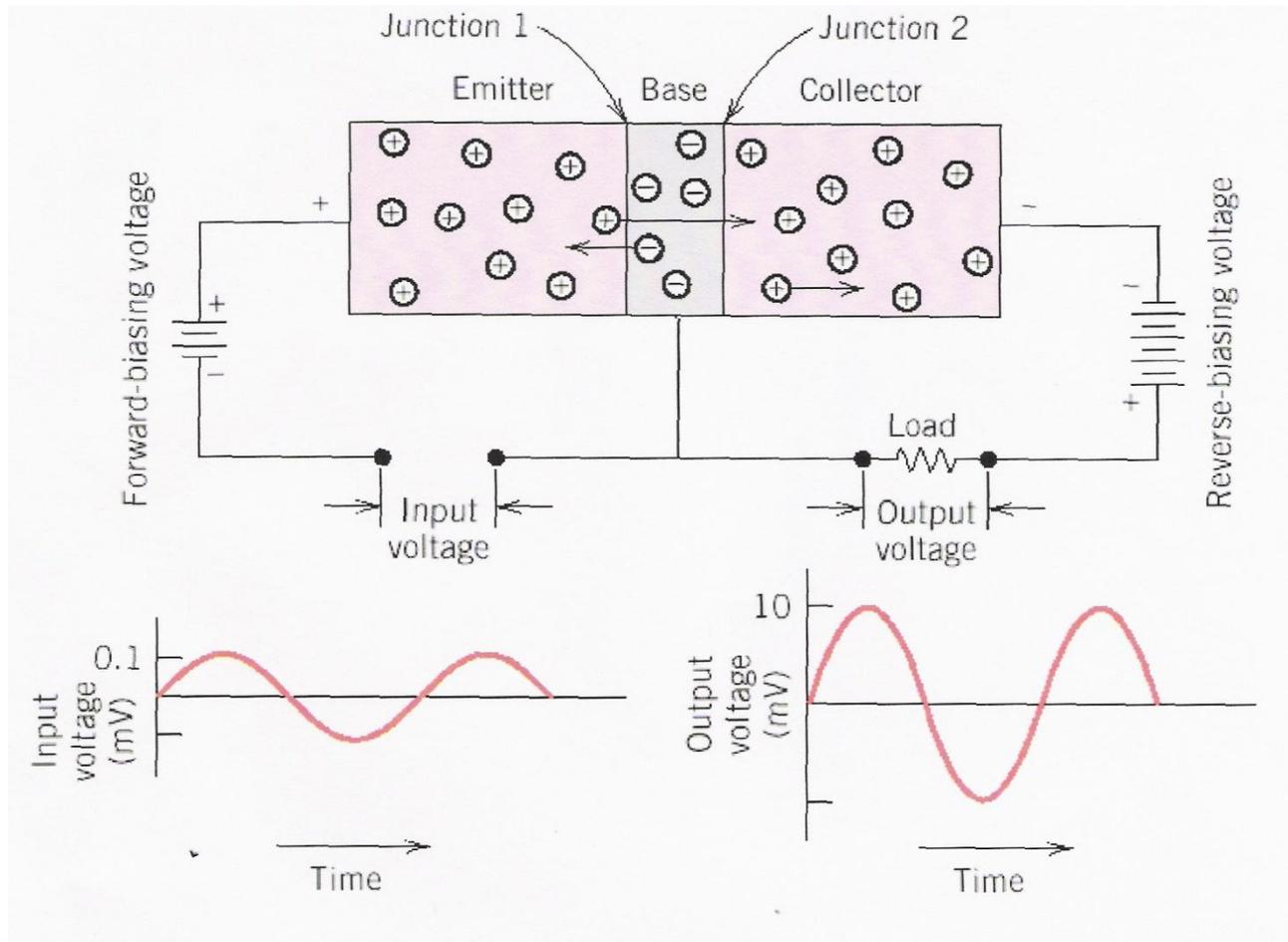


Diodos

Retificação

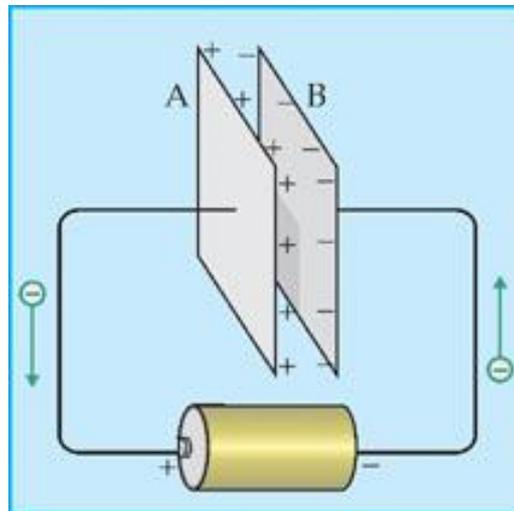


Transistores



Capacitores

