



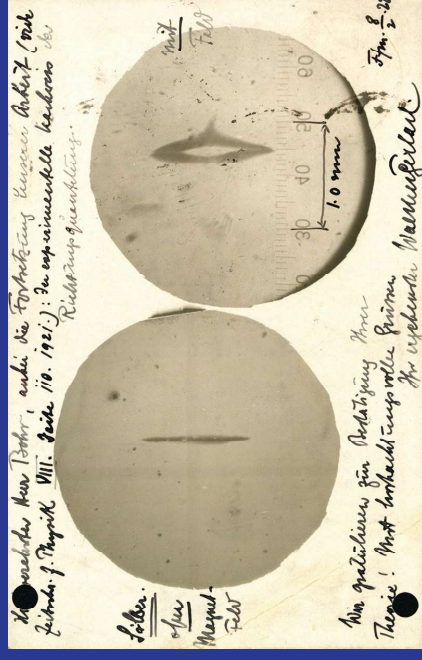
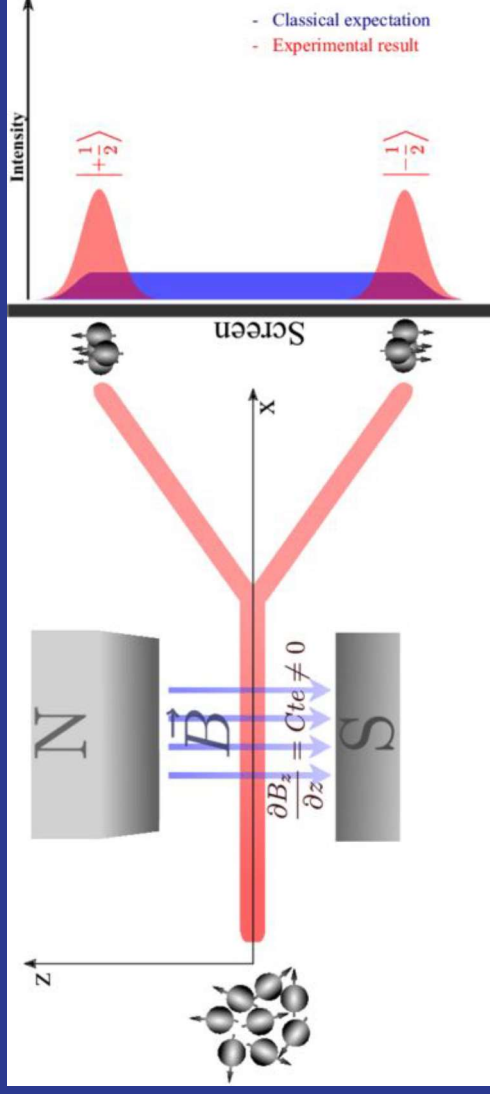
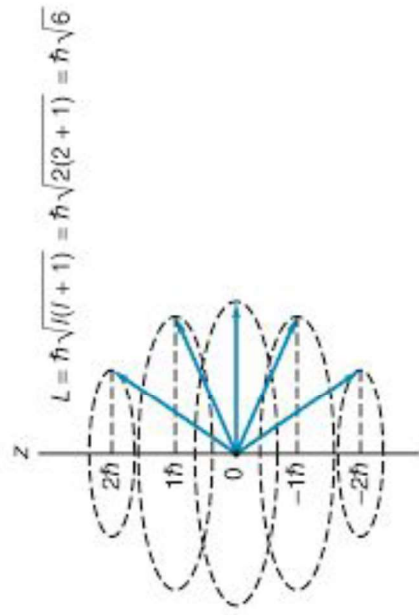
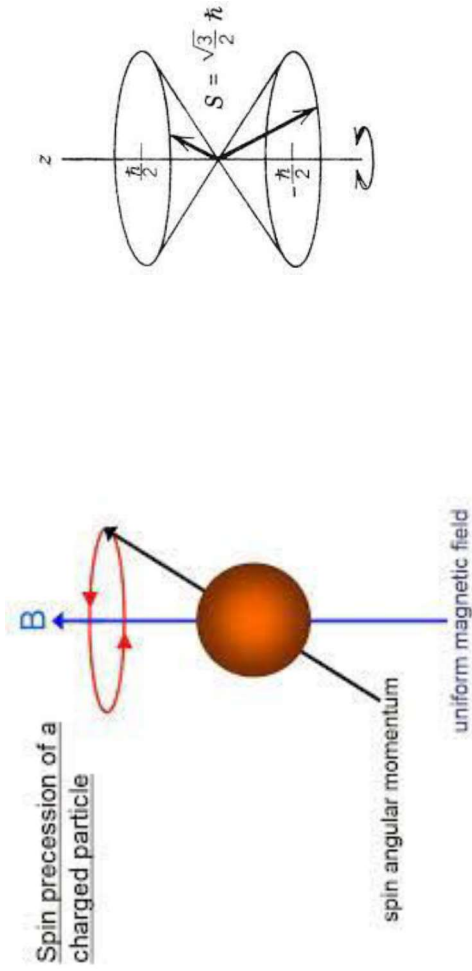
Introdução a Física Moderna A

Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Departamento Acadêmico de Física de Ji-Paraná - DAF-JP

Mais sobre os átomos

- O experimento de Stern-Gerlach
- O princípio de Exclusão de Pauli
- A construção da Tabela periódica
- Espectros de Raio-X dos elementos
- O laser e a luz do Laser

O experimento de Stern-Gerlach



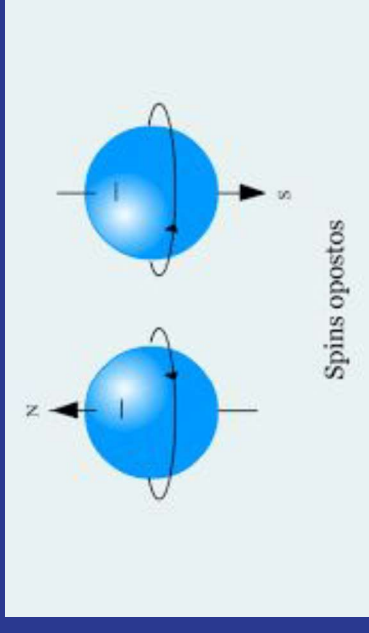
Princípio de Exclusão de Pauli



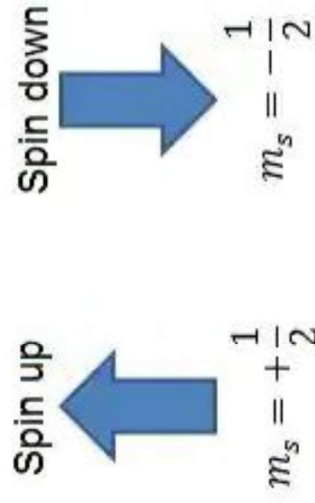
O **princípio de exclusão de Pauli** é um princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925.

Elétrons são férmions e possuem $m_s = \pm 1/2$

Dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico *simultaneamente*.



Princípio de Exclusão de Pauli





Para elétrons de um mesmo átomo, implica dizer que dois elétrons não podem ter os mesmos quatro números quânticos.

Números quânticos para os elétrons no átomo				
Nome	Símbolo	Valores	Específica	Indica
Principal	n	$1, 2, \dots$	Camada	Tamanho
Azimutal ou Orbital	l	$0, 1, \dots, n-1$	Subcamada $l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ s, p, d, f, g, \dots	Forma
Magnético	m_l	$l, l-1, \dots, -l$	Orbitais da subcamada	Orientação
Magnético de spin	m_s	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	Estado do spin	Direção do spin


Princípio de Exclusão de Pauli


NÚMEROS QUÂNTICOS


PRINCIPAL 
Indica o nível energético do elétron.
Varia de 1 a 7.

MAGNÉTICO 
Indica o orbital do elétron.

s	0						
p	-1	0	+1				
d	-2	-1	0	+1	+2		
f	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

SECUNDÁRIO 
Indica o subnível de energia do elétron.
 $s=0$ $p=1$ $d=2$ $f=3$

SPIN 
 $SPIN = \frac{1}{2}$
Indica o sentido de rotação do elétron.
Os sentidos horário e anti-horário são indicados por sinais (+ e -), geralmente, $\uparrow = +$ e $\downarrow = -$.

@livian-qi  Livian Kessy

Para elétrons de um mesmo átomo, implica dizer que dois elétrons não podem ter os mesmos quatro números quânticos.

Princípio de Exclusão de Pauli

NÚMEROS QUÂNTICOS


PRINCIPAL n
Indica o nível energético do elétron.
Varia de 1 a 7.

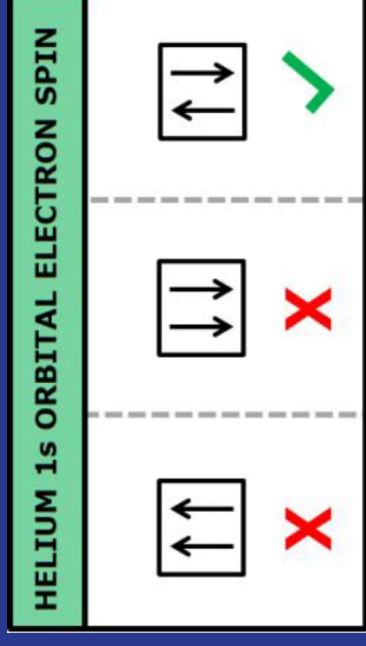
SECUNDÁRIO l
Indica o subnível de energia do elétron.
 $s=0$ $p=1$ $d=2$ $f=3$

MAGNÉTICO m
Indica o orbital do elétron.

