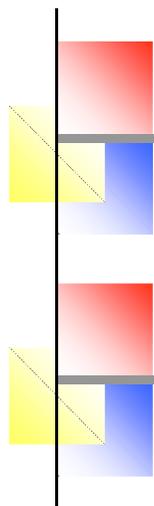


Universidade Federal Fluminense
Instituto de Física
Física IV



Condução elétrica nos sólidos
Cap. 41 (Halliday)

Daniel

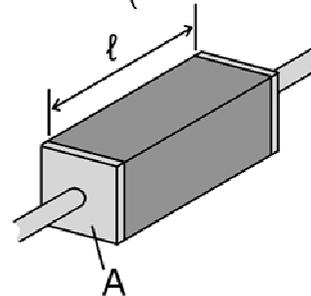
Niterói, 19 de novembro de 2014

Propriedades elétricas

Propriedades elétricas relevantes de sólidos:

1. **Resistividade** ρ à temperatura ambiente (unid: $\Omega \cdot m$)

$$\rho = R \frac{A}{l}$$



2. **Coeficiente de temperatura da resistividade:** α (unid: K^{-1})

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

3. **Concentração de portadores de carga:** n

= número de portadores de carga por unidade de volume (unid: m^{-3})

Propriedades Elétricas de Sólidos

Os valores e comportamentos dessas propriedades nos permitem classificar a maioria dos sólidos em 3 categorias:

Metal, isolante, ou semiconductor

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Material</i>		
		<i>Cobre</i>	<i>Silicio</i>	<i>Diamante</i>
<i>Tipo de condutor</i>		<i>Metal</i>	<i>Semiconductor</i>	<i>Isolante</i>
<i>Resistividade, ρ</i>	$\Omega \cdot m$	2×10^{-8}	3×10^3	10^{16}
<i>Coefficiente de temperatura da resistividade, α</i>	K^{-1}	$+4 \times 10^{-3}$	-70×10^{-3}	
<i>Concentraçao de portadores de carga, n</i>	m^{-3}	9×10^{28}	1×10^{16}	

Pergunta chave: O que causa um diamante ser um isolante, o cobre um metal e o silício um semiconductor?

Propriedades Elétricas de Sólidos

Os valores e comportamentos dessas propriedades nos permitem classificar a maioria dos sólidos em 3 categorias:

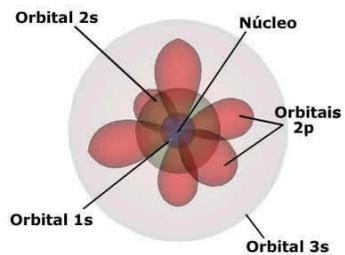
Metal, isolante, ou semicondutor

	Metal	Semicondutor	Isolante
Exemplo	Cobre	Silício	Diamante
Resistividade ρ	$\sim 10^{-8} \Omega.m$	$\sim 10^3 \Omega.m$	$\sim 10^{16} \Omega.m$
<i>Band gap</i> E_g		pequeno ($E_g \sim 0 - 3 \text{ eV}$)	grande ($E_g > 3 \text{ eV}$)
Coeficiente de temperatura da resistividade α	positivo	negativo	negativo
Concentração de portadores n	$\sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$	$\sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$	desprezível

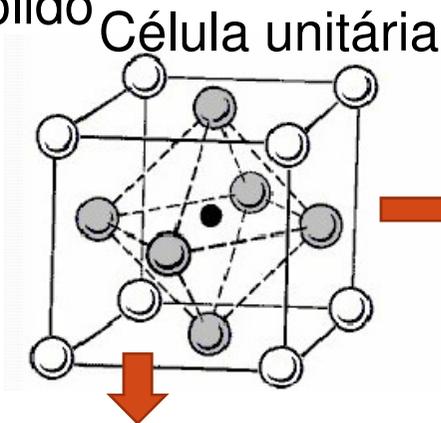
Pergunta chave: O que causa um diamante ser um isolante, o cobre um metal e o silício um semicondutor?

Átomo isolado e sólido

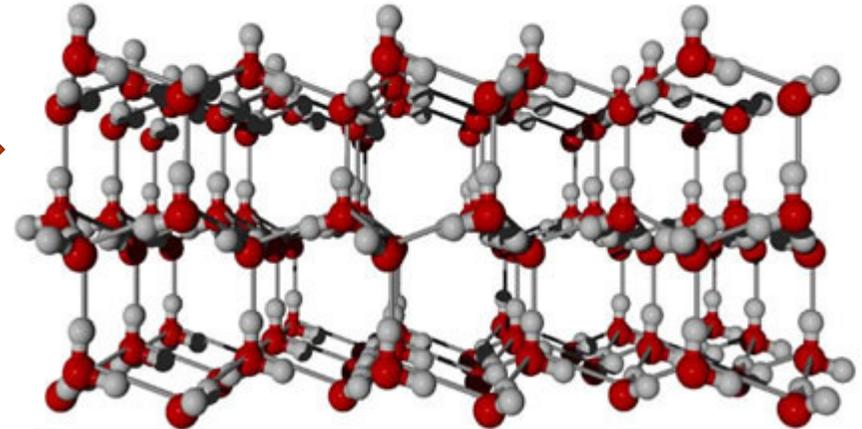
Existem diferenças drásticas entre um átomo isolado e um átomo em um sólido



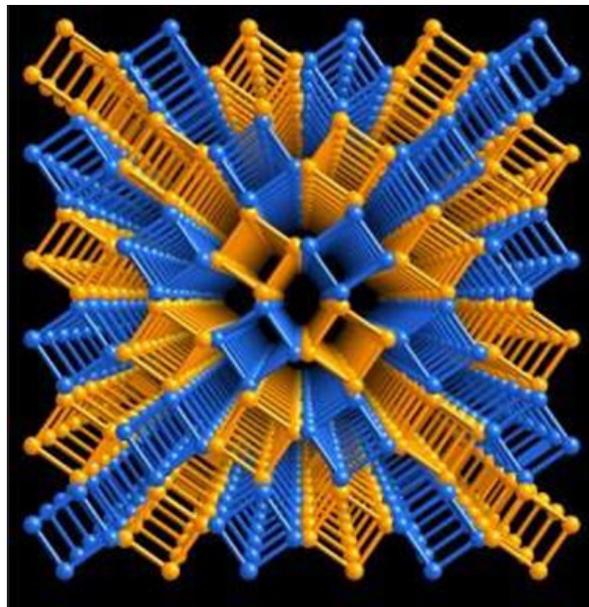
Átomo isolado



Estrutura cristalina

