

# Propriedades Elétricas de Materiais Cerâmicos

SMM0194 – Engenharia e Ciência  
dos Materiais II

# Corrente elétrica

- Corrente elétrica é o movimento de partículas eletricamente carregadas, em resposta às forças que atuam sobre elas quando submetidas a um campo elétrico aplicado externamente.
- As partículas positivas são aceleradas na direção do campo, enquanto as partículas negativas são aceleradas em direção contrária.

# Dependendo do portador de carga

- Elétrons – condução eletrônica (maioria dos sólidos)
- Íons – condução iônica (materiais cerâmicos condutores rápidos de íons ou Fast Ion Conductors, FIC)
- A corrente elétrica é a soma da contribuição de ambos.

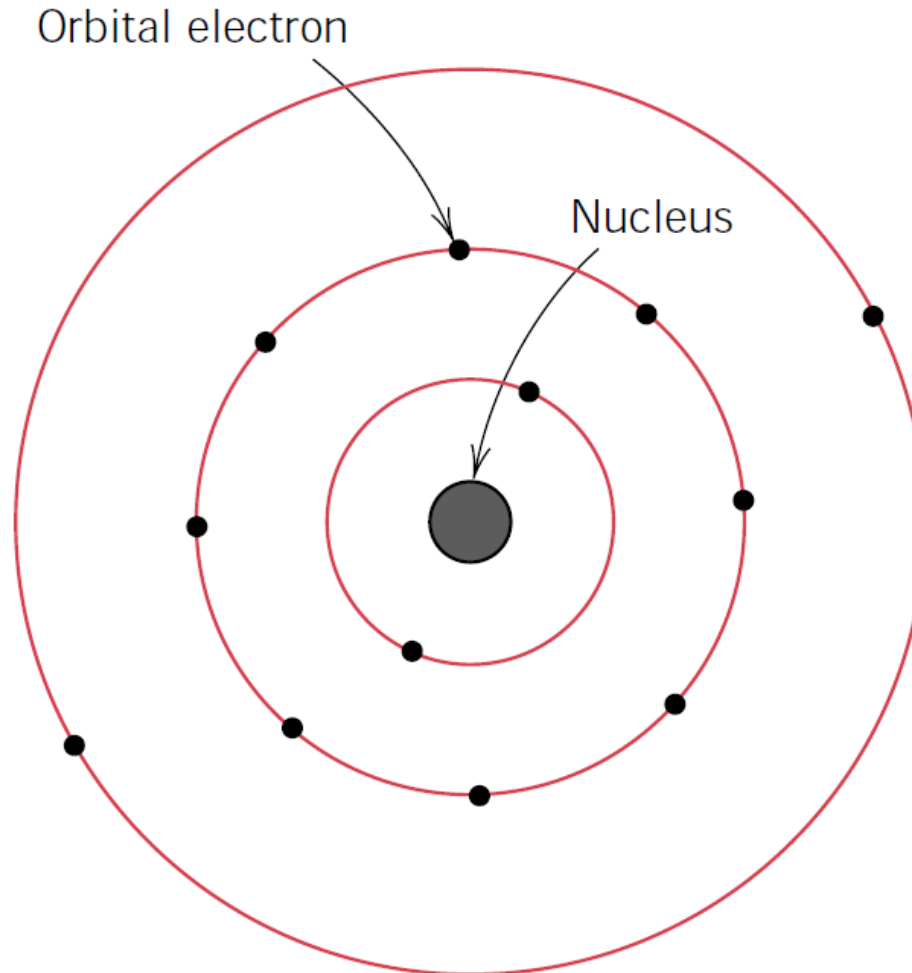
# Condutividade Elétrica

- Depende do **número de portadores de carga presente e de suas mobilidades.**
- Quanto maior o número de portadores de carga (eletrônicos ou iônicos), maior será a condutividade elétrica – desde que esses portadores possam se mover.
- Quanto maior a mobilidade dos portadores, maior a condutividade.

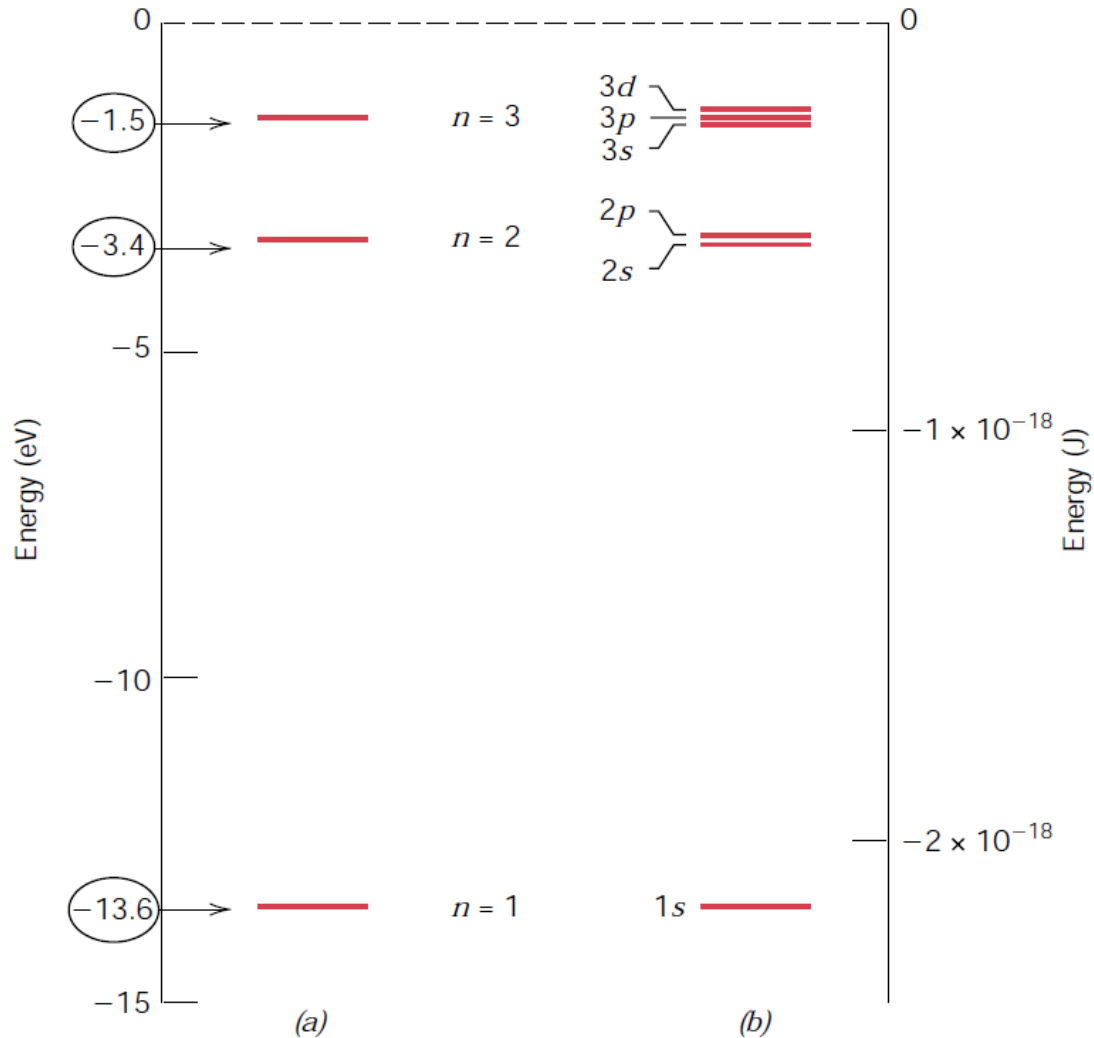
# Condutividade eletrônica

- No caso de materiais condutores eletrônicos, o número de elétrons disponíveis para condução está relacionado com a maneira como esses elétrons estão arrançados em níveis energéticos nas camadas eletrônicas dos átomos.

# Representação esquemática do átomo de Bohr



# Níveis de energia para elétrons no átomo de hidrogênio de acordo com: a) o modelo de Bohr e b) a mecânica quântica



# Preenchimento das camadas eletrônicas dos átomos

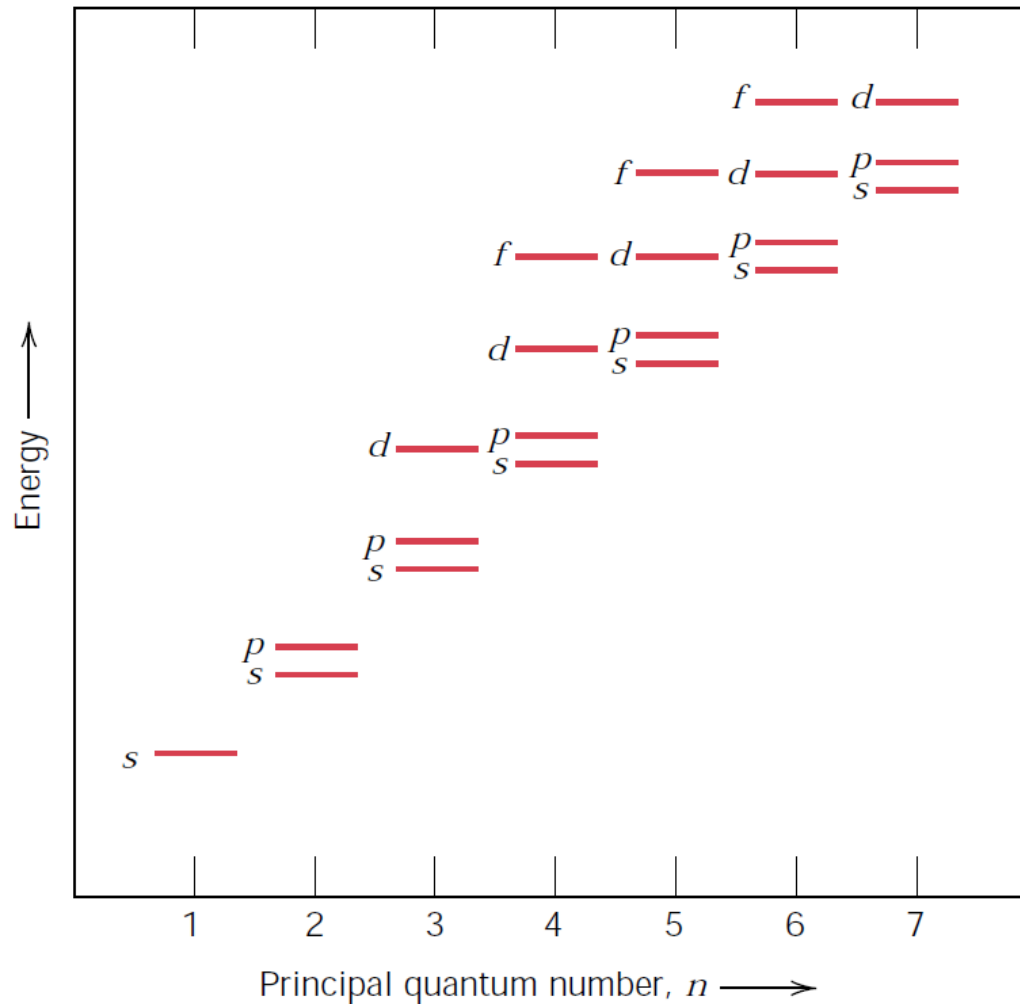
- Camadas: 1, 2, 3 ...
- Subcamadas: s, p, d, f
- Estados: 1 (s), 3 (p), 5 (d), 7 (f)
- Spin: dois, opostos em cada estado
- As posições eletrônicas possuem diferentes níveis de energia
- O preenchimento começa a partir dos níveis de energia mais baixos, crescendo em energia progressivamente



