



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS

PMT 2100 - Introdução à Ciência dos
Materiais para Engenharia
2º semestre de 2005

ROTEIRO DA AULA

- Resistência elétrica e a lei de Ohm
- Resistividade e condutividade elétrica
- Lei de Ohm
- Condutividade elétrica
- Bandas de energia nos sólidos
- Condutividade elétrica dos metais
- Condutividade elétrica dos semicondutores intrínsecos
- Condutividade elétrica dos semicondutores extrínsecos tipo n
- Condutividade elétrica dos semicondutores extrínsecos tipo p

RESISTÊNCIA ELÉTRICA

- O comportamento dos materiais, em resposta à aplicação de um **CAMPO ELÉTRICO** externo, define as **PROPRIEDADES ELÉTRICAS** dos materiais.
- As propriedades elétricas dependem de diversas características dos materiais, dentre as quais mencionamos a configuração eletrônica, o tipo de ligação química e os tipos de estrutura e microestrutura.
- A **CORRENTE ELÉTRICA** é o movimento de portadores de carga que ocorre dentro dos materiais, em resposta à ação de um campo elétrico externo. São portadores de carga: elétrons, buracos eletrônicos, cátions e ânions.
- Em 1827 Georg Simon Ohm, baseado em evidências experimentais e utilizando o conceito **RESISTÊNCIA ELÉTRICA (R)** de um corpo, formulou uma lei que relaciona a **VOLTAGEM (U)** aplicada sobre o corpo com a **CORRENTE ELÉTRICA (I)** que o atravessa.

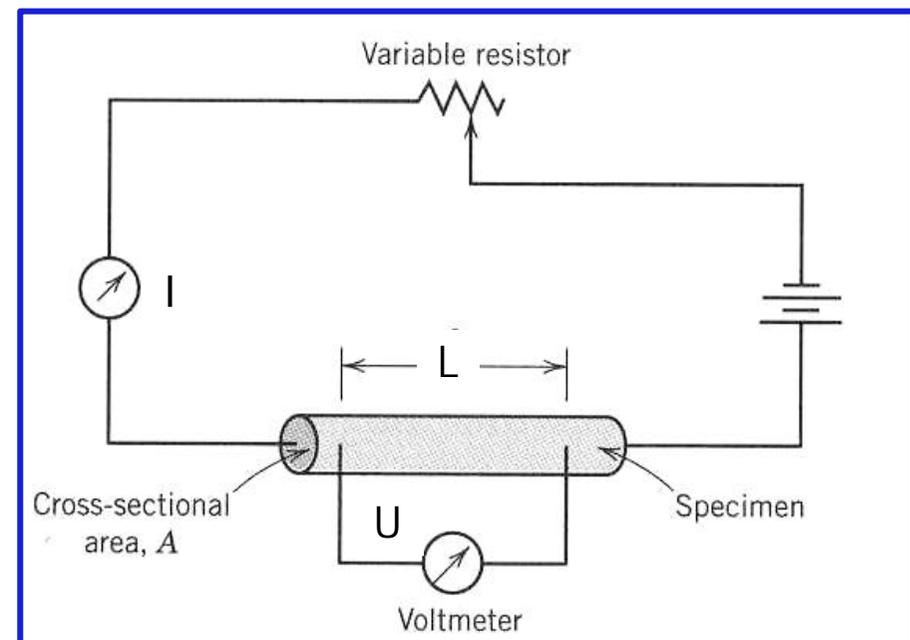
$$U = R I$$

LEI DE OHM

Unidades SI: U ... Volts (V) = J / C

I ... Ampères (A) = C / s

R ... Ohms (Ω) = V / A



Representação esquemática de um arranjo experimental que permite medir a resistência elétrica de um corpo.

RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- Para um corpo cilíndrico de comprimento L e seção transversal de área A (veja a figura da transparência nº 3), define-se a **RESISTIVIDADE ELÉTRICA** (ρ) do material do qual o corpo é constituído por

$$\rho = R (A / L)$$

Unidade SI: ρ ... Ohms-metro ($\Omega \cdot m$) = $V \cdot m / A$

- ✓ Note que a *resistência* é uma **PROPRIEDADE DO CORPO** enquanto a *resistividade* é uma **PROPRIEDADE DO MATERIAL** do qual o corpo é constituído.
- A **CONDUTIVIDADE ELÉTRICA** (σ) de um material é uma medida da facilidade com que ele é capaz de conduzir uma corrente elétrica. Define-se a condutividade elétrica como sendo o inverso da resistividade,

$$\sigma = 1 / \rho$$

Unidade SI: σ ... (Ohms-metro)⁻¹ ($\Omega \cdot m$)⁻¹ = $A / V \cdot m$

- ✓ Cuidado com a notação! Observe que, de acordo com a notação do livro texto, estamos utilizando a letra “A” para denotar tanto a área da seção transversal do corpo cilíndrico como a unidade de corrente o Ampere.

LEI DE OHM

- Utilizando o conceito de **CONDUTIVIDADE (σ)**, a **LEI DE OHM** determina que a **DENSIDADE DE CORRENTE (J)** num dado material é diretamente proporcional ao **CAMPO ELÉTRICO (E)** aplicado sobre o mesmo.