SPIN s $SPIN = \frac{1}{2}$
Indica o sentido de rotação do elétron.
Os sentidos horário e anti-horário são indicados por sinais (+ e -), geralmente, $\uparrow = +$ e $\downarrow = -$.

s $\begin{matrix} 0 \\ \square \\ -1 & 0 & +1 \end{matrix}$
 d $\begin{matrix} -2 & -1 & 0 & +1 & +2 \\ \square & \square & \square & \square & \square \end{matrix}$
 p $\begin{matrix} -1 & 0 & +1 \\ \square & \square & \square \end{matrix}$
 f $\begin{matrix} -3 & -2 & -1 & 0 & +1 & +2 & +3 \\ \square & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{matrix}$

@livian-qi  Livian Kessy



Por exemplo, se os números quânticos n , l , m_l são iguais nos dois elétrons, estes deverão necessariamente ter os números m_s diferentes, e portanto os dois elétrons têm spins opostos.

A construção da tabela periódica

Número Quântico Secundário (l)

❖ Indica o *subnível de energia*, identificado pela letra **l**. Matematicamente, $l = n - 1$, são conhecidos, na prática, apenas quatro (vide tabela).

Subnível	s	p	d	f
l	0	1	2	3
n° max. e ⁻	2	6	10	14

Obs. O Número máximo de elétrons por subnível é dado por: $n^\circ e^- = 2(2l + 1)$



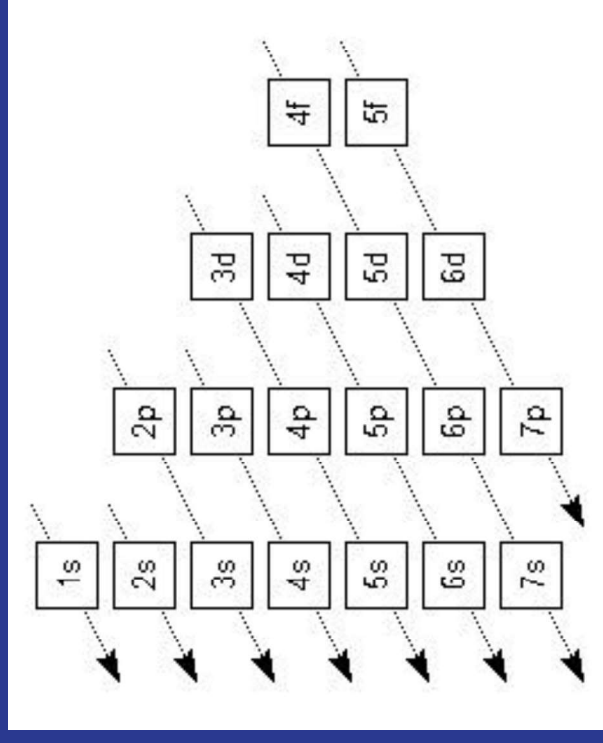
A construção da tabela periódica

Número Quântico Secundário (l)

❖ Indica o **subnível de energia**, identificado pela letra **l**. Matematicamente, $l = n - 1$, são conhecidos, na prática, apenas quatro (vide tabela).

Subnível	s	p	d	f
l	0	1	2	3
n° max. e ⁻	2	6	10	14

Obs. O Número máximo de elétrons por subnível é dado por: $n^\circ e^- = 2(2l + 1)$

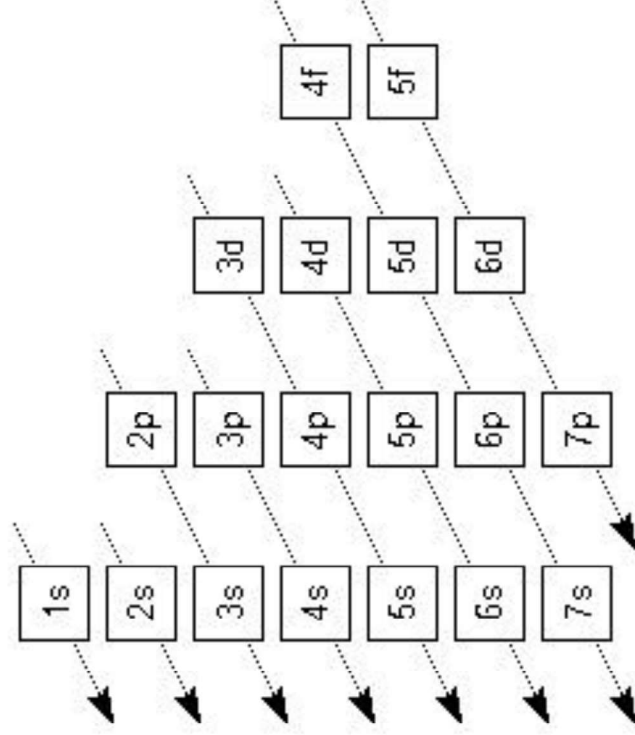


Nesta figura, o número dentro de cada quadrado é o valor de n . Assim, cada linha do diagrama corresponde a uma camada eletrônica.

A letra representa o valor de l .

$$s \rightarrow l = 0, p \rightarrow l = 1, d \rightarrow l = 2 \text{ e } f \rightarrow l = 3.$$

A construção da tabela periódica



$s \rightarrow l=0$, $p \rightarrow l=1$, $d \rightarrow l=2$ e $f \rightarrow l=3$.

Dois elétrons podem ocupar o mesmo orbital, um com *spin* “para cima” e outro com *spin* “para baixo”.

$s \rightarrow l=0$ corresponde a um orbital ($m=0$)

$p \rightarrow l=1$ corresponde a três orbitais ($m=-1, 0, +1$)

$d \rightarrow l=2$ corresponde a cinco orbitais ($m=-2, -1, 0, +1, +2$)

$f \rightarrow l=3$ corresponde a sete orbitais ($m=-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$)

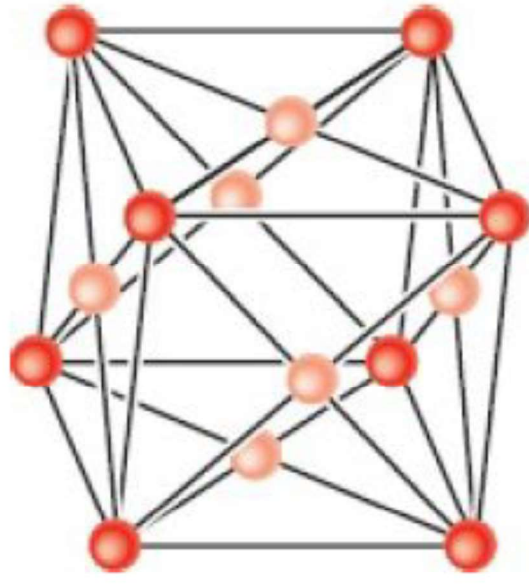
O átomo de germânio com 32 elétrons. A distribuição eletrônica é:



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Condução de eletricidade nos sólidos

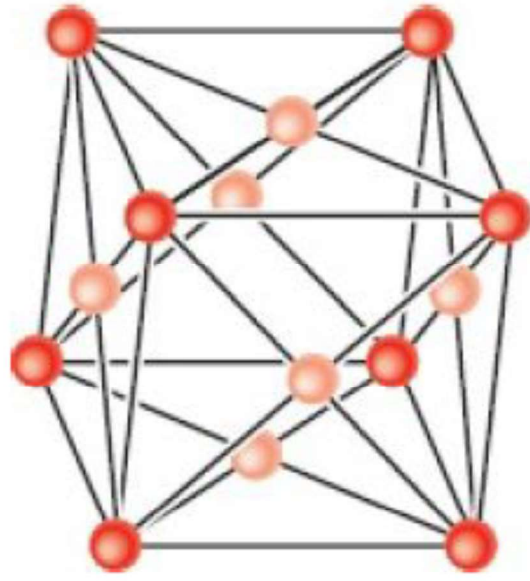
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS



Quais são os mecanismos por meio dos quais um material conduz, ou não conduz, uma corrente elétrica?

