

Cap.5 - Sólidos

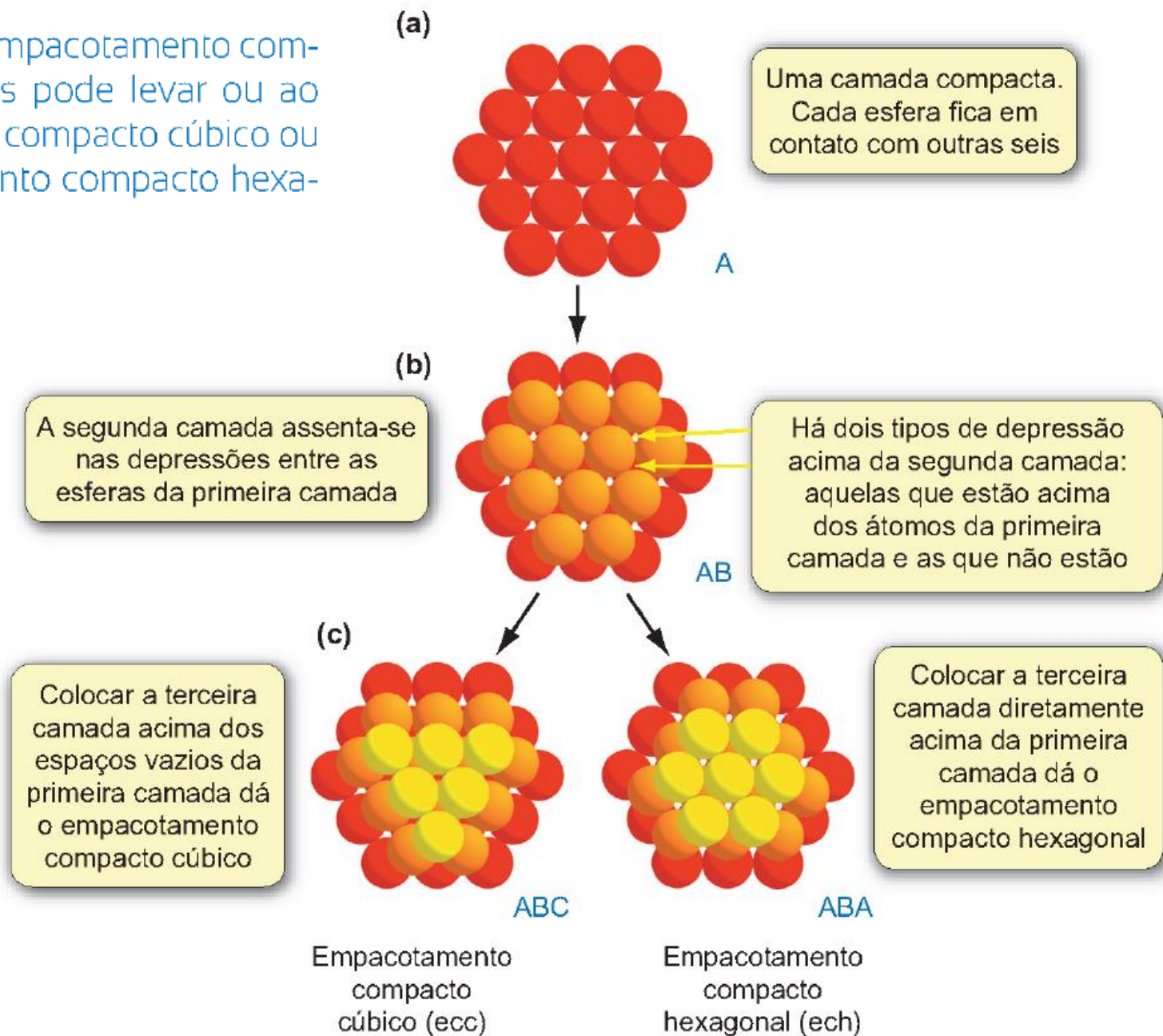
Sólidos

Estrutura de sólidos e célula unitária

Estrutura

- Estruturas baseadas no empacotamento de esferas:
 - Empacotamento compacto;

Figura 5.4 O empacotamento compacto de esferas pode levar ou ao empacotamento compacto cúbico ou ao empacotamento compacto hexagonal.



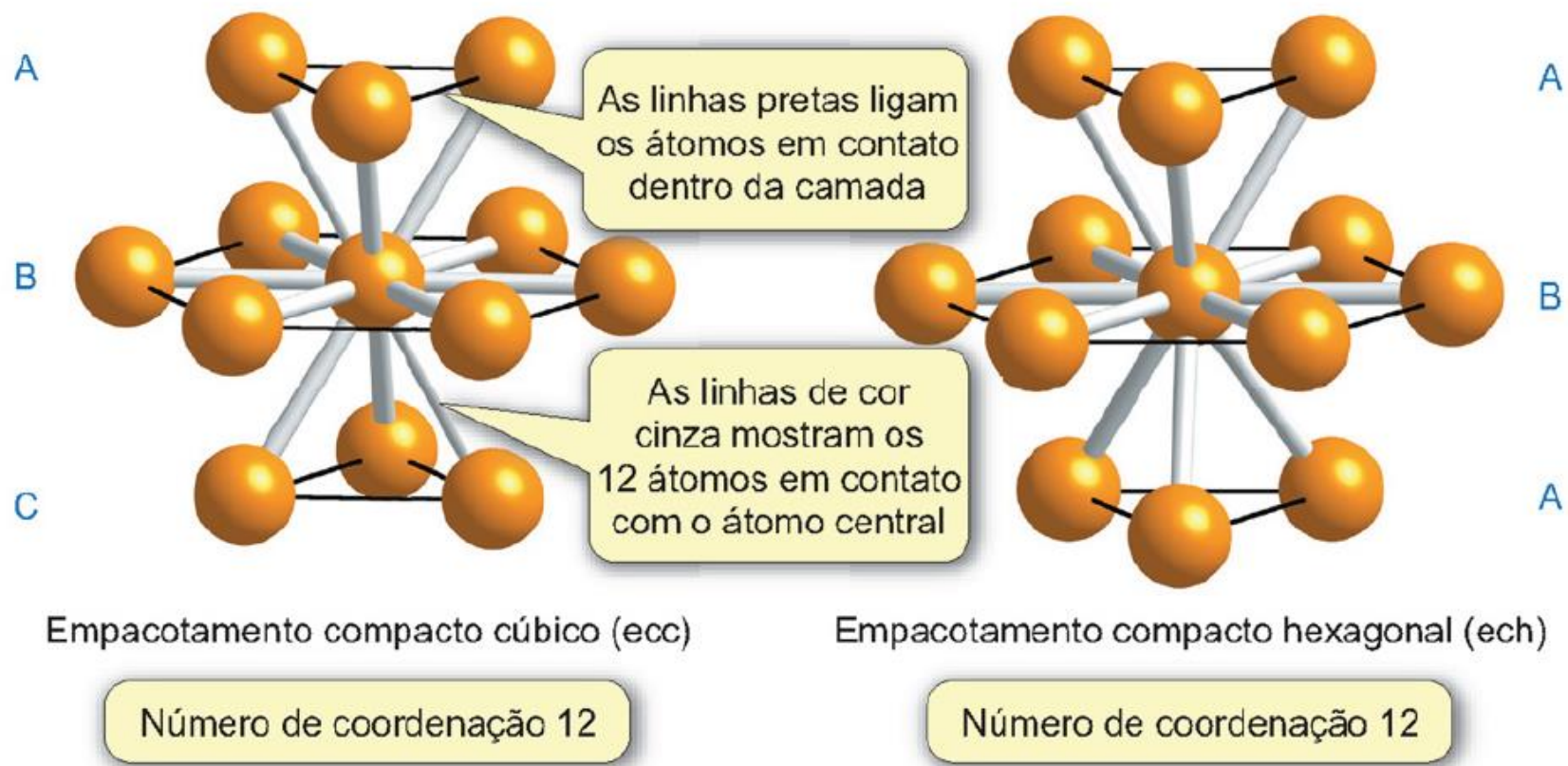
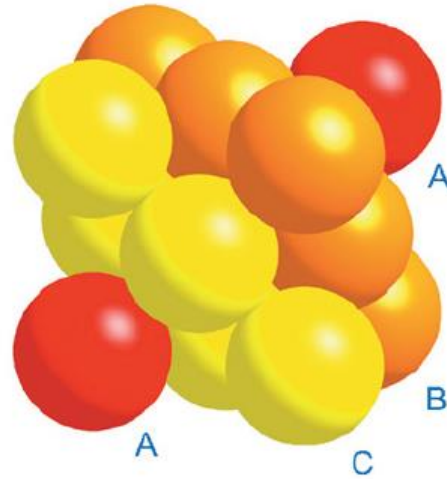


Figura 5.5 Os átomos nas estruturas de empacotamento compacto cúbico e empacotamento compacto hexagonal têm números de coordenação iguais a 12. Nesta figura, os átomos não são mostrados em contato para que suas geometrias sejam vistas mais claramente.

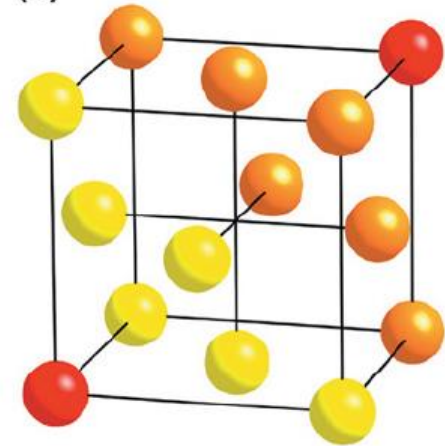
Estrutura

- Estruturas baseadas no empacotamento de esferas:
 - Empacotamento compacto;
 - Estruturas cúbicas;

(a)



(b)



A figura girou 55° a partir da vista apresentada na Figura 5.5.

Figura 5.6 As estruturas de empacotamento compacto cúbico geralmente são mostradas nessa orientação para enfatizar a simetria cúbica; (a) mostra a localização das camadas no empacotamento compacto, enquanto (b) mostra a geometria cúbica. Ao olhar figuras como esta, lembre-se de que os átomos estão realmente em contato um com o outro.

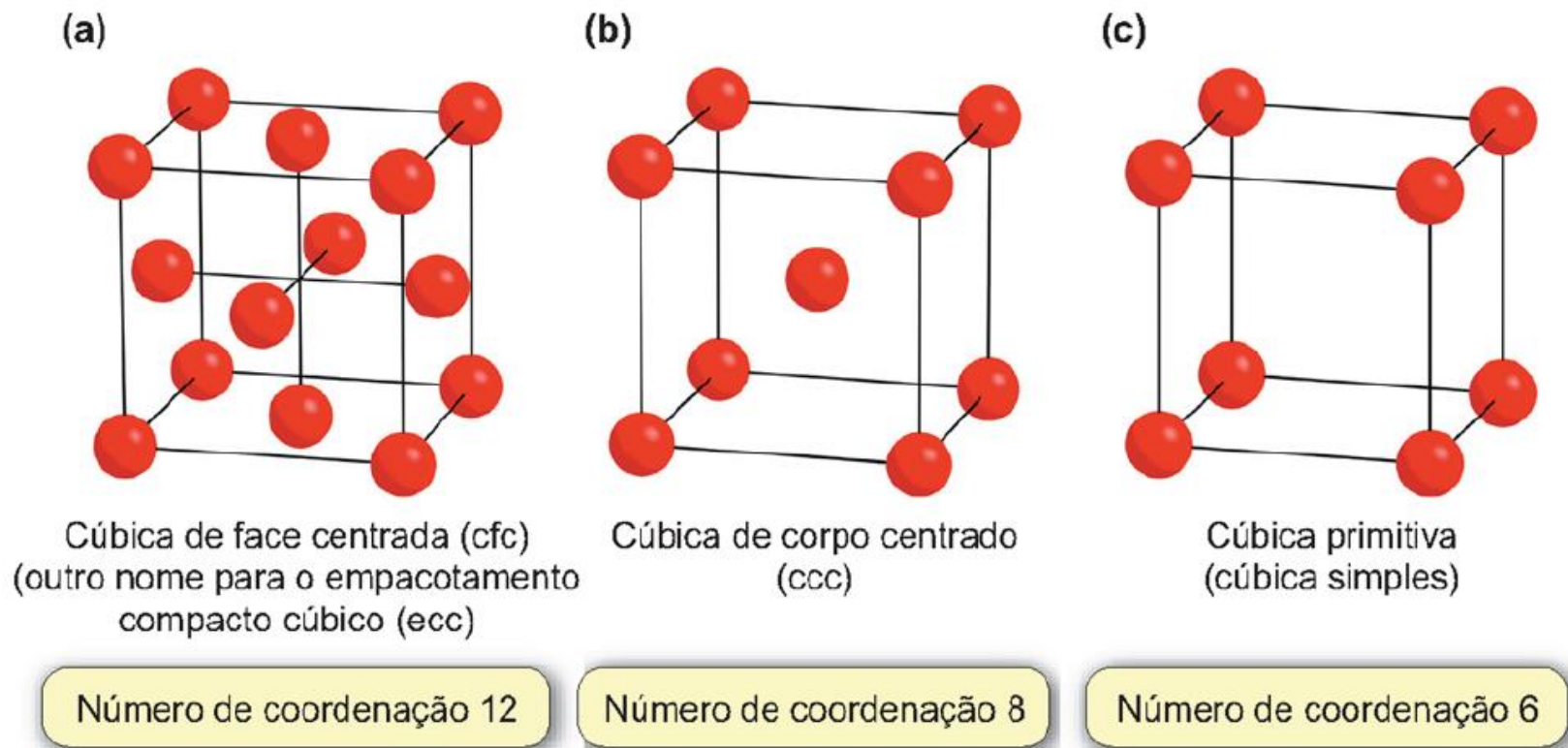
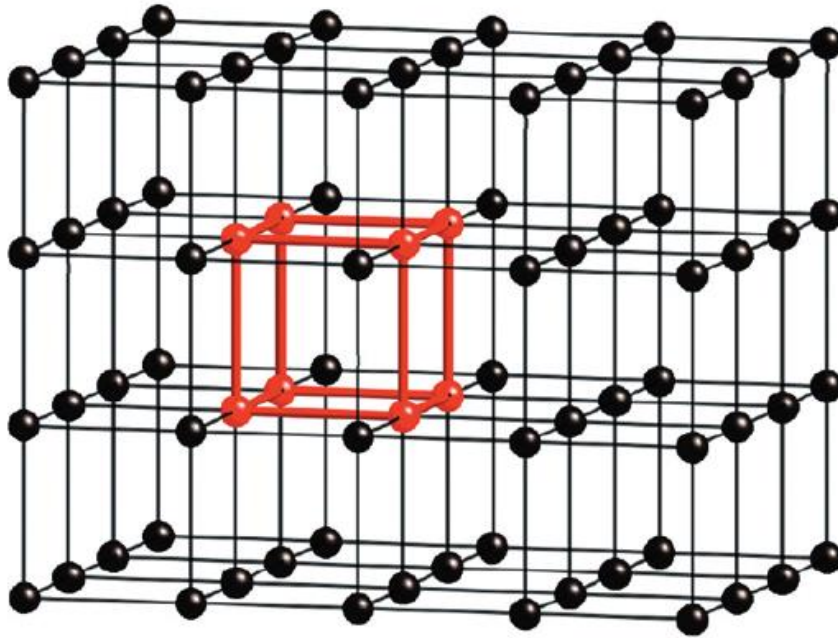


Figura 5.7 As células unitárias de importantes redes cúbicas. (a) Cúbica de face centrada (cfc), (b) cúbica de corpo centrado (ccc) e (c) cúbica primitiva.



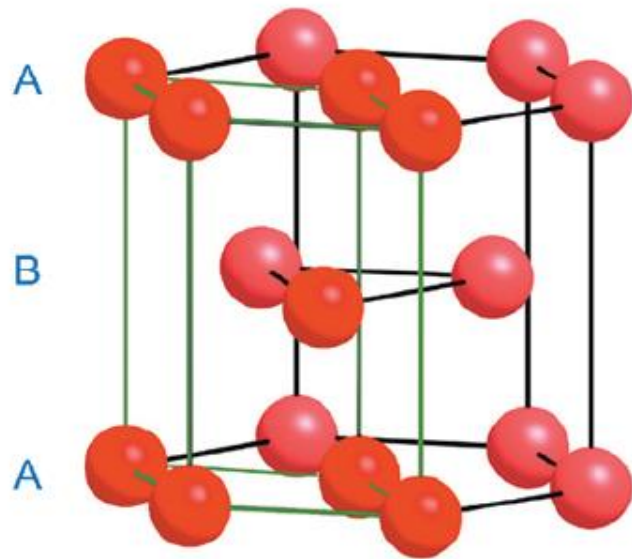
Repetir a célula unitária vermelha em três dimensões dá a estrutura cúbica primitiva

Figura 5.8 A célula unitária é a menor unidade repetidora em uma estrutura cristalina. Repetir a célula unitária vermelha em três dimensões dá a estrutura cúbica primitiva.

Estrutura

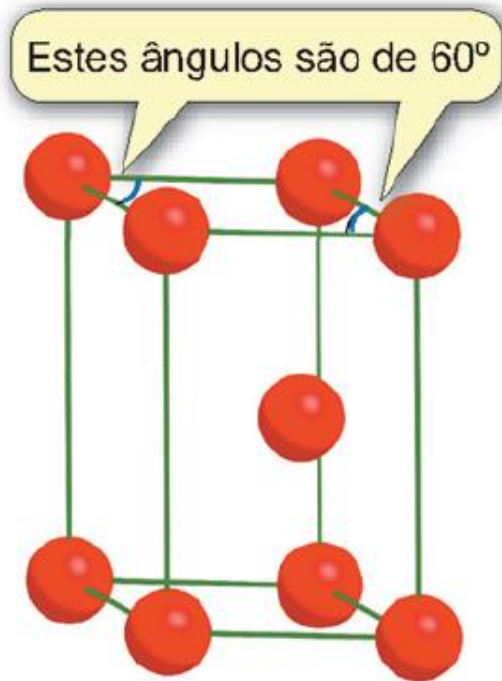
- Estruturas baseadas no empacotamento de esferas:
 - Empacotamento compacto;
 - Estruturas cúbicas;
 - Estruturas hexagonais;

(a)



Unidade repetidora hexagonal para o empacotamento compacto hexagonal

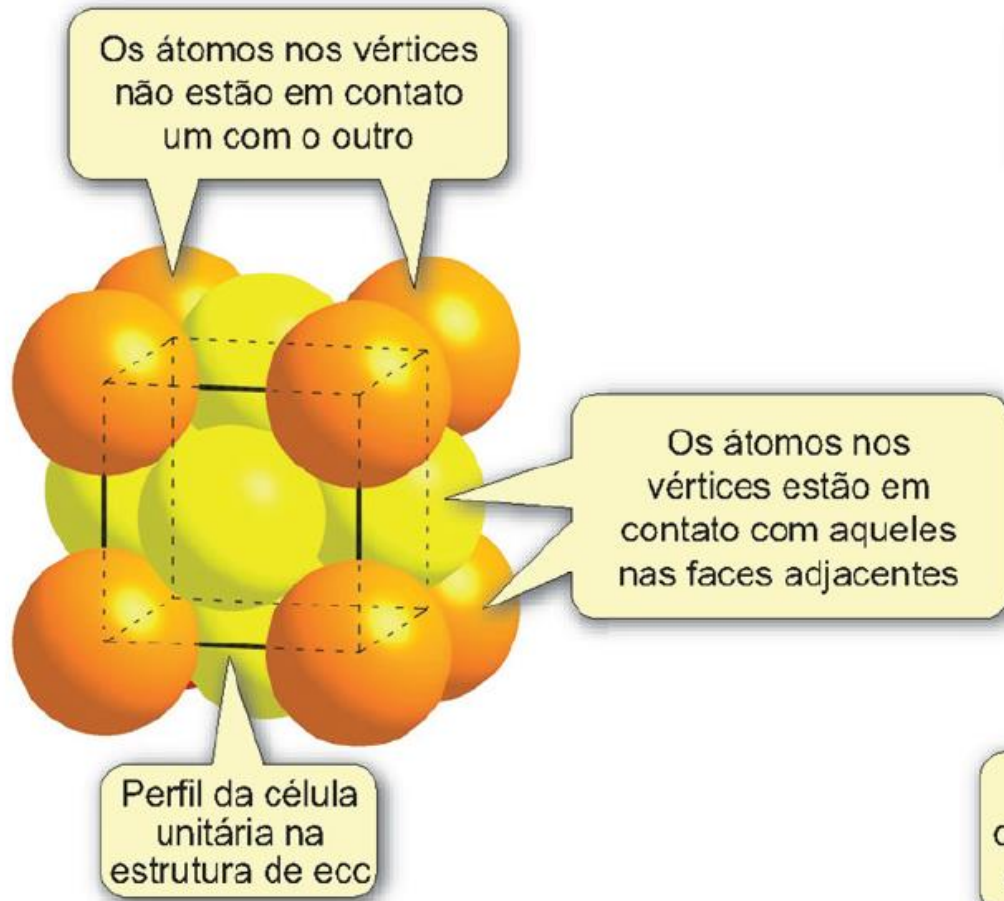
(b)



Célula unitária na estrutura de empacotamento compacto hexagonal

Figura 5.9 A estrutura de empacotamento compacto hexagonal. (a) A unidade repetidora hexagonal. (b) A célula unitária.

(a)



(b)

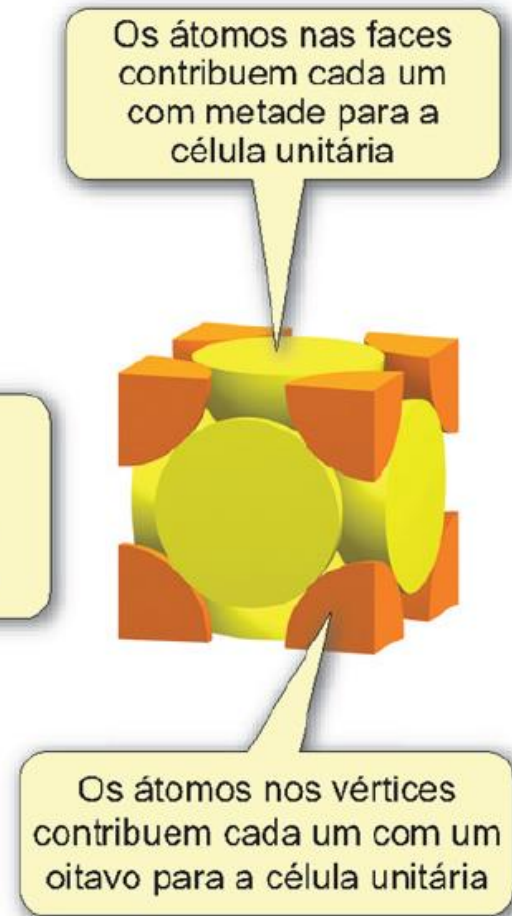


Figura 5.10 Nenhum dos átomos da célula unitária na estrutura de empacotamento compacto cúbico fica completamente dentro da célula – todos são compartilhados com células unitárias vizinhas; (a) mostra todos os átomos que contribuem para uma célula unitária e (b) mostra apenas as partes dos átomos que repousam dentro da célula unitária.