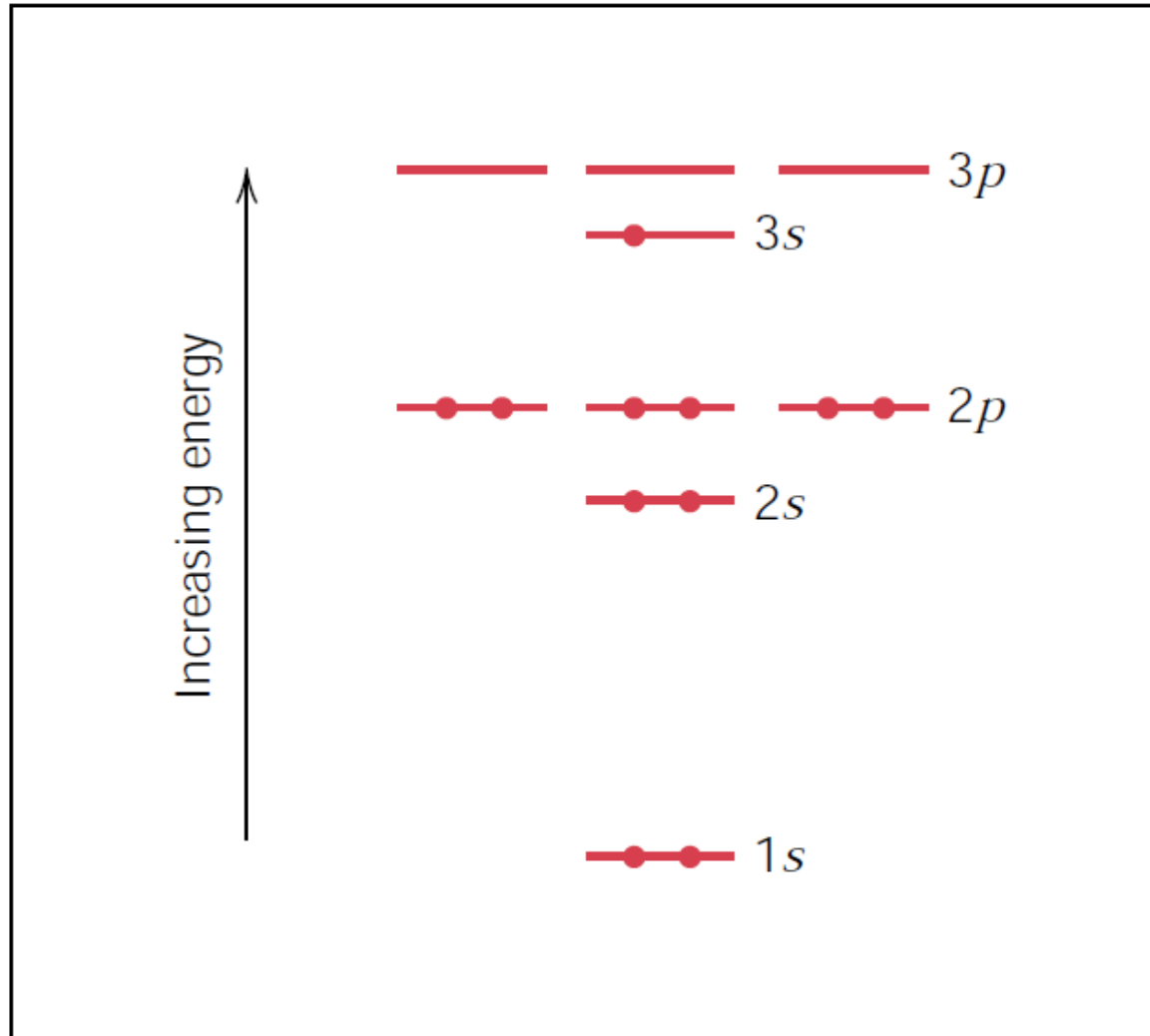
# Número de estados disponíveis para ocupação por elétrons em algumas das camadas e subcamadas

<i>Principal Quantum Number n</i>	<i>Shell Designation</i>	<i>Subshells</i>	<i>Number of States</i>	<i>Number of Electrons</i>	
				<i>Per Subshell</i>	<i>Per Shell</i>
1	<i>K</i>	<i>s</i>	1	2	2
2	<i>L</i>	<i>s</i>	1	2	8
		<i>p</i>	3	6	
3	<i>M</i>	<i>s</i>	1	2	18
		<i>p</i>	3	6	
		<i>d</i>	5	10	
4	<i>N</i>	<i>s</i>	1	2	32
		<i>p</i>	3	6	
		<i>d</i>	5	10	
		<i>f</i>	7	14	

# Energia dos elétrons nas diversas camadas e subcamadas



# Ocupação dos níveis de energia eletrônicos de um átomo de sódio



<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	<i>Atomic Number</i>	<i>Electron Configuration</i>
Hydrogen	H	1	$1s^1$
Helium	He	2	$1s^2$
Lithium	Li	3	$1s^2 2s^1$
Beryllium	Be	4	$1s^2 2s^2$
Boron	B	5	$1s^2 2s^2 2p^1$
Carbon	C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Nitrogen	N	7	$1s^2 2s^2 2p^3$
Oxygen	O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Fluorine	F	9	$1s^2 2s^2 2p^5$
Neon	Ne	10	$1s^2 2s^2 2p^6$
Sodium	Na	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Magnesium	Mg	12	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Aluminum	Al	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Silicon	Si	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Phosphorus	P	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
Sulfur	S	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Chlorine	Cl	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
Argon	Ar	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
Potassium	K	19	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
Calcium	Ca	20	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$