Condução de eletricidade nos sólidos

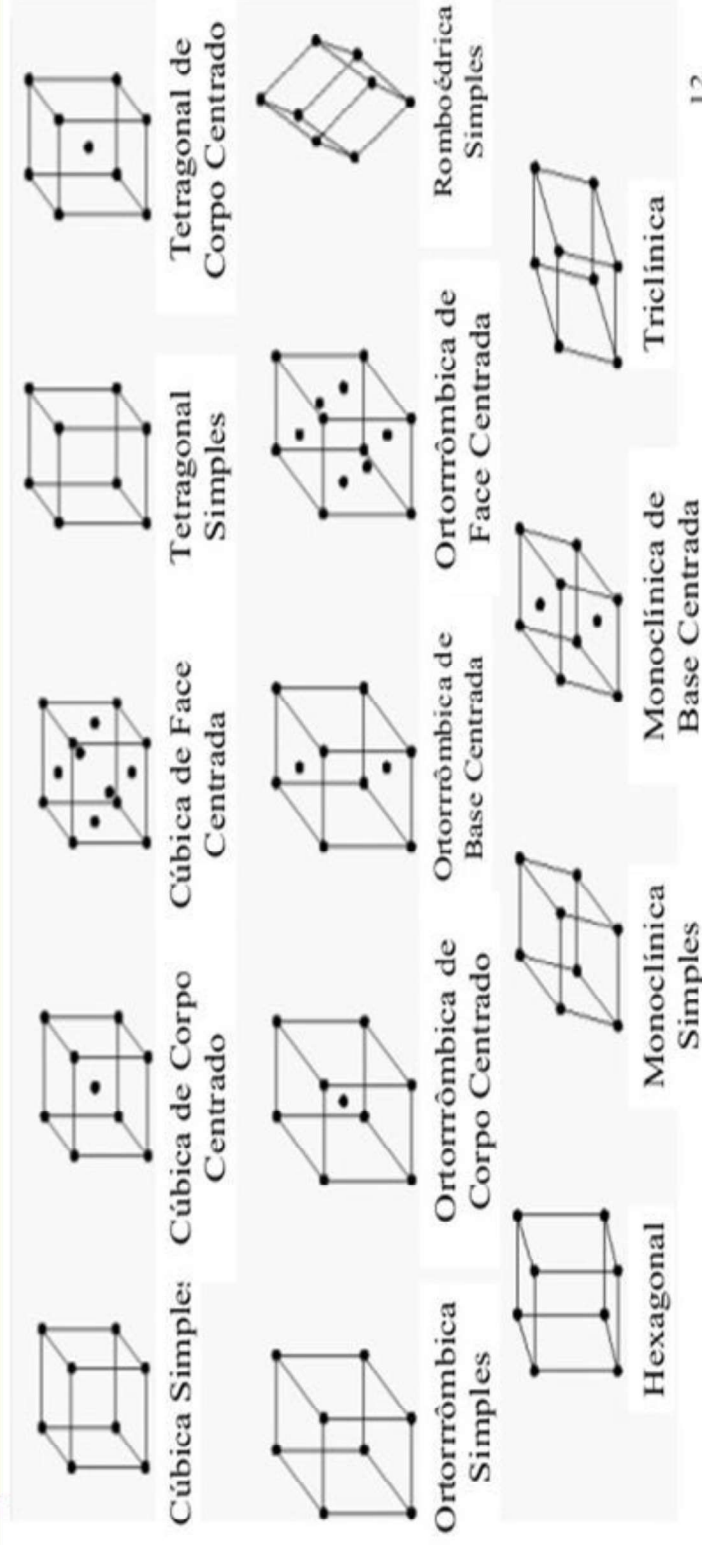
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS



Sólidos cristalinos são estruturas, cujos átomos estão dispostos de forma periódica tridimensional, conhecida como **rede cristalina**.

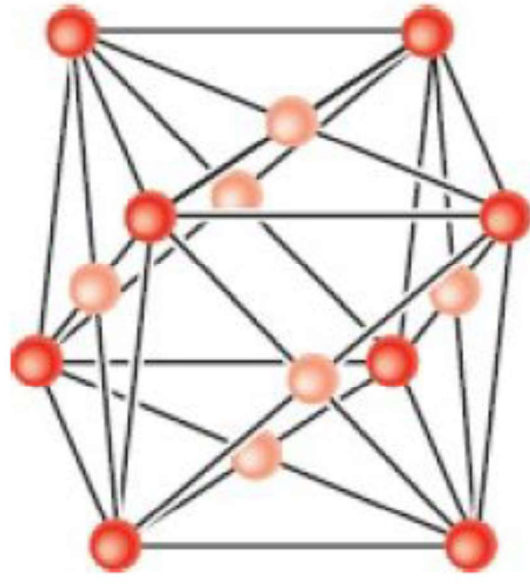
Quais são os mecanismos por meio dos quais um material conduz, ou não conduz, uma corrente elétrica?

REDES DE BRAVAIS.



Condução de eletricidade nos sólidos

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS

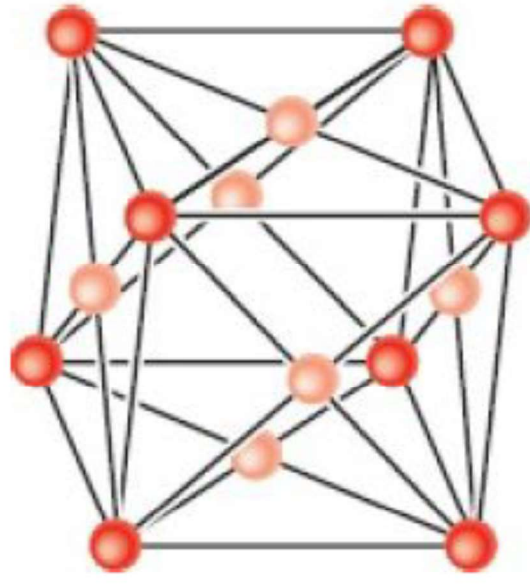


Sólidos cristalinos são estruturas, cujos átomos estão dispostos de forma periódica tridimensional, conhecida como **rede cristalina**.

- A resistividade r , cuja unidade no SI é o ohm-metro ($\Omega \cdot m$);

Condução de eletricidade nos sólidos

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS

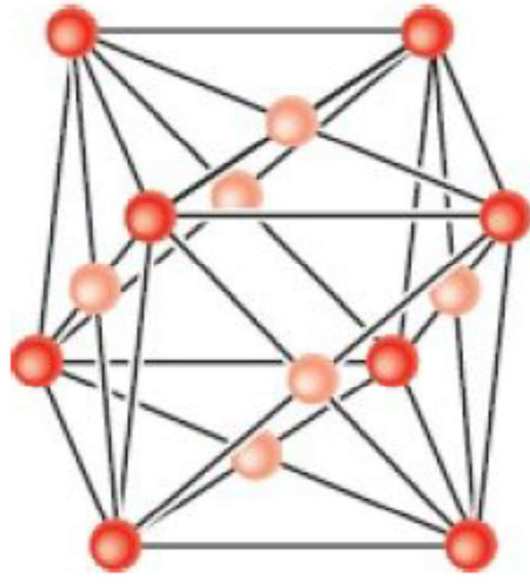


Sólidos cristalinos são estruturas, cujos átomos estão dispostos de forma periódica tridimensional, conhecida como **rede cristalina**.

- A resistividade r , cuja unidade no SI é o ohm-metro ($\Omega \cdot m$);
- O coeficiente de temperatura da resistividade α é definido pela relação $\alpha = (1/\rho)(d\rho/dT)$, cuja unidade no SI é o inverso do kelvin (K^{-1}).

Condução de eletricidade nos sólidos

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS



Sólidos cristalinos são estruturas, cujos átomos estão dispostos de forma periódica tridimensional, conhecida como **rede cristalina**.

- A resistividade ρ , cuja unidade no SI é o ohm-metro ($\Omega \cdot m$);
- O coeficiente de temperatura da resistividade α é definido pela relação $\alpha = (1/\rho)(dp/dT)$, cuja unidade no SI é o inverso do kelvin (K^{-1}).
- A concentração de portadores de carga n .

Condução de eletricidade nos sólidos

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS

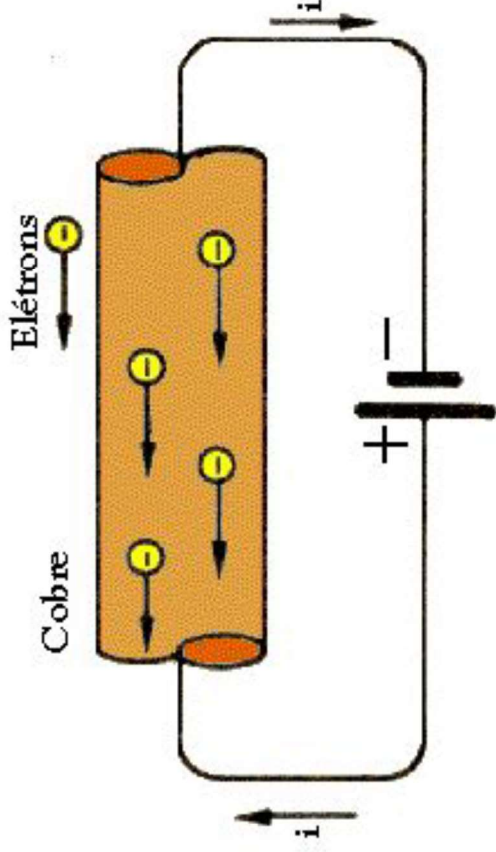


A resistividade elétrica de materiais isolantes é extremamente elevada.

Medindo a resistividade de diferentes materiais, constatamos que existem alguns materiais, os chamados isolantes, que, para todos os efeitos práticos, não conduzem eletricidade.

Condução de eletricidade nos sólidos

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS



Os semicondutores possuem uma resistividade ρ bem maior que a dos metais.