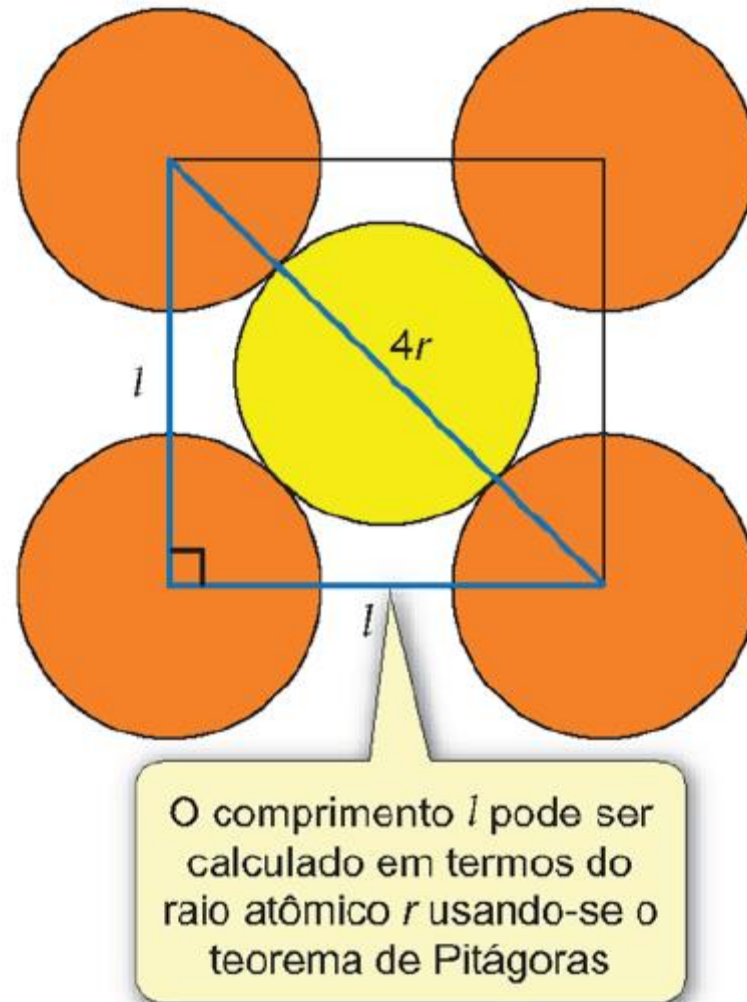


Figura 5.11 Uma face de uma célula unitária na estrutura de empacotamento compacto cúbico.

Exercício: Qual a eficiência de empacotamento da estrutura cúbica de corpo centrado?

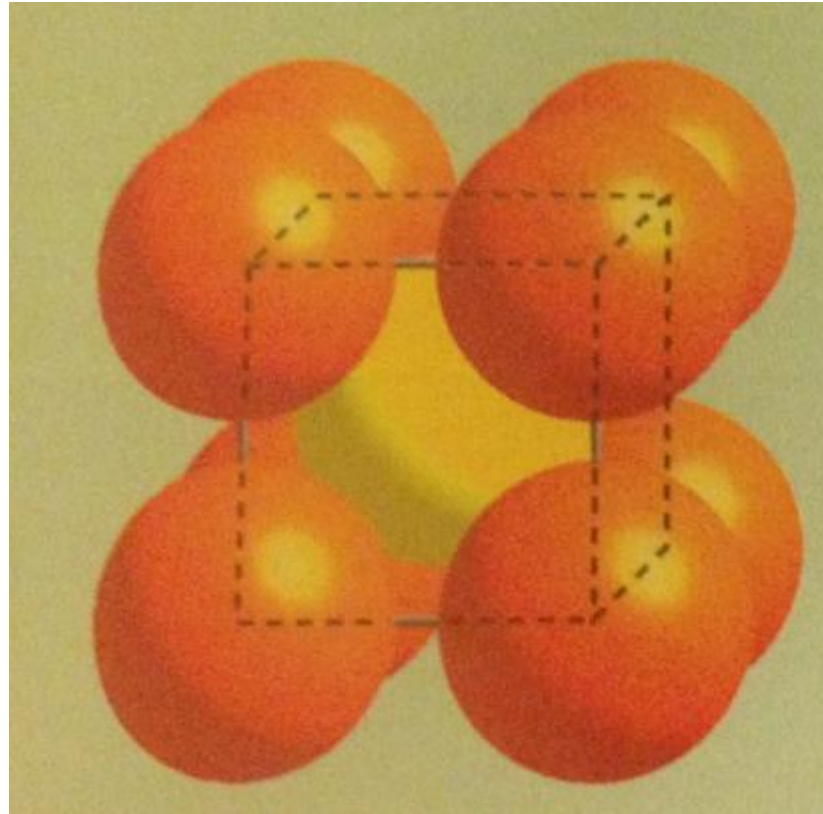
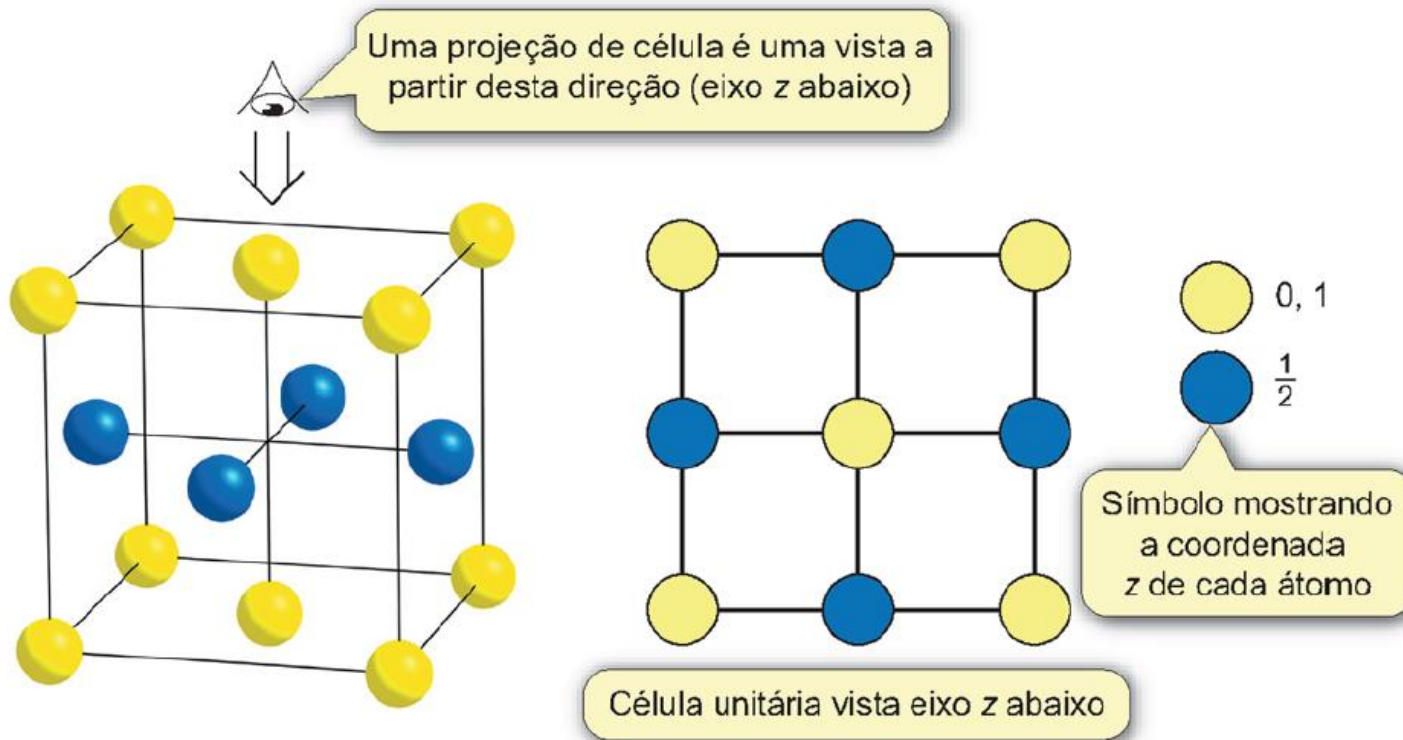


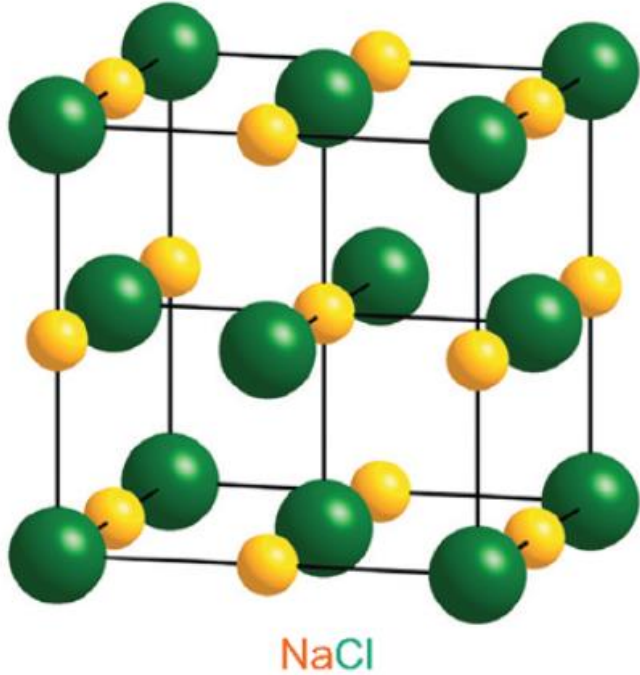
Diagrama de projeção das células



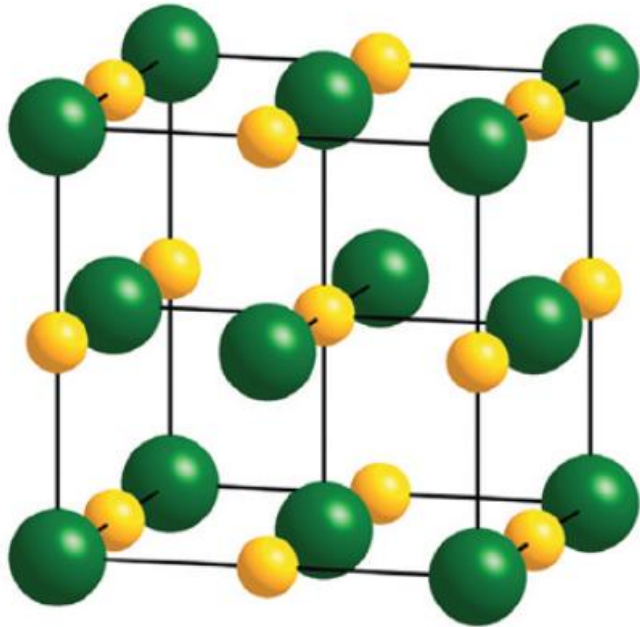
(a) Célula unitária na estrutura de ecc (b) Projeção de célula

Figura 5.12 (a) A célula unitária na estrutura de empacotamento compacto cúbico (ecc). (b) Um diagrama de projeção de célula para a estrutura de ecc. Os átomos de cores diferentes têm diferentes coordenadas z.

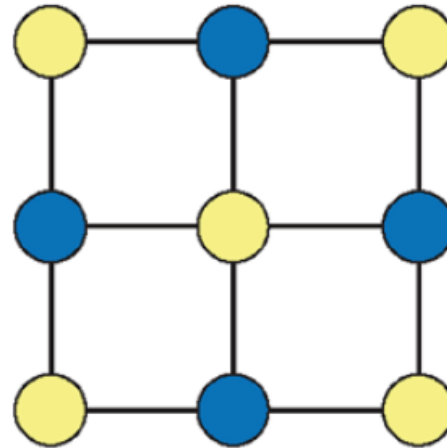
Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:



Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:

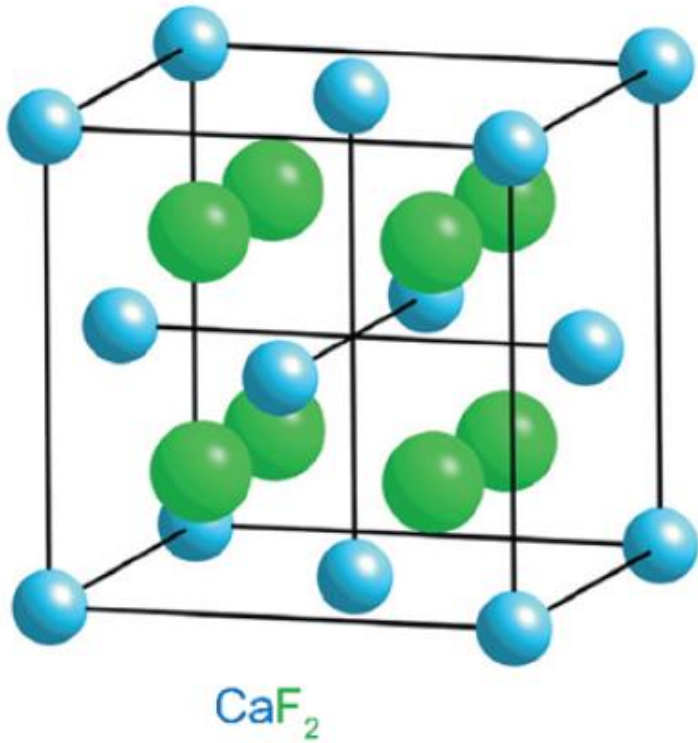


NaCl

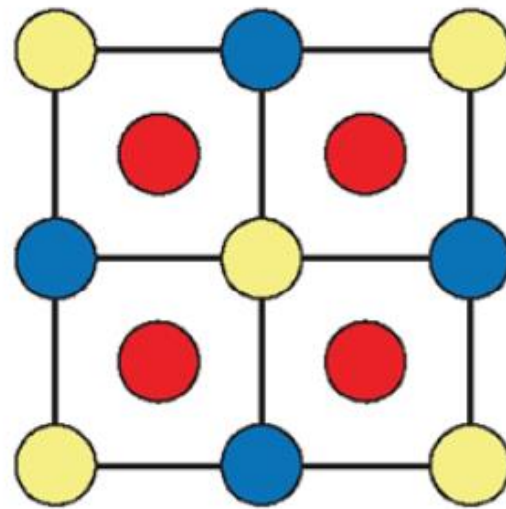
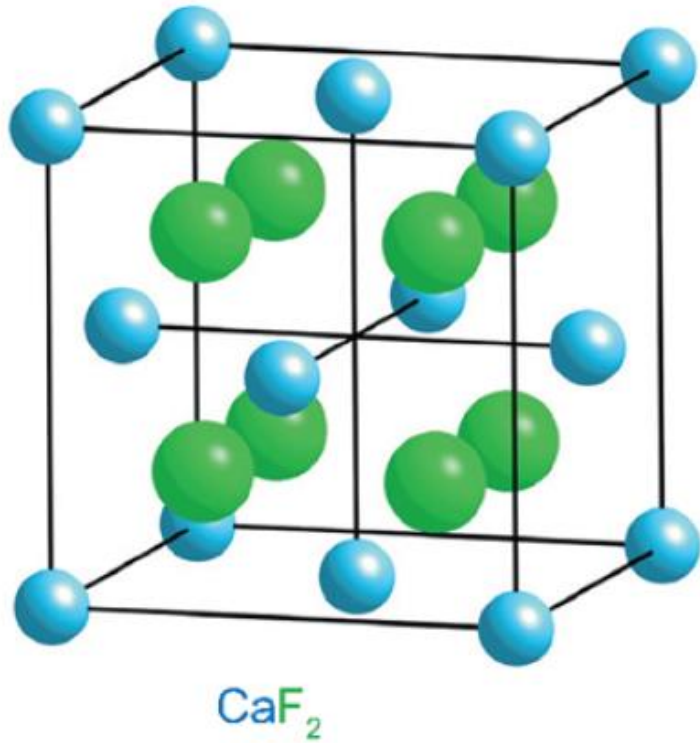


- Cl⁻ em 0 e 1, Na⁺ em $\frac{1}{2}$
- Cl⁻ em $\frac{1}{2}$, Na⁺ em 0 e 1

Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:

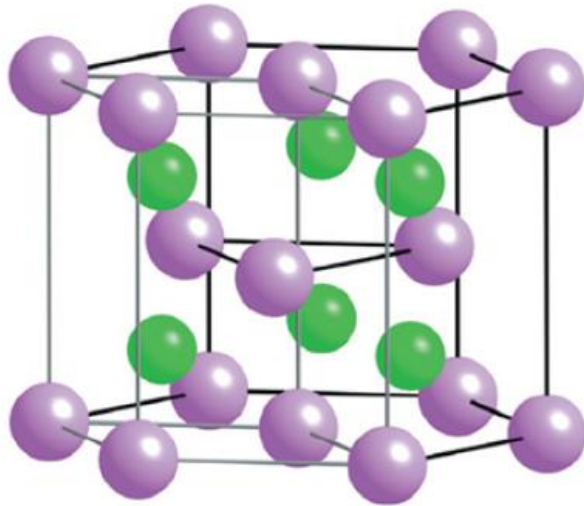


Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:



- Ca^{2+} em 0 e 1
- Ca^{2+} em $\frac{1}{2}$
- F^- em $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$

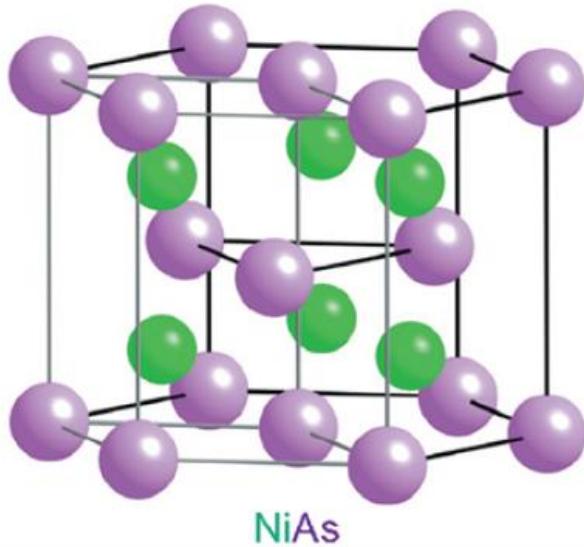
Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:



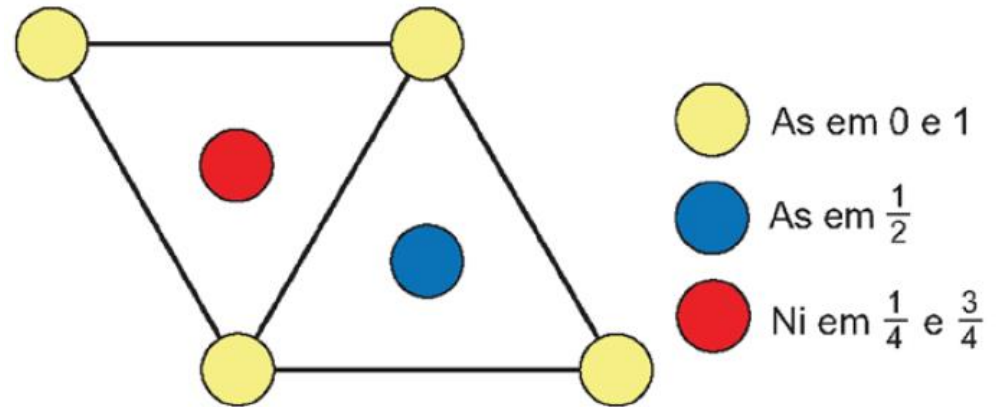
NiAs

A unidade repetidora hexagonal para o NiAs. A célula unitária é um terço disso, com suas fronteiras mostradas em cinza

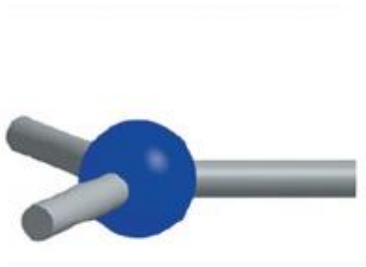
Diga a posição (0 a 1) de cada átomo:



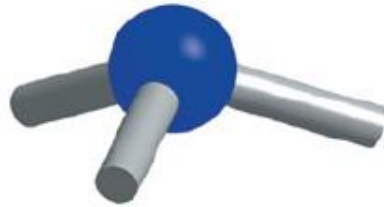
A unidade repetidora hexagonal para o NiAs. A célula unitária é um terço disso, com suas fronteiras mostradas em cinza



Sítios intersticiais



Trigonal plana



Trigonal piramidal



Tetraédrica



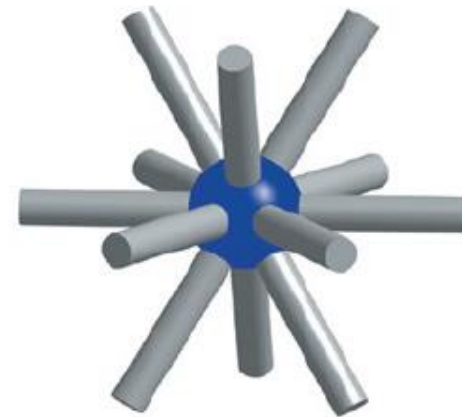
Octaédrica



Trigonal prismática



Cúbica



Cuboctaédrica

Figura 5.13 Exemplos de geometrias que podem ser observadas em sítios intersticiais.

Sítios intersticiais: estruturas compactas

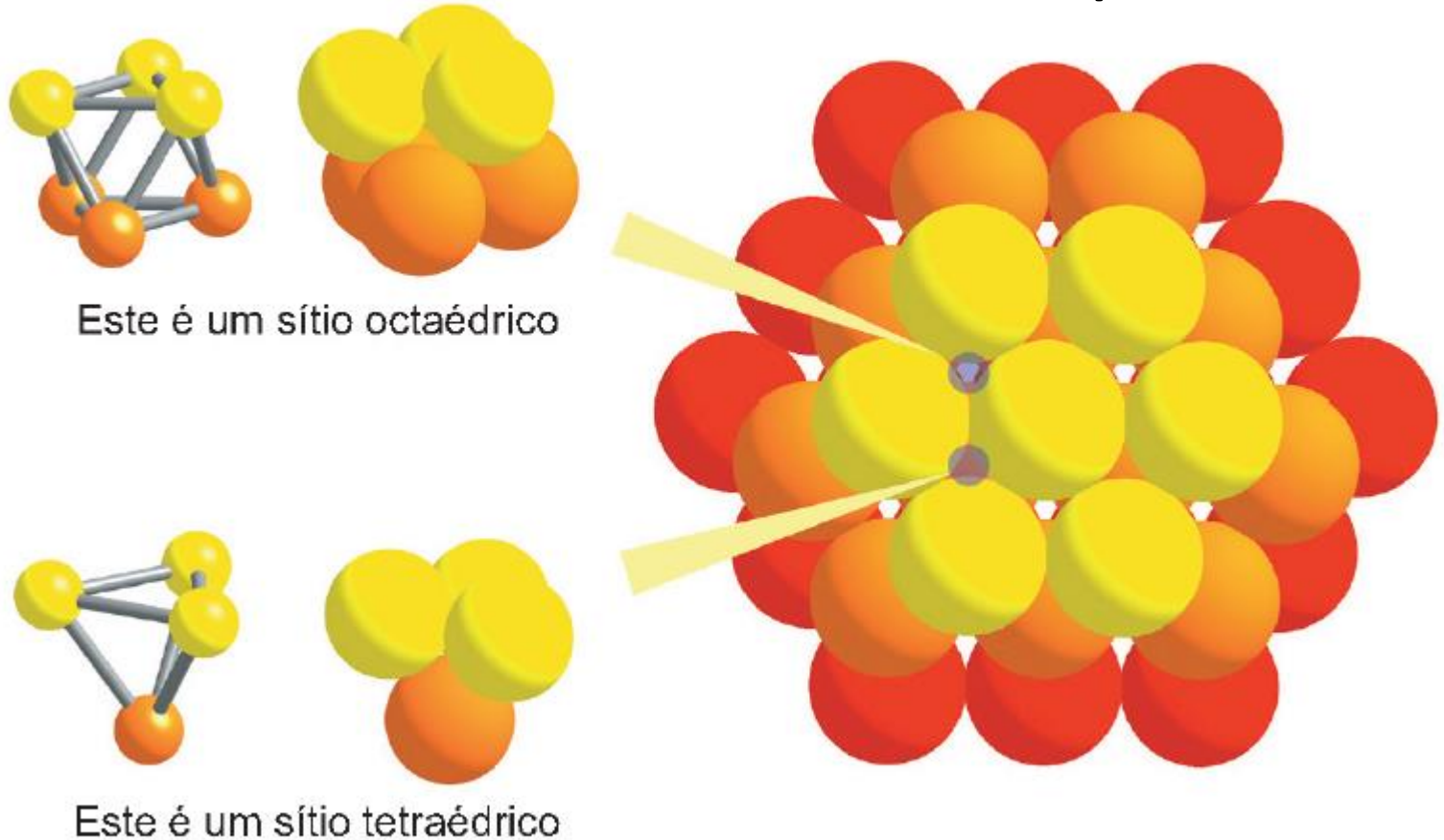
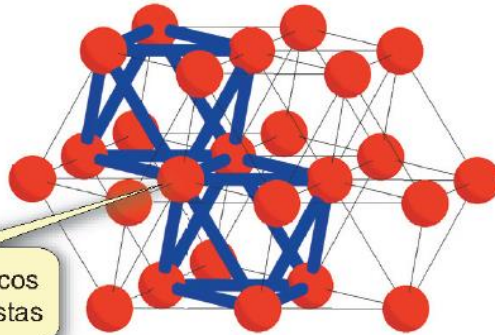


Figura 5.14 Exemplos dos sítios octaédricos e tetraédricos em uma estrutura de empacotamento compacto.