$$J = \sigma E$$

Unidades SI: $E = U / L \dots$ Volts-metros⁻¹ (V/m) = J / m.C

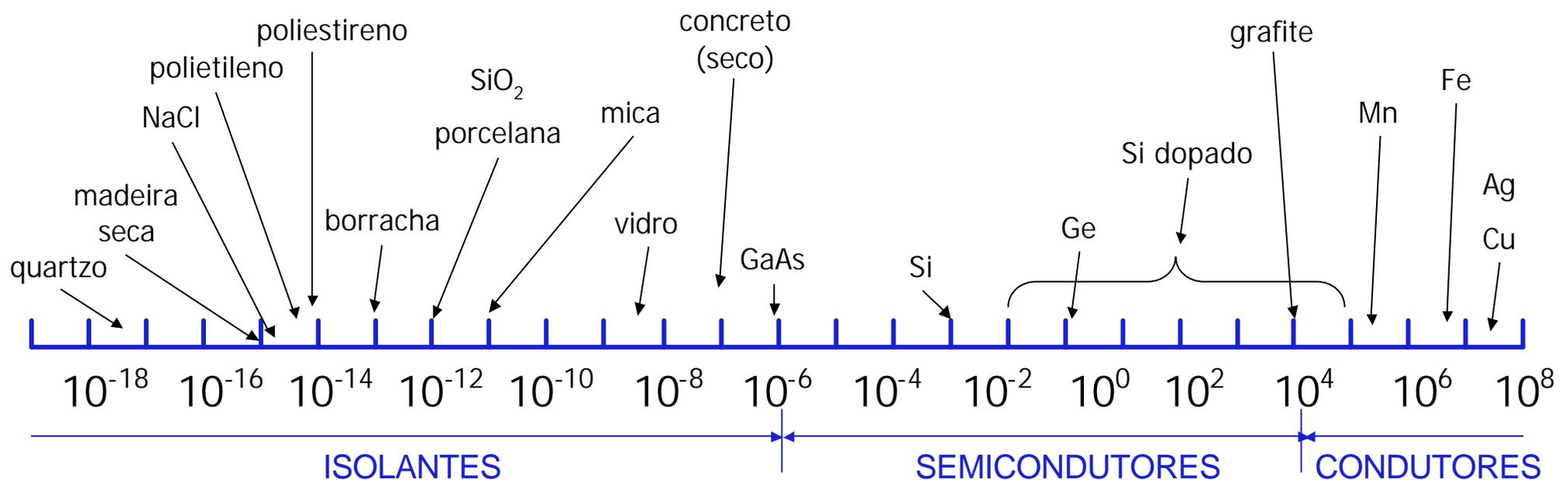
$J = I / A \dots$ Ampères -metros⁻² (A/m²) = C / m².s

- ✓ Observação: O caráter vetorial das diversas grandezas aqui consideradas será omitido em nosso tratamento matemático, ou seja, trataremos apenas de casos de materiais isotrópicos sujeitos a campos elétricos constantes.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- Os materiais sólidos podem ser classificados, de acordo com a magnitude de sua condutividade elétrica, em três grupos principais: **CONDUTORES**, **SEMICONDUCTORES** e **ISOLANTES**.

Condutividade s em $(W.m)^{-1}$ de uma variedade de materiais à temperatura ambiente.



CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

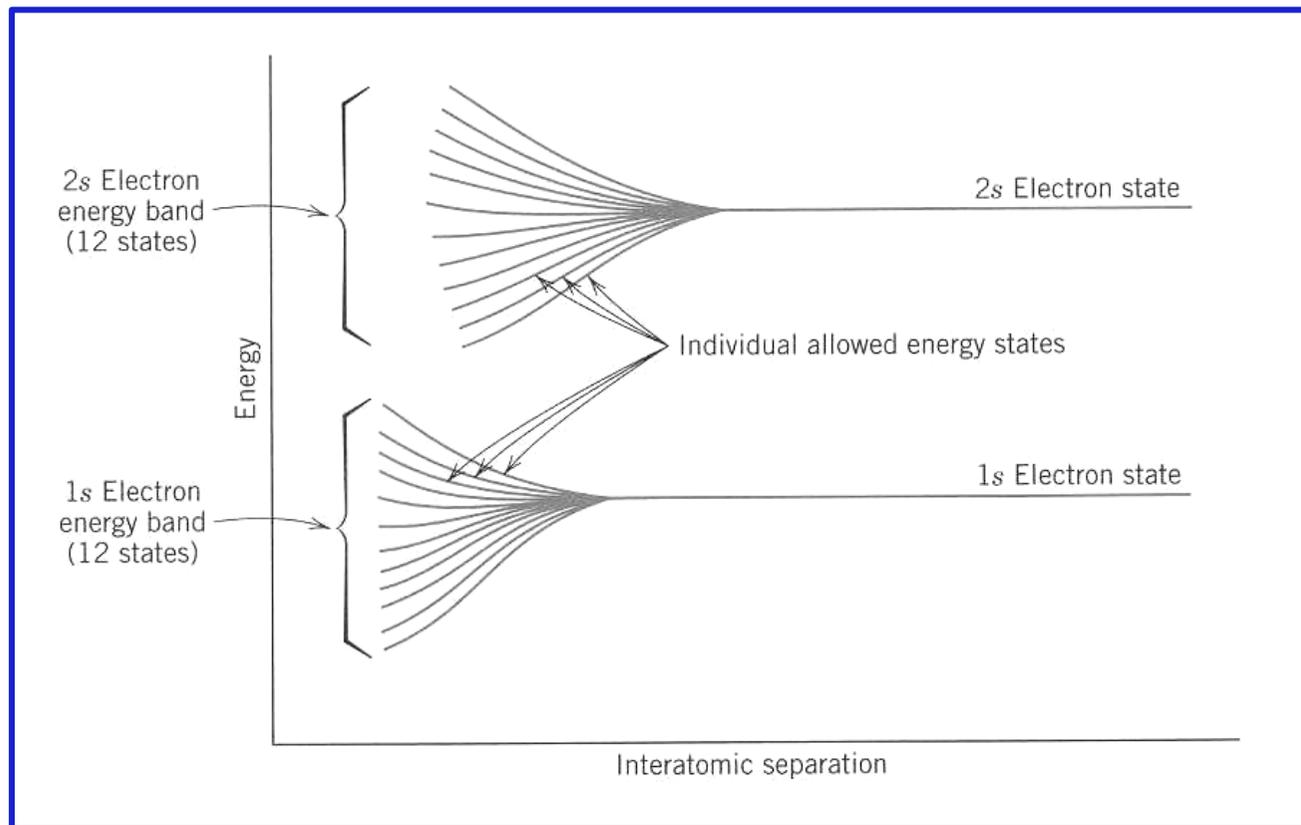
- O **MODELO DOS ELÉTRONS LIVRES** dos metais supõe que o material é composto por um gás de elétrons que se movem num retículo cristalino formado por íons pesados. Esse modelo prevê corretamente a forma funcional da lei de Ohm. No entanto, ele prevê incorretamente os valores observados experimentalmente para a condutividade elétrica. Por exemplo, para o cobre temos:
 $\sigma_{\text{calculado}} = 5,3 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ e $\sigma_{\text{experimental}} = 59 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.
- Para uma compreensão aprofundada das propriedades elétricas dos materiais necessitamos considerar o caráter ondulatório dos elétrons e fazer uso de conceitos da mecânica quântica, mas isto está além do escopo desta disciplina.
- Na aula de hoje, explicaremos a condutividade elétrica dos materiais utilizando, de forma simplificada, alguns conceitos provindos da mecânica quântica. Em particular, consideraremos o **MODELO DE BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS**.

BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

- Considere um conjunto de N átomos. A distâncias de separação relativamente grandes, cada átomo é independente de todos os demais, e tem os níveis de energia atômica e a configuração eletrônica que teria se estivesse isolado. Contudo, à medida que esses átomos chegam próximos uns aos outros, os elétrons sentem a ação dos elétrons e núcleos dos átomos adjacentes ou são perturbados por eles. Essa influência é tal que cada estado atômico distinto pode se dividir em uma série de estados eletrônicos proximamente espaçados no sólido, para formar o que é conhecido por **BANDA DE ENERGIA ELETRÔNICA**.
- A extensão da divisão depende da separação interatômica e começa com as camadas eletrônicas mais externas, uma vez que elas são as primeiras a serem perturbadas quando os átomos coalescem.
- Dentro de cada banda, os estados de energia são discretos, embora a diferença entre os estados adjacentes seja excessivamente pequena.

BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

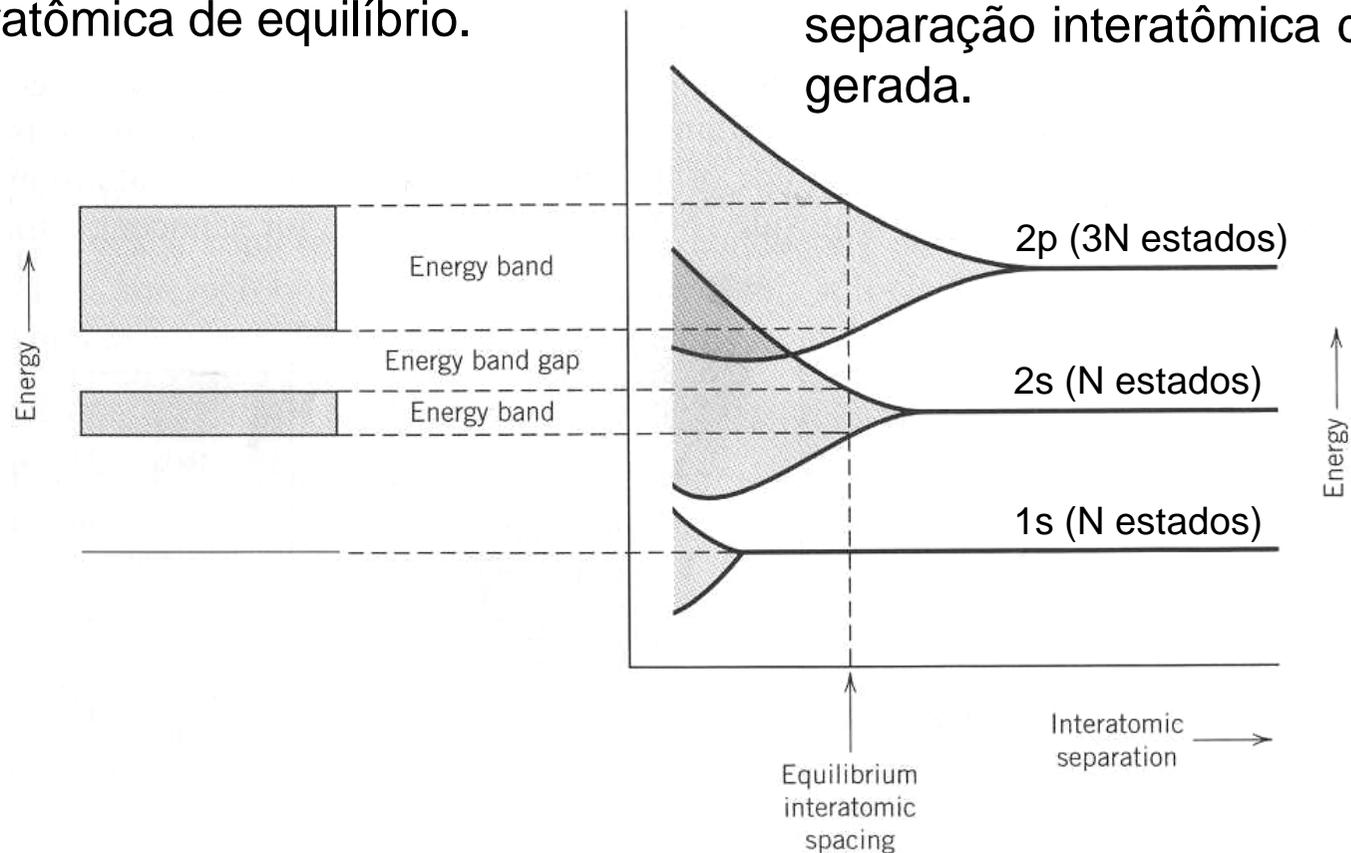
- Gráfico esquemático da energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de 12 átomos ($N = 12$). Com a aproximação cada um dos estados atômicos $1s$ e $2s$ se divide para formar uma banda de energia eletrônica que consiste em 12 estados. Cada estado de energia é capaz de acomodar dois elétrons que devem possuir spins com sentidos opostos.



BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

- Bandas de energia eletrônica para um material sólido formado por N átomos.
 - ✓ Representação convencional da estrutura da banda de energia eletrônica para um material sólido na separação interatômica de equilíbrio.