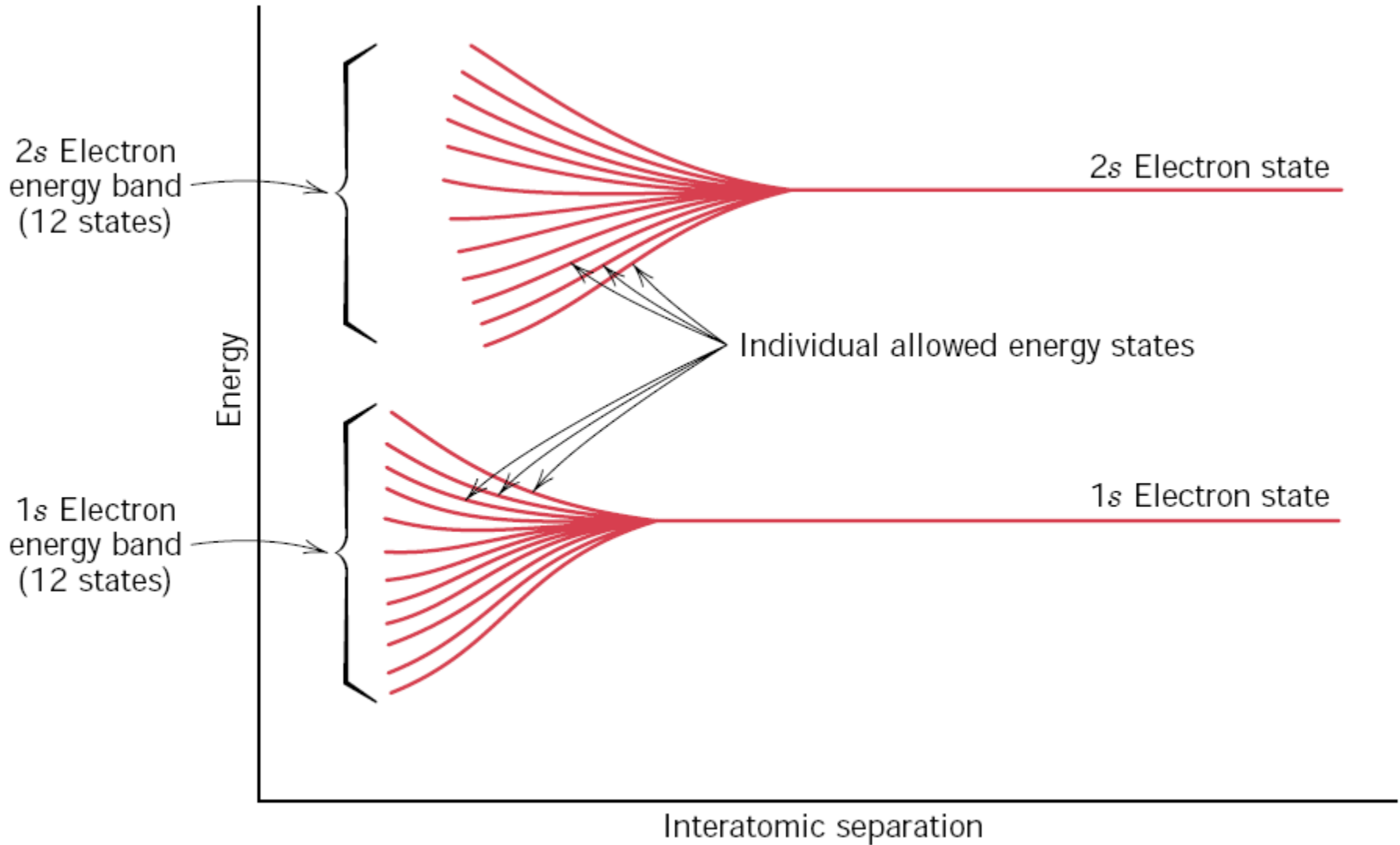
# Bandas de Energia nos Sólidos

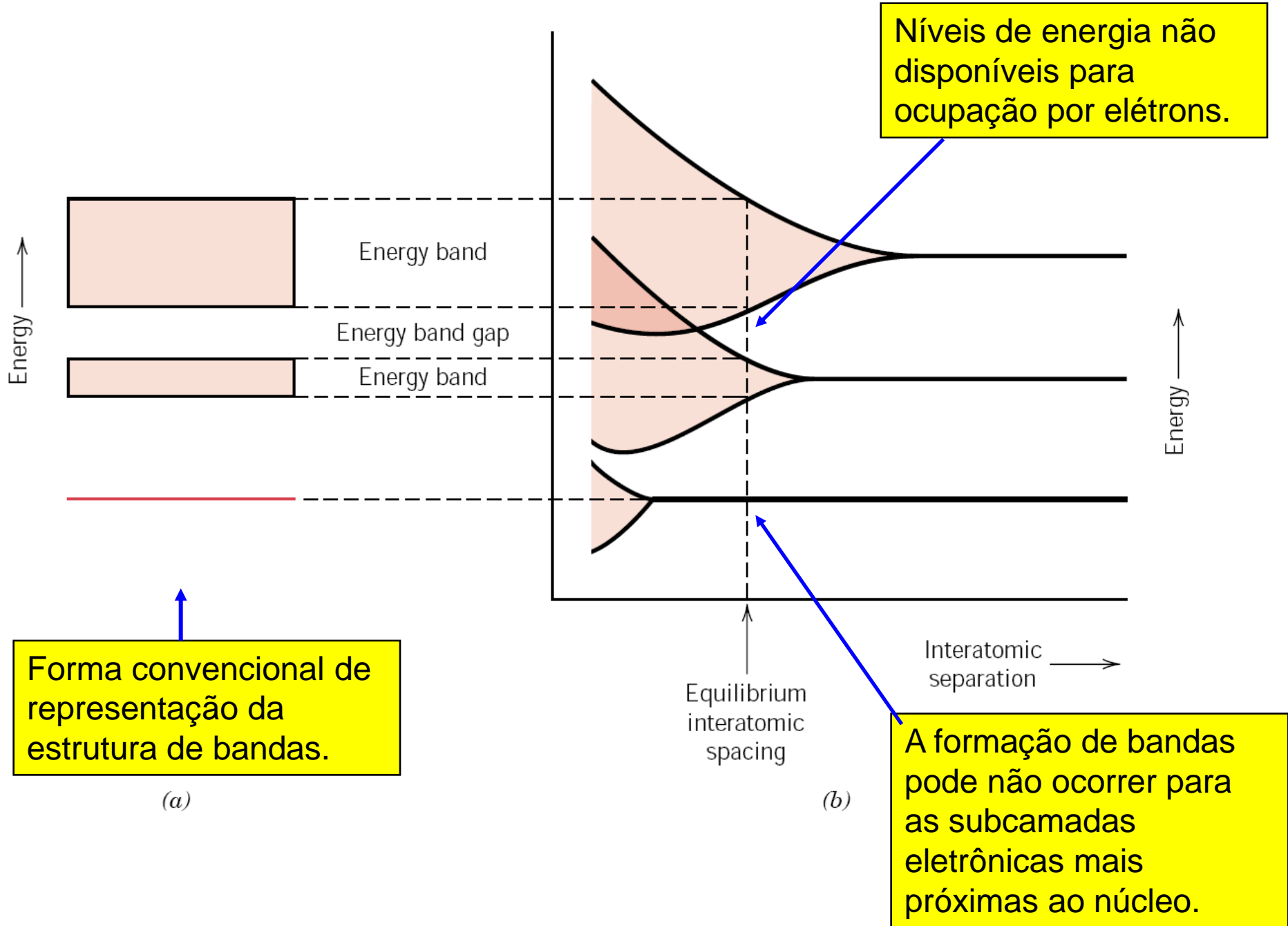
- O esquema de níveis de energia discretos apresentado anteriormente corresponde à forma como os elétrons estão arranjados em um **átomo isolado!**
- Mas à medida que os átomos ocupam posição em um sólido, os elétrons são afetados pelos elétrons e núcleos dos átomos vizinhos.

# Bandas de Energia nos Sólidos

- A influência dos átomos vizinhos em um sólido é tal que **cada nível de energia se divide**, formando uma série de estados eletrônicos próximos entre si, conhecida como bandas de energia.
- A extensão da divisão depende da separação interatômica e começa pelas camadas mais externas.

# Agregado de 12 átomos – a extensão da divisão depende da separação interatômica





Forma convencional de representação da estrutura de bandas.

(a)

Níveis de energia não disponíveis para ocupação por elétrons.

A formação de bandas pode não ocorrer para as subcamadas eletrônicas mais próximas ao núcleo.

(b)



# Número de estados no interior de cada banda

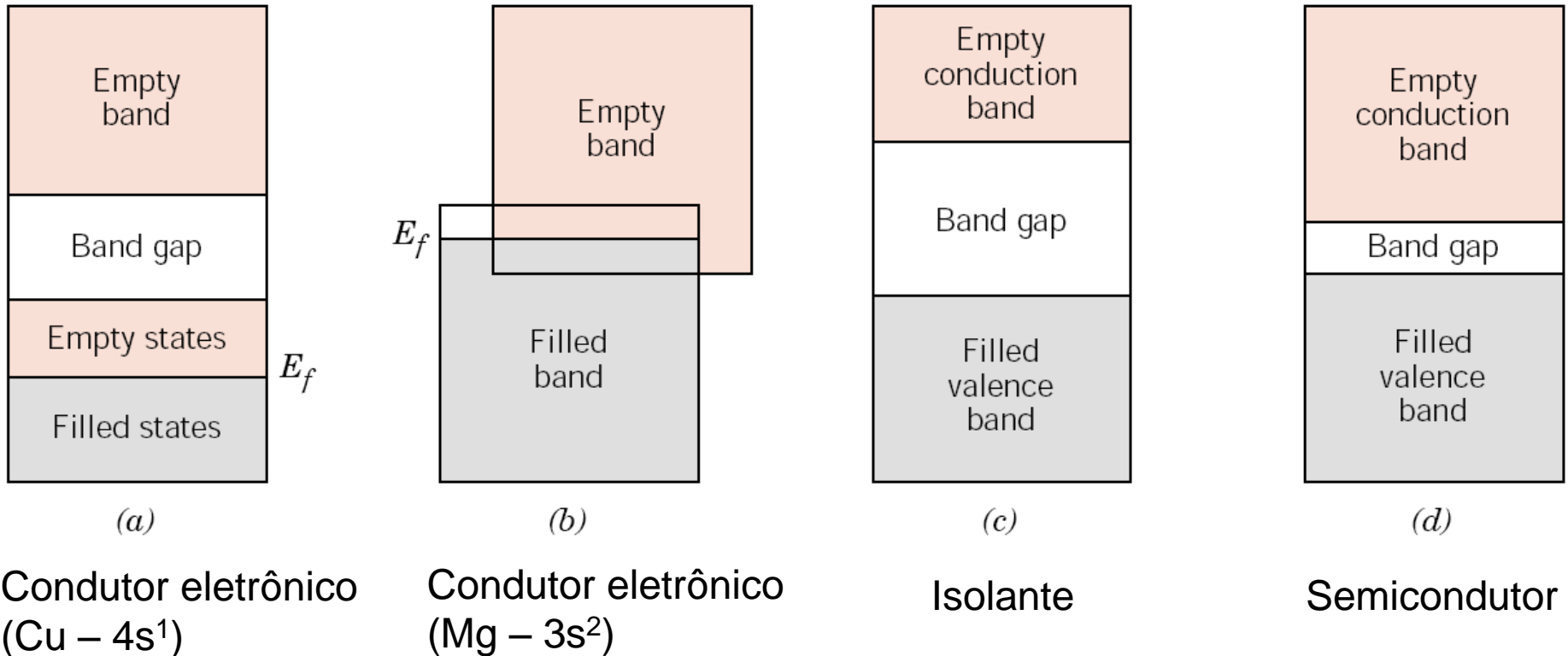
- Será igual à soma de todos os estados equivalentes dos  $N$  átomos presentes no sólido.
- Por exemplo, uma banda  $s$  consistirá de  $N$  estados e uma banda  $p$  de  $3N$  estados.
- Cada estado pode acomodar dois elétrons de spins contrários.
- As bandas conterão os elétrons dos níveis correspondentes dos átomos isolados.

# Propriedades elétricas de materiais sólidos

- É uma consequência do arranjo das bandas eletrônicas mais externas e da maneira como elas estão preenchidas por elétrons.
- Podem existir bandas vazias e preenchidas parcialmente.
- Pode existir sobreposição de bandas.