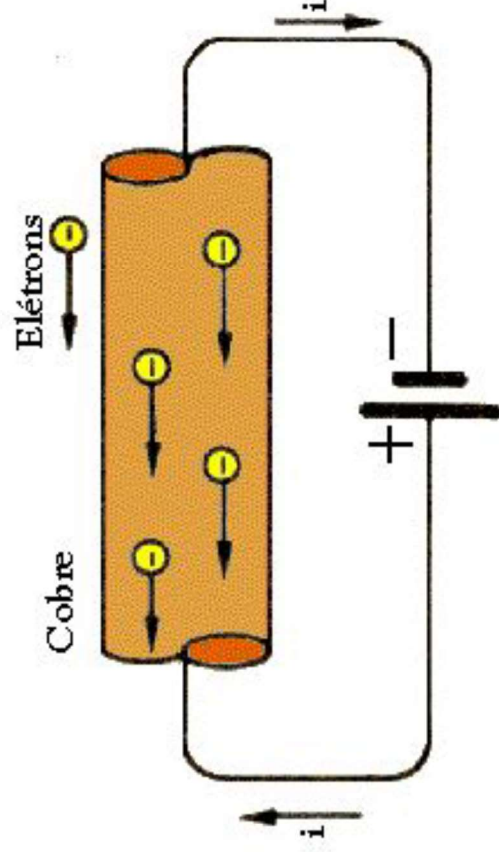
E os materiais, que não são isolantes:

- Os metais e;
- semicondutores.

Podemos usar as medidas de ρ , α e n para obter dados desses metais.

Condução de eletricidade nos sólidos

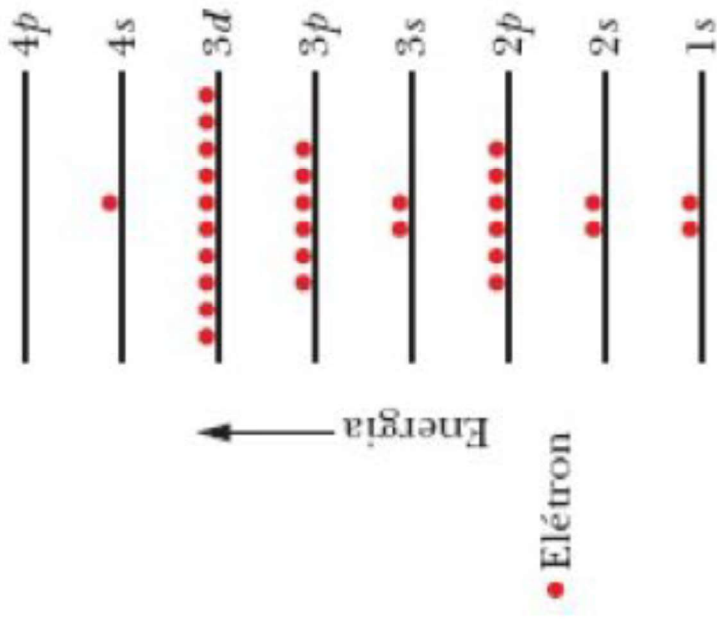
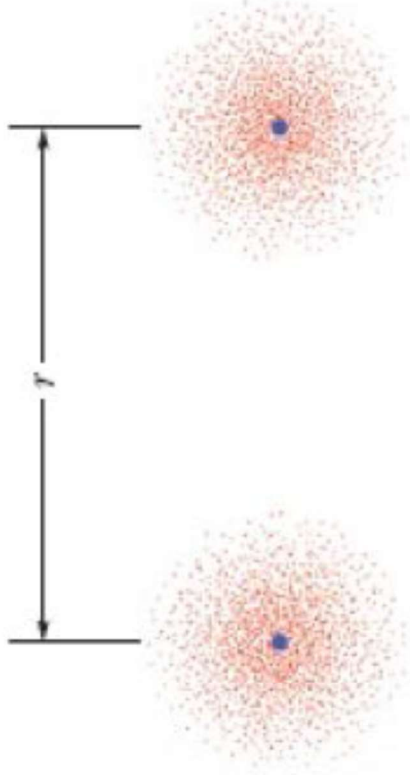
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS METAIS



Sólidos cristalinos são estruturas, cujos átomos estão dispostos de forma periódica tridimensional, conhecida como **rede cristalina**.

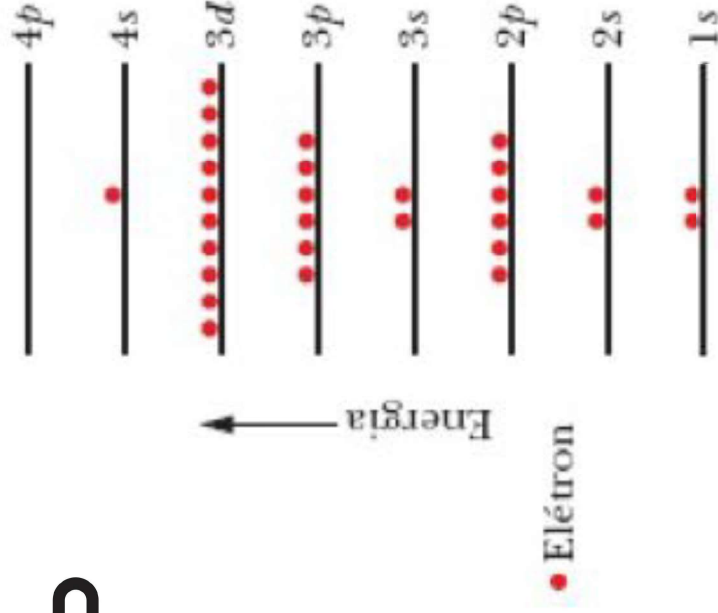
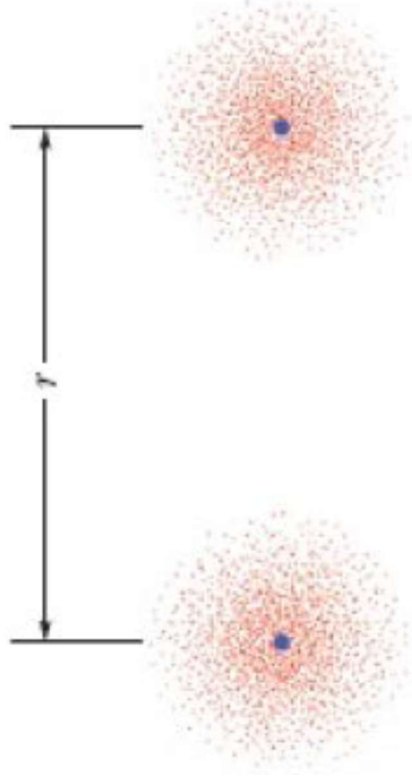
Medindo a resistividade de diferentes materiais, constatamos que existem alguns materiais, os chamados isolantes, que, para todos os efeitos práticos, não conduzem eletricidade.

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO



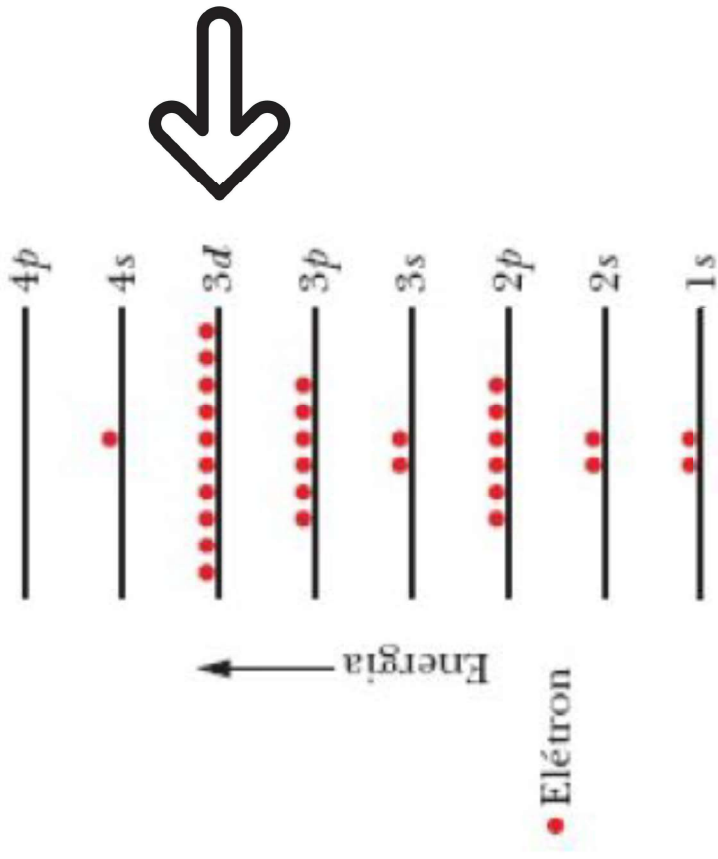
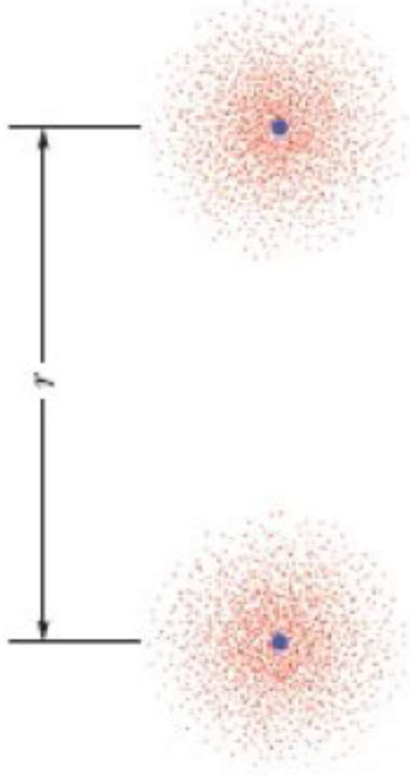
Dois átomos de cobre separados por uma grande distância; as distribuições de elétrons nos átomos estão representadas por gráficos de pontos.