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

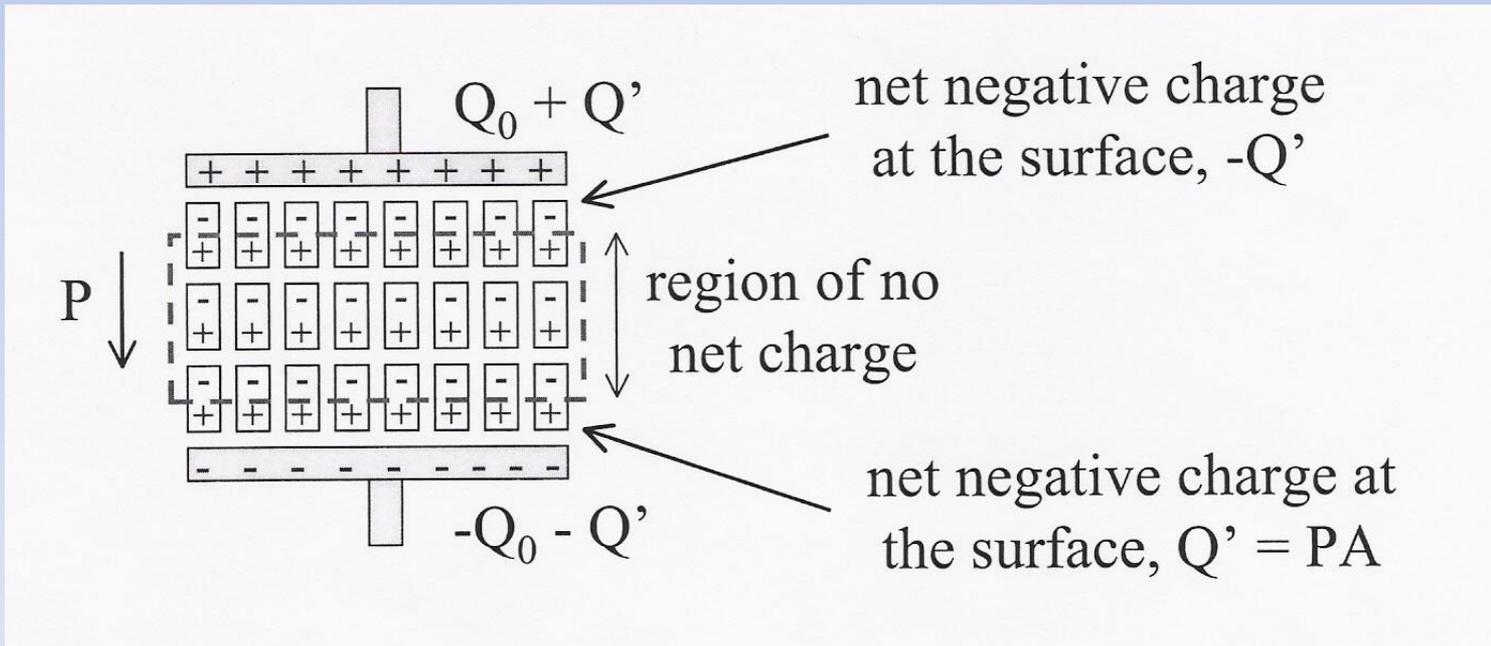
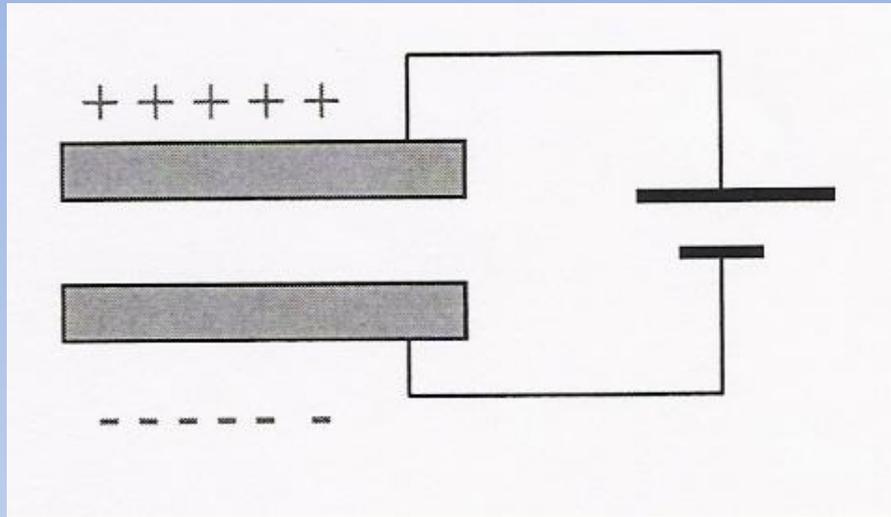