# Propriedades elétricas de materiais sólidos

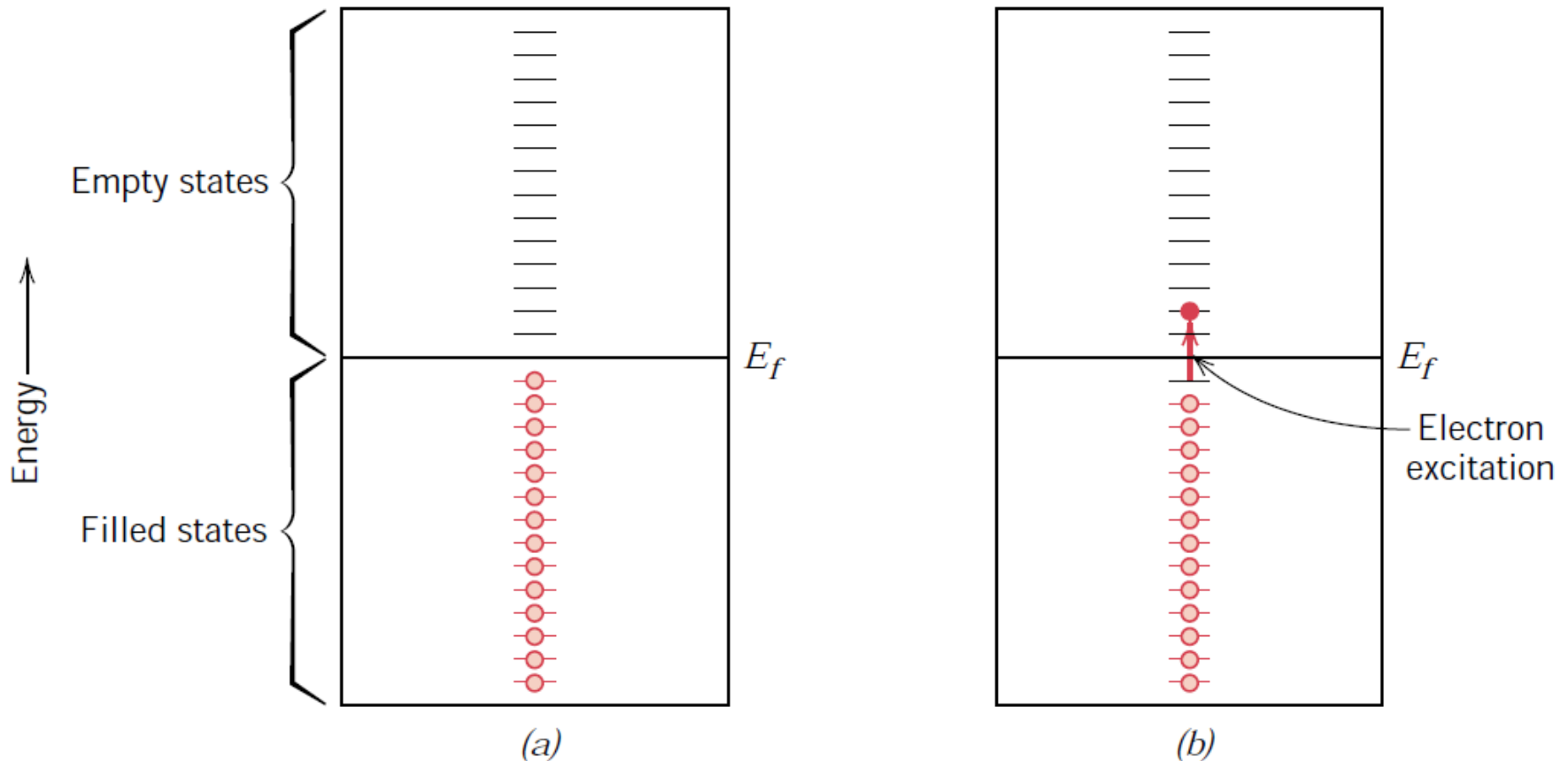
**Energia de Fermi ( $E_f$ ):** energia do estado de energia mais alta preenchido a 0 K, ou a energia abaixo da qual, para  $N$  átomos,  $N$  estados são preenchidos, dois elétrons por estado; ou ainda: nível de energia para o qual a probabilidade de se encontrar o elétron é 0,5 (ou 50%).



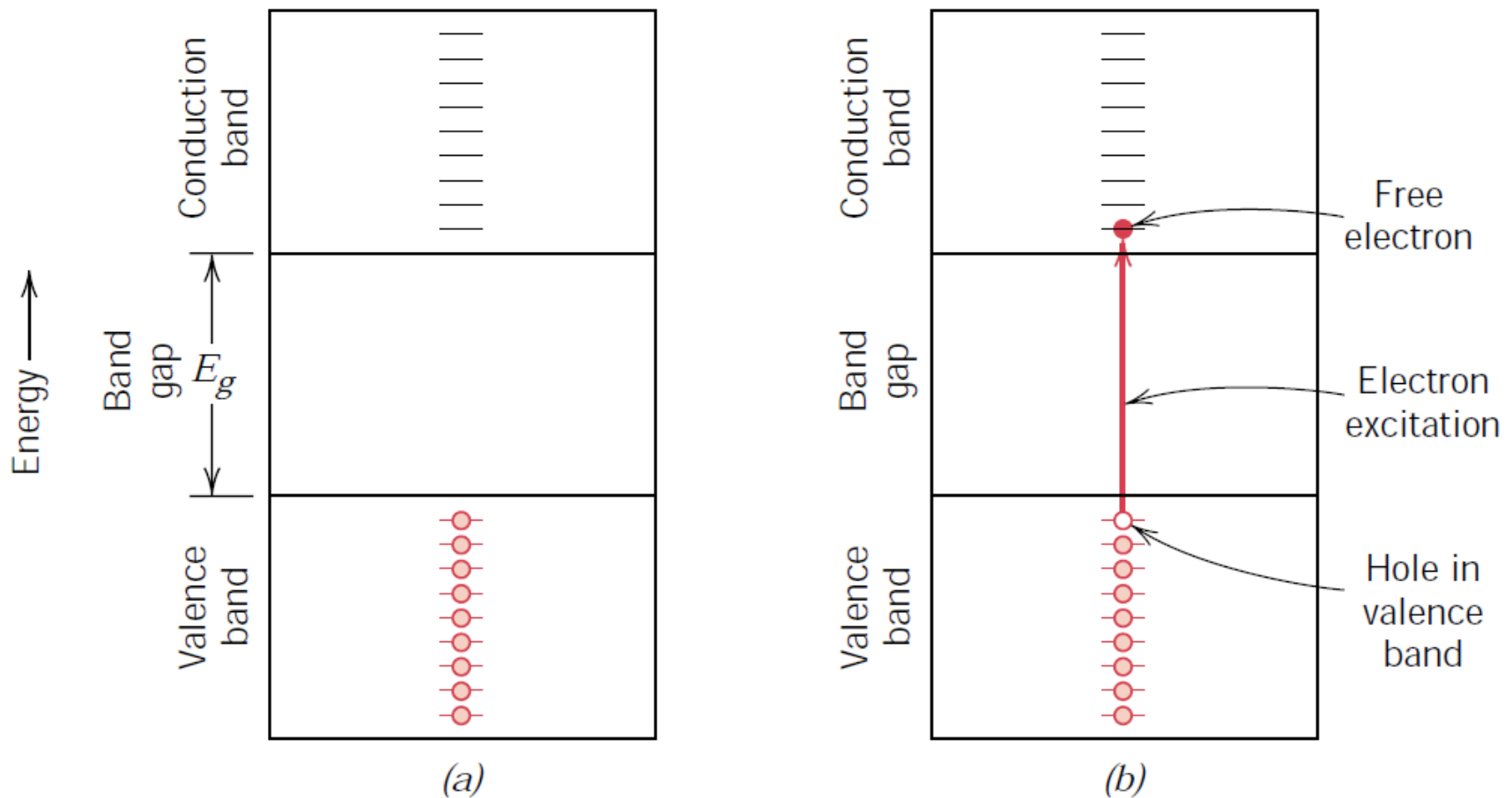
# Cerâmicas isolantes elétricas



Conductividade eletrônica em um metal,  
(a) antes e (b) após a excitação de um elétron da  
banda de valência para a banda de condução

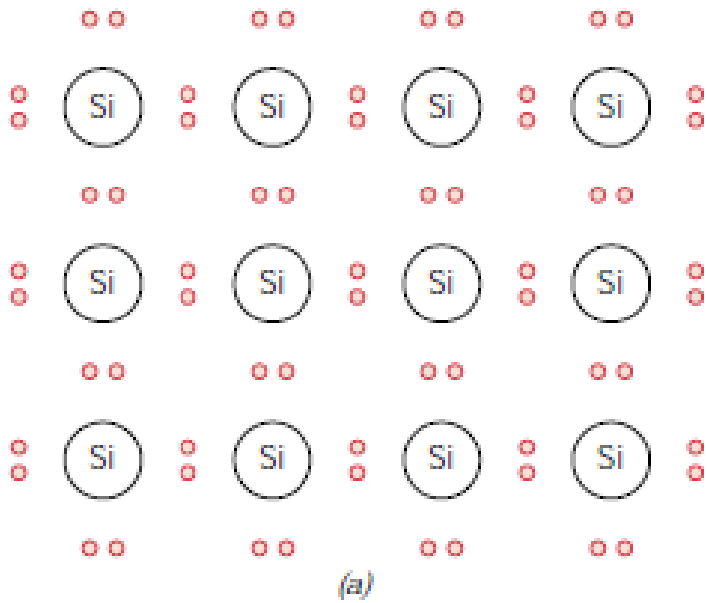


# Condutividade eletrônica em um isolante ou semicondutor, (a) antes e (b) após a excitação de um elétron da banda de valência para a banda de condução

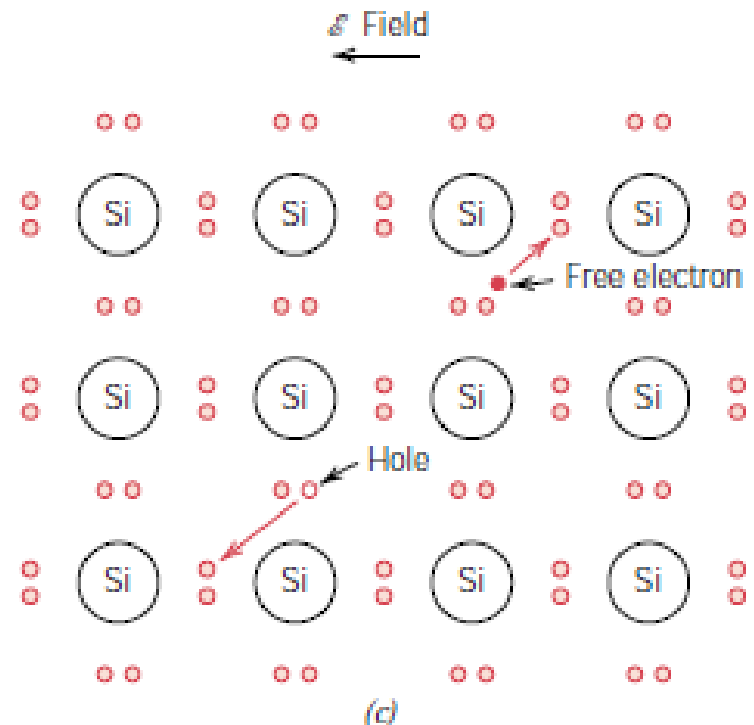
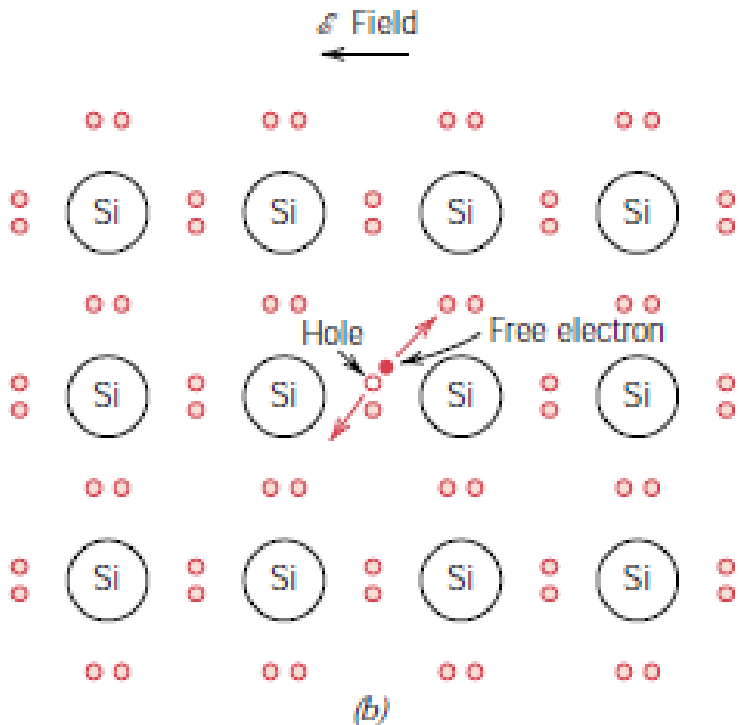


# Semicondutores intrínsecos

- ✓ Os elétrons e buracos são gerados pela excitação através do “gap” de energia do material (energia necessária para o elétron saltar da banda de valência para a banda de condução).
- ✓ Para cada elétron excitado que salta para a banda de condução, um buraco eletrônico é formado na banda de valência (número de portadores negativos, elétrons, é igual ao de portadores positivos, buracos:  $n = p$ ).
- ✓ Materiais com gap de energia  $E_g$  menor que 2 eV são semicondutores intrínsecos, em geral.
- ✓ Exemplos:
  - C ( $E_g = 5,33$  eV)
  - Si ( $E_g = 1,12$  eV)
  - Ge ( $E_g = 0,74$  eV).