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO



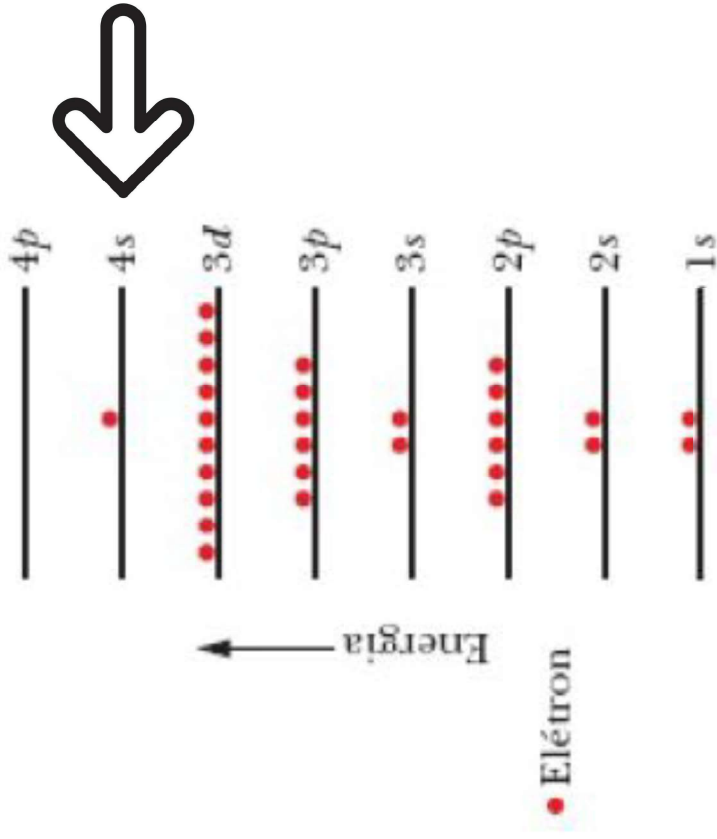
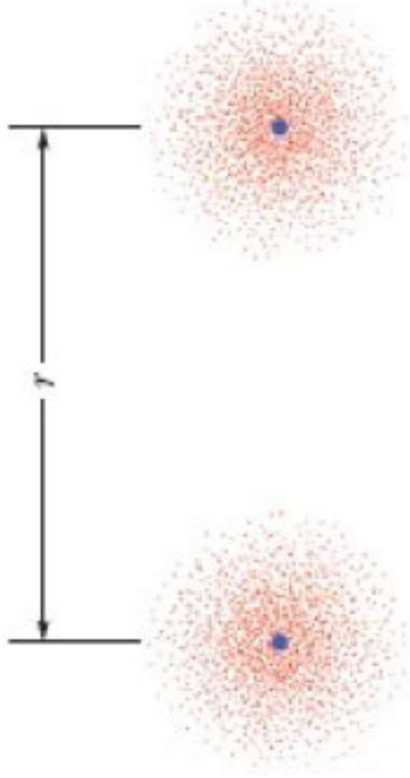
- Cada átomo de cobre possui 29 elétrons;

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO



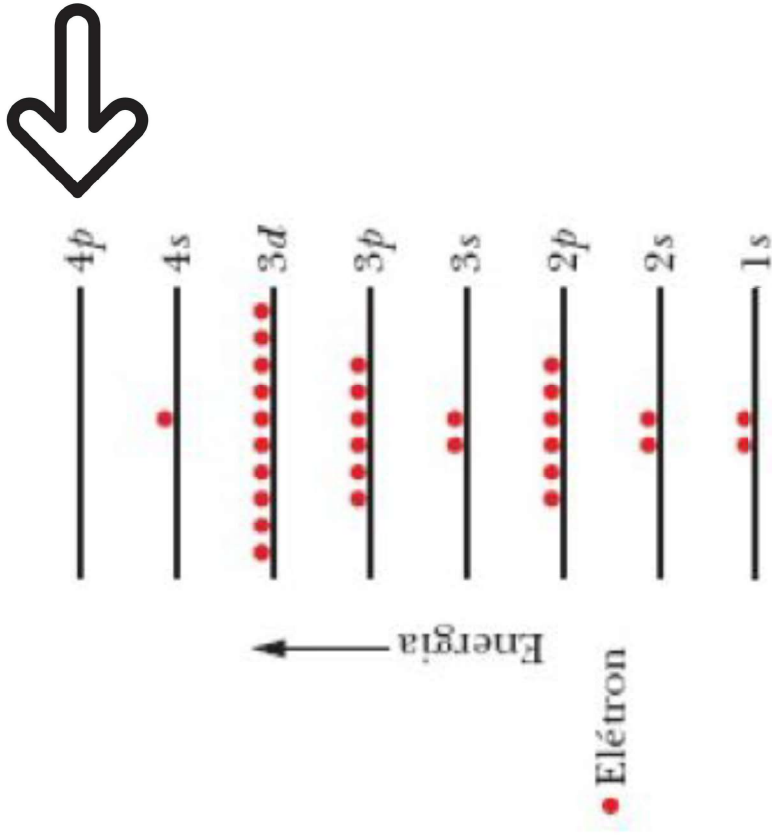
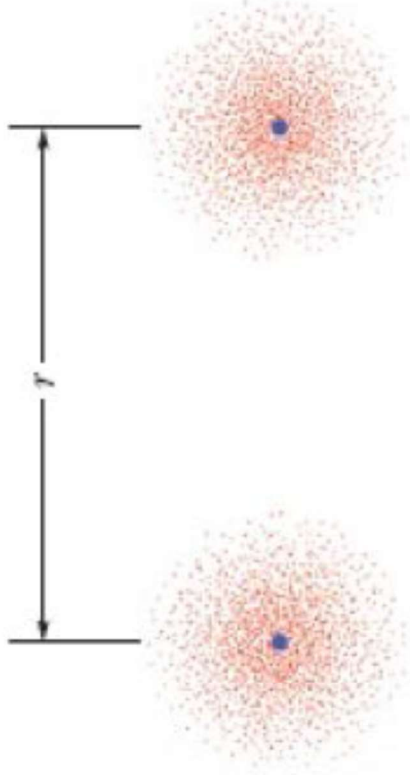
- Cada átomo de cobre possui 29 elétrons;
- Em um átomo neutro no estado fundamental, todas as subcamadas até o nível 3d estão totalmente ocupadas;

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO



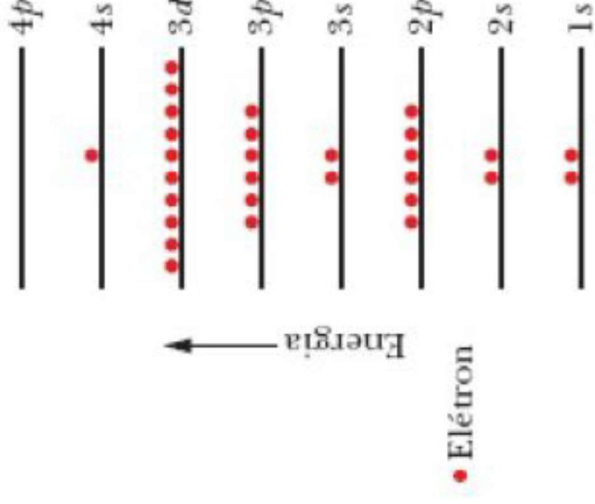
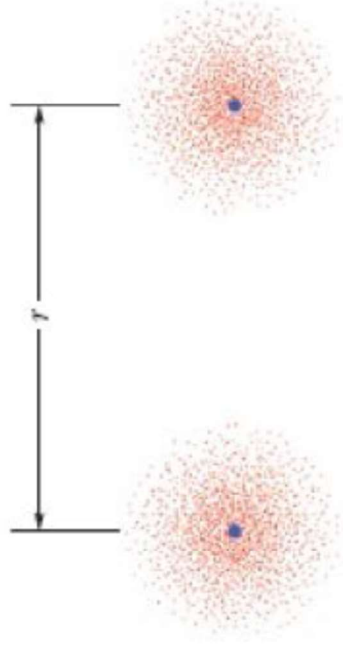
- Cada átomo de cobre possui 29 elétrons;
- Em um átomo neutro no estado fundamental, todas as subcamadas até o nível 3d estão totalmente ocupadas;
- A subcamada 4s contém um elétron (a subcamada pode acomodar dois elétrons);

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO



- Cada átomo de cobre possui 29 elétrons;
- Em um átomo neutro no estado fundamental, todas as subcamadas até o nível 3d estão totalmente ocupadas;
- A subcamada 4s contém um elétron (a subcamada pode acomodar dois elétrons);
- As subcamadas de maior energia estão vazias.