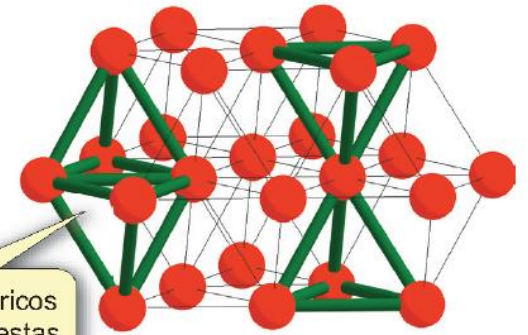
(a) Empacotamento compacto cúbico

Nesta figura, os átomos são mostrados pequenos para enfatizar as posições dos sítios octaédricos e tetraédricos

Os sítios octaédricos compartilham arestas

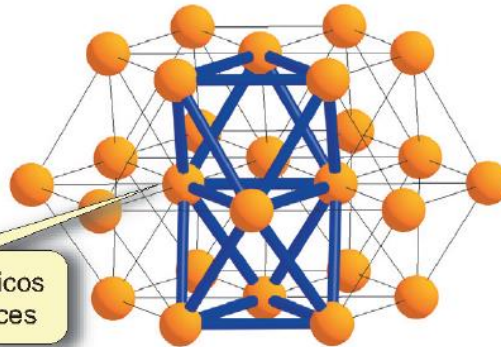


Os sítios tetraédricos compartilham arestas



(b) Empacotamento compacto hexagonal

Os sítios octaédricos compartilham faces



Os sítios tetraédricos compartilham faces

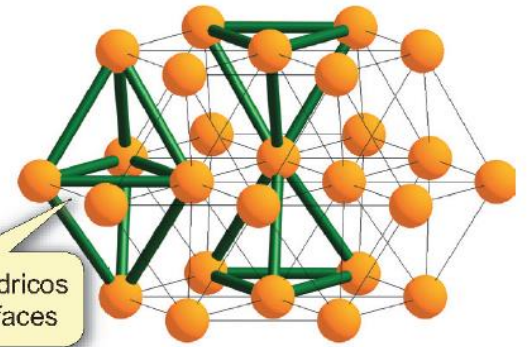
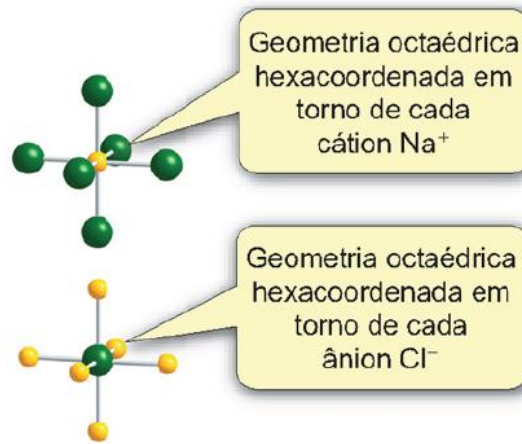
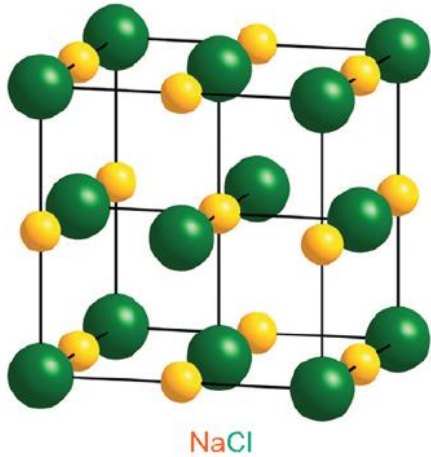


Figura 5.15 Os sítios intersticiais octaédricos e tetraédricos nas estruturas de empacotamento compacto cúbico e de empacotamento compacto hexagonal mostrados na forma de poliedros.

Cloreto de Sódio

(a) Célula unitária do NaCl



(b) Diagrama de projeção de célula para o NaCl

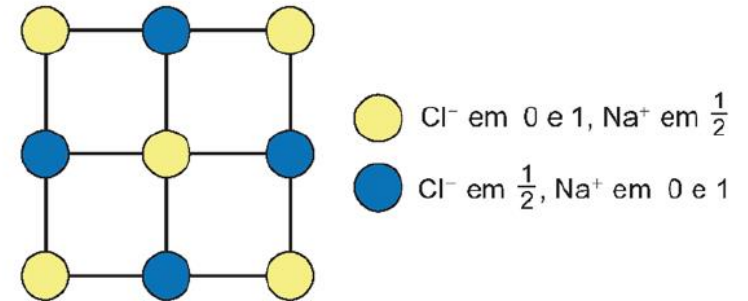
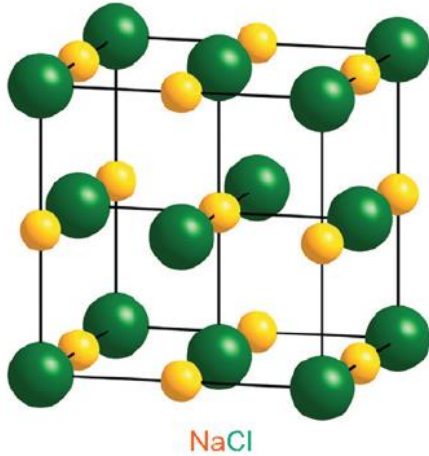


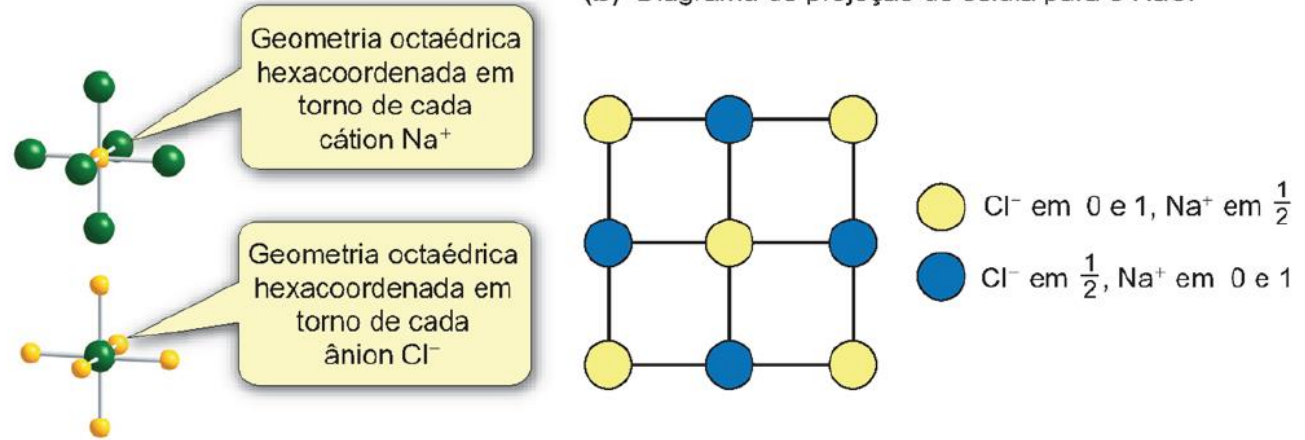
Figura 5.20 (a) A célula unitária e (b) diagrama de projeção de célula para o cloreto de sódio (NaCl).

Cloreto de Sódio

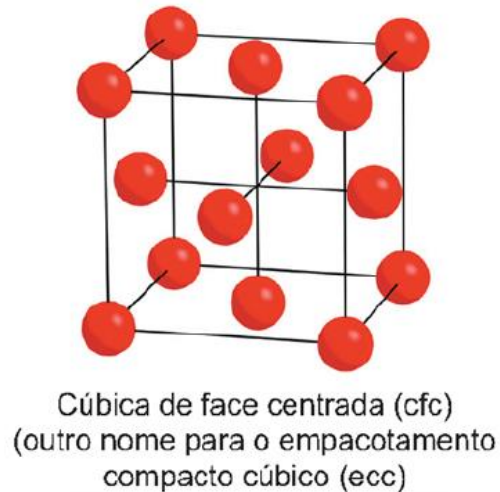
(a) Célula unitária do NaCl



(b) Diagrama de projeção de célula para o NaCl



(a)



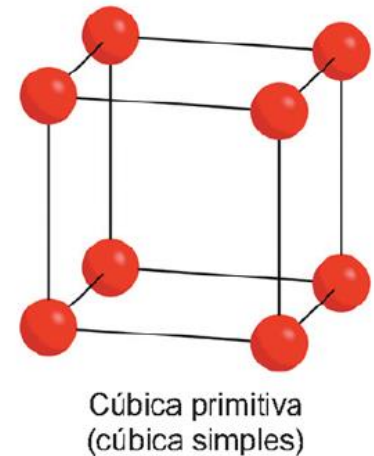
Número de coordenação 12

(b)



Número de coordenação 8

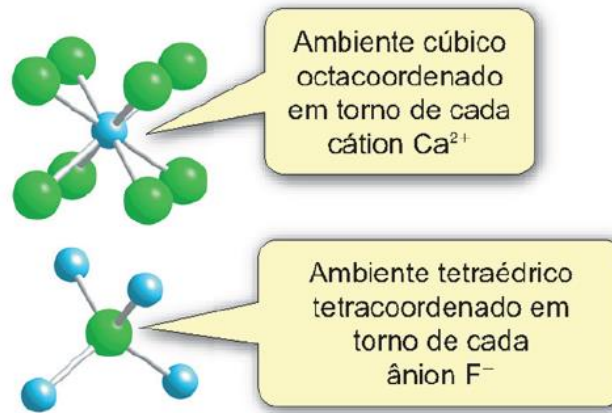
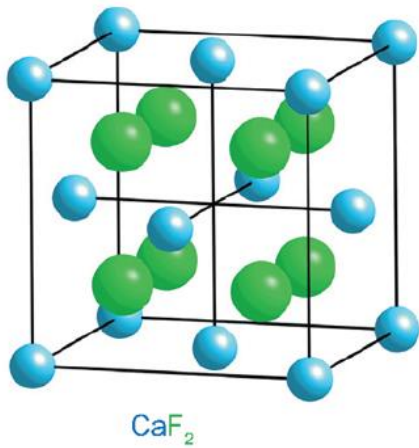
(c)



Número de coordenação 6

Fluorita

(a) Célula unitária para a CaF_2



(b) Diagrama de projeção de célula para a CaF_2

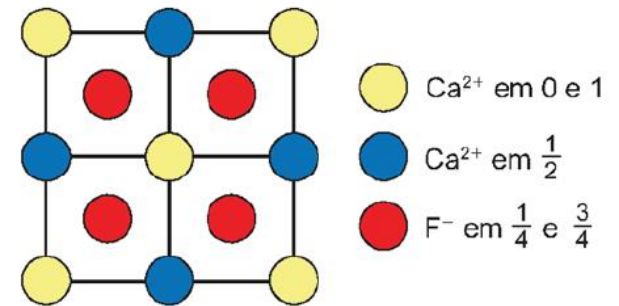
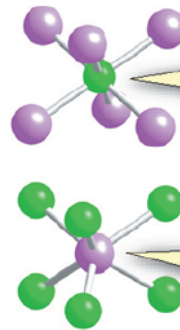
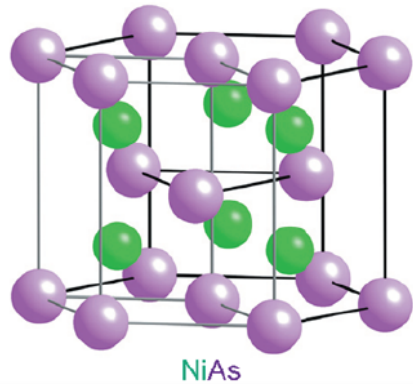


Figura 5.21 (a) A célula unitária e (b) diagrama de projeção de célula para a fluorita (CaF_2).

Arseneto de níquel

(a) Estrutura do NiAs



Geometria octaédrica hexacoordenada em torno do centro de cada Ni

Geometria prismática trigonal hexacoordenada em torno do centro de cada As

A unidade repetidora hexagonal para o NiAs. A célula unitária é um terço disso, com suas fronteiras mostradas em cinza

(b) Diagrama de projeção de célula para o NiAs

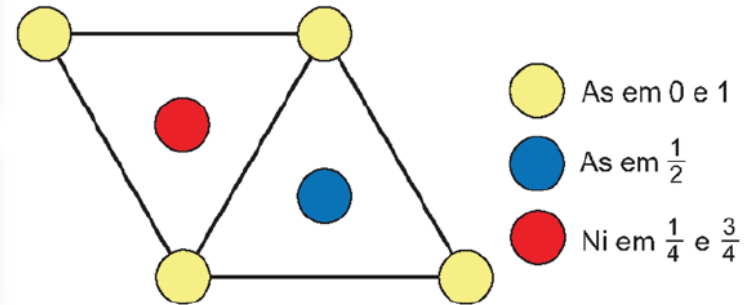
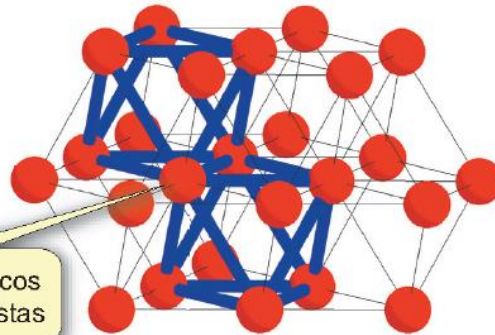


Figura 5.22 O arseneto de níquel possui uma estrutura baseada no empacotamento compacto hexagonal de átomos de As com os átomos de Ni nos sítios octaédricos. (a) Estrutura do NiAs. (b) Diagrama de projeção de célula do NiAs.

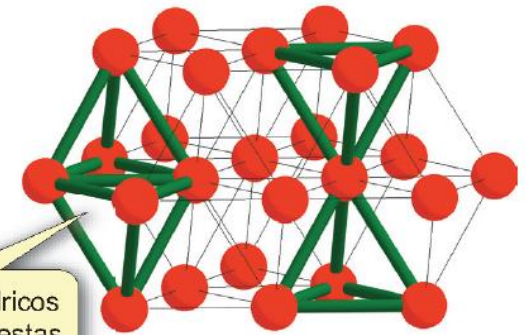
(a) Empacotamento compacto cúbico

Nesta figura, os átomos são mostrados pequenos para enfatizar as posições dos sítios octaédricos e tetraédricos

Os sítios octaédricos compartilham arestas

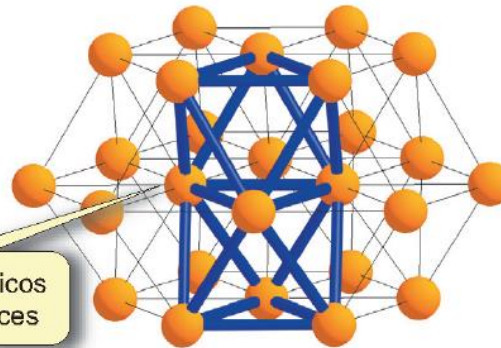


Os sítios tetraédricos compartilham arestas



(b) Empacotamento compacto hexagonal

Os sítios octaédricos compartilham faces



Os sítios tetraédricos compartilham faces

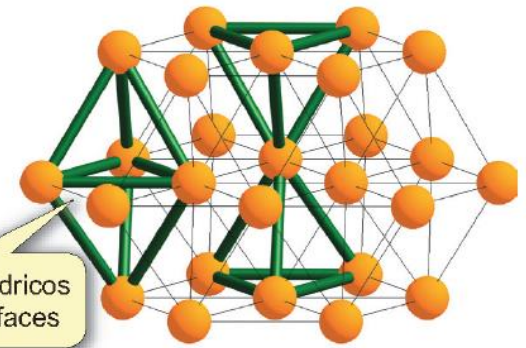
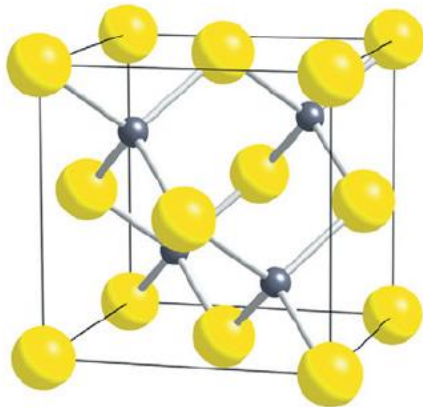


Figura 5.15 Os sítios intersticiais octaédricos e tetraédricos nas estruturas de empacotamento compacto cúbico e de empacotamento compacto hexagonal mostrados na forma de poliedros.

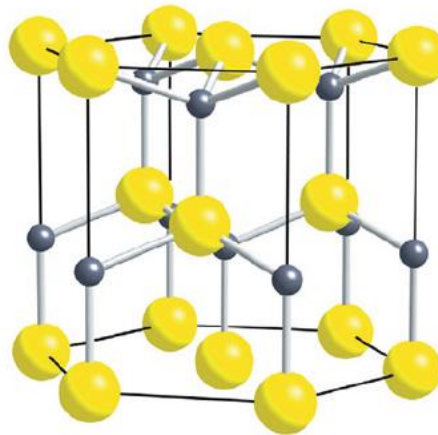
Seleneto de zinco

Um arranjo de empacotamento compacto cúbico de íons S^{2-} com íons Zn^{2+} em metade dos sítios tetraédricos



(a) Esfalerita (ZnS)

Um arranjo de empacotamento compacto hexagonal de íons S^{2-} com íons Zn^{2+} em metade dos sítios tetraédricos



(b) Wurtzita (ZnS)

Figura 5.23 As estruturas dos polimorfos esfalerita e wurtzita do sulfeto de zinco (ZnS).

Haleto de Cádmi

Arranjo de empacotamento compacto cúbico de íons Cl^- com os íons Cd^{2+} em metade dos sítios octaédricos

Arranjo de empacotamento compacto hexagonal de íons I^- com os íons Cd^{2+} em metade dos sítios octaédricos

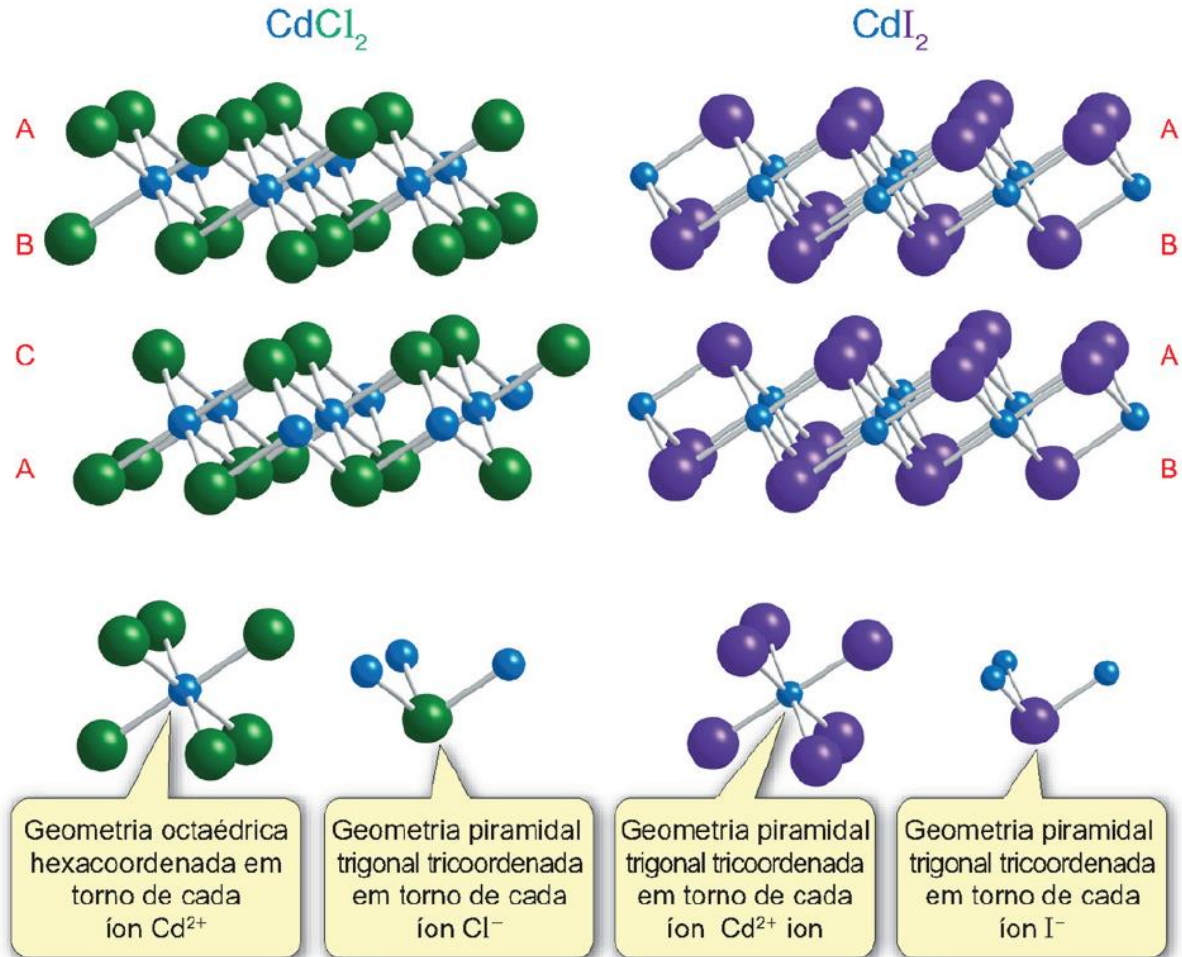


Figura 5.24 As estruturas em camadas do cloreto de cádmio (CdCl_2) e do iodeto de cádmio (CdI_2).

Tabela 5.4 Estruturas baseadas em empacotamento compacto

Estrutura cristalina	Tipo de empacotamento compacto	Sítios intersticiais ocupados	Porcentagem de sítios ocupados	Números de coordenação
Cloreto de sódio (NaCl)	Cúbico	Octaédricos	100	6,6
Arseneto de níquel (NiAs)	Hexagonal	Tetraédricos	100	6,6
Fluorita (CaF ₂)	Cúbico	Octaédricos	100	8,4
<i>não observada</i>	Hexagonal	Tetraédricos	100	8,4
Esfalerita (ZnS)	Cúbico	Octaédricos	50	4,4
Wurtzita (ZnS)	Hexagonal	Tetraédricos	50	4,4
Cloreto de cádmio (CdCl ₂)	Cúbico	Octaédricos	50*	6,3
Iodeto de cádmio (CdI ₂)	Hexagonal	Tetraédricos	50*	6,3

*Camadas alternadas cheias e vazias.

Estruturas não baseadas em arranjos compactos

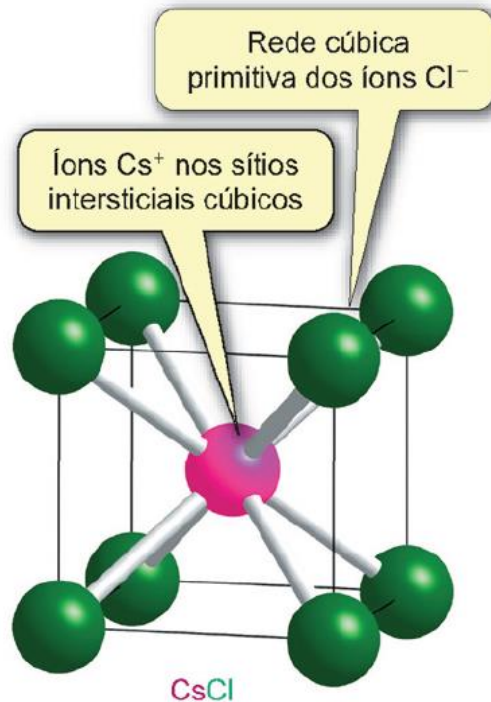


Figura 5.25 A célula unitária do CsCl.