Modelo da ligação eletrônica para a condução elétrica no silício intrínseco: (a) antes da excitação; (b) e (c) depois da excitação (movimentos subsequentes do elétron livre e do buraco em resposta à aplicação de um campo elétrico externo).





**Table 2.6** Summary of band gaps for various ceramics.

Material	Band gap, eV	Material	Band gap, eV
<b>Halides</b>			
AgBr	2.80	MgF <sub>2</sub>	11.00
BaF <sub>2</sub>	8.85	MnF <sub>2</sub>	15.50
CaF <sub>2</sub>	12.00	NaCl	7.30
KBr	7.4	NaF	6.70
KCl	7.00	SrF <sub>2</sub>	9.50
LiF	12.00	TlBr	2.50
<b>Binary oxides, carbides, and nitrides</b>			
AlN	6.2	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> parallel	8.8	MgO (periclase)	7.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> perpendicular	8.85	SiC ( $\alpha$ )	2.60–3.20
BN	4.8	SiO <sub>2</sub> (fused silica)	8.3
C (diamond)	5.33	UO <sub>2</sub>	5.20
CdO	2.1		

## Transition metal oxides

### Binaries

CoO	4.0
CrO <sub>3</sub>	2.0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.3
CuO	1.4
Cu <sub>2</sub> O	2.1
FeO	2.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.1
MnO	3.6
MoO <sub>3</sub>	3.0
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.9
NiO	4.2
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.2
TiO <sub>2</sub> (rutile)	3.0–3.4
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.2
WO <sub>3</sub>	2.6
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5
ZnO	3.2

### Ternaries

BaTiO <sub>3</sub>	2.8–3.2
KNbO <sub>3</sub>	3.3
LiNbO <sub>3</sub>	3.8
LiTaO <sub>3</sub>	3.8
MgTiO <sub>3</sub>	3.7
NaTaO <sub>3</sub>	3.8
SrTiO <sub>3</sub>	3.4
SrZrO <sub>3</sub>	5.4
Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	3.0

**Table 12.1** Room-Temperature Electrical Conductivities for Nine Common Metals and Alloys

<i>Metal</i>	<i>Electrical Conductivity</i> [[ $\Omega\text{-m}$ ] <sup>-1</sup> ]
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	$0.2 \times 10^7$

Comparação entre as condutividades elétricas de metais e semicondutores.

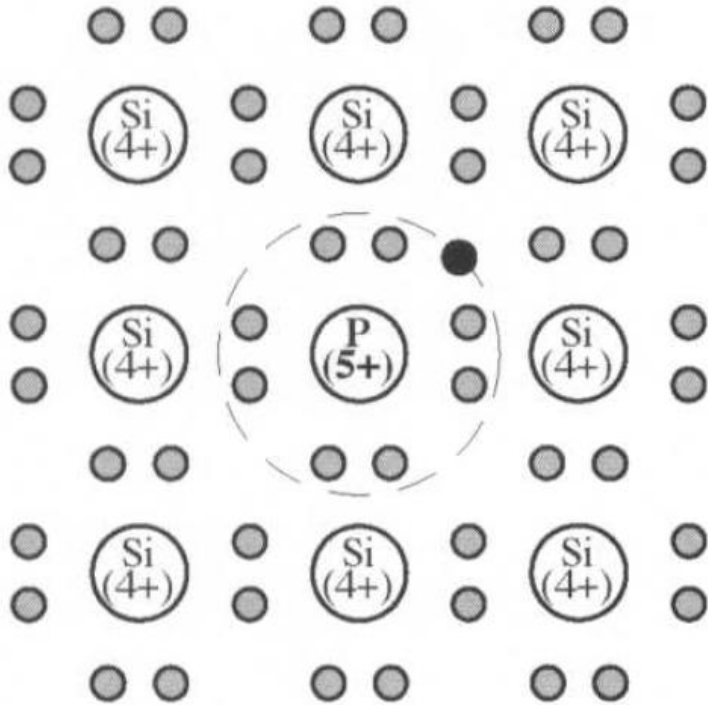
**Table 12.2** Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

<i>Material</i>	<i>Band Gap</i> (eV)	<i>Electrical Conductivity</i> [[ $\Omega\text{-m}$ ] <sup>-1</sup> ]	<i>Electron Mobility</i> (m <sup>2</sup> /V-s)	<i>Hole Mobility</i> (m <sup>2</sup> /V-s)
<b>Elemental</b>				
Si	1.11	$4 \times 10^{-4}$	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
<b>III–V Compounds</b>				
GaP	2.25	—	0.05	0.002
GaAs	1.42	$10^{-6}$	0.85	0.45
InSb	0.17	$2 \times 10^4$	7.7	0.07
<b>II–VI Compounds</b>				
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01

# Semicondutores extrínsecos

- A condutividade é principalmente determinada pela **presença de impurezas**
- Um átomo de impureza para cada  $10^{12}$  átomos de Si é suficiente para torná-lo um semicondutor extrínseco à temperatura ambiente

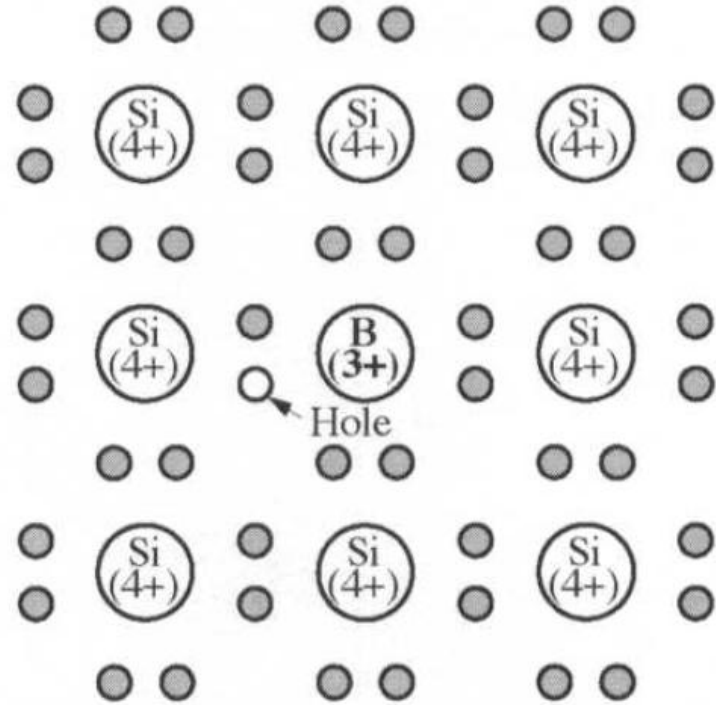
# Semicondutores extrínsecos



(a)

## Tipo n

Ex.:  $\text{Si}^{4+}$  dopado com  $\text{P}^{5+}$   
(sobra elétron, excesso de carga negativa)



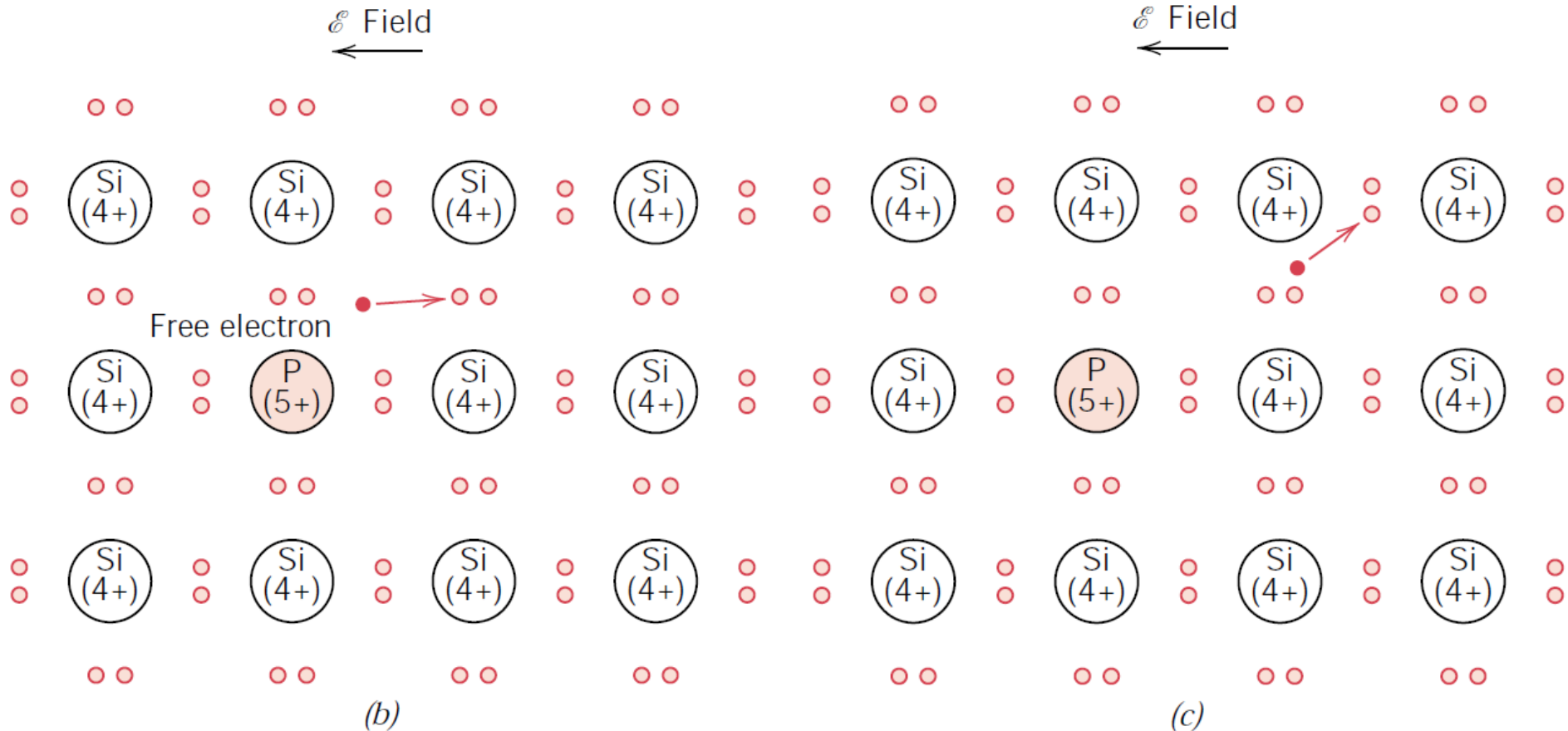
(b)