Capacitores

- 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.

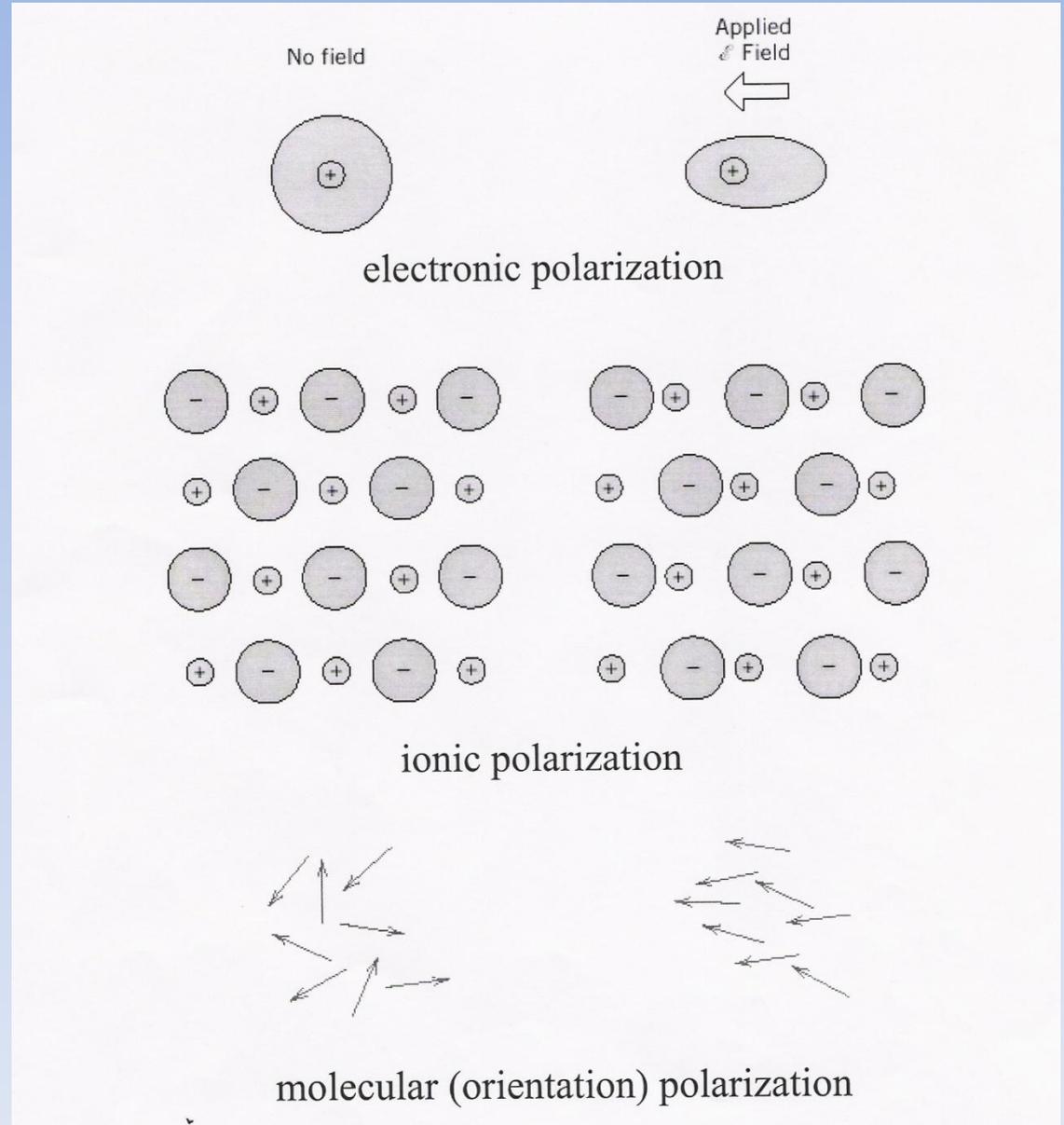
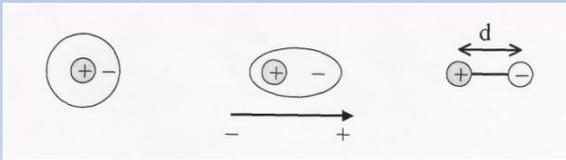
Capacitores