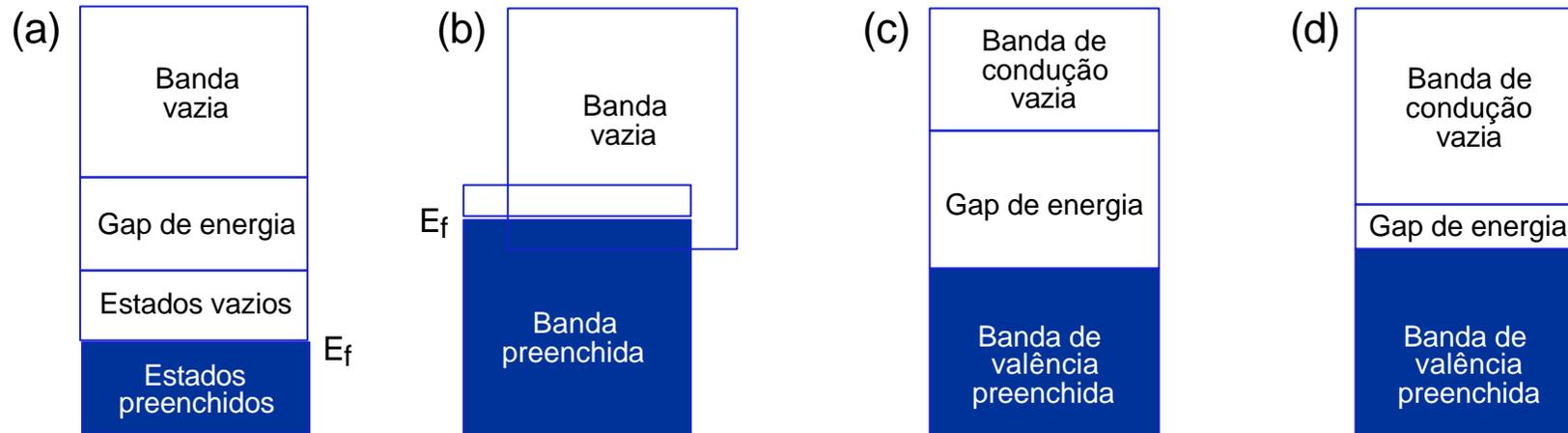
- ✓ Energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de N átomos, ilustrando como a estrutura da banda de energia na separação interatômica de equilíbrio é gerada.



ESTRUTURAS DE BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

11

Estruturas de bandas de energia possíveis para sólidos a 0 K.



- (a) Bandas de energia de **METAIS** tais como o cobre ($Z = 29, \dots 3d^{10} 4s^1$) nos quais se encontram disponíveis, na mesma banda de energia, estados eletrônicos não preenchidos acima e adjacentes a estados eletrônicos preenchidos.
- (b) Bandas de energia de **METAIS** tais como o magnésio ($Z = 12, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$) nos quais ocorre a superposição das bandas de energia mais externas, a preenchida e a não-preenchida.
- (c) Bandas de energia típicas de **ISOLANTES**: a BANDA DE VALÊNCIA (banda de energia preenchida) é separada da BANDA DE CONDUÇÃO (banda de energia não-preenchida) por um **GAP DE ENERGIA** (banda de energia proibida, ou seja, barreira de energia) de largura relativamente grande (>2 eV).
- (d) Bandas de energia de **SEMICONDUCTORES**: a estrutura de bandas de energia é semelhante à dos isolantes, mas com gaps de energia de larguras menores (<2 eV).

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- A **ENERGIA DE FERMI**, E_f , é uma consequência do caráter estatístico do comportamento dos elétrons e do Princípio de Exclusão de Pauli. Para metais a $T = 0K$, E_f é definida como a energia máxima dos estados eletrônicos ocupados. Para semicondutores e isolantes E_f tem um valor situado na faixa de energias do poço de potencial.
- Nos metais, somente elétrons com energia maior que E_f podem ser acelerados na presença de um campo elétrico. Esses elétrons são os que participam do processo de condução e são chamados de **ELÉTRONS LIVRES**.
- Em semicondutores e isolantes, os **BURACOS ELETRÔNICOS** têm energia menor que E_f e também participam do processo de condução.
- O processo de condução se origina na mobilidade dos **PORTADORES DE CARGA**.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - METAIS

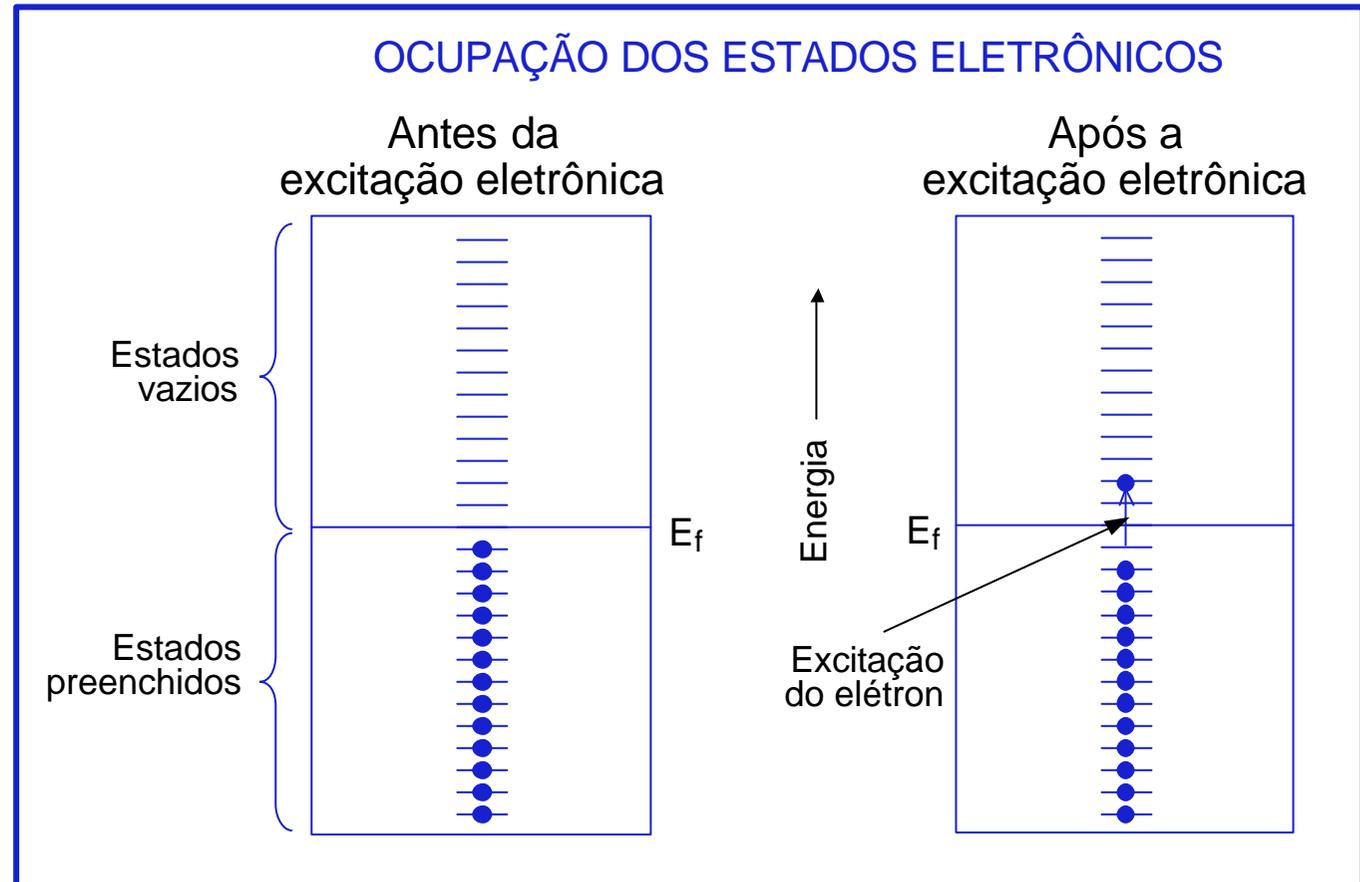
- Em metais, um elétron torna-se livre quando passa para um estado de energia disponível e não preenchido acima de E_f ; é pequena a energia necessária para tal mudança.
- A condutividade elétrica dos metais pode ser representada pela equação