## Tipo p

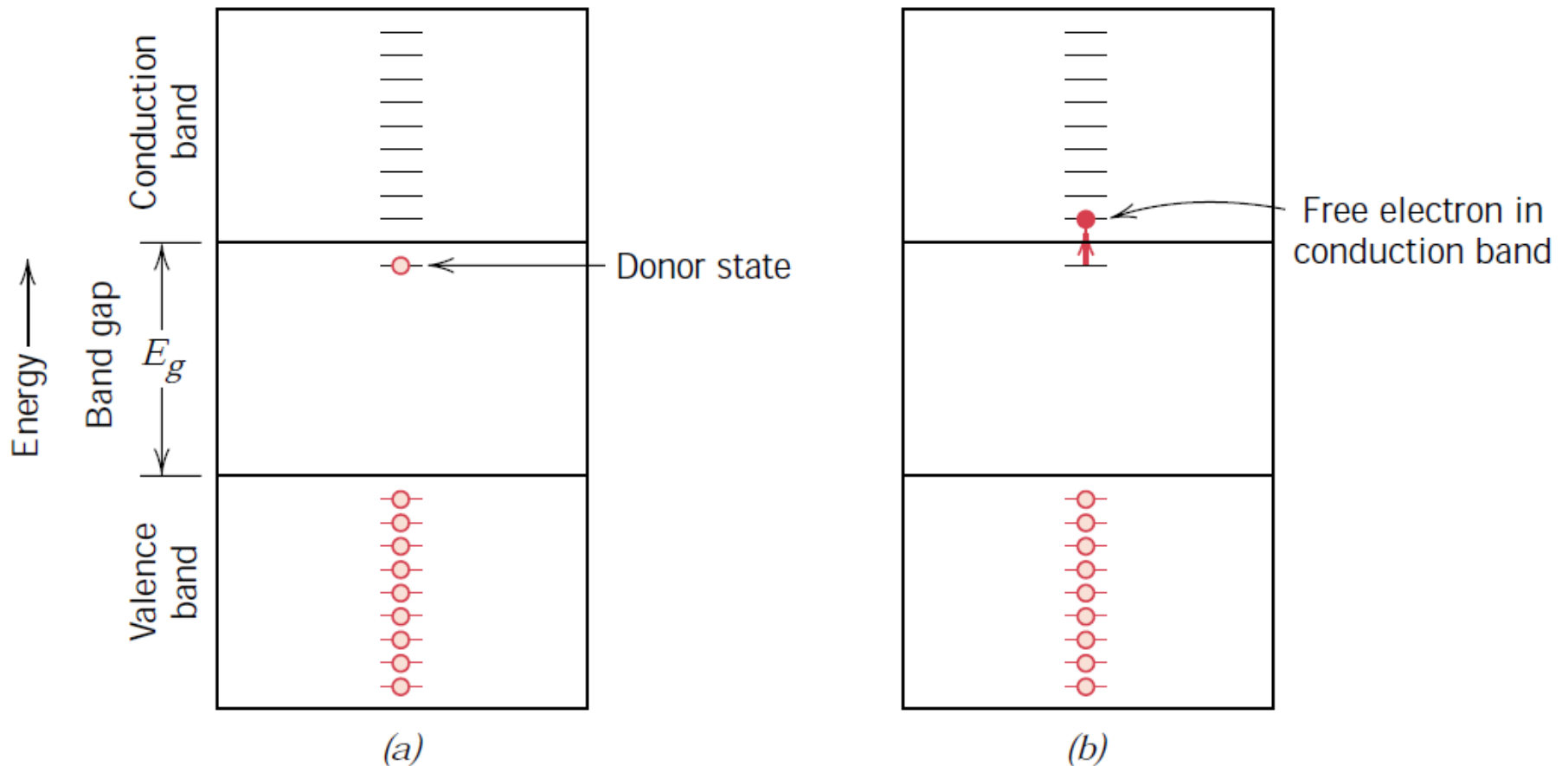
Ex.:  $\text{Si}^{4+}$  dopado com  $\text{B}^{3+}$   
(falta elétron, excesso de carga positiva)

# Modelo de **semicondução extrínseca**

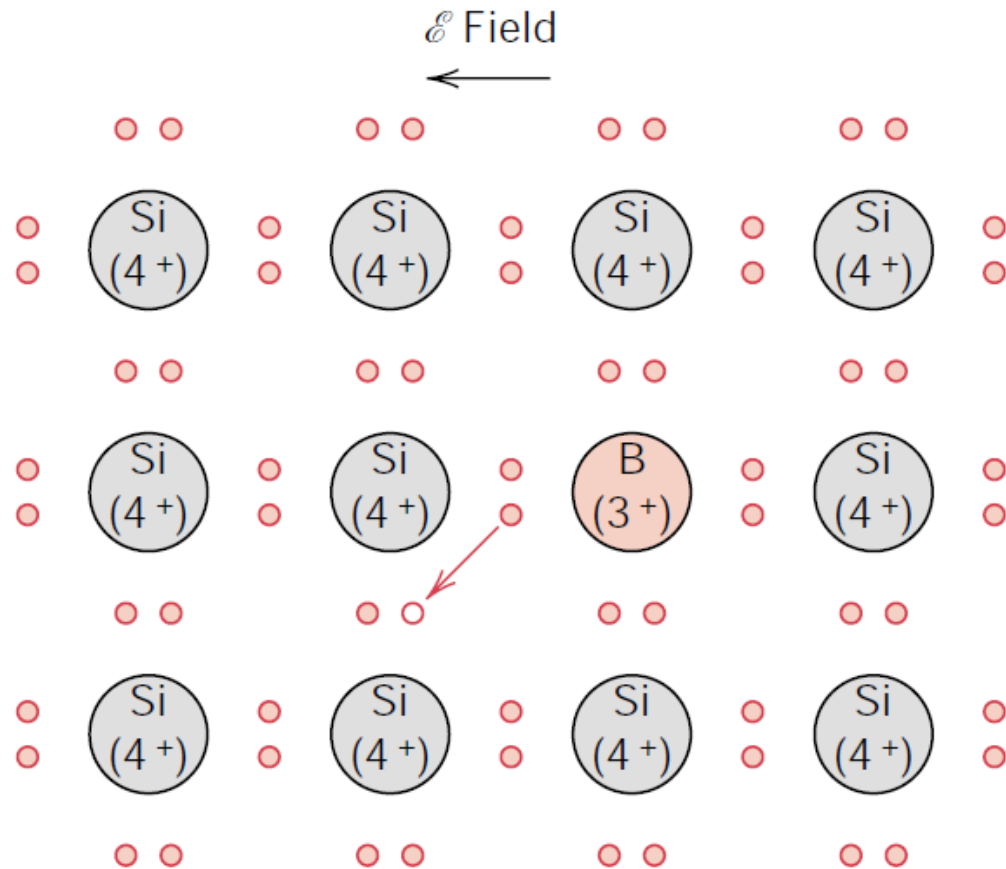
**do tipo n:** (b) excitação para formar um elétron livre e (c) o movimento desse elétron livre em resposta a um campo elétrico.



- (a) Esquema de banda de energia eletrônica para **um nível de impureza doador** localizado dentro do espaçamento entre bandas abaixo do nível inferior da banda de condução.
- (b) Excitação (0,01 eV) a partir de um estado doador onde um elétron livre é gerado na banda de condução.