- 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



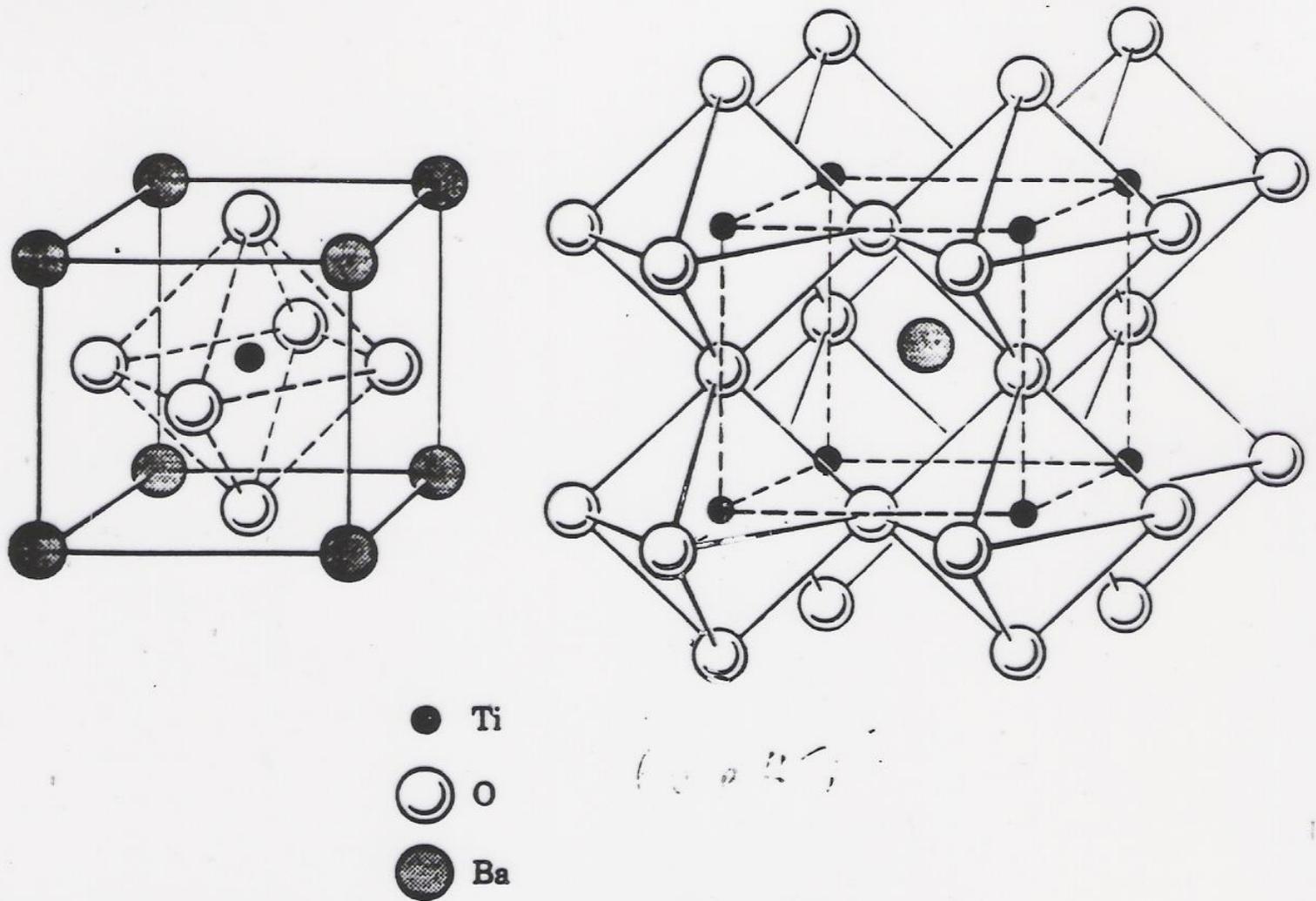


Fig. 1.27 Ion positions in ideal cubic perovskite structure.

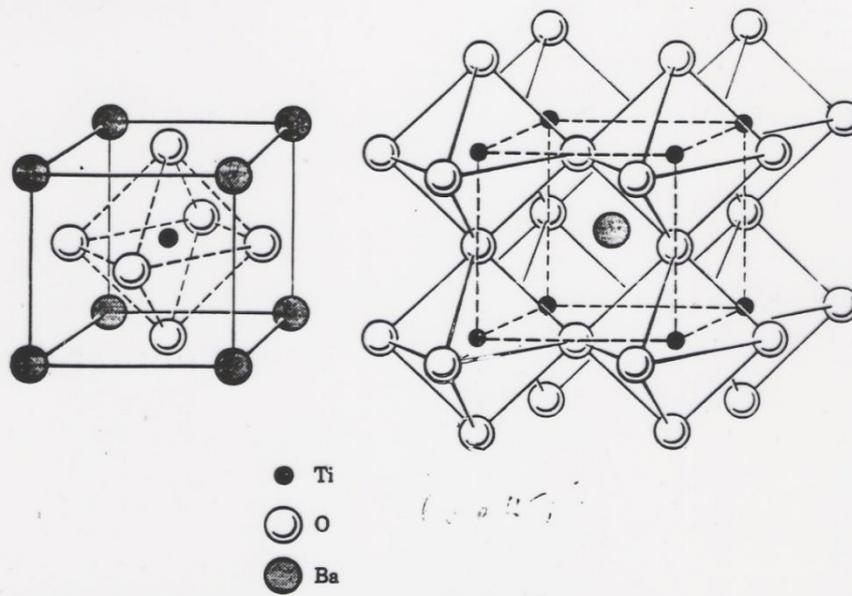