Estruturas não baseadas em arranjos compactos

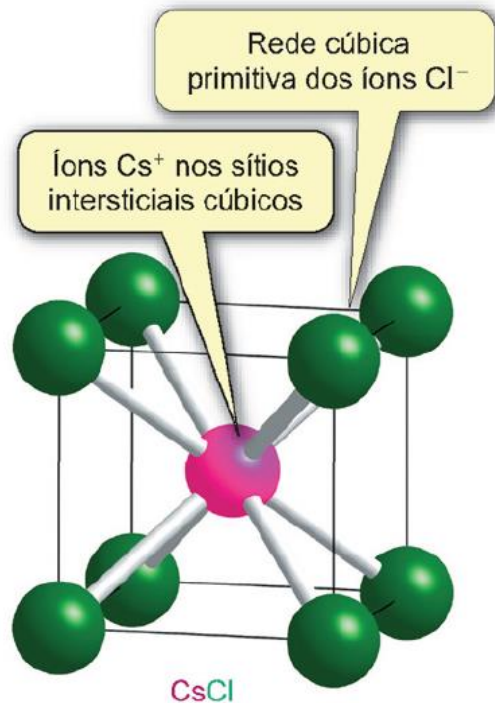
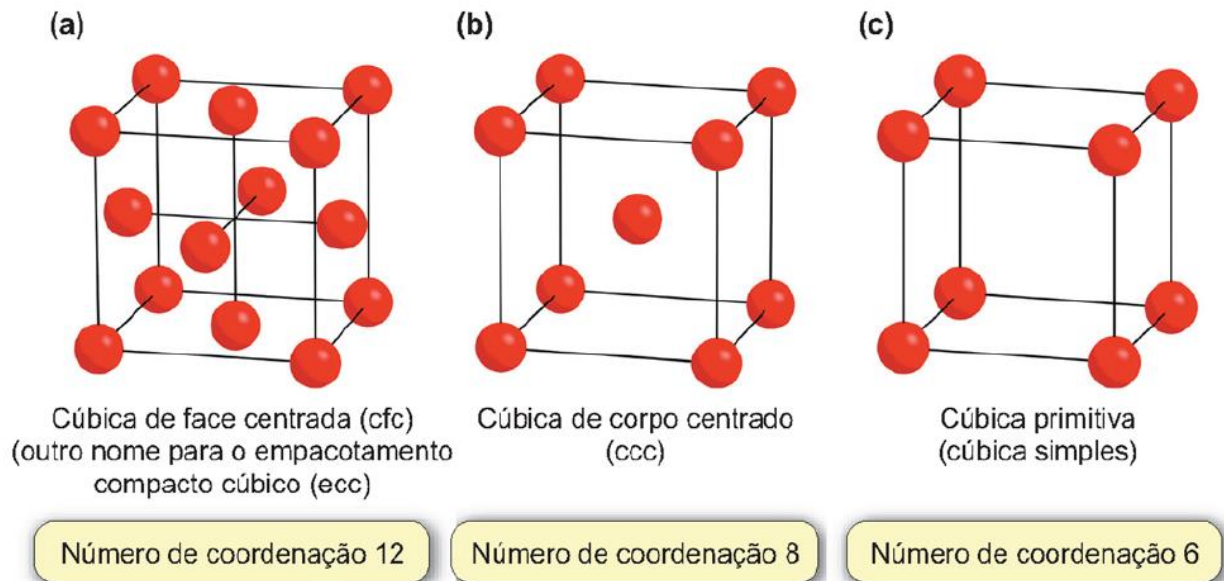


Figura 5.25 A célula unitária do



Estruturas não baseadas em arranjos compactos

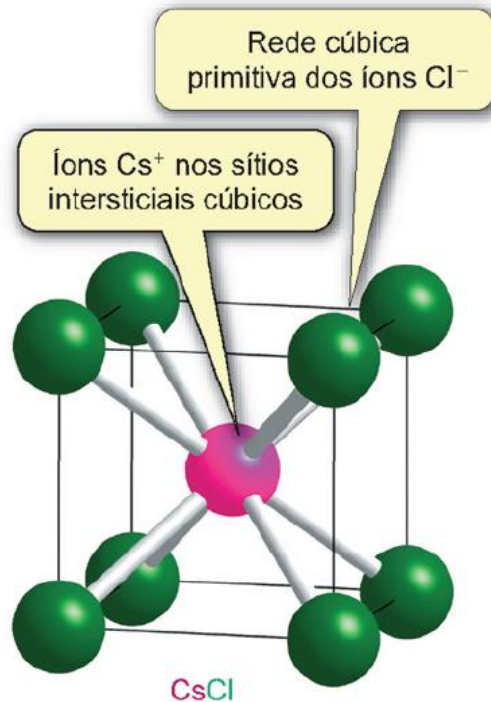


Figura 5.25 A célula unitária do CsCl.

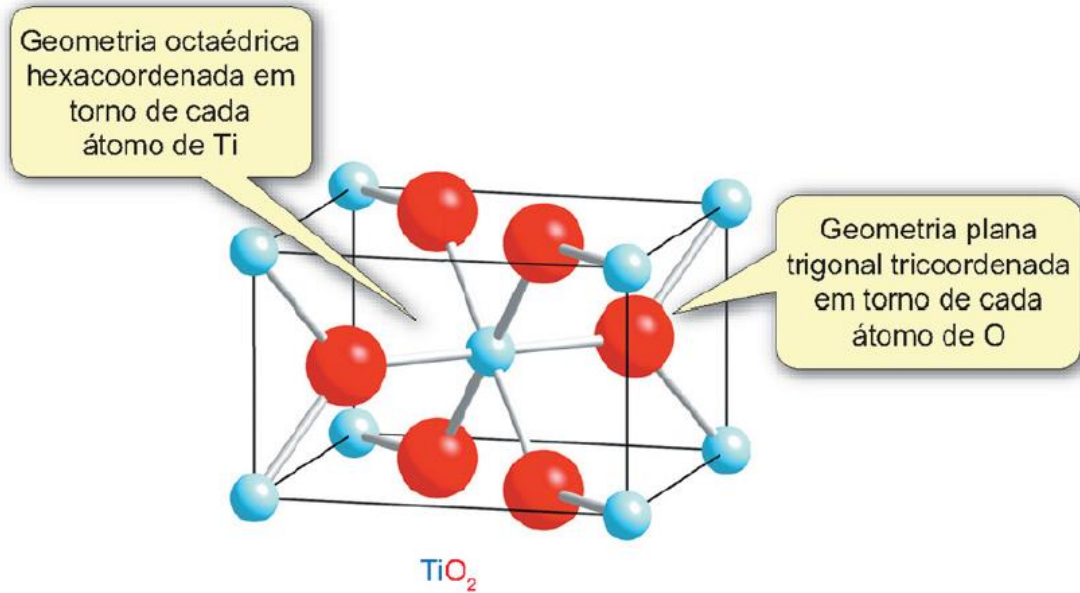
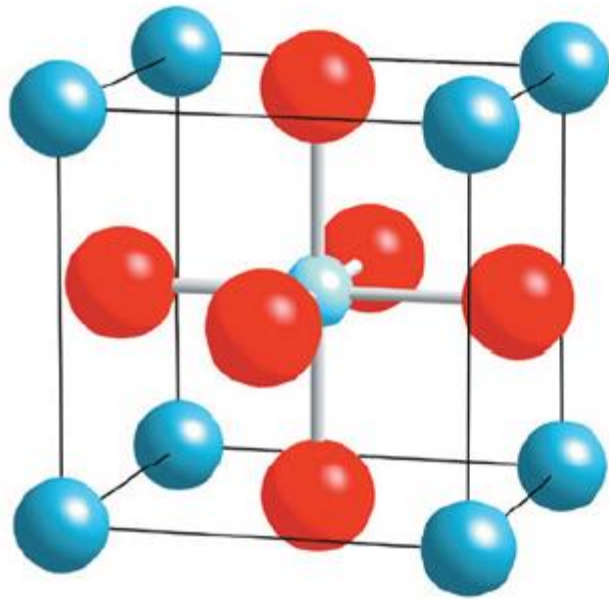
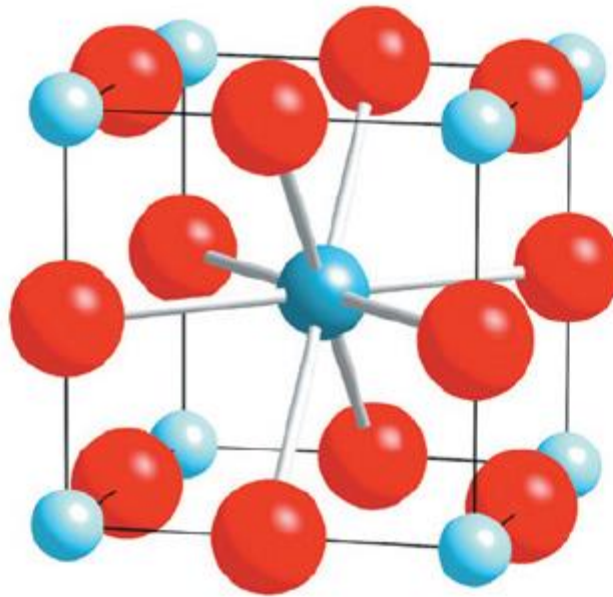


Figura 5.26 A célula unitária do rutilo (TiO_2).

Estruturas não baseadas em arranjos compactos



(a) CaTiO_3



(b) CaTiO_3

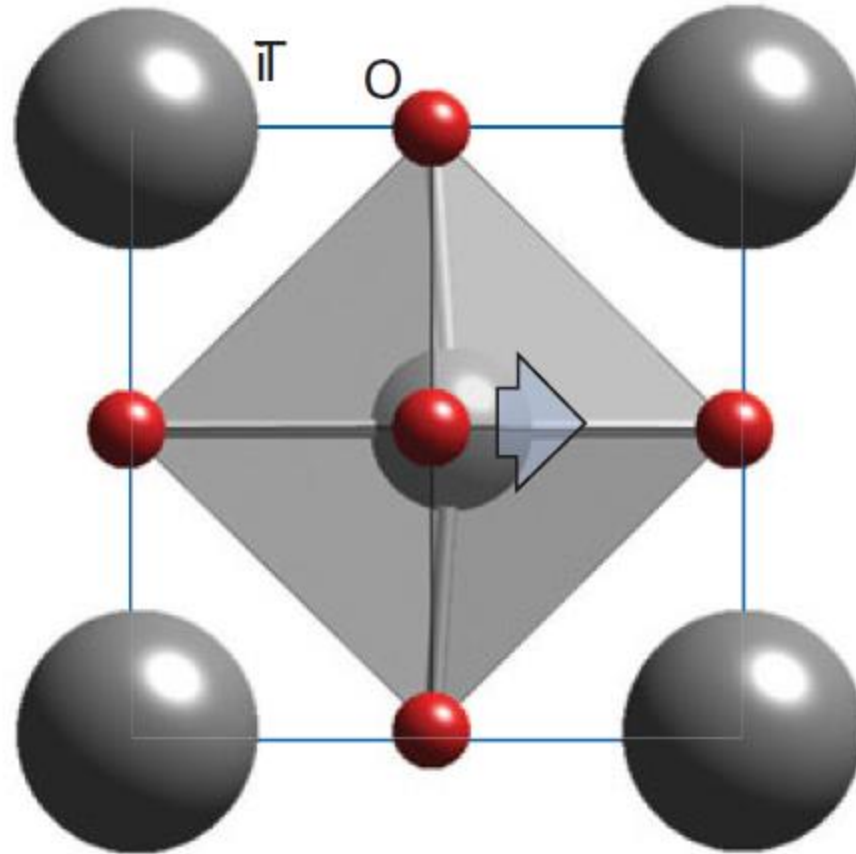
As duas células unitárias dão a mesma estrutura quando repetidas em três dimensões

Figura 5.27 Duas células unitárias equivalentes para a perovskita (CaTiO_3).

Materials piezoelétricos

as a result of ion di
resemble ferromagn
crystal, the electric

the sense that they
over a region of the
result, the relative



Another charac
centre of symmet
is under stress or
Piezoelectric mate
ultramicromanip
and as the probe s
BaTiO₃, NaNbO₃,

Figure 24.20 The tetragonal BaTiO₃ structure showing the local Ti⁴⁺ ion displacement that leads to the ferroelectric behaviour of this material.

skites that lack a
d when the crystal
cal field is applied.
ssure transducers,
, sound detectors,
tant examples are

Sólidos

Ligação metálica e teoria de bandas

Ligas metálica

- Ligas: Material que contém dois ou mais metais ou um metal com não metais.
 - Solução sólida: Mistura entre metais nas mais variadas proporções.
 - Ex: Bronze = solução sólida de Cu e Sn (proporção de 1 a 40%)
 - Composto intermetálico: Possui composição fixa.
 - Ex: Amálgama sódio-mercúrio = NaHg_2 .

Ligas metálica

- Solução sólida - tipo mais comum de liga:
 - Liga substitucional: átomos de um metal são trocados pelo de outro na estrutura da rede.
 - Ex: Latão: até $\approx 40\%$ dos átomos da estrutura ECC do cobre podem ser trocados por zinco , sem distorções na rede.
 - Raios atômicos: Cu = 128 pm; Zn = 137 pm.

Ligas metálica

- Solução sólida - tipo mais comum de liga:
 - Liga substitucional: átomos de um metal são trocados pelo de outro na estrutura da rede.
 - Ex: Latão: até $\approx 40\%$ dos átomos da estrutura ECC do cobre podem ser trocados por zinco, sem distorções na rede.
 - Raios atômicos: Cu = 128 pm; Zn = 137 pm.
 - Liga intersticial: os átomos de um elemento estão presentes nos sítios intersticiais de uma rede de um metal.
 - Ex: Aço: liga de Fe com até 2% de C, ocupando os sítios intersticiais da rede ECC do Fe.

Ligas metálica

- Ligas: Material que contém dois ou mais metais ou um metal com não metais.
 - Solução sólida: Mistura entre metais nas mais variadas proporções.
 - Ex: Bronze = solução sólida de Cu e Sn (proporção de 1 a 40%)
 - Composto intermetálico: Possui composição fixa.
 - Ex: Amálgama sódio-mercúrio = NaHg_2 .
- Tamanho dos átomos influenciam nas propriedades das liga!

CD

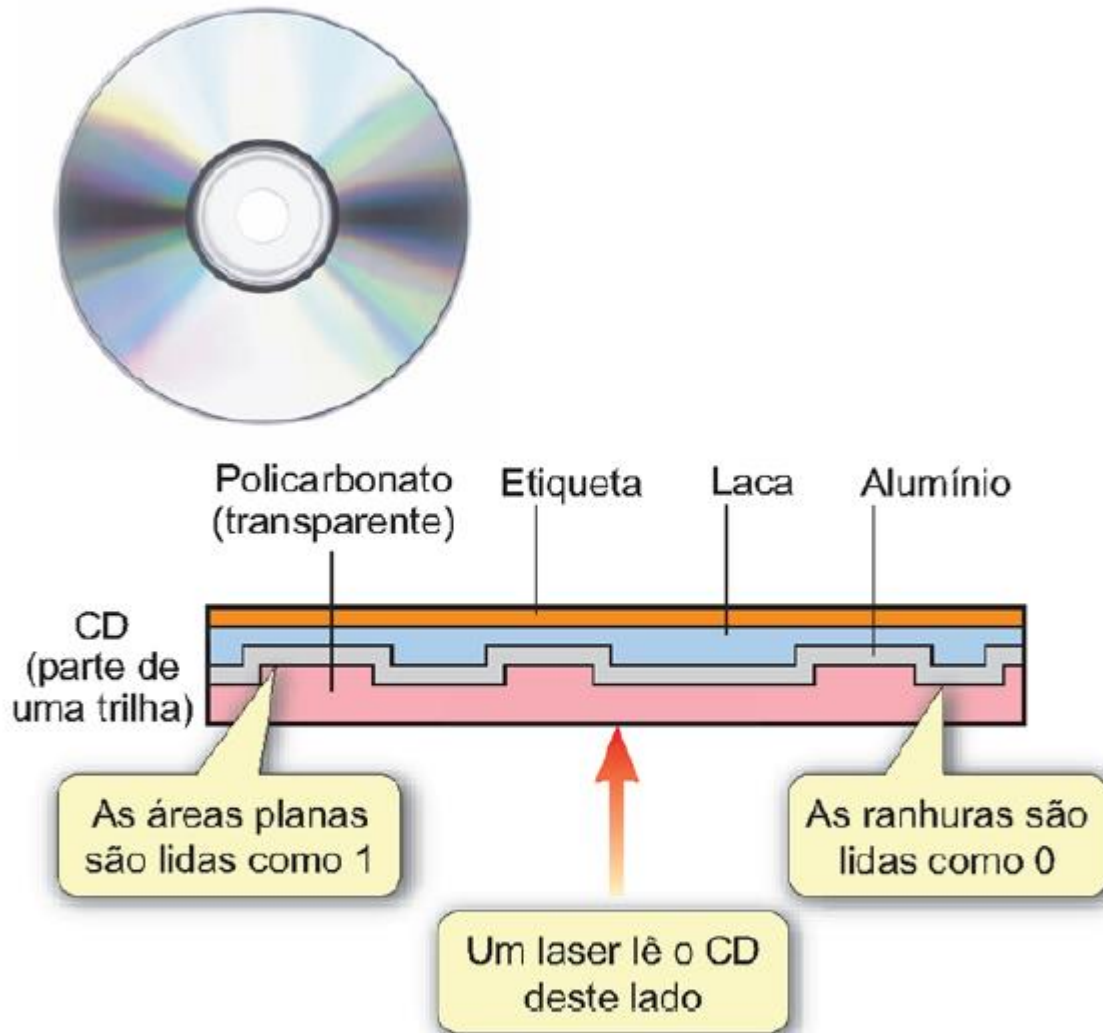


Figura 1 Corte transversal de um disco compacto (CD) de produção comercial.



Figura 1 Corte transversal de comercial.



CD-R

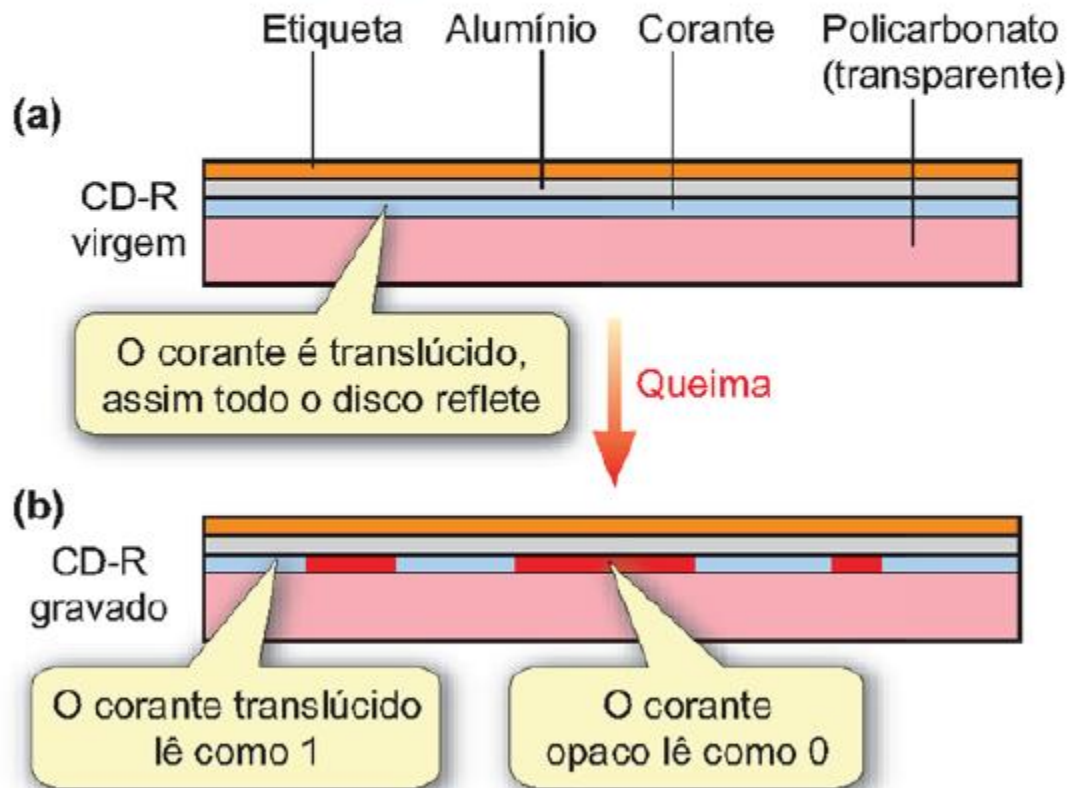


Figura 2 Corte transversal de um disco compacto gravável (CD-R).

CD-RW

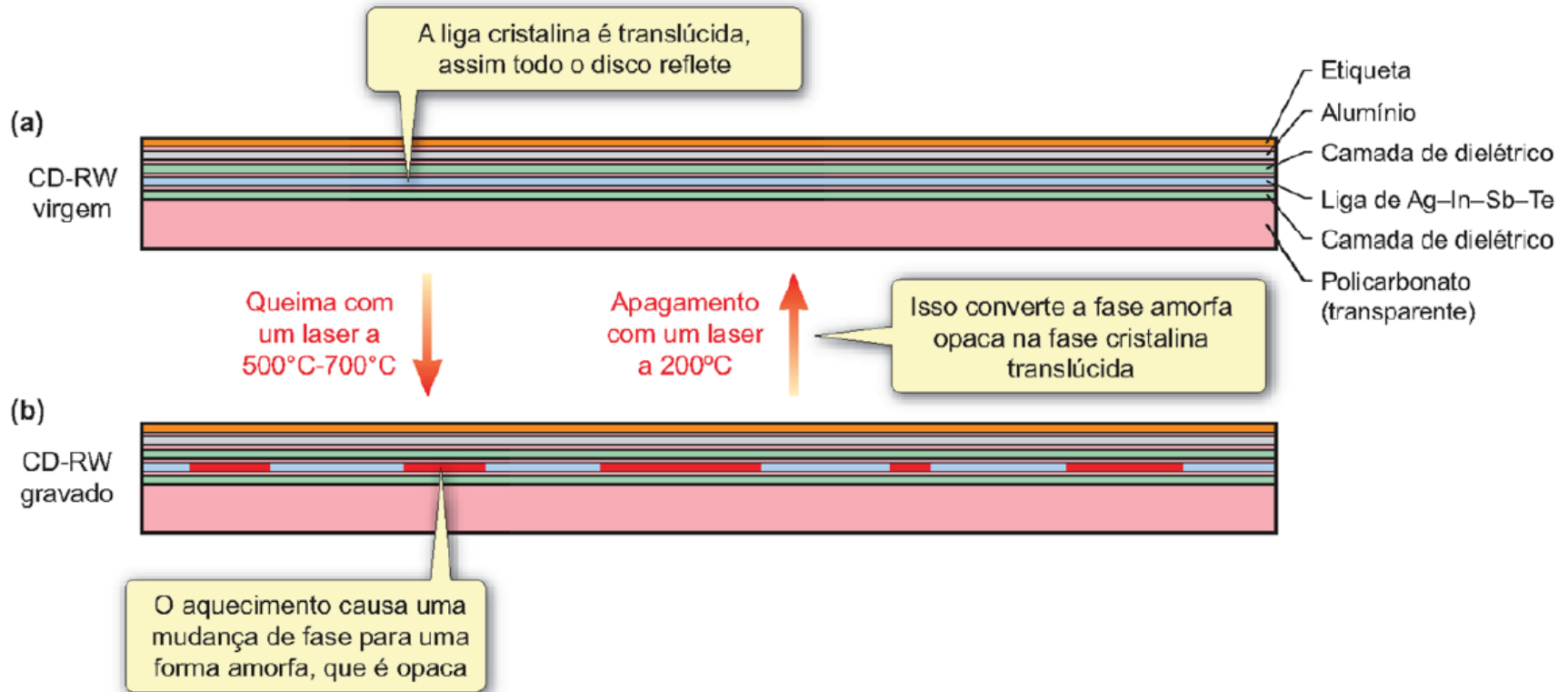


Figura 3 Corte transversal de um disco compacto regravável (CD-RW).