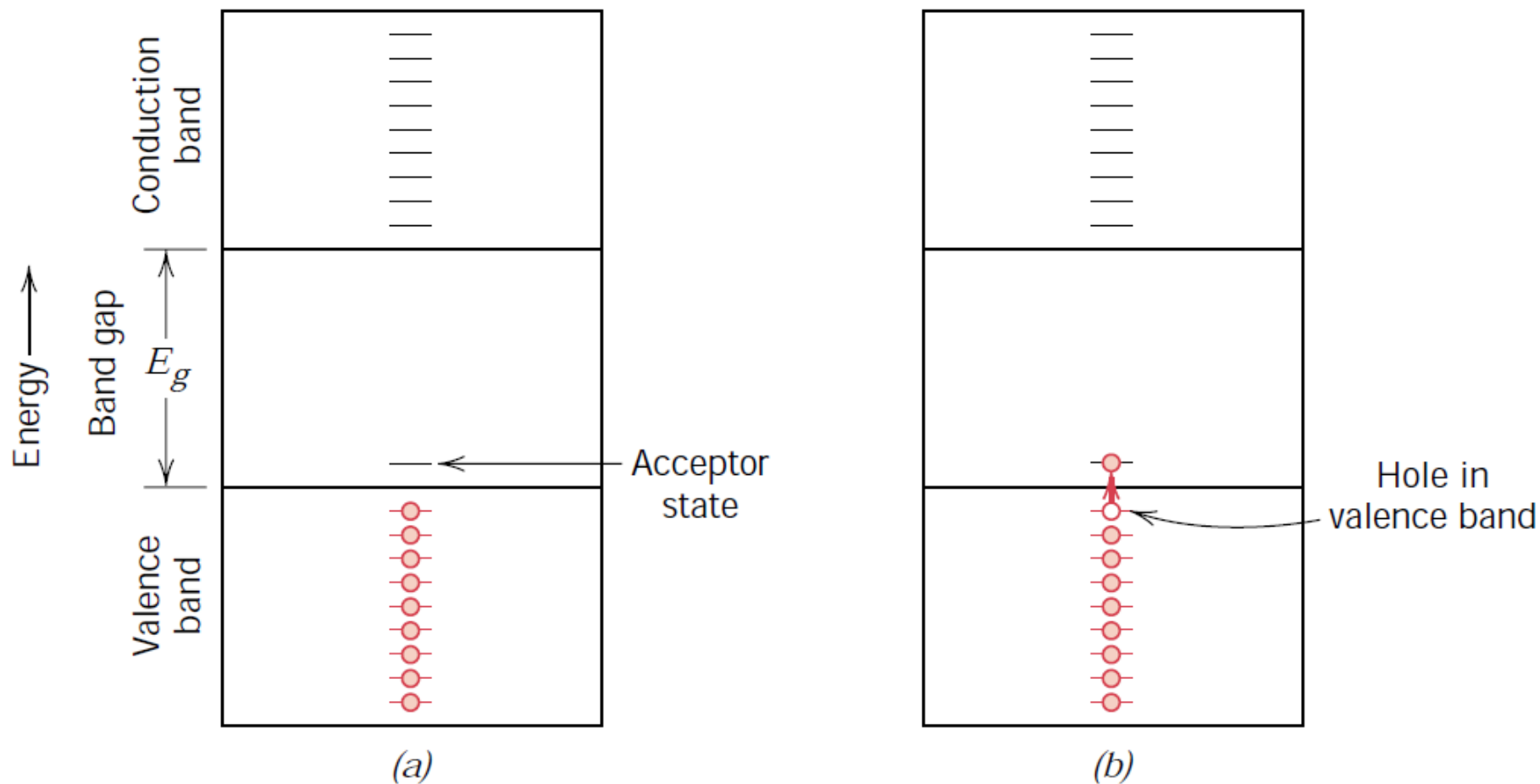


Modelo de **semicondução extrínseca do tipo p**: o movimento de um buraco eletrônico em resposta a um campo elétrico.

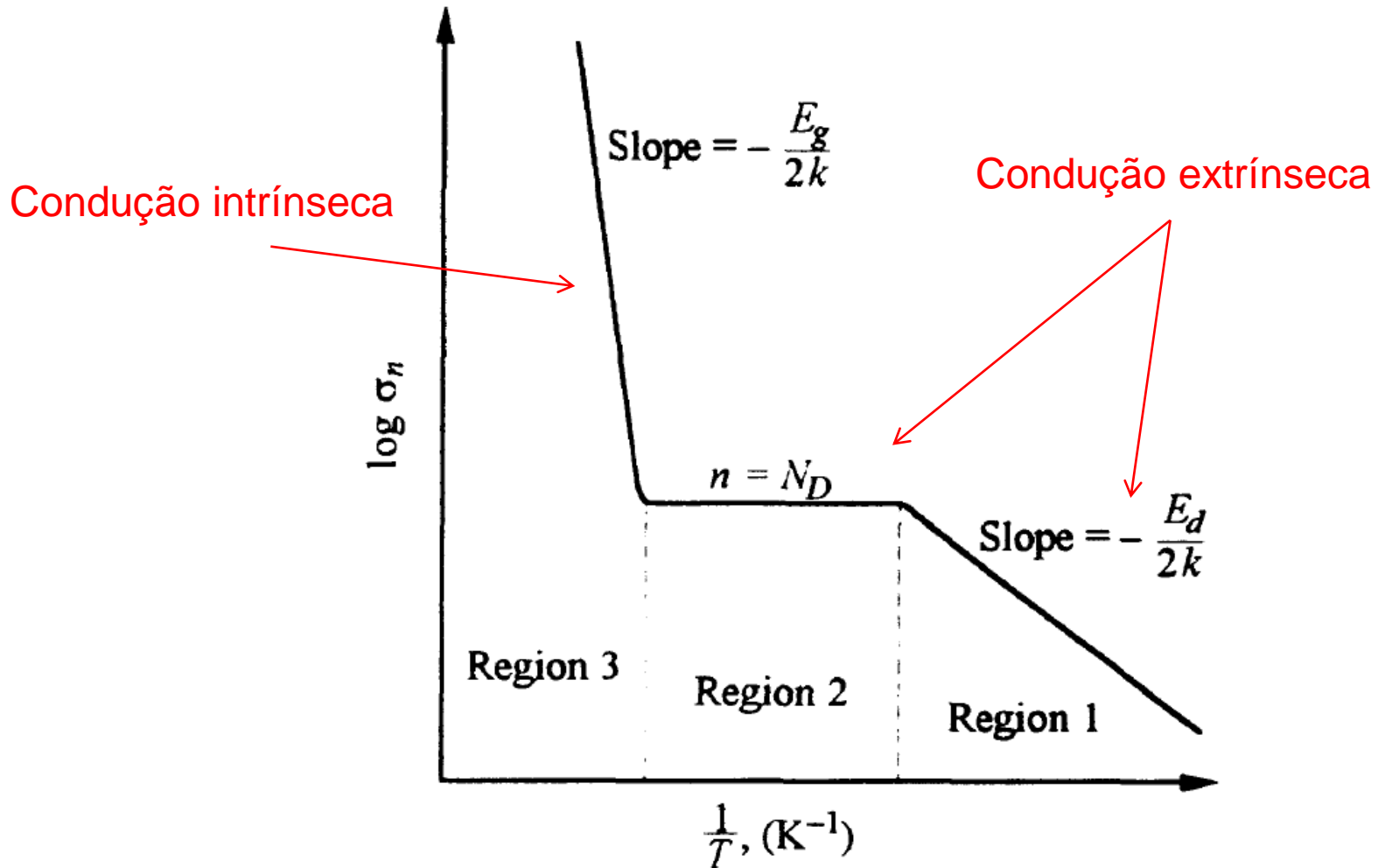




- (a) Esquema de banda de energia eletrônica para um **nível de impureza receptor** localizado dentro do espaçamento entre bandas acima do topo da banda de valência.
- (b) Excitação de um elétron para dentro no nível receptor, deixando para trás um buraco na banda de valência.



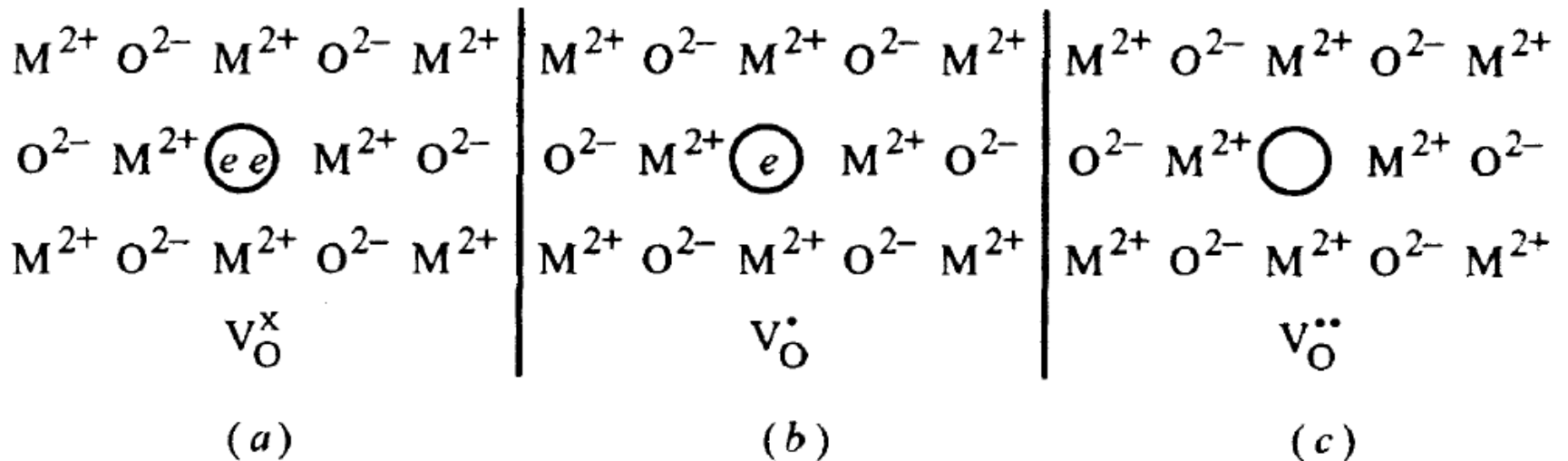
# Efeito da temperatura na condutividade de um semiconductor extrínseco



**Figure 7.14** Temperature dependence of the electronic conductivity of an extrinsic semiconductor. Region 2 is sometimes referred to as the *exhaustion region*.

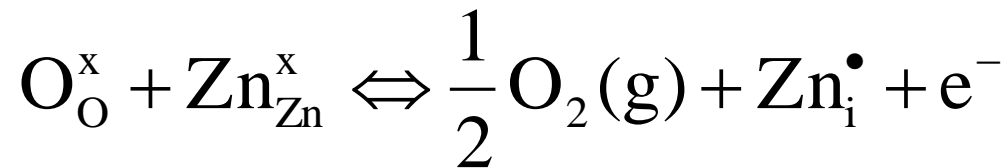
# Semicondutores não-estequiométricos

- Nesse caso, os defeitos eletrônicos se formam não como resultado da presença de impurezas ou dopagem, mas preferencialmente pela **variação da estequiometria** do cristal.