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO

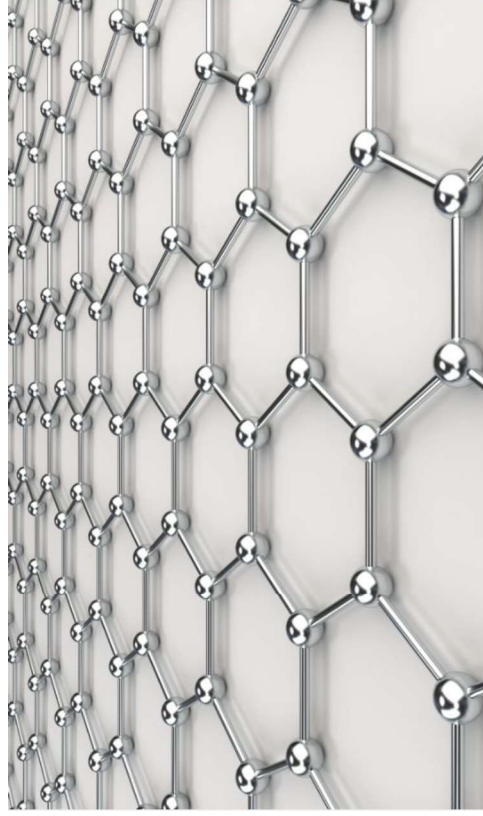


Quando aproximamos dois átomos como acima, as funções de onda se superpõem, temos portanto um sistema de dois átomos. Esse sistema, que, no caso do cobre, contém $2 \times 29 = 58$ elétrons, está sujeito ao princípio de exclusão de Pauli, o que significa que os 58 elétrons devem ocupar estados quânticos diferentes.

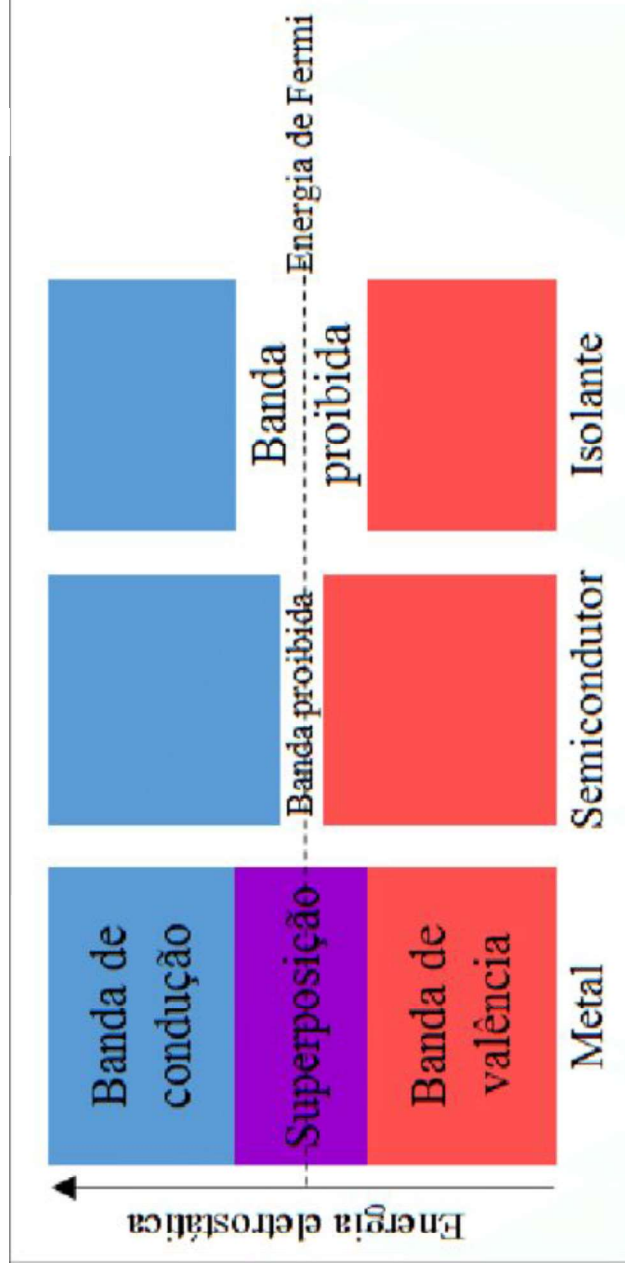


NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO

Rede cristalina



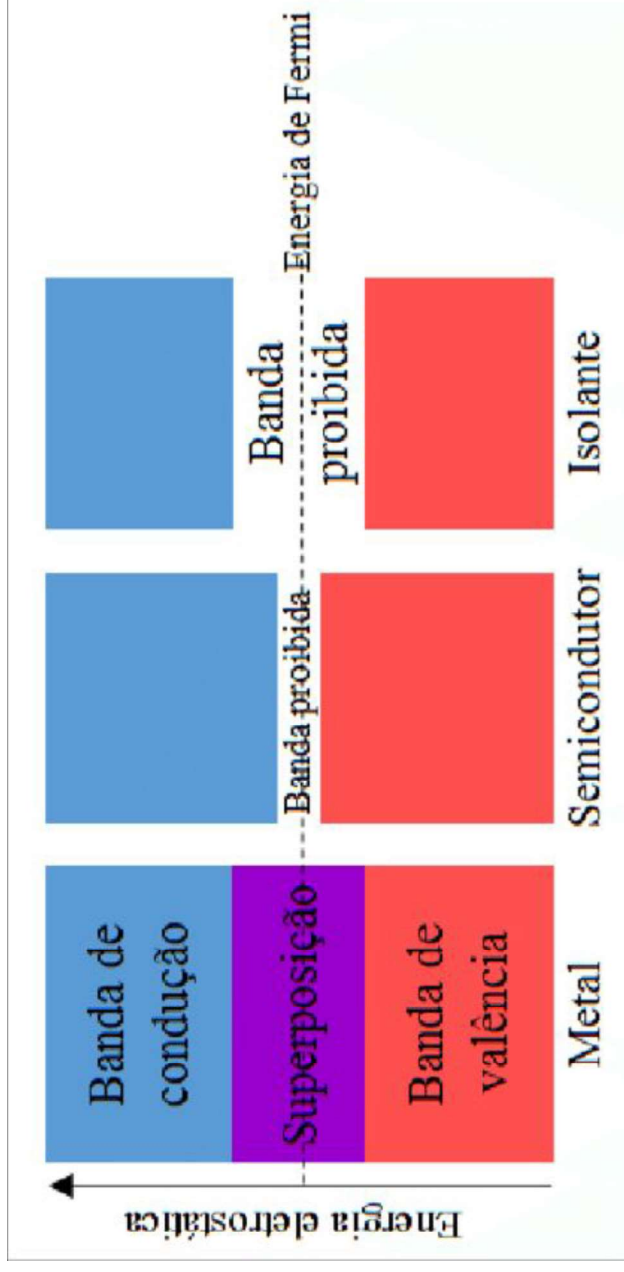
Bandas de energia



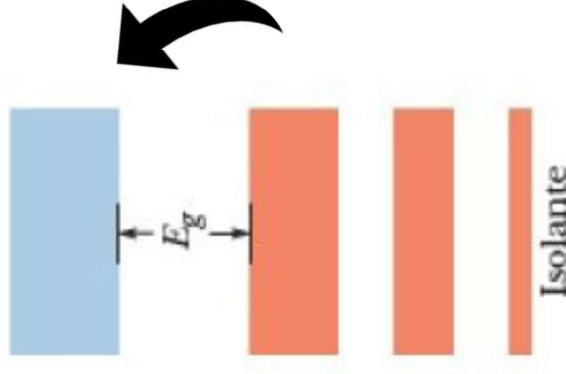
Assim, em uma rede cristalina, os N níveis de energia de um átomo isolado se desdobram para formar **BANDAS DE ENERGIA**, separadas por **BANDAS PROIBIDAS**, isto é, níveis de energia que nenhum elétron pode ocupar.

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO

Bandas de energia - Isolantes



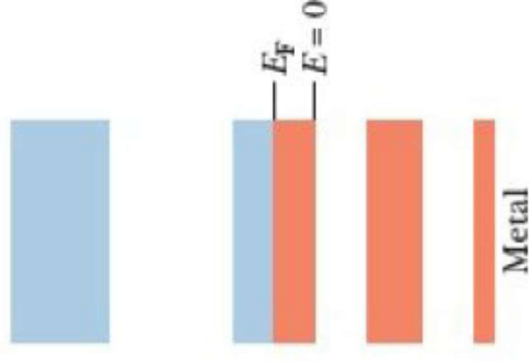
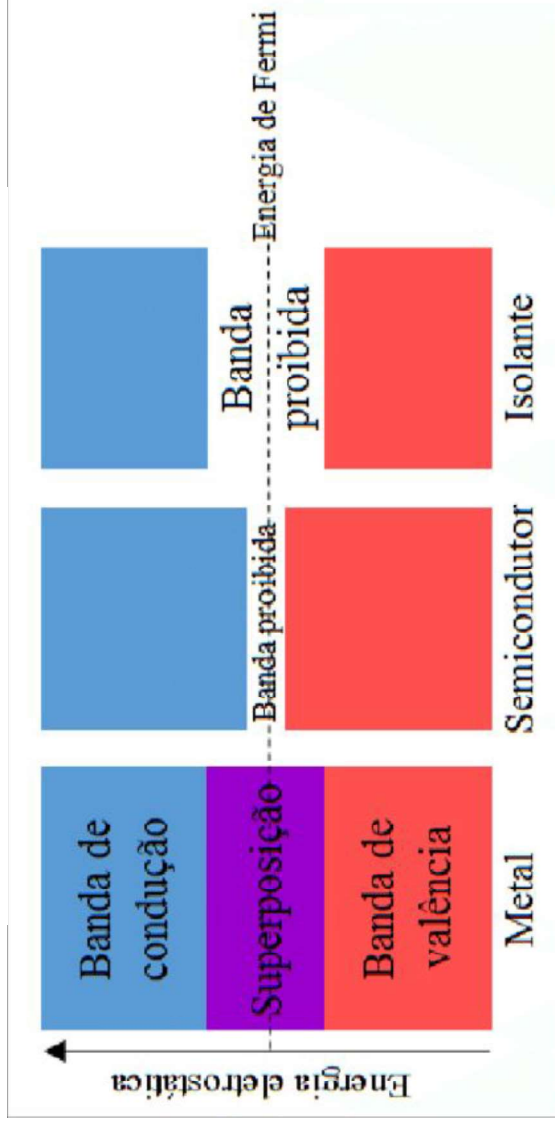
Nos isolantes, a energia dos elétrons precisa aumentar muito para que haja corrente.