Ligação metálica

- Metais: baixa entalpia de ionização (perde facilmente o elétron da camada de valência);
- Modelo do elétron livre:
 - Íons cercados por um mar de elétrons deslocalizados!

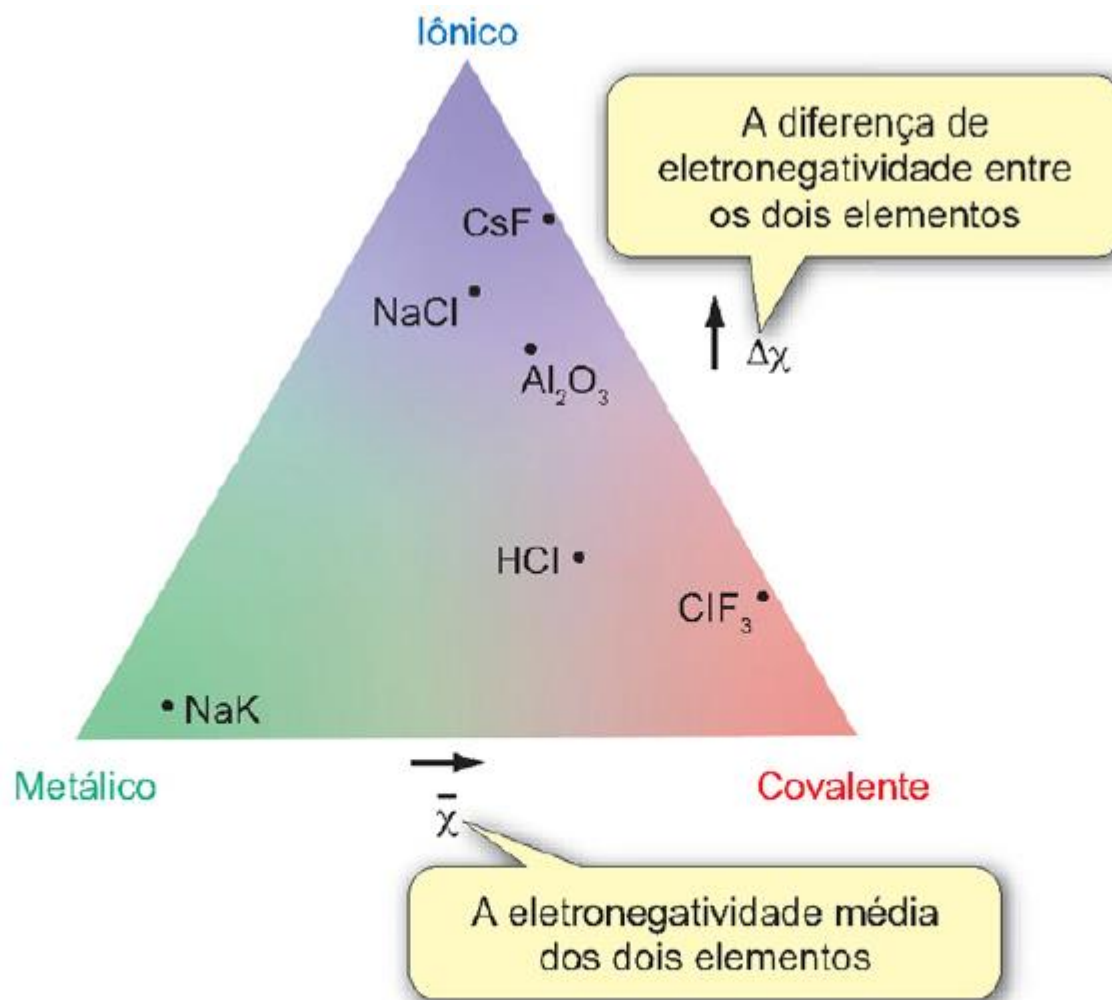


Figura 5.31 Um triângulo de tipos de ligação. Para um composto binário, o tipo de ligação pode ser previsto por representação gráfica da diferença de eletronegatividade para os dois átomos em função de sua eletronegatividade média.

Ligação metálica

- Metais: baixa entalpia de ionização (perde facilmente o elétron da camada de valência);
- Modelo do elétron livre:
 - Íons cercados por um mar de elétrons deslocalizados!
- Quais os movimentos permitidos para os íons nessa estrutura?
- Quais os movimentos permitidos para os elétrons nessa estrutura?

Ligação metálica

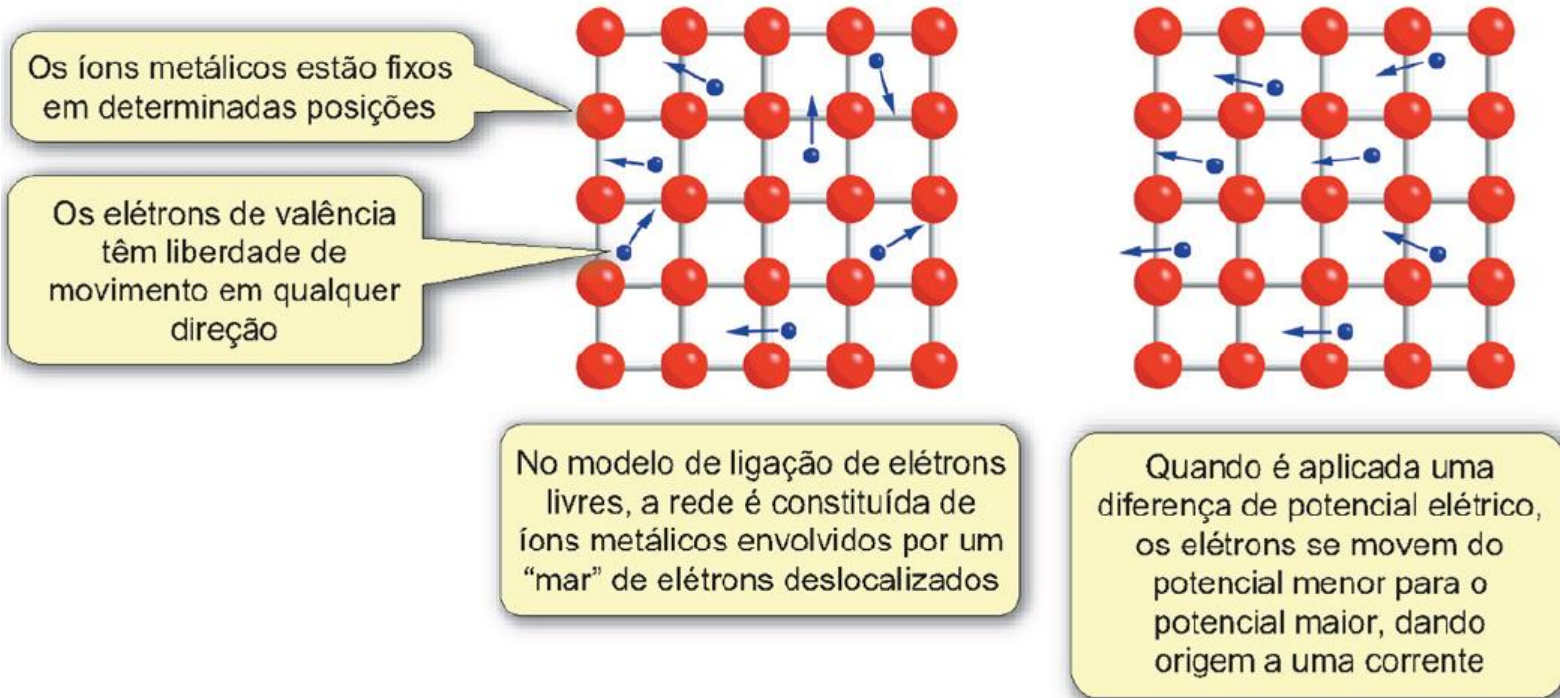


Figura 5.16 No modelo de elétrons livres de ligação nos metais, há uma rede de íons metálicos com os elétrons de valência livres para se movimentar. (As linhas entre os íons são para enfatizar suas posições fixas – elas não representam ligações covalentes. Os íons estão, de fato, tocando uns aos outros.)

Ligação metálica

- Metais: baixa entalpia de ionização (perde facilmente o elétron da camada de valência);
- Modelo do elétron livre:
 - Íons cercados por um mar de elétrons deslocalizados!
- Normalmente os elétrons movem-se em direções aleatórias, mas quando aplicada uma diferença de potencial, os elétrons irão se mover do menor para o maior potencial, originando uma corrente elétrica.

Ligação metálica

- Metais: baixa entalpia de ionização (perde facilmente o elétron da camada de valência);
- Modelo do elétron livre:
 - Íons cercados por um mar de elétrons deslocalizados!
- Características: Maleáveis e dúcteis!

Ligação metálica

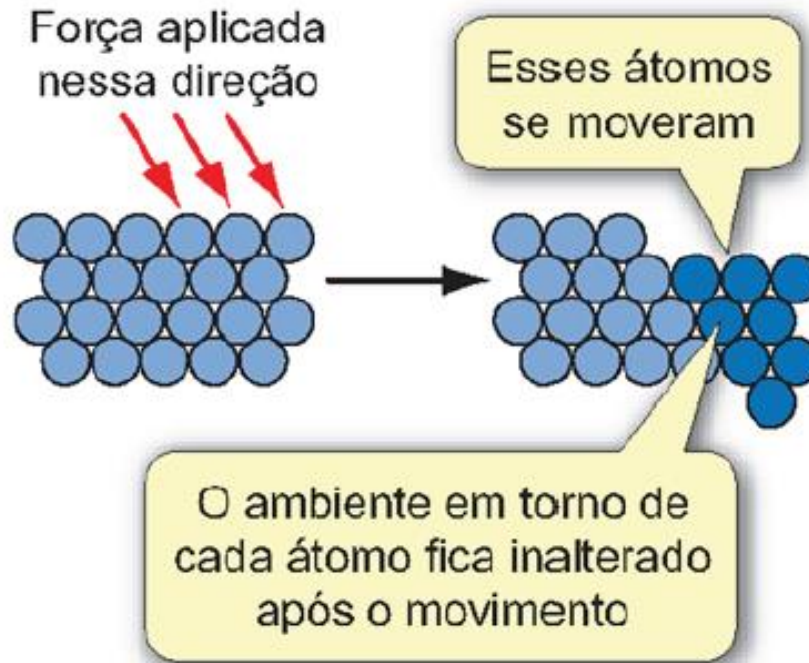


Figura 5.17 A origem da maleabilidade dos metais.

Ligação metálica

- Metais: baixa entalpia de ionização (perde facilmente o elétron da camada de valência);
- Modelo do elétron livre:
 - Íons cercados por um mar de elétrons deslocalizados!
- Características: Maleáveis e dúcteis!
- Por que os metais se tornam piores condutores à medida que a temperatura aumenta?

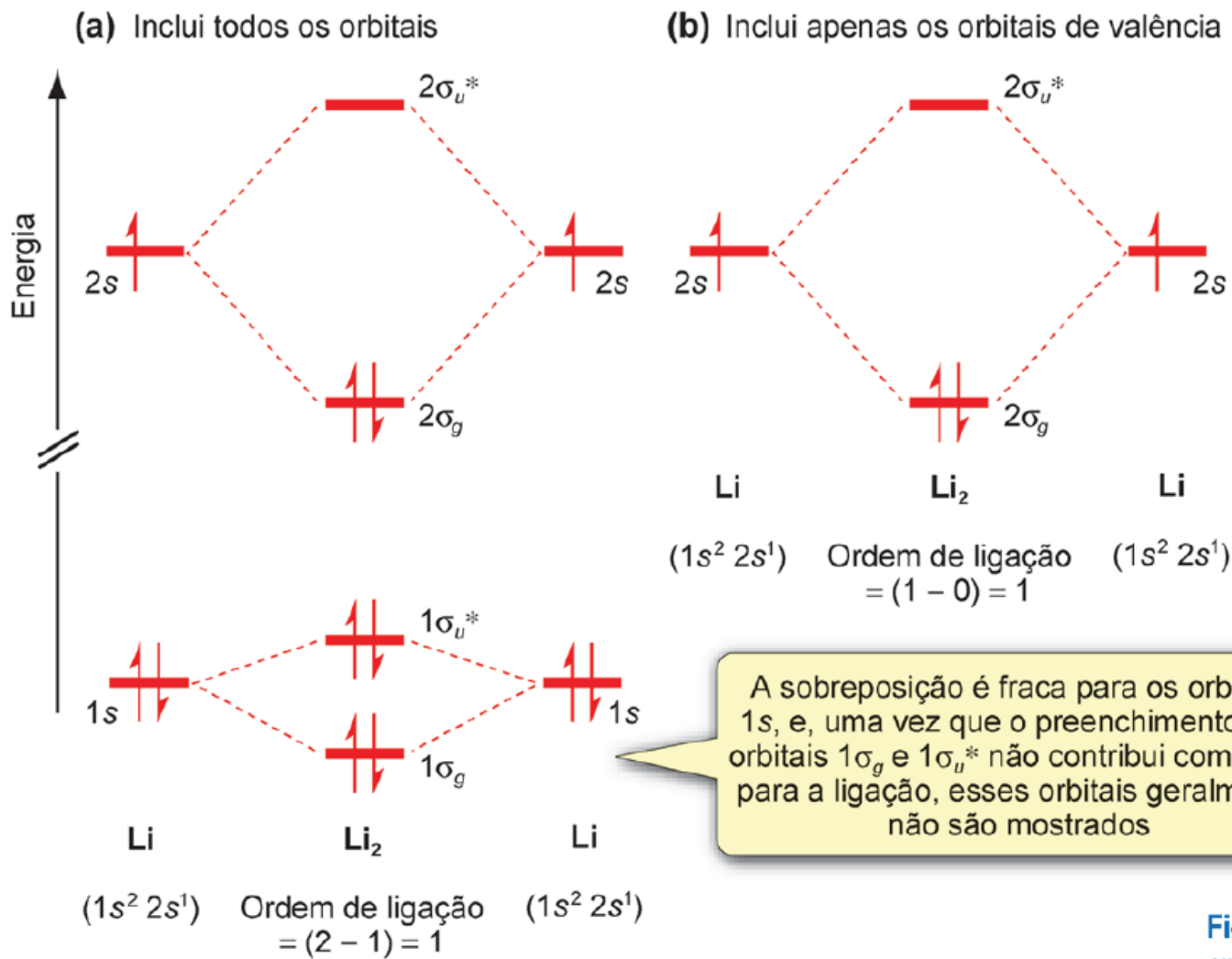


Figura 3.17 O diagrama de níveis de energia dos orbitais moleculares do Li_2 , que tem uma ordem de ligação igual a 1. Em (a) são mostrados todos os orbitais moleculares, mas em (b) são omitidos os orbitais $1s$ e seus orbitais moleculares resultantes, uma vez que eles não fornecem nenhuma contribuição para a ligação.

Teoria de bandas

À medida que mais átomos interagem, os orbitais moleculares ficam mais próximos em energia, até por fim se fundirem em uma banda

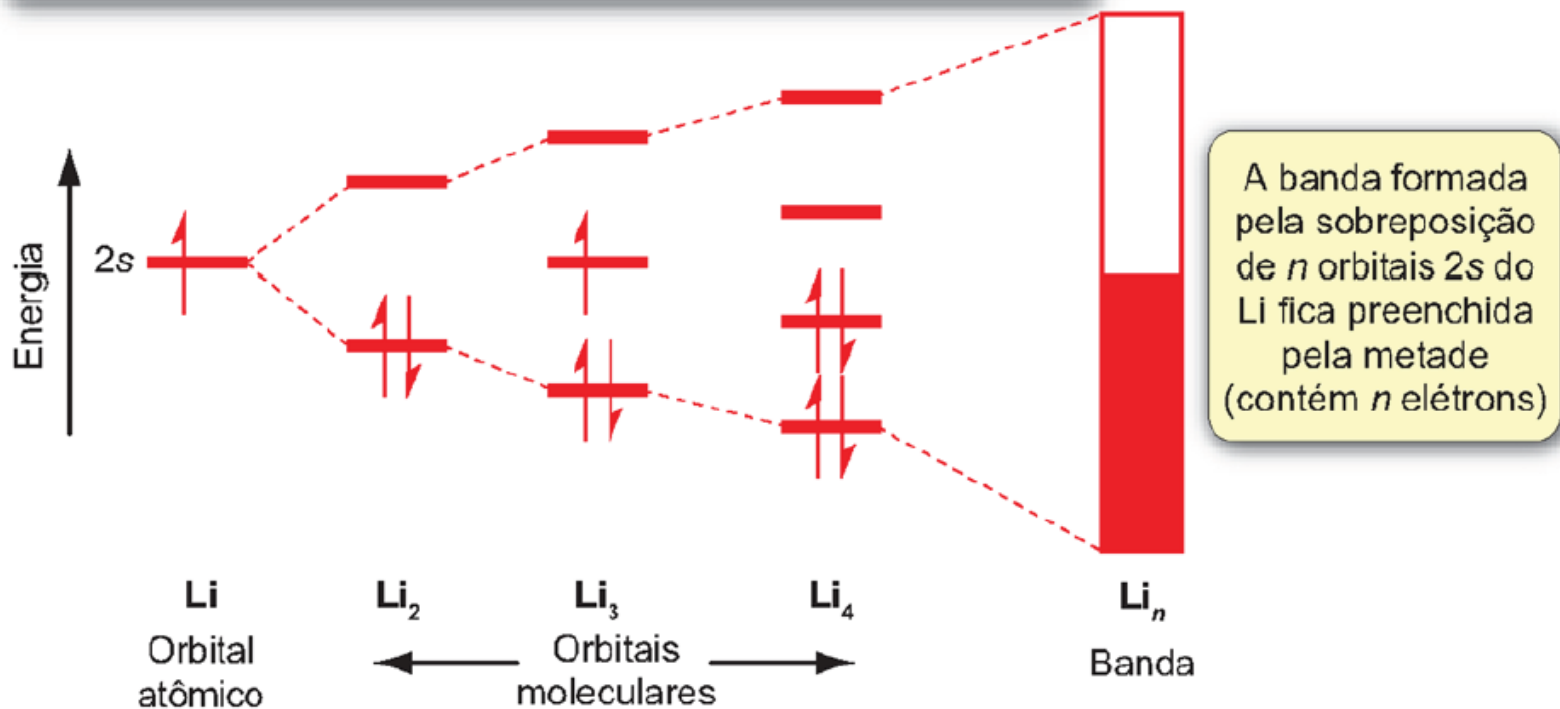
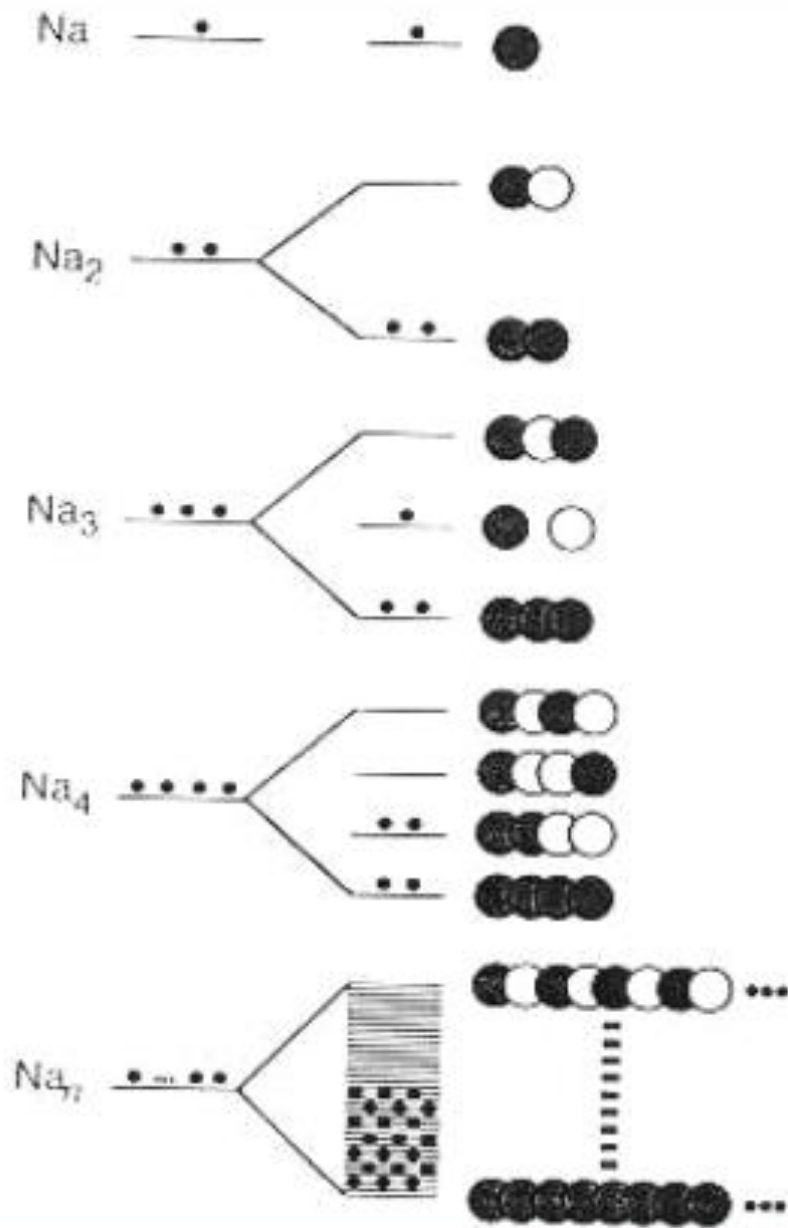


Figura 5.18 A origem da banda de valência do lítio metálico.



Banda de condução!

Banda de valência cheia

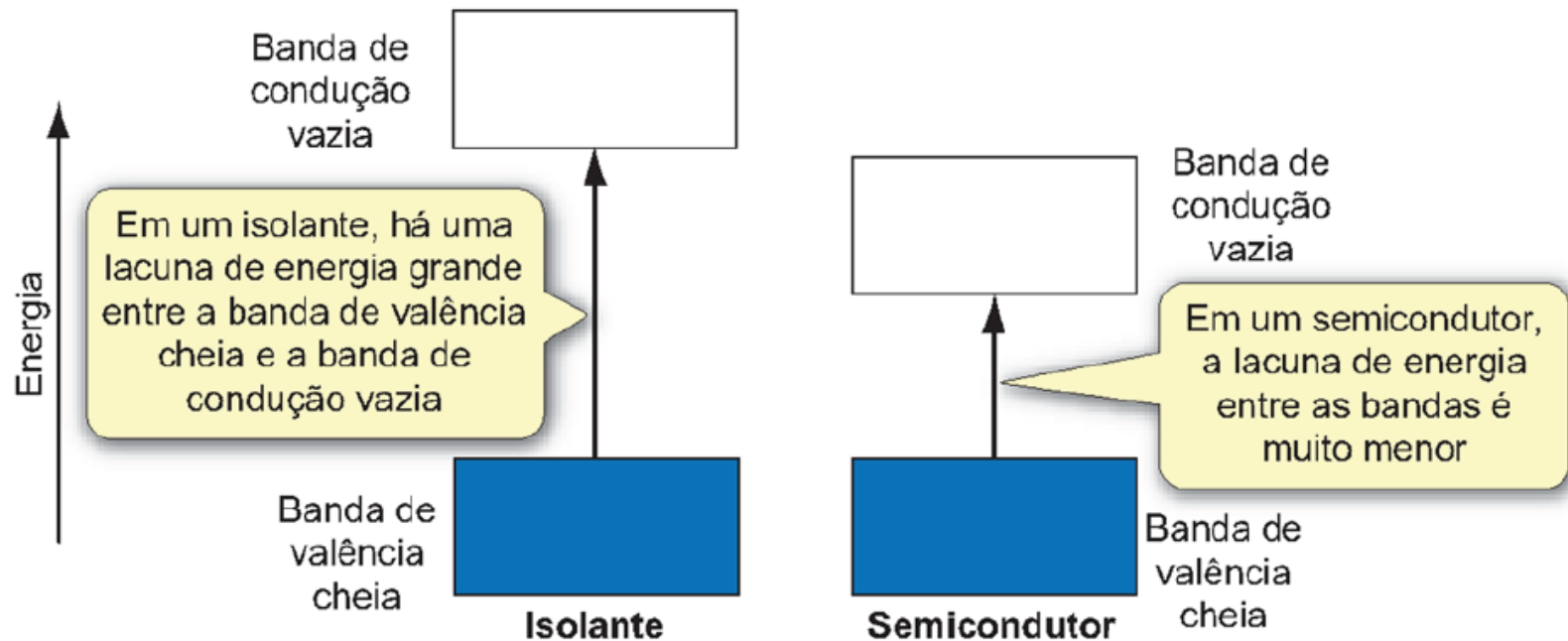


Figura 5.19 Isolantes e semicondutores têm ambas lacunas de banda entre a banda de valência cheia e a banda de condução vazia.