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

n = número de portadores de carga (elétrons) por unidade de volume

$|e|$ = magnitude da carga dos portadores ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

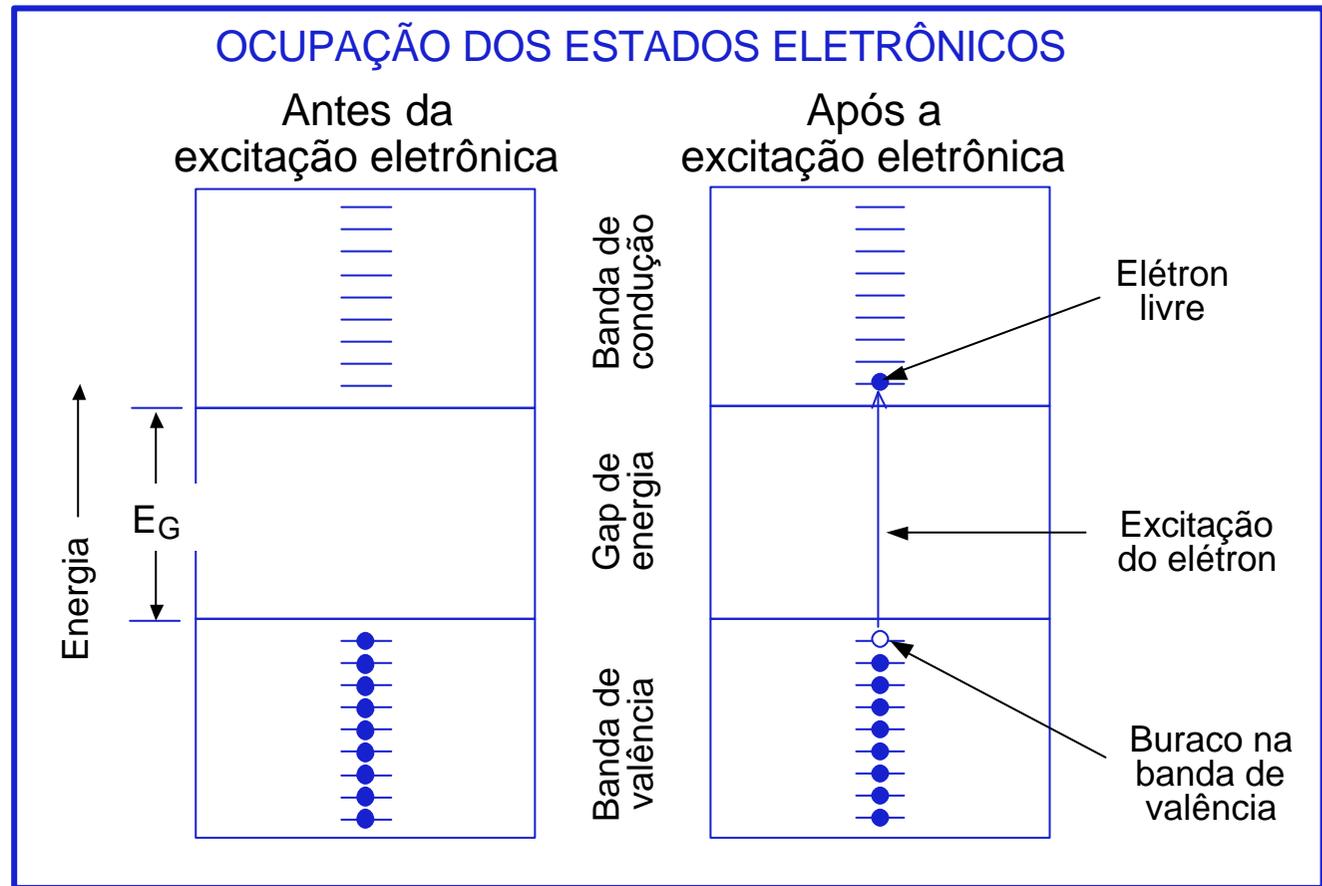
μ_e = mobilidade dos portadores de carga



- A condutividade elétrica dos metais condutores *diminui* à medida que a sua *temperatura aumenta*.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - SEMICONDUTORES E ISOLANTES

- No caso de isolantes e semicondutores, um elétron torna-se livre quando salta da banda de valência para a banda de condução, atravessando o gap de energia. A energia de excitação necessária para tal mudança é aproximadamente igual à largura da barreira.
- A diferença entre semicondutores e isolantes está na largura do gap de energia. Comparada com a largura do gap de energia dos isolantes, a dos semicondutores é bastante pequena.
- Quando o elétron salta da banda de valência para a banda de condução são gerados tanto um elétron livre quanto um buraco eletrônico.