Dizemos que uma substância é isolante se a aplicação de uma diferença de potencial à substância não produz uma corrente elétrica. Para que exista uma corrente elétrica, é necessário que a energia cinética média dos elétrons do material aumente. **Para isso, alguns elétrons devem passar para um nível mais alto de energia.**

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO

Bandas de energia - Metais

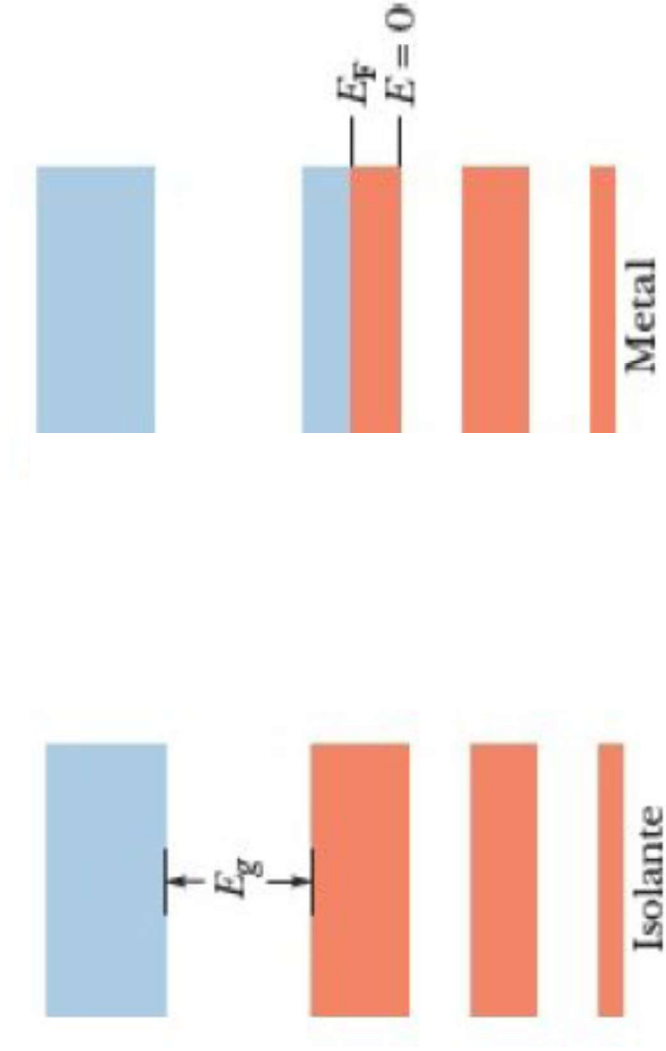


Nos metais, a energia dos elétrons não precisa aumentar muito para que haja corrente.

O que define um metal é que, o nível de energia mais alto ocupado pelos elétrons está perto do centro de uma banda de energias permitidas. Quando aplicamos uma diferença de potencial a um metal, produzimos uma corrente elétrica, já que existem muitos estados com uma energia ligeiramente maior para os quais os elétrons podem ser transferidos pela diferença de potencial.

NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SÓLIDO CRISTALINO

Níveis de Fermi

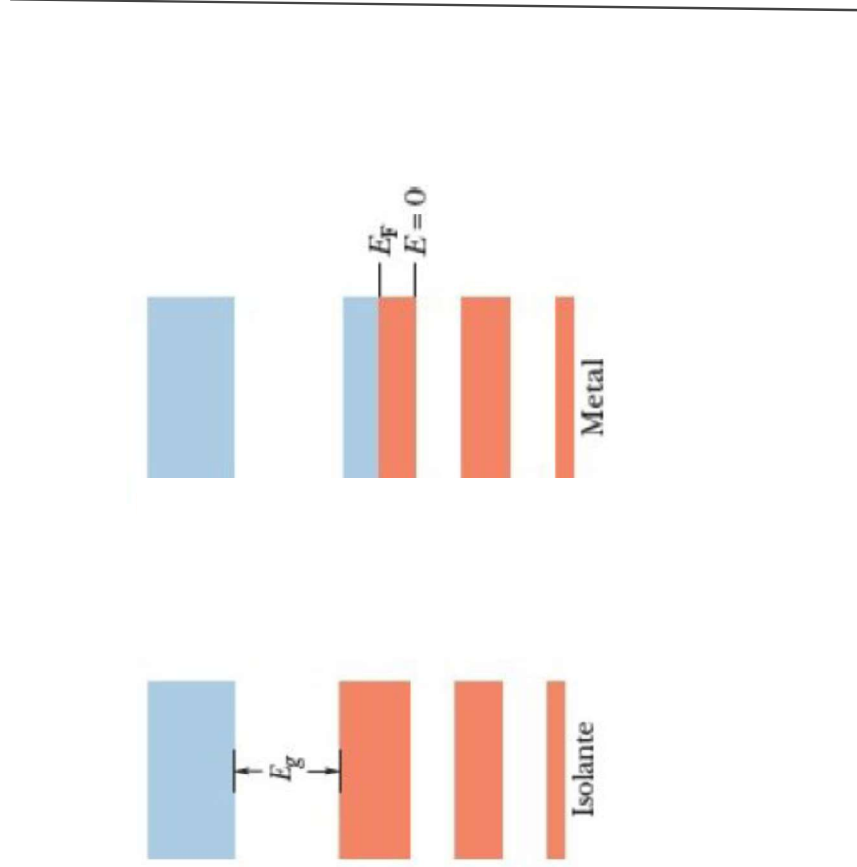
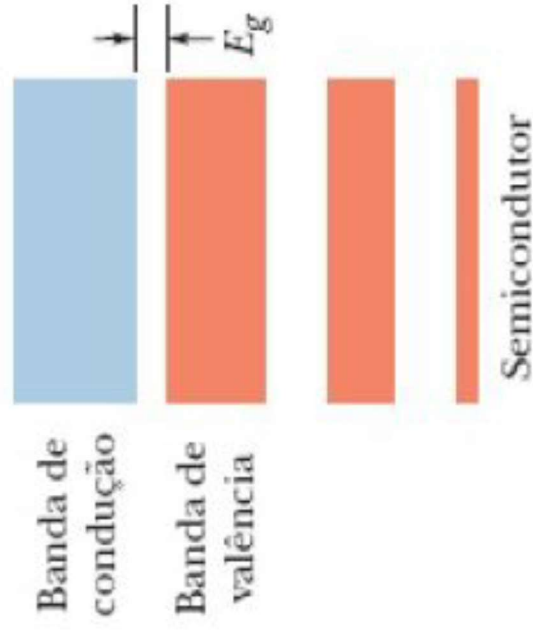


O nível mais alto ocupado da banda no zero absoluto ($T = 0$ K) é denominado nível de Fermi; a energia correspondente é chamada de energia de Fermi e representada pelo símbolo E_F . No caso do cobre, $E_F = 7,0$ eV.