Teoria de Bandas

Tabela 5.3 Lacunas de banda para os elementos do Grupo 14

Elemento	Lacuna de banda/kJ mol⁻¹
Carbono (diamante)	527
Silício	107
Germânio	65
Estanho (cinza)	8

Condutividade de sólidos

Condutores, semicondutores e
isolantes

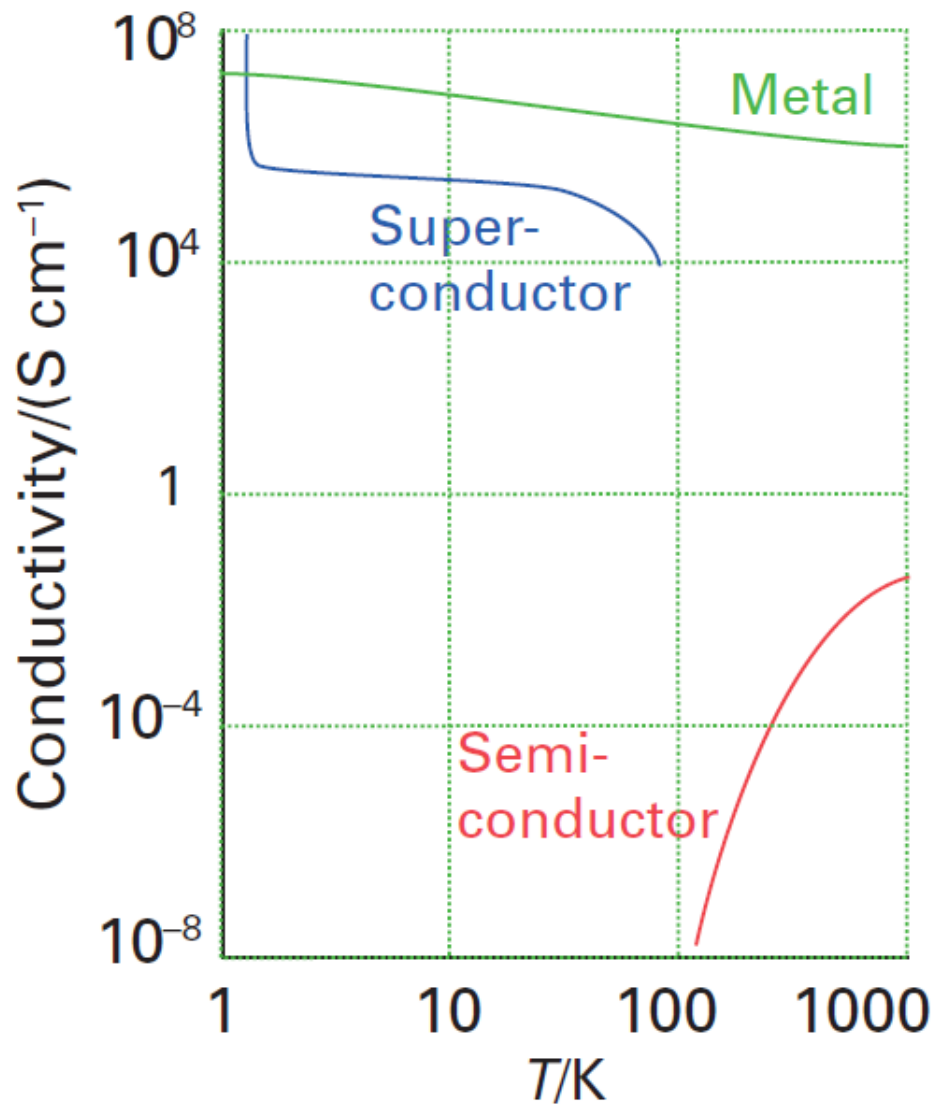


Fig. 3.60 The variation of the electrical conductivity of a substance with temperature is the basis of the classification of the substance as a metallic conductor, a semiconductor, or a superconductor.

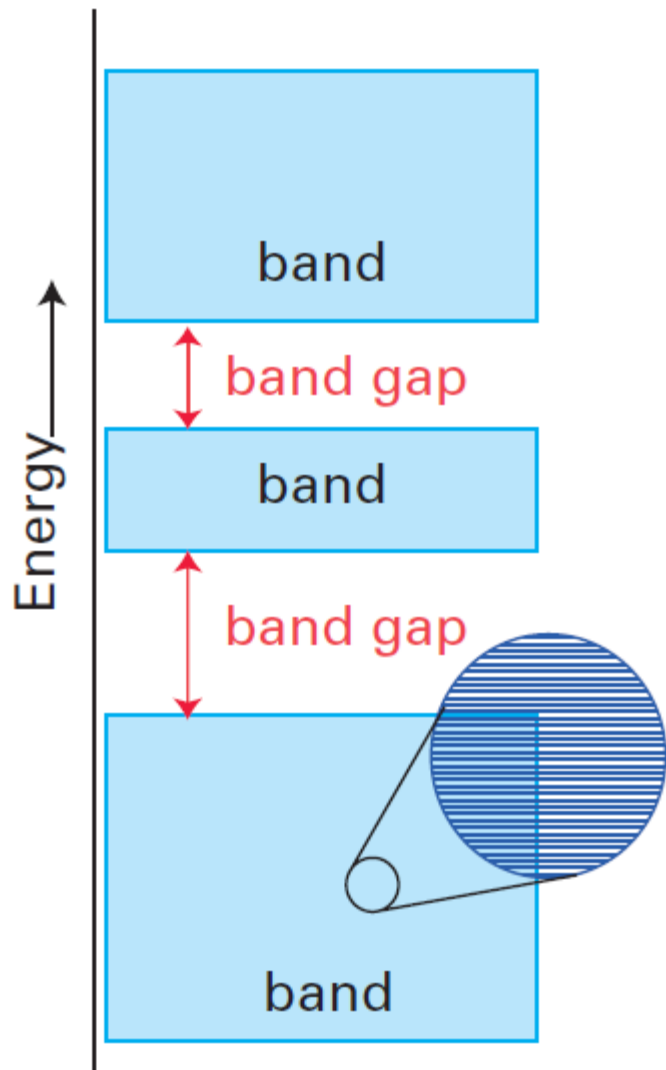


Fig. 3.61 The electronic structure of a solid is characterized by a series of bands of orbitals separated by gaps at energies where orbitals do not occur.

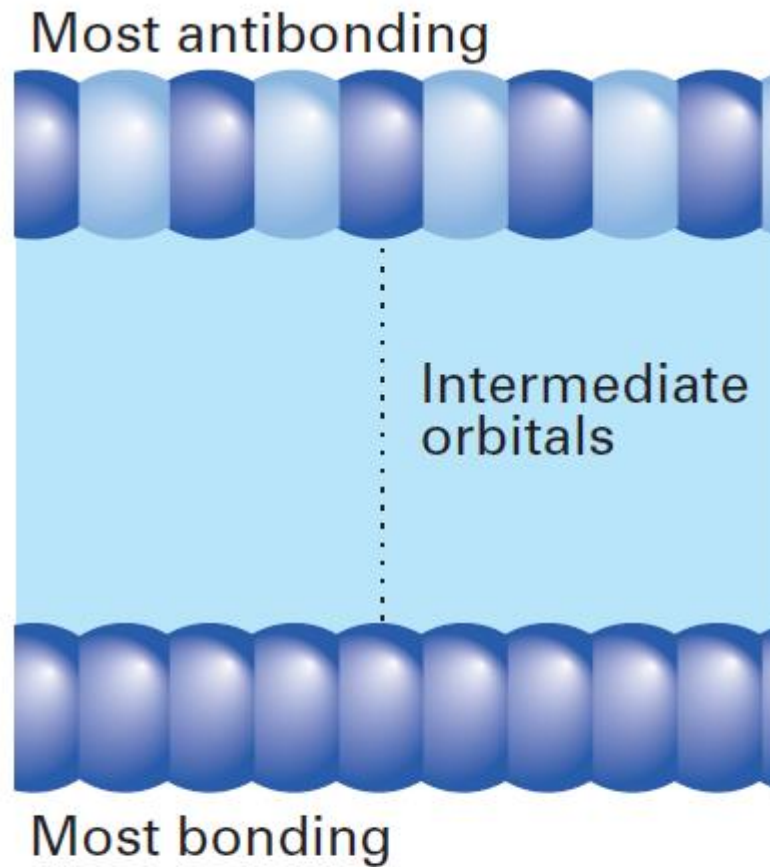


Fig. 3.62 A band can be thought of as formed by bringing up atoms successively to form a line of atoms. N atomic orbitals give rise to N molecular orbitals.

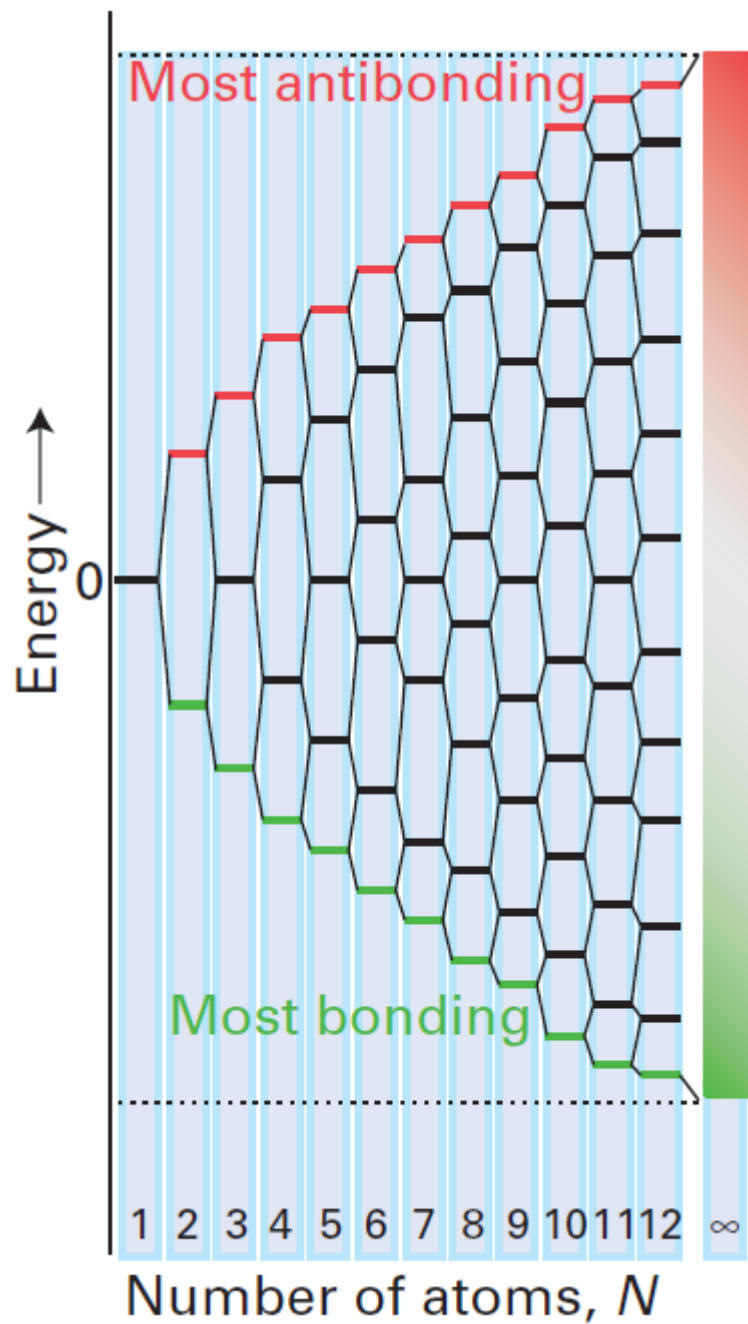


Fig. 3.63 The energies of the orbitals that are formed when N atoms are brought up to form a one-dimensional array.

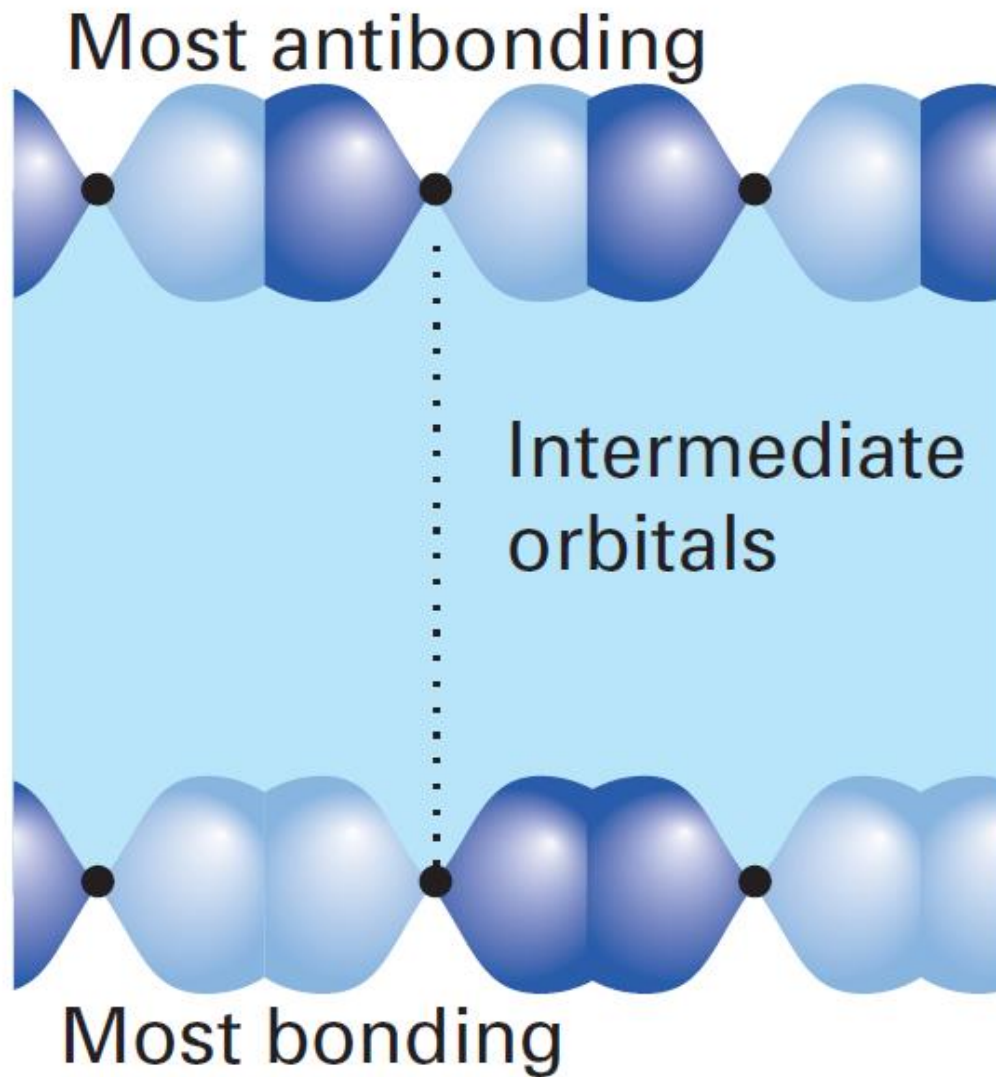


Fig. 3.64 An example of a p band in one-dimensional solid.

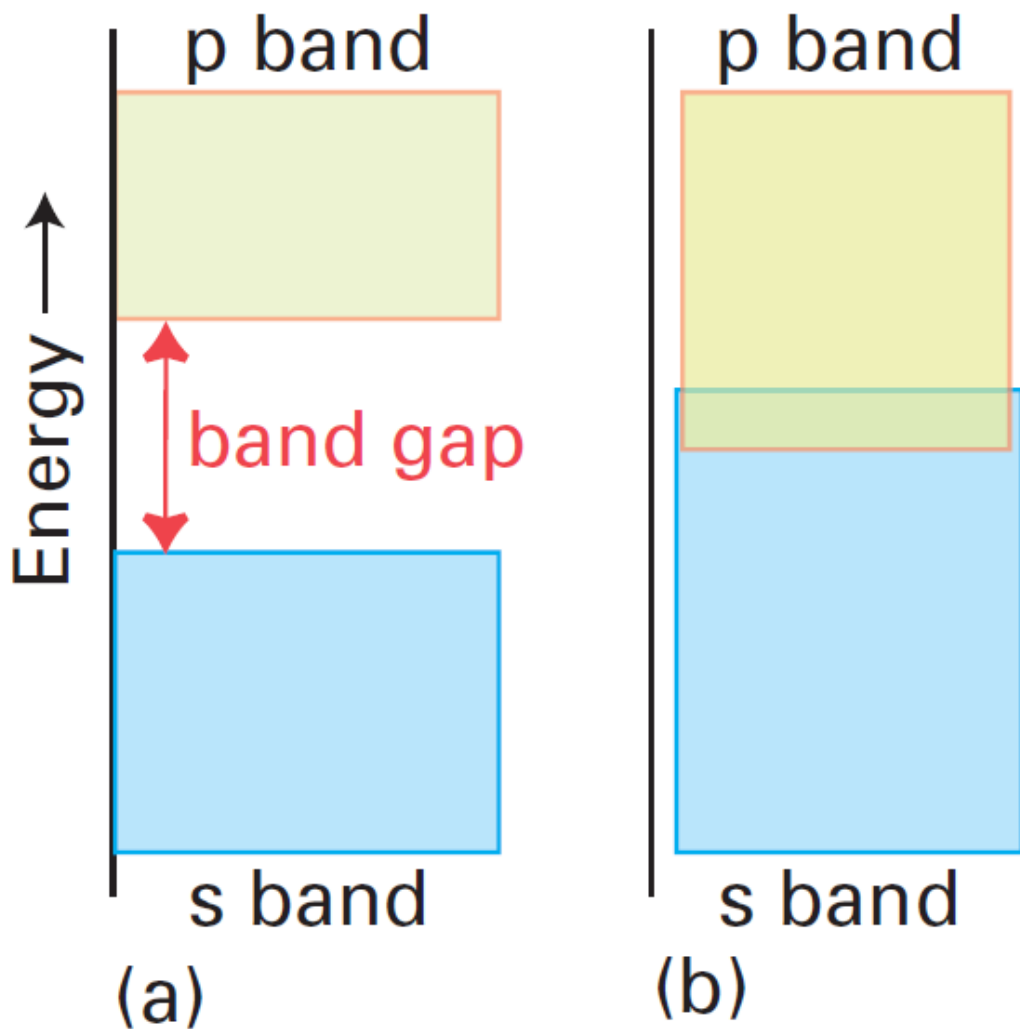


Fig. 3.65 (a) The s and p bands of a solid and the gap between them. Whether or not there is in fact a gap depends on the separation of the s and p orbitals of the atoms and the strength of the interaction between them in the solid. (b) If the interaction is strong, the bands are wide and may overlap.

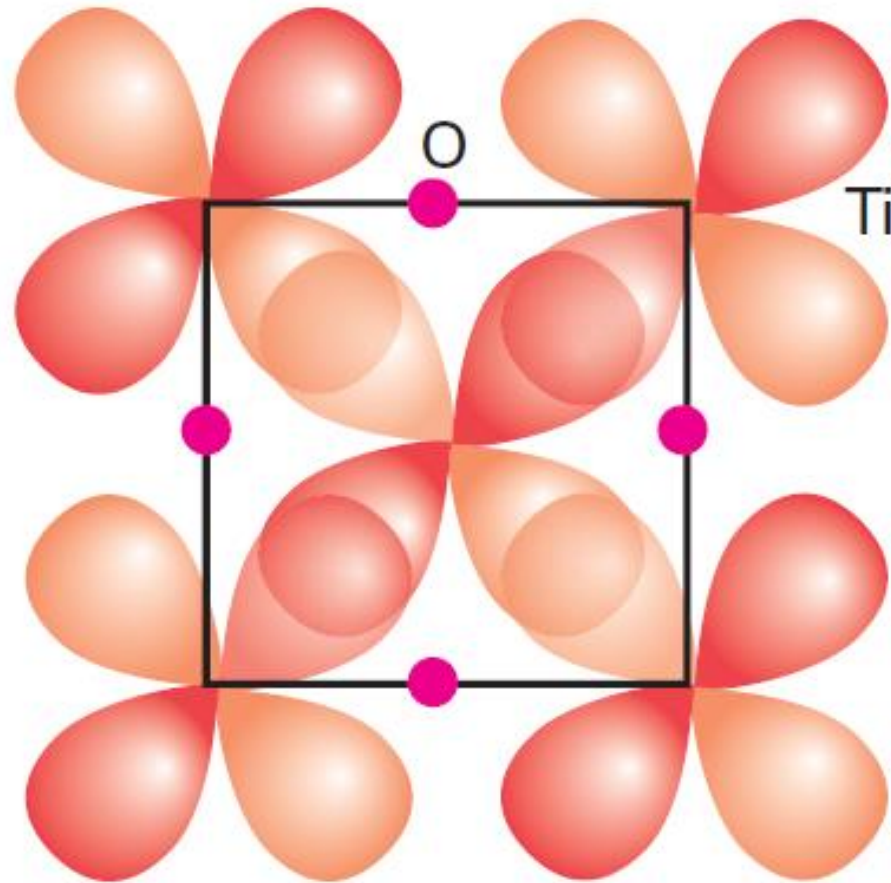


Fig. 3.66 One face of the TiO rock-salt structure showing how orbital overlap can occur for the d_{xy} , d_{yz} , and d_{zx} orbitals.