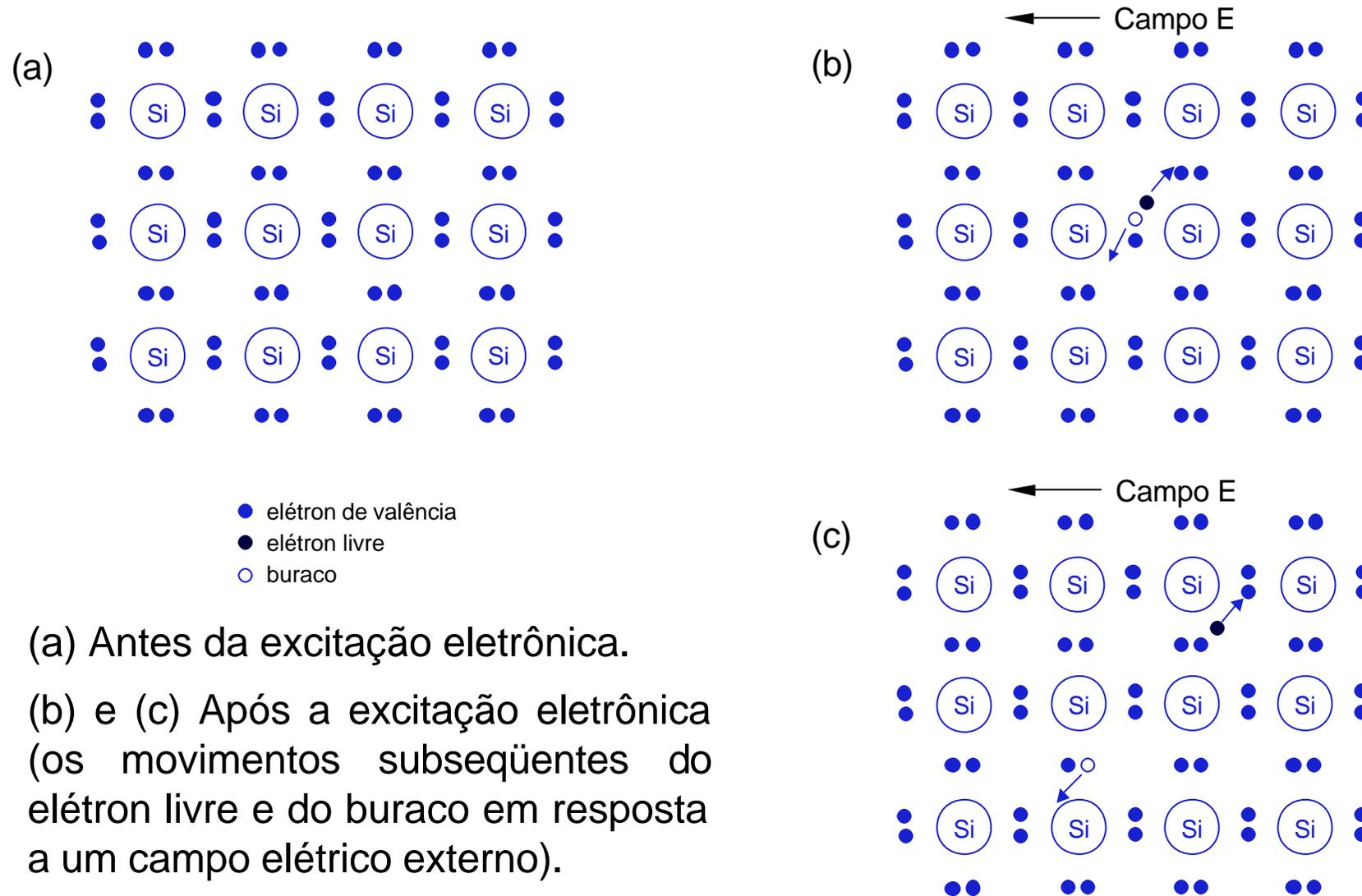


MATERIAIS SEMICONDUTORES

- **SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS** são aqueles cujo comportamento elétrico depende basicamente da estrutura eletrônica do material puro. Sua condutividade elétrica geralmente é pequena e varia muito com a temperatura.
- **SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS** são aqueles cujo comportamento elétrico depende fortemente do tipo e da concentração dos átomos de impurezas. A adição de impurezas para a moldagem do comportamento elétrico dos semicondutores é chamada de **DOPAGEM**.
- A maioria dos semicondutores comerciais elementais são extrínsecos; o mais importante exemplo é o Si, mas também estão nesta categoria o Ge e o Sn. É a possibilidade de adicionar impurezas diversas ao material puro que permite a fabricação de uma variedade de dispositivos eletrônicos a partir do mesmo material semicondutor.
- Os semicondutores extrínsecos têm condutividade que varia pouco com a temperatura e cujo valor é controlado pela concentração de impurezas. As concentrações utilizadas variam de 10^{14} cm^{-3} (1 parte em 10^8 , considerando 10^{22} átomos por cm^3) a 10^{20} cm^{-3} (1 parte em 10^2 , que é muito alta).
- Semicondutores intrínsecos de compostos dos grupos III-V e II-VI vêm adquirindo crescente importância para a indústria eletrônica nos últimos anos.

SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Modelo de ligação eletrônica para a condução elétrica no Silício intrínseco



SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

- A condutividade elétrica dos materiais semicondutores pode ser representada pela equação

$$\sigma = n |e| \mu_{\varepsilon} + p |e| \mu_b ,$$

onde: n = número de elétrons livres por unidade de volume;

p = número de buracos eletrônicos por unidade de volume;

$|e|$ = magnitude da carga dos portadores ($1,6 \times 10^{-19}$ C);

μ_{ε} = mobilidade dos elétrons livres;

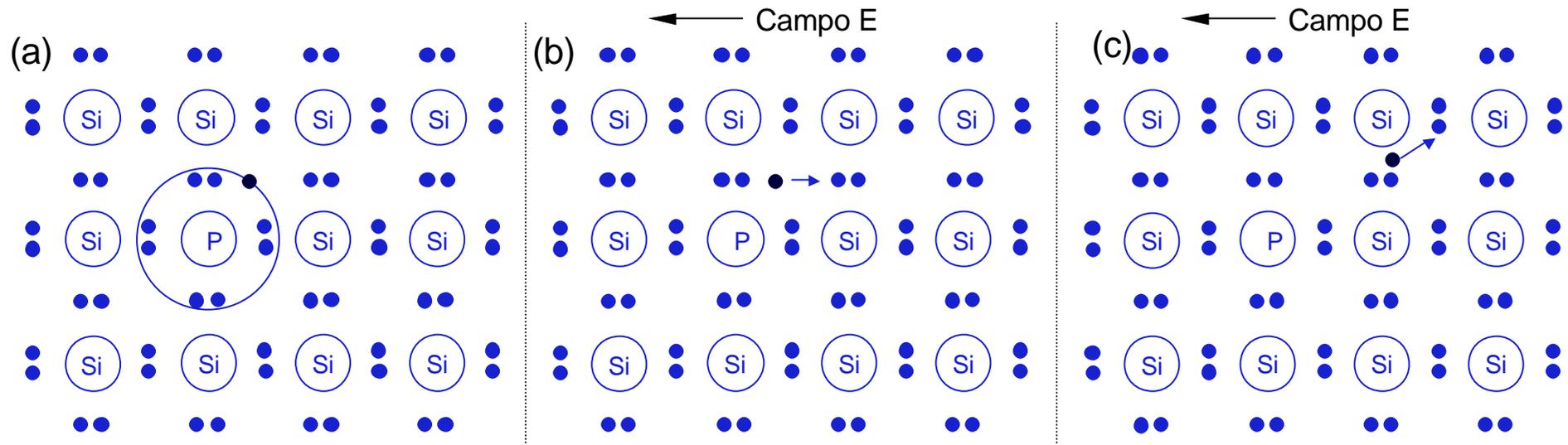
μ_b = mobilidade dos buracos eletrônicos.