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$$

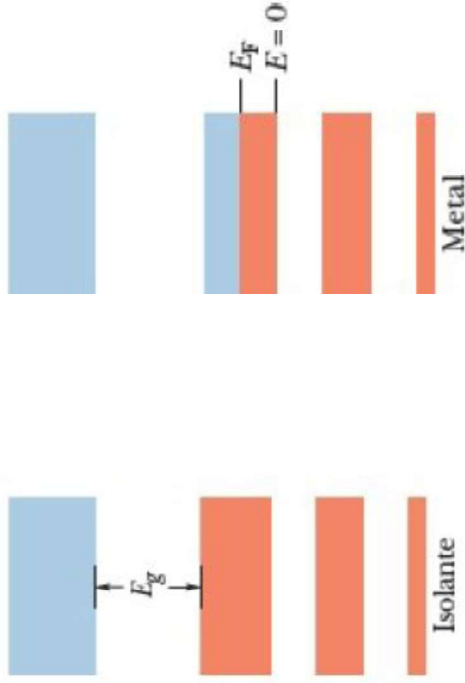
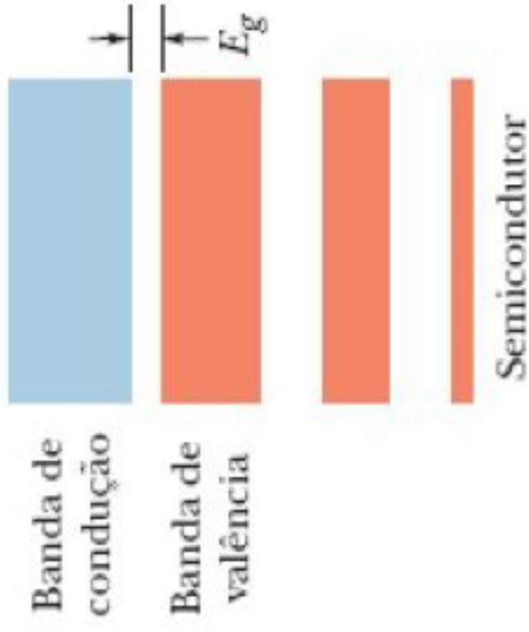
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS SEMICONDUTORES

Níveis de Fermi



PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS SEMICONDUTORES

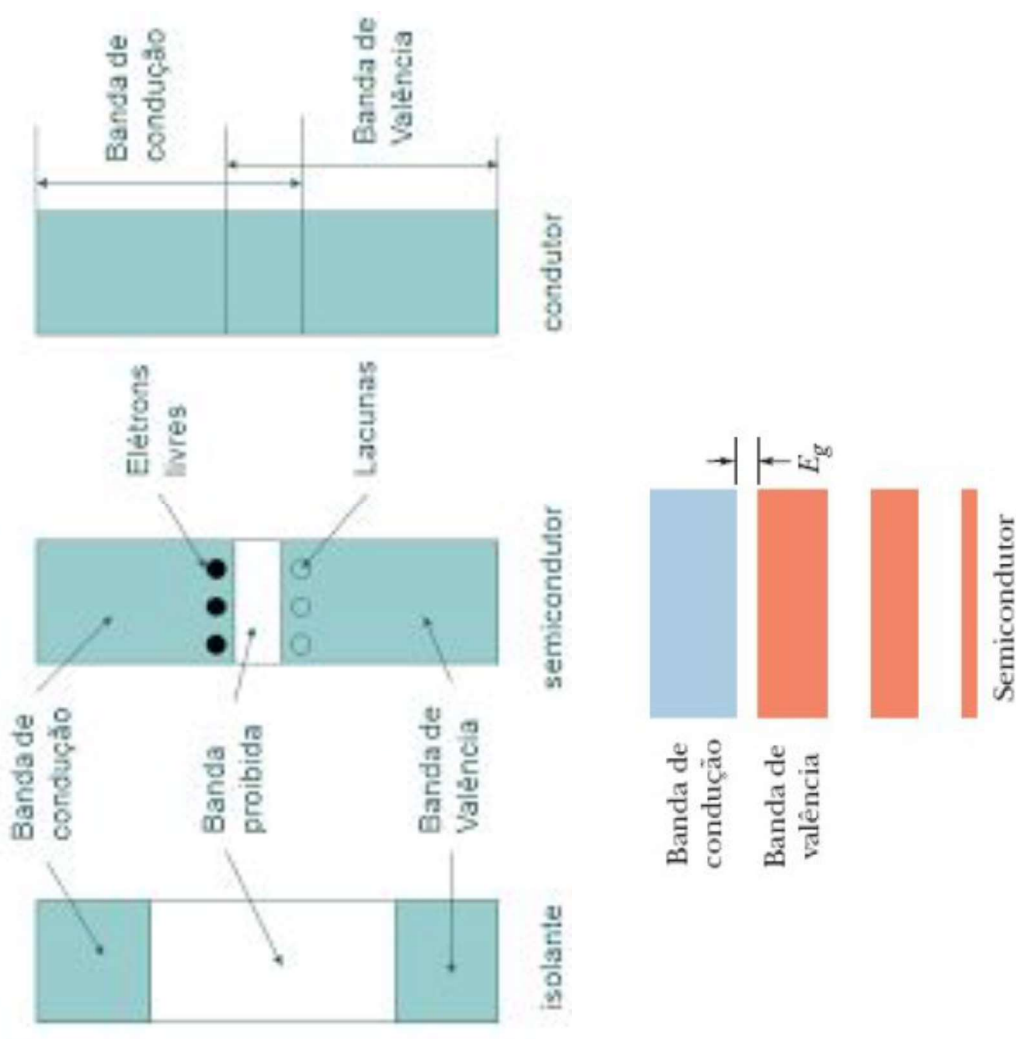
Níveis de Fermi



Vemos que a estrutura de bandas de um semicondutor é parecida com a de um isolante.

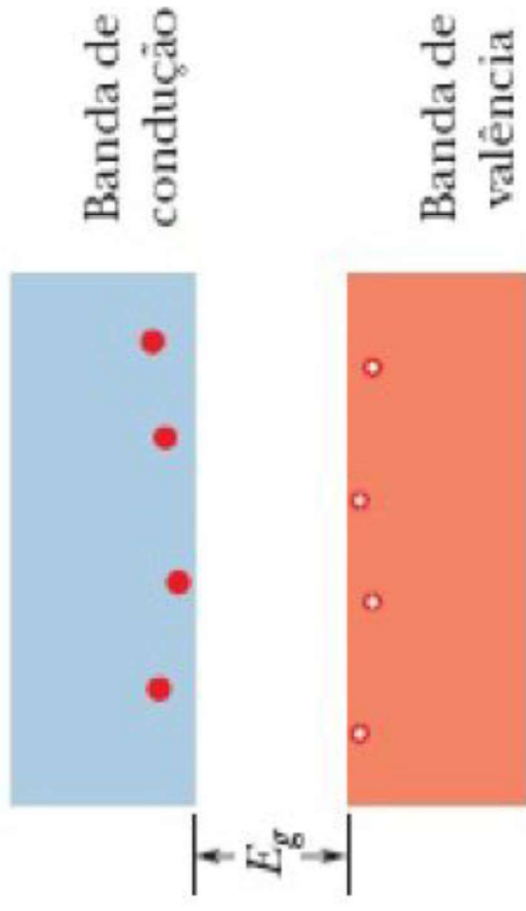
PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS SEMICONDUTORES

Nos semicondutores, a distância E_g entre o nível mais alto da última banda ocupada (a **banda de valência**) e o nível mais baixo da primeira banda desocupada (a **banda de condução**) é muito menor que nos isolantes.



PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS SEMICONDUTORES

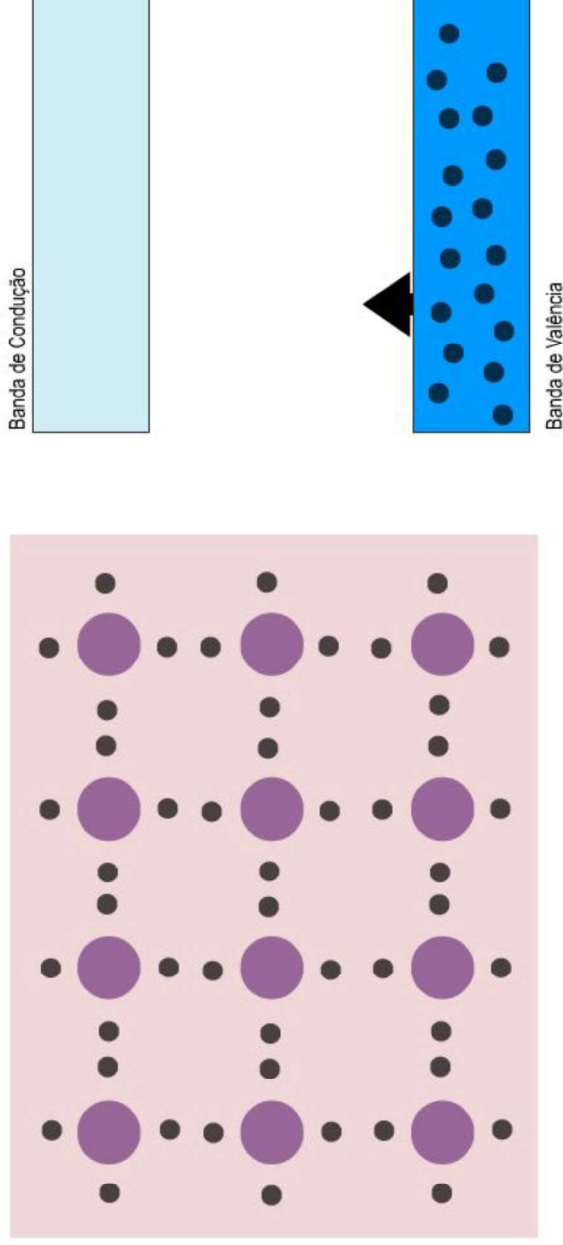
Banda de condução é a região dentro da banda de valência mais próxima ao nível de Fermi, parcialmente preenchida com elétrons.



Banda de energia formada por níveis de energia, ocupada por elétrons semilivres, que estão um pouco mais separados do núcleo que os demais.

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS SEMICONDUTORES

Banda de condução



Banda valência