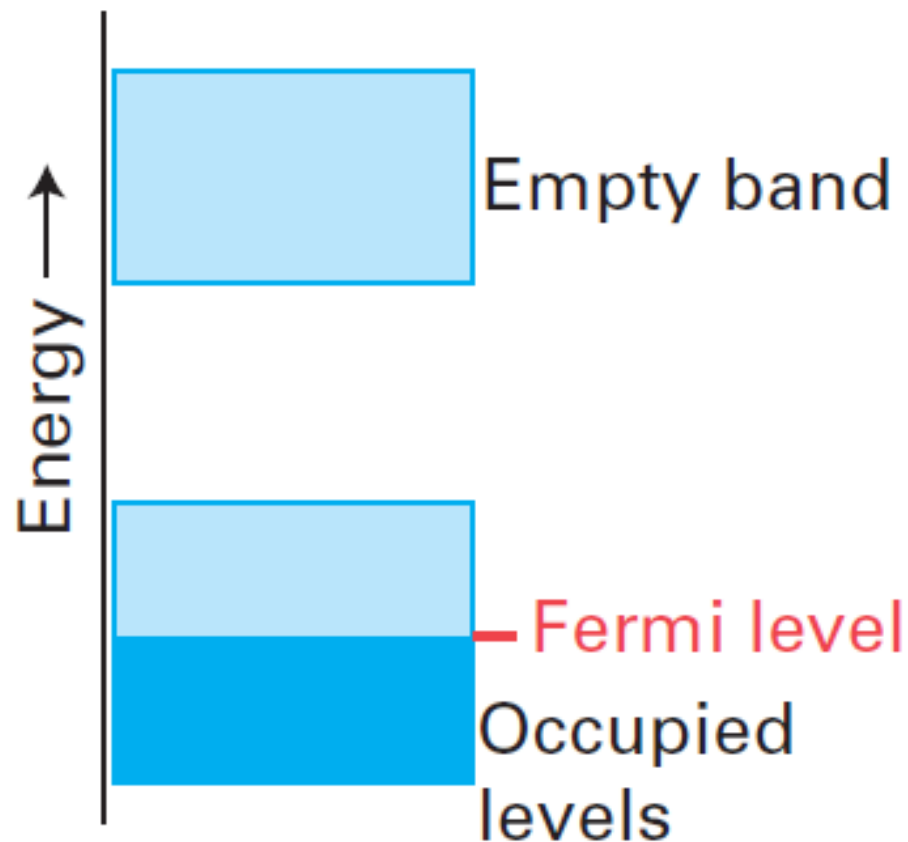


Fig. 3.67 If each of the N atoms supplies one s electron, then at $T = 0$ the lower $\frac{1}{2}N$ orbitals are occupied and the Fermi level lies near the centre of the band.

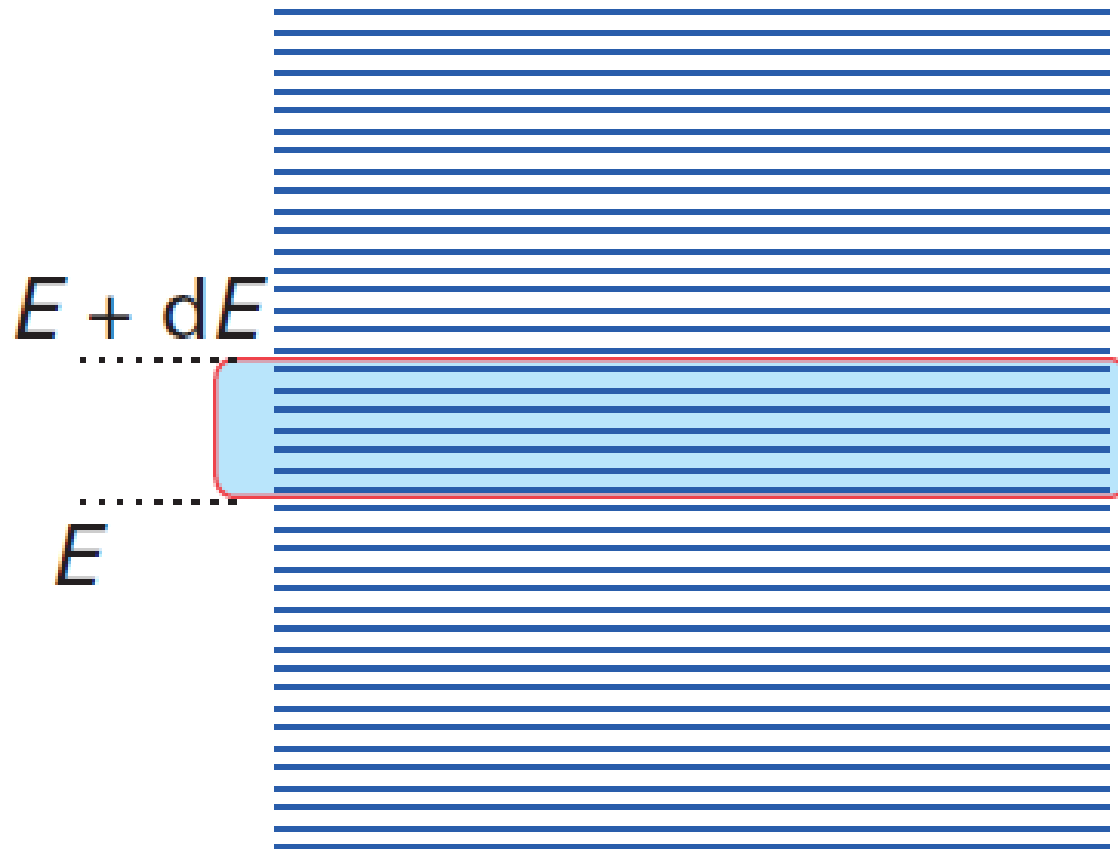


Fig. 3.68 The density of states is the number of energy levels in an infinitesimal range of energies between E and $E + dE$.

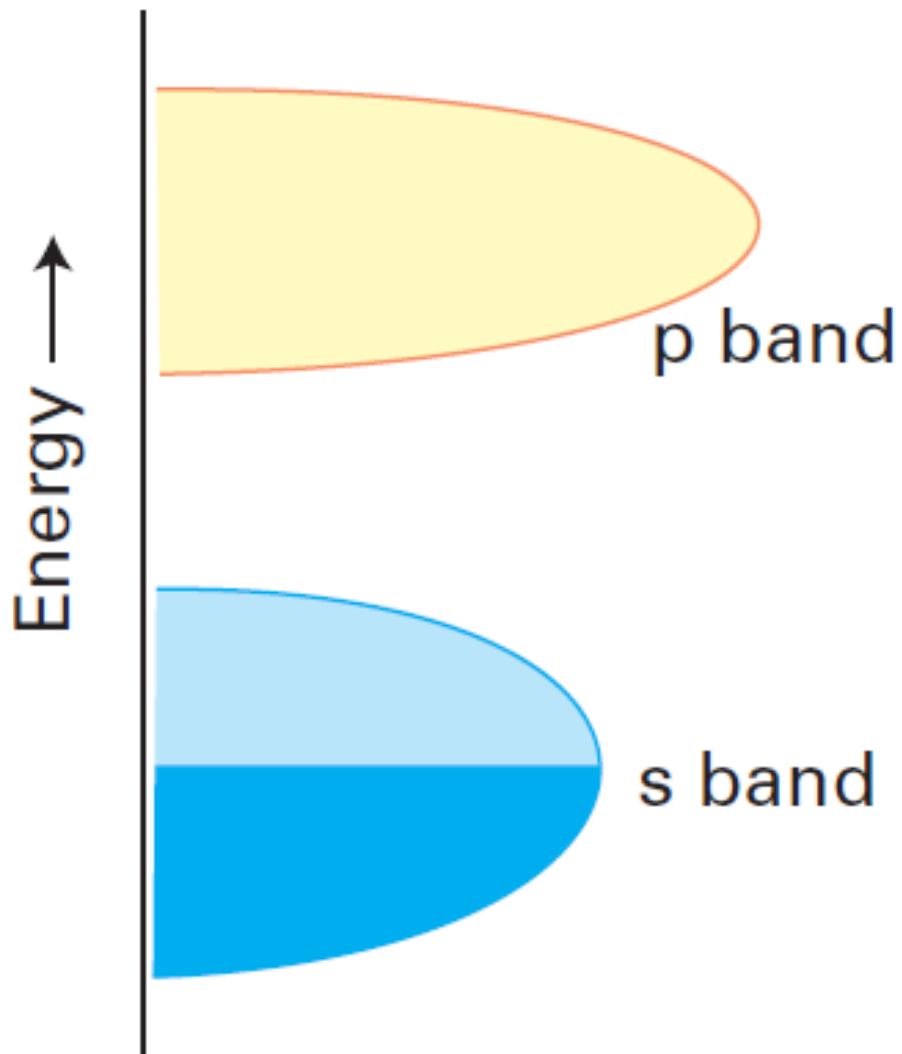


Fig. 3.69 Typical densities of states for two bands in a three-dimensional metal.

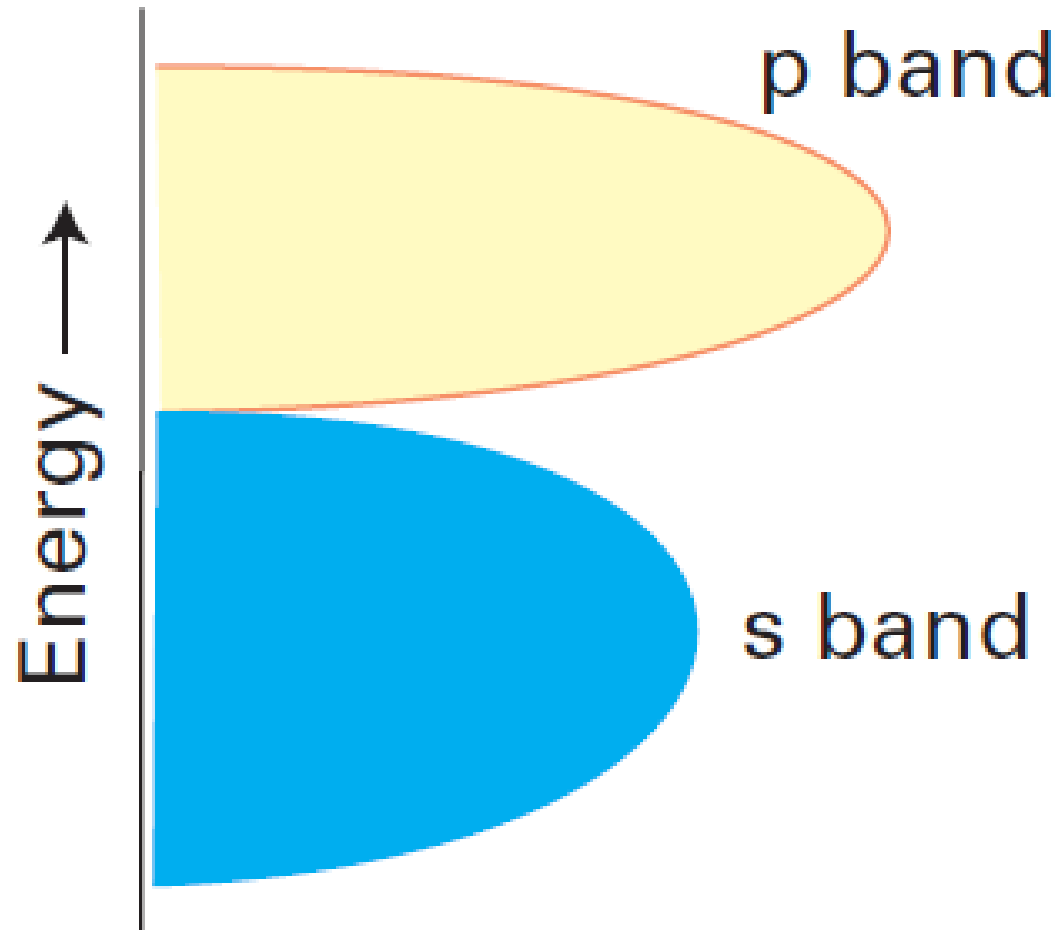


Fig. 3.70 The densities of states in a semimetal.

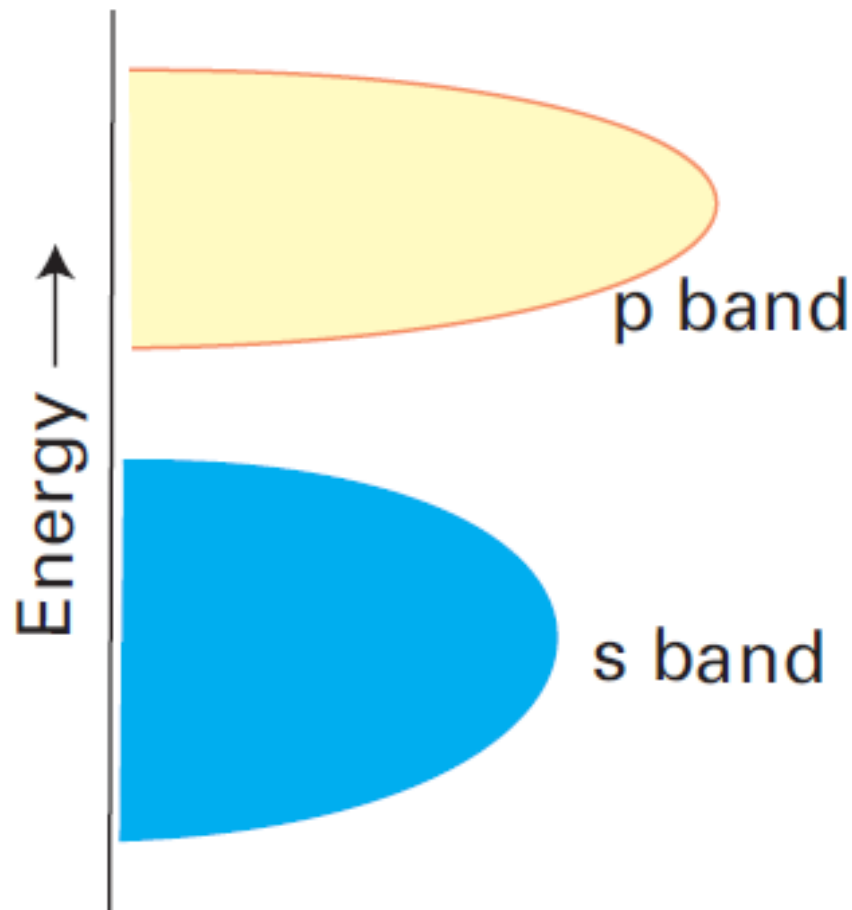


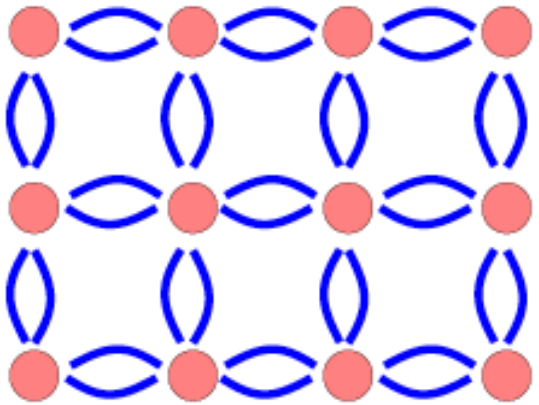
Fig. 3.71 The structure of a typical insulator: there is a significant gap between the filled and empty bands.

Table 3.13 Some typical band gaps at 298 K

Material	E_g/eV
Carbon (diamond)	5.47
Silicon carbide	3.00
Silicon	1.11
Germanium	0.66
Gallium arsenide	1.35
Indium arsenide	0.36

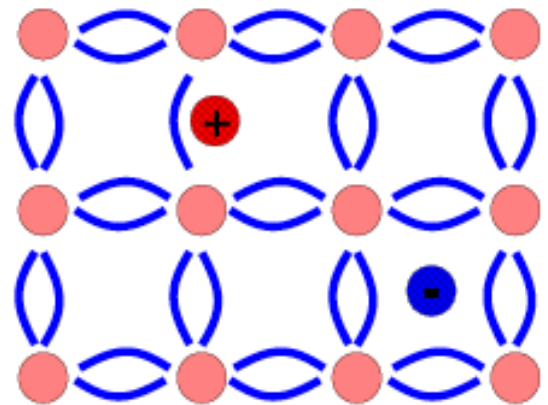
Intrínseco

T = 0 K



a)

T > 0 K

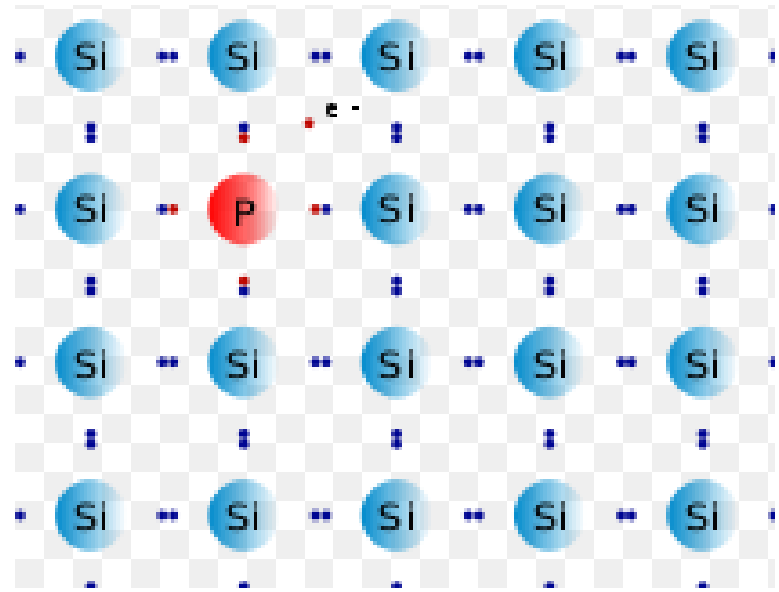


b)

+ Lacuna.

- Elettrone

Extrínseco



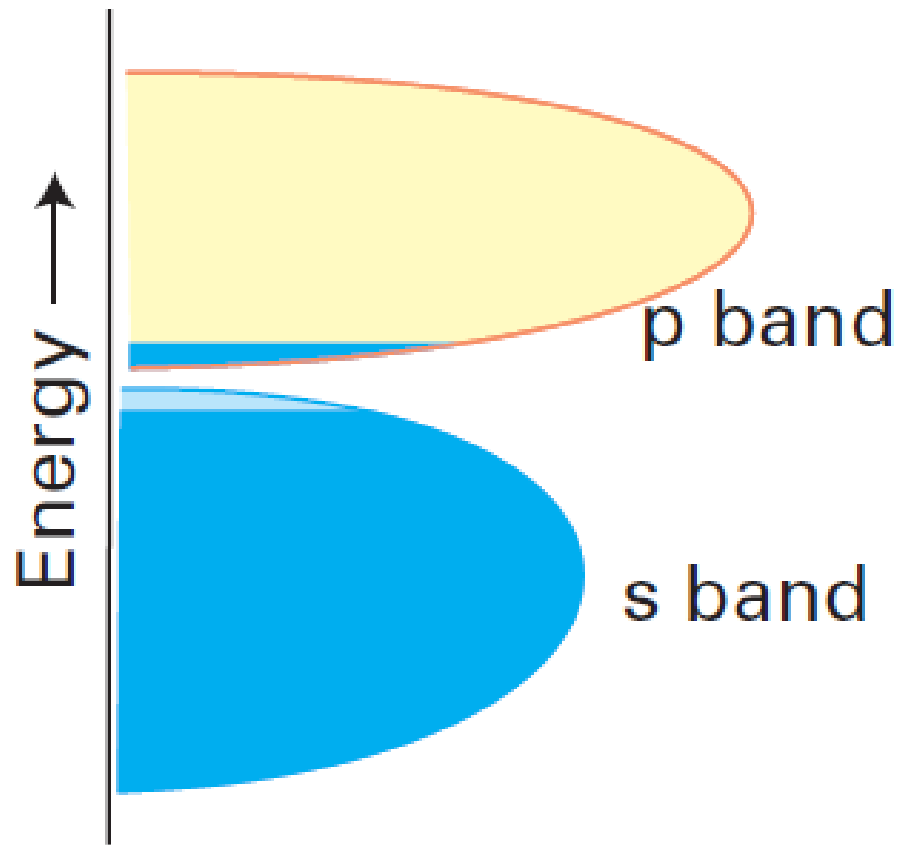


Fig. 3.72 In an intrinsic semiconductor, the band gap is so small that the Fermi distribution results in the population of some orbitals in the upper band.

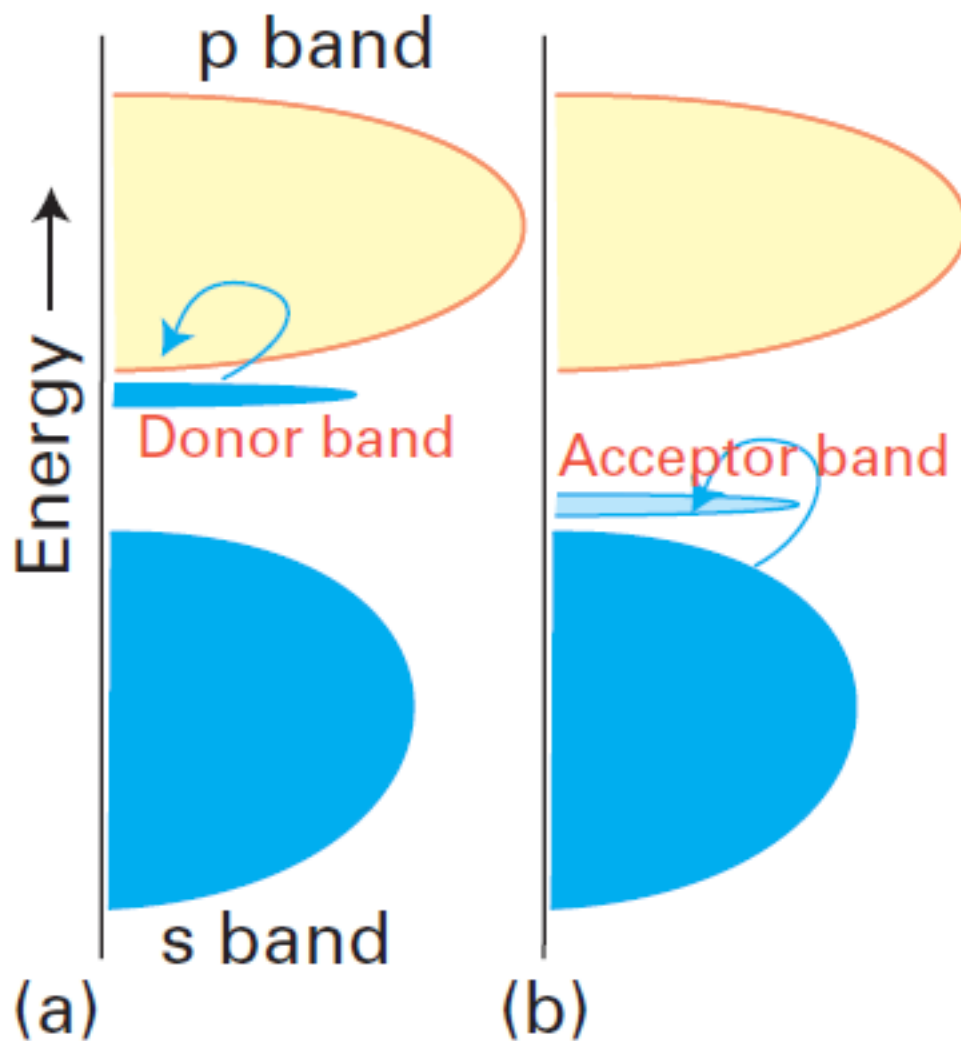
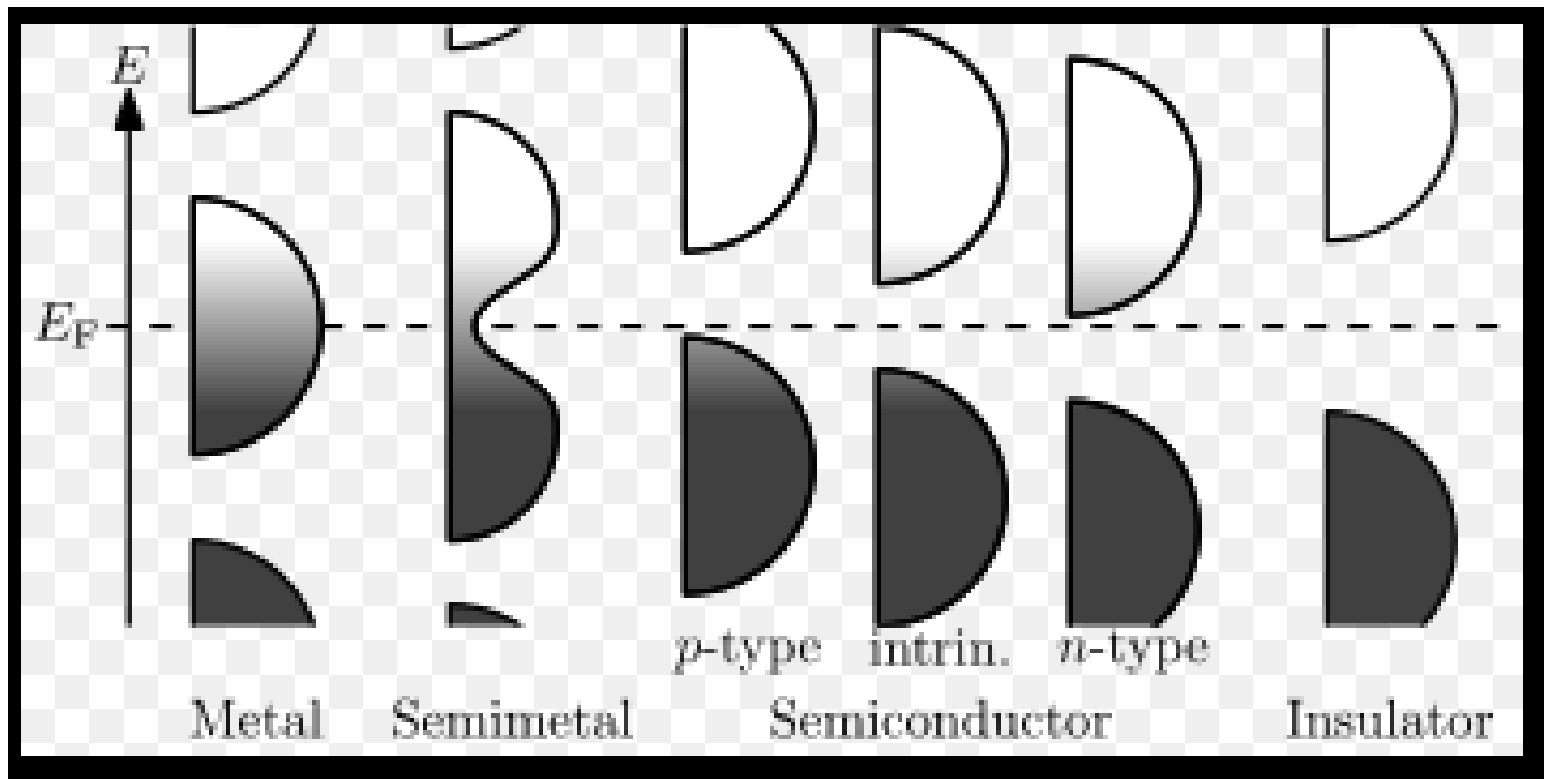


Fig. 3.73 The band structure in (a) an n-type semiconductor and (b) a p-type semiconductor.