- Note que $\mu_{\varepsilon} > \mu_b$.
- A condutividade elétrica dos semicondutores intrínsecos aumenta à medida que a temperatura aumenta.
- Para semicondutores intrínsecos, $n = p$. Portanto,

$$\sigma = n |e| (\mu_{\varepsilon} + \mu_b) .$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

- Modelo de ligação eletrônica para a semicondução extrínseca do tipo n. Por exemplo, a dopagem do Si (valência 4) com P (valência 5) gera elétrons livres; uma impureza desse tipo é chamada de doadora.

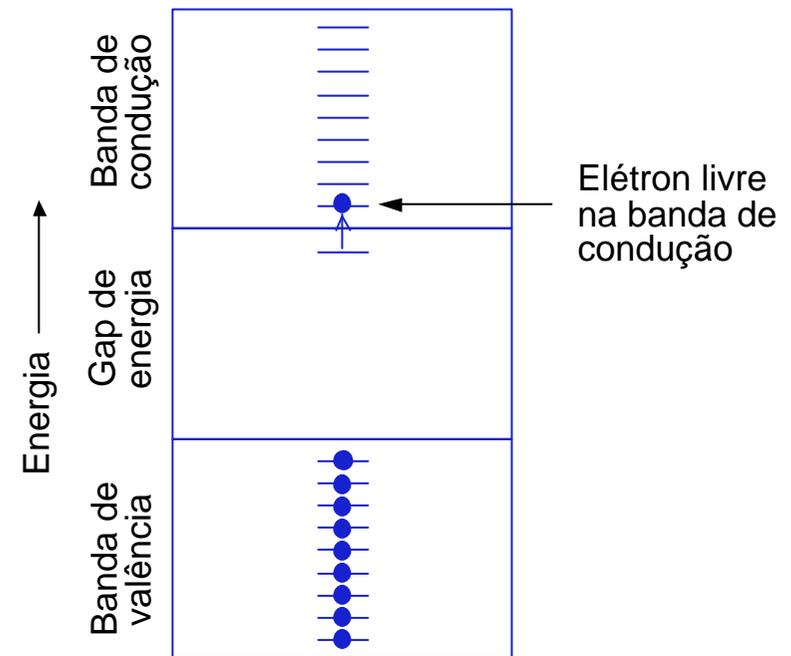
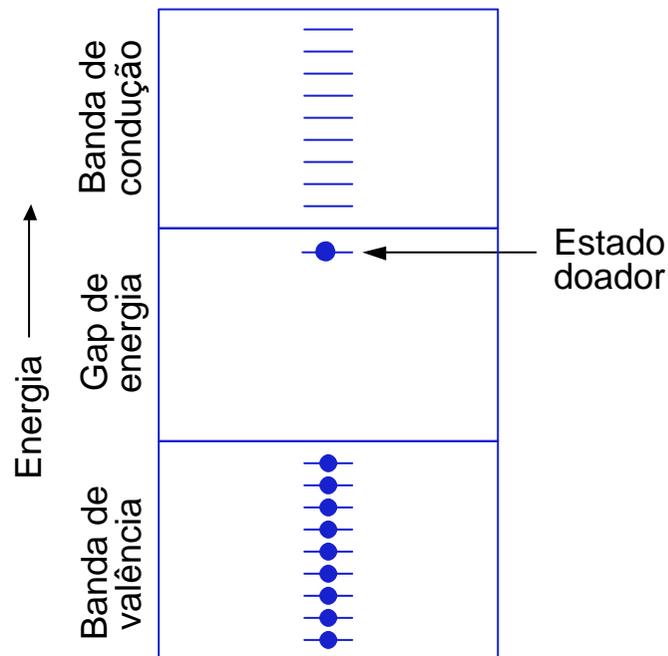


- (a) O átomo de impureza (P) substitui um átomo hospedeiro de Si, resultando em um elétron extra ligado ao átomo de impureza.
- (b) Excitação do elétron extra como consequência da aplicação de um campo elétrico externo, formando-se um elétron livre.
- (c) Movimento do elétron livre em resposta ao campo elétrico externo.
- Para *semicondutores do tipo n*, os elétrons livres são os principais portadores de corrente, isto é, $n \gg p$. Portanto,