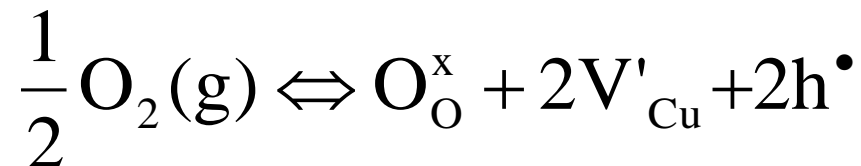


# Semicondutores não estequiométricos

- ZnO – a condutividade eletrônica diminui com o aumento da pressão parcial de O<sub>2</sub>



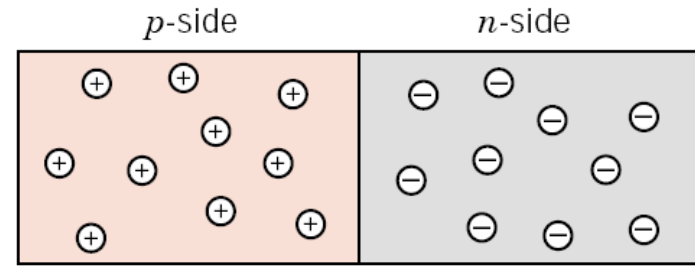
- Cu<sub>2</sub>O – a condutividade eletrônica aumenta com o aumento da pressão parcial de O<sub>2</sub>



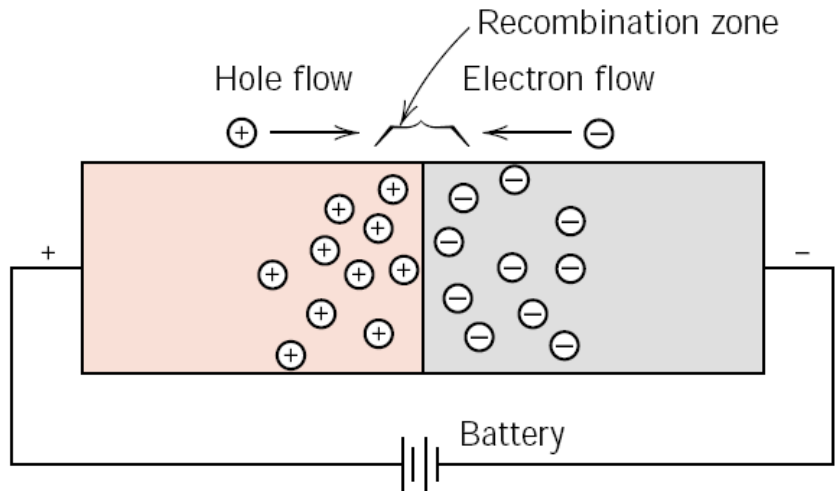
# Junção retificadora ou diodo p-n

Transforma, por exemplo, uma corrente alternada em uma corrente contínua.

Fluxo para a frente

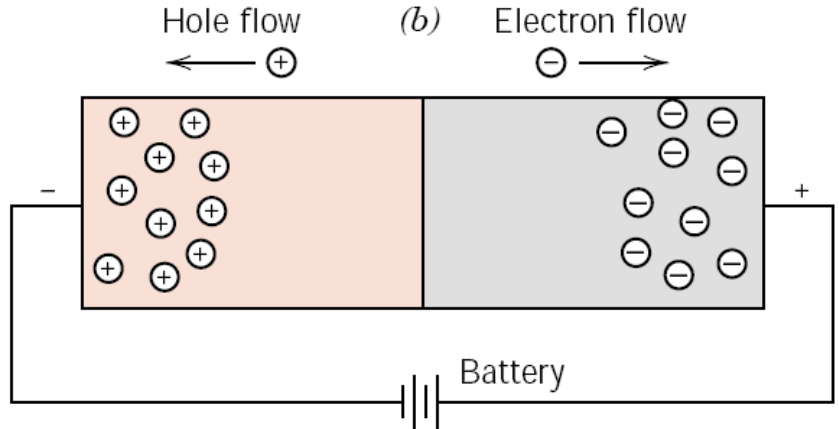


(a)



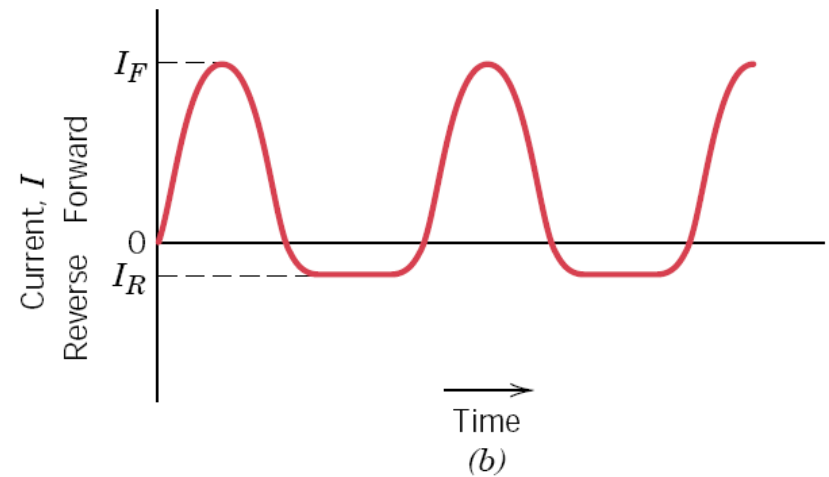
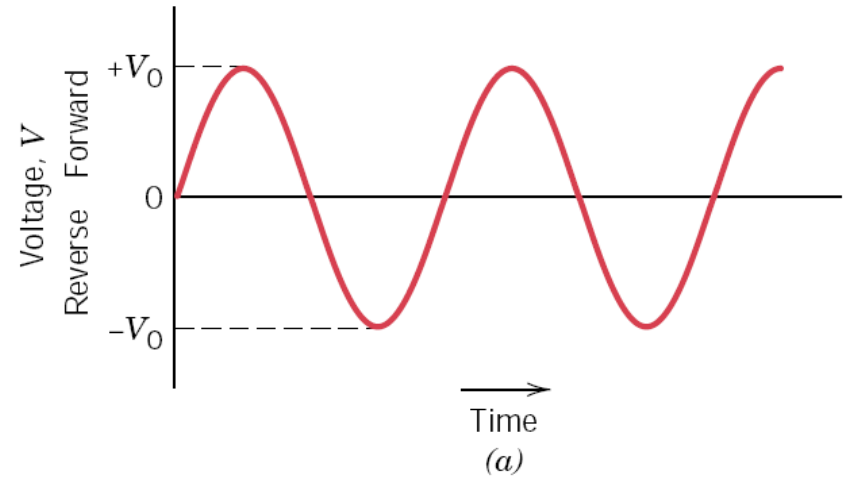
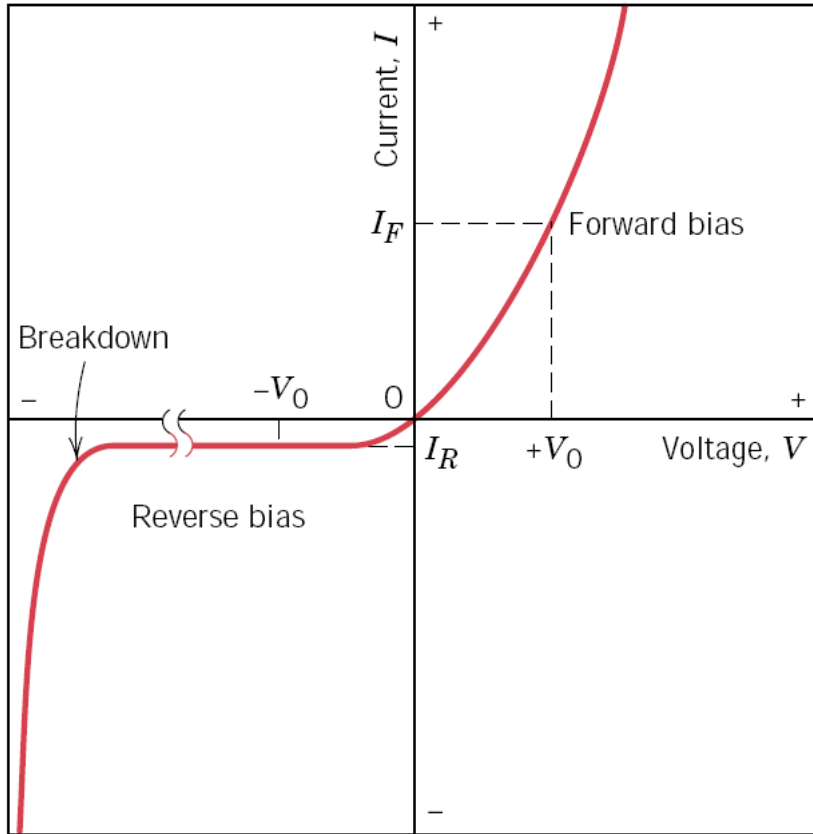
(b)

Fluxo para trás



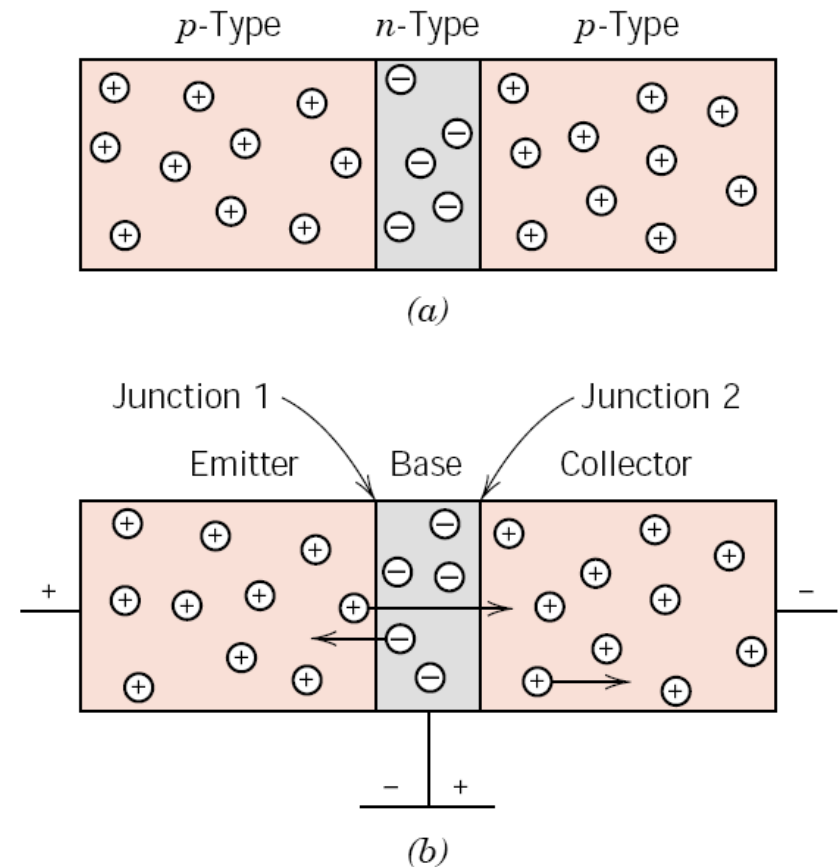
(c)

# Junção retificadora ou diodo p-n



# Transistor tipo p-n-p

- Duas funções principais:
  - **Amplificadores de sinal elétrico.**
  - **Dispositivos interruptores nos computadores para o processamento e armazenamento de informações.**



# Transistor tipo p-n-p