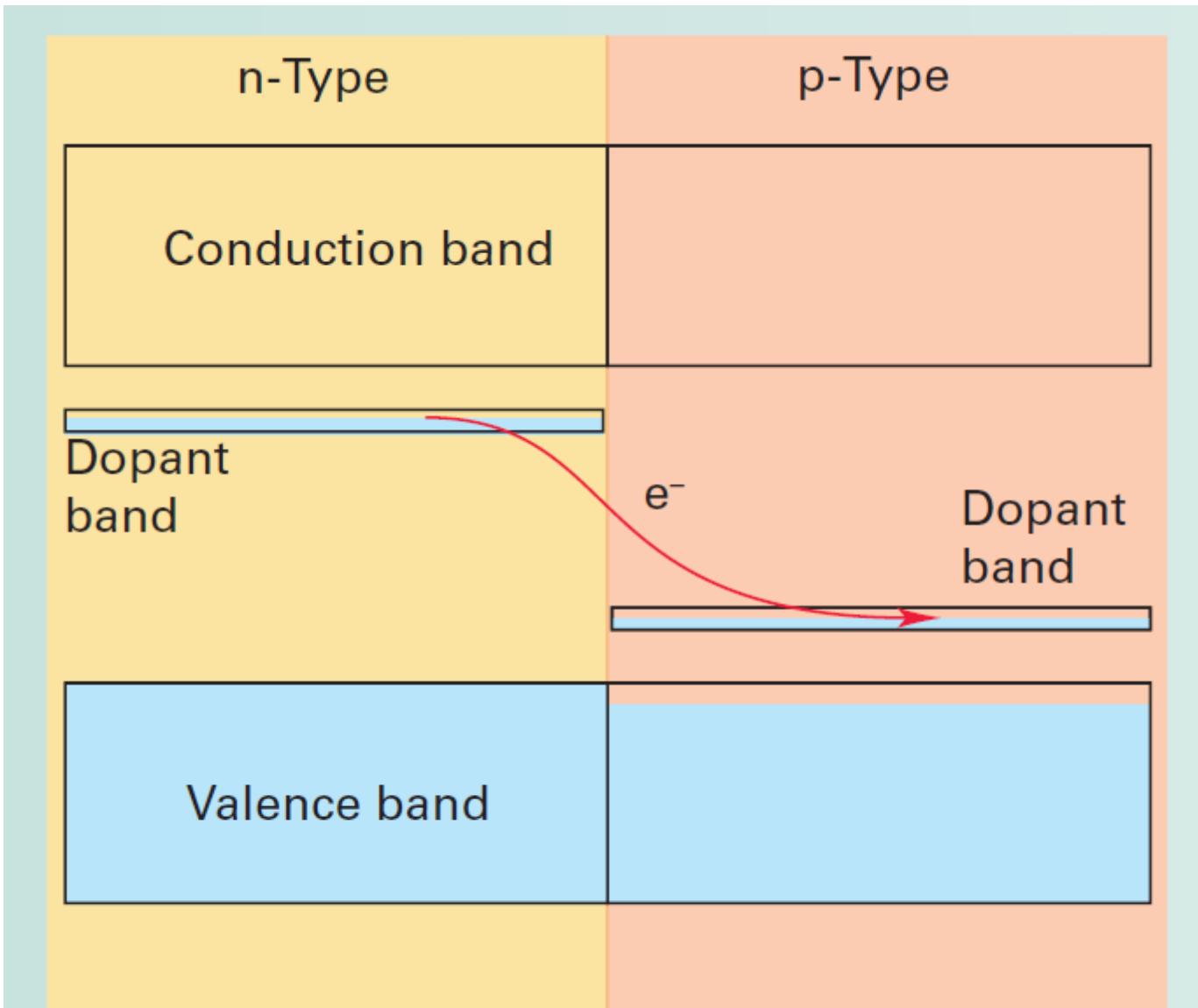
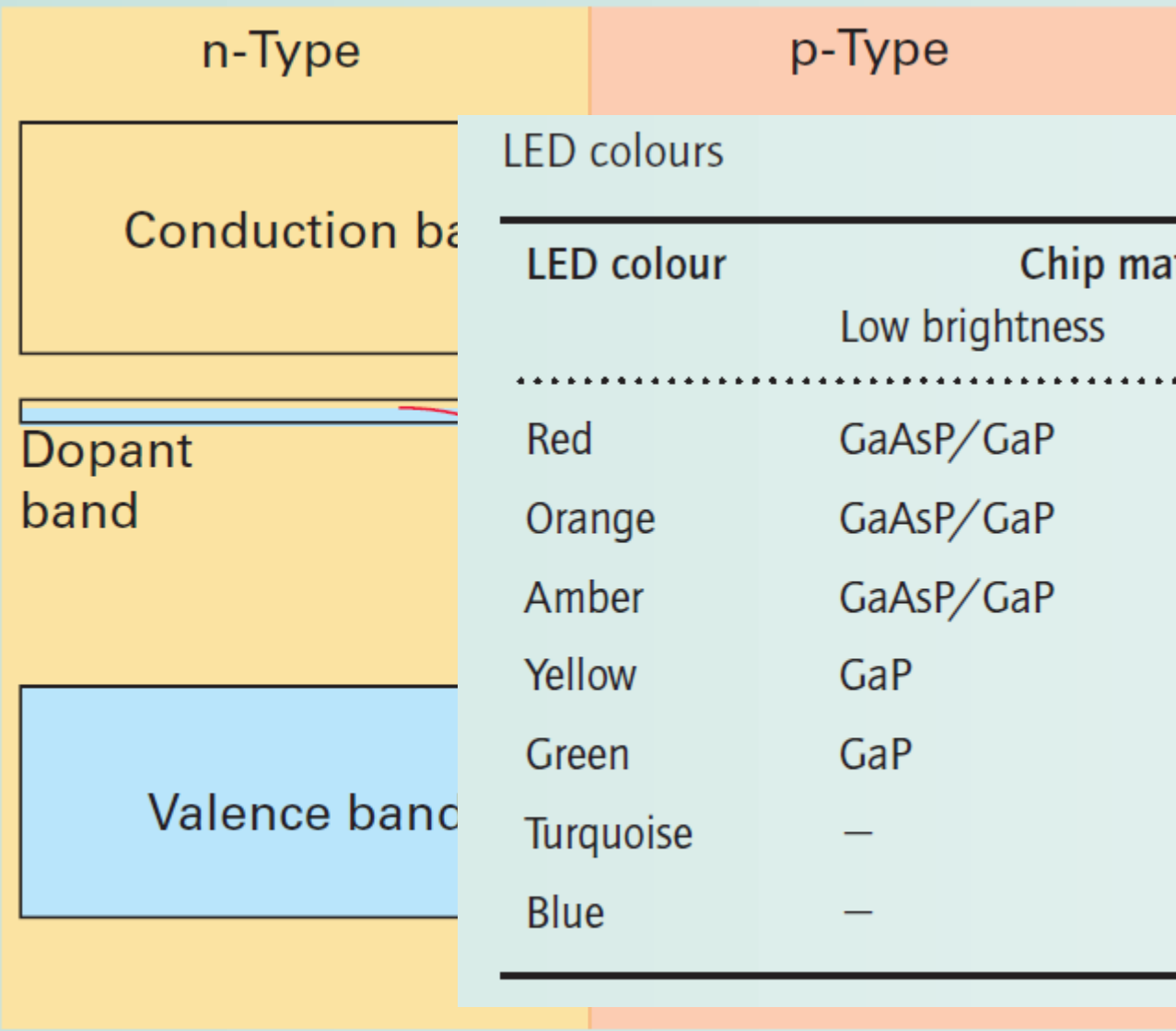


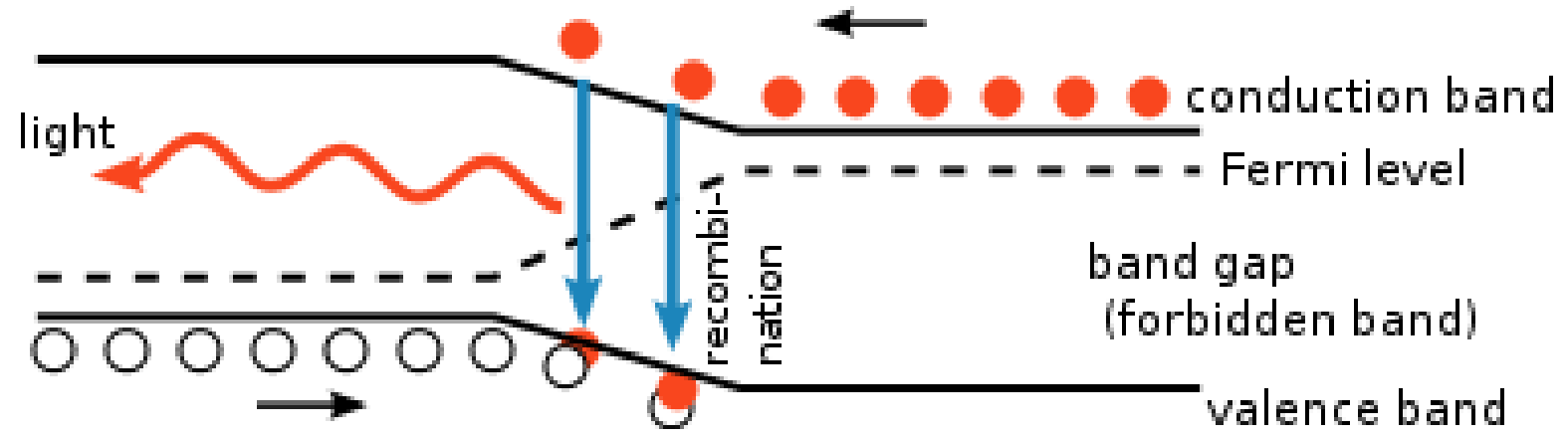
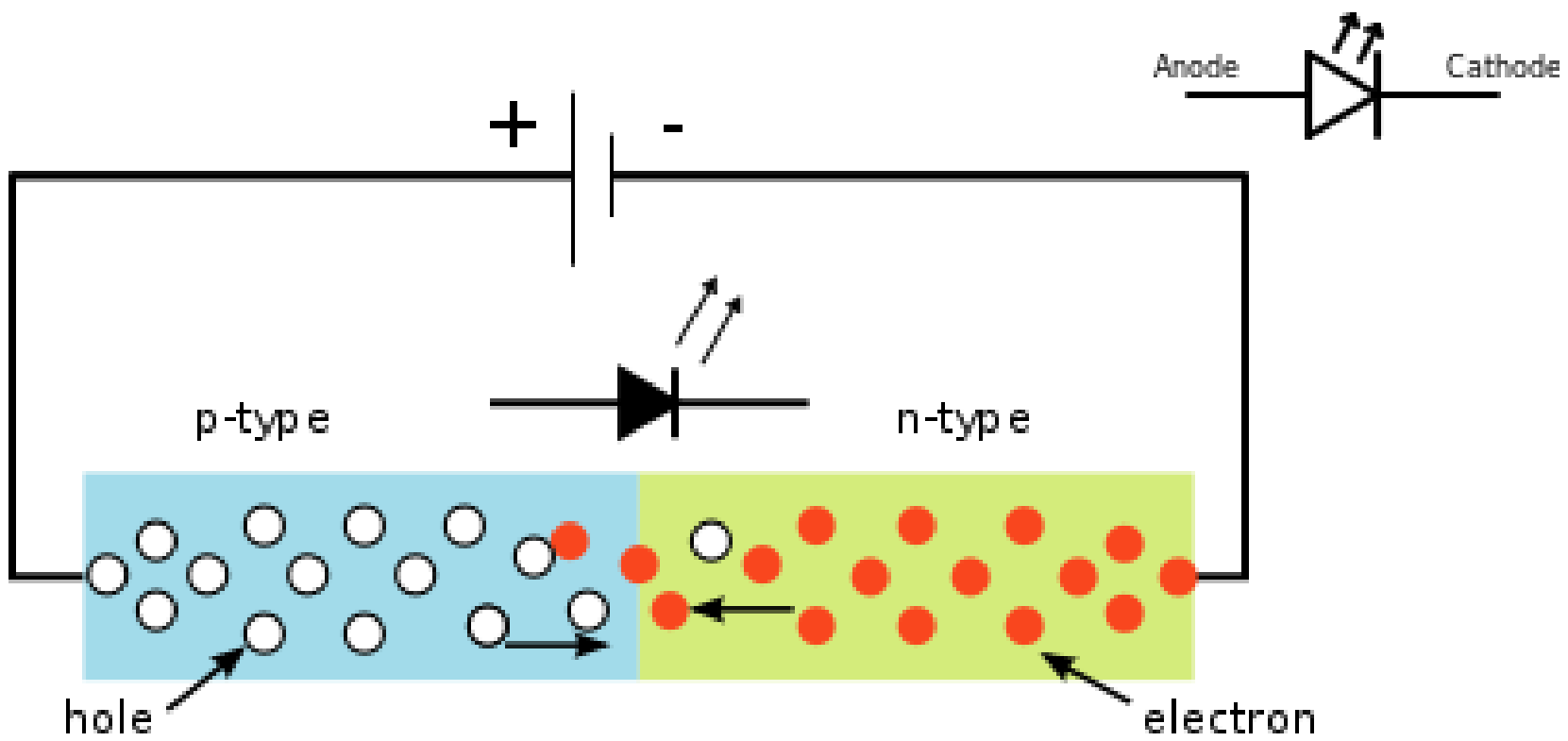
Figure B24.2 The structure of a p-n junction.

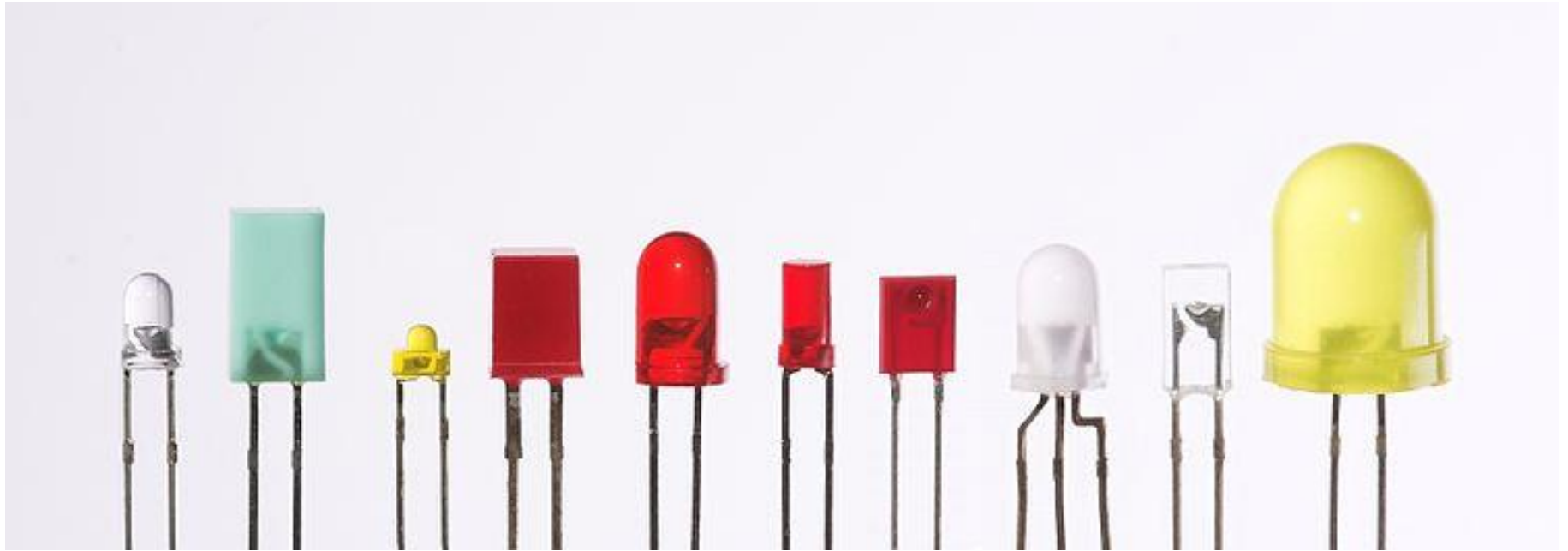


LED colours

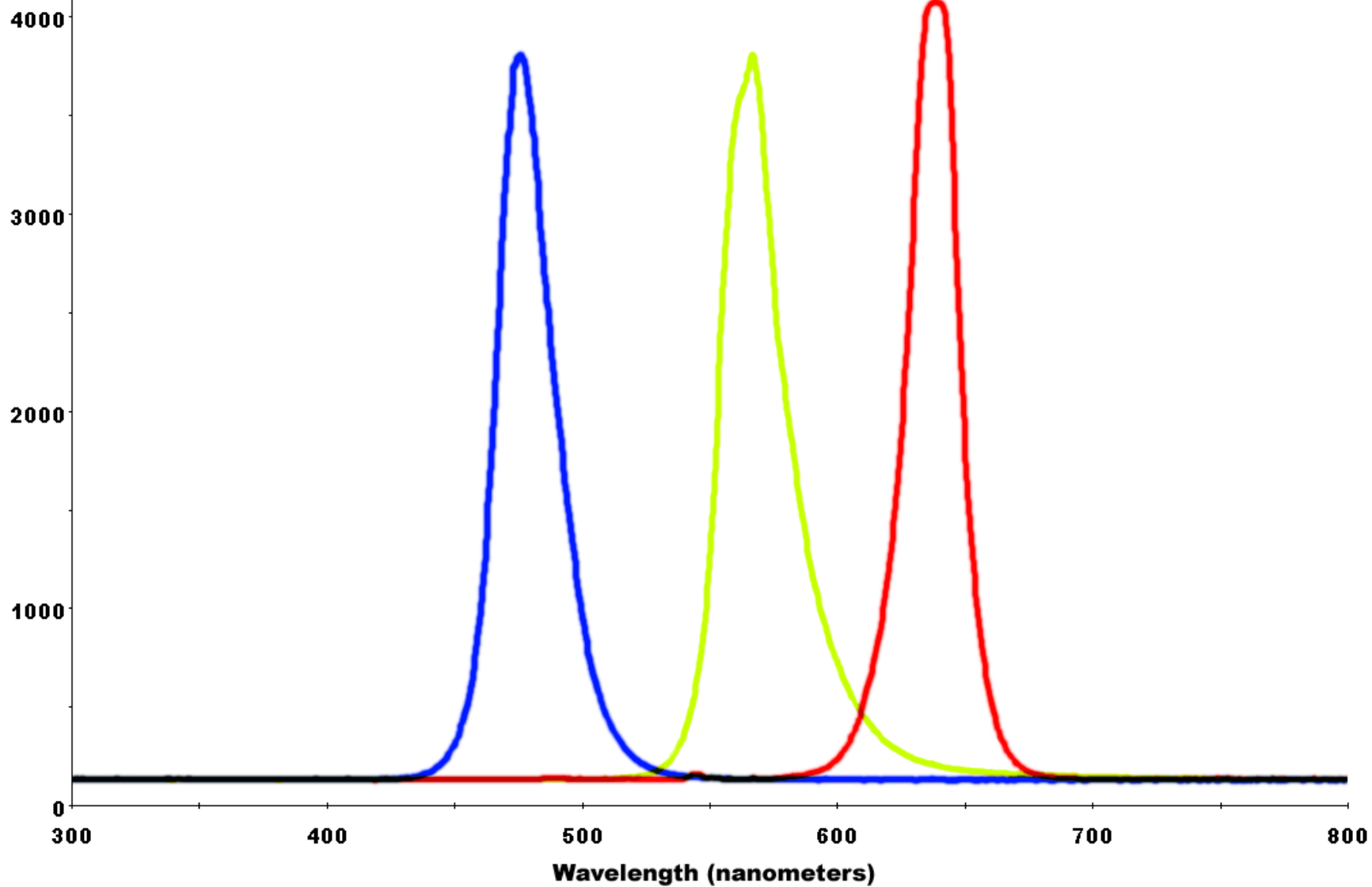
LED colour	Chip material	
	Low brightness	High brightness
Red	GaAsP/GaP	AlInGaP
Orange	GaAsP/GaP	AlInGaP
Amber	GaAsP/GaP	AlInGaP
Yellow	GaP	—
Green	GaP	GaN
Turquoise	—	GaN
Blue	—	GaN

Figure B24.2 The structure of a p-n junction.





**Intensity
(counts)**



	Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ΔV]	Semiconductor material
	Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[68]} < \Delta V < 4.0$	Traditional green: Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) Pure green: Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	Multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) ^[69] Boron nitride (215 nm) ^{[70][71]} Aluminium nitride (AlN) (210 nm) ^[72] Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm ^[73]
	Pink	Multiple types	$\Delta V \sim 3.3^{[74]}$	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white phosphors with pink pigment or dye over top. ^[75]
	White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

	Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ΔV]	Semiconductor material
	Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[68]} < \Delta V < 4.0$	Traditional green: Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) Pure green: Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	Multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic

	Color	Wavelength range (nm)	Typical efficacy (lm/W)	Typical efficiency (W/W)
	Red	$620 < \lambda < 645$	72	0.39
	Red-orange	$610 < \lambda < 620$	98	0.29
	Green	$520 < \lambda < 550$	93	0.15
	Cyan	$490 < \lambda < 520$	75	0.26
	Blue	$460 < \lambda < 490$	37	0.35

—down to 210 nm^[73]

added afterwards,
re over top.^[75]



The Nobel Prize in Physics 2014

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura

Share this:     2.3K 

The Nobel Prize in Physics 2014



Photo: A. Mahmoud

Isamu Akasaki

Prize share: 1/3



Photo: A. Mahmoud

Hiroshi Amano

Prize share: 1/3



Photo: A. Mahmoud

Shuji Nakamura

Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2014 was awarded jointly to Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura *"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"*.