$$\sigma \approx n |e| \mu_e .$$

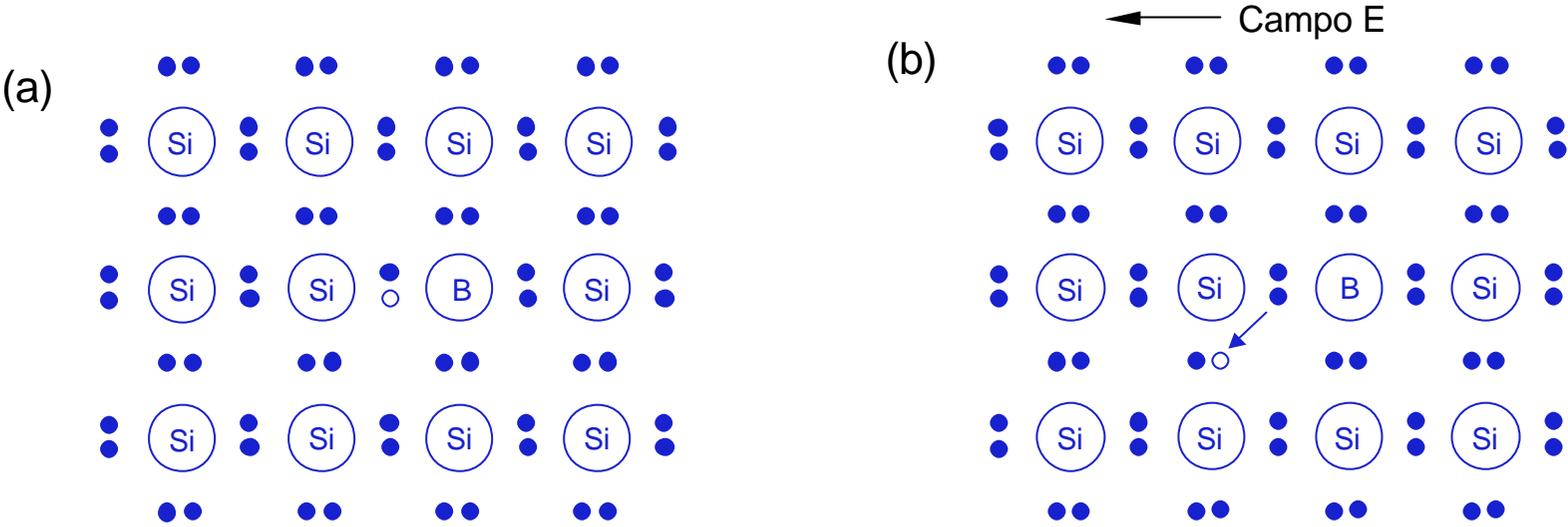
SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

- Esquema da banda de energia eletrônica para um nível de impureza doadora localizado dentro do gap de energia, imediatamente abaixo da parte inferior da banda de condução.
- Excitação de um estado doador em que um elétron livre é gerado na banda de condução.



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Modelo de ligação eletrônica para a semicondução extrínseca do tipo p. Por exemplo, a dopagem do Si (valência 4) com B (valência 3) gera buracos eletrônicos; uma impureza desse tipo é chamada de receptora.



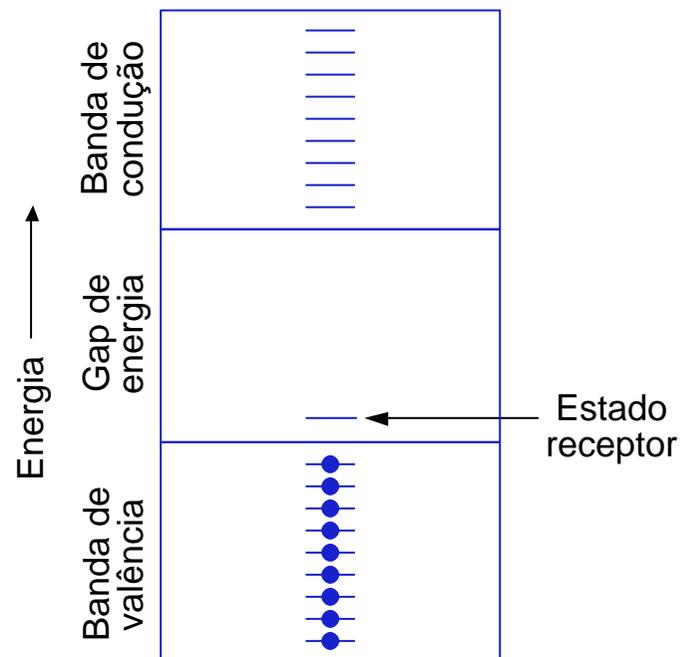
- (a) O átomo de impureza (B) substitui um átomo hospedeiro de Si, resultando na deficiência de um elétron de valência ou, de forma equivalente, num buraco eletrônico associado ao átomo de impureza.
- (b) Movimento do buraco eletrônico em resposta a um campo elétrico externo.
- Para *semicondutores tipo p*, os buracos eletrônicos são os principais portadores de corrente, isto é, $p \gg n$. Portanto,

$$\sigma \approx p |e| \mu_b .$$

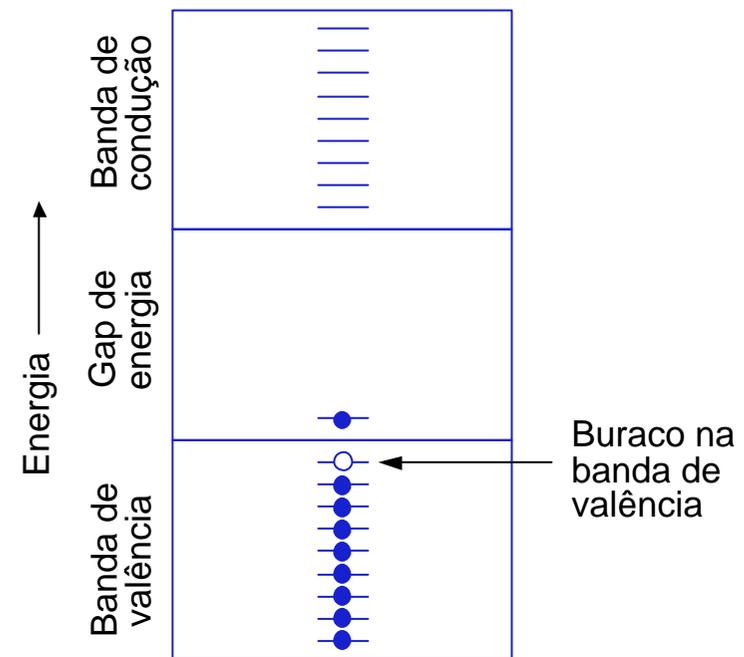
SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

21

- Esquema da banda de energia para um nível de impureza receptora localizado dentro do gap de energia, imediatamente acima da parte superior da banda de valência.



- Excitação de um elétron para o nível receptor, deixando para trás um buraco na banda de valência.



➤ **Capítulos do Callister tratados nesta aula**

✓ **Capítulo 19** : seções 1 a 7, 9, 10 e 11.

➤ **Leitura Adicional**

✓ J. F. Shackelford em “Introduction to Materials Science for Engineers”, 4ª edição, Prentice-Hall Inc., 1996.

▪ Capítulo 11.