Fig. 1.27 Ion positions in ideal cubic perovskite structure.

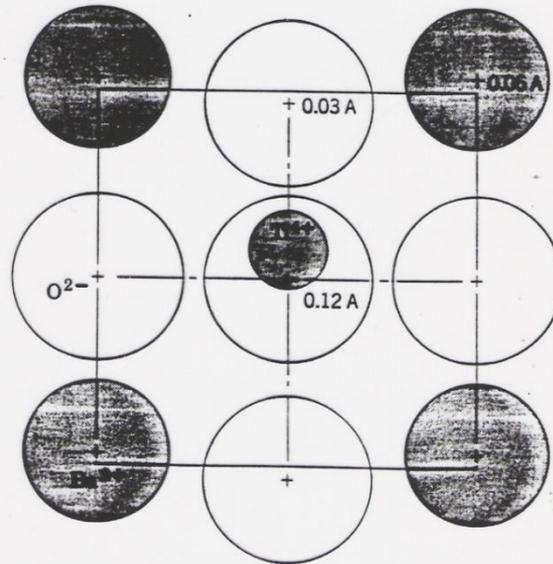


Fig. 1.28 Ion positions in tetragonal BaTiO₃. [From G. Shirane, F. Jona, and R. Pepinsky, *Proc. I.R.E.*, 42, 1738 (1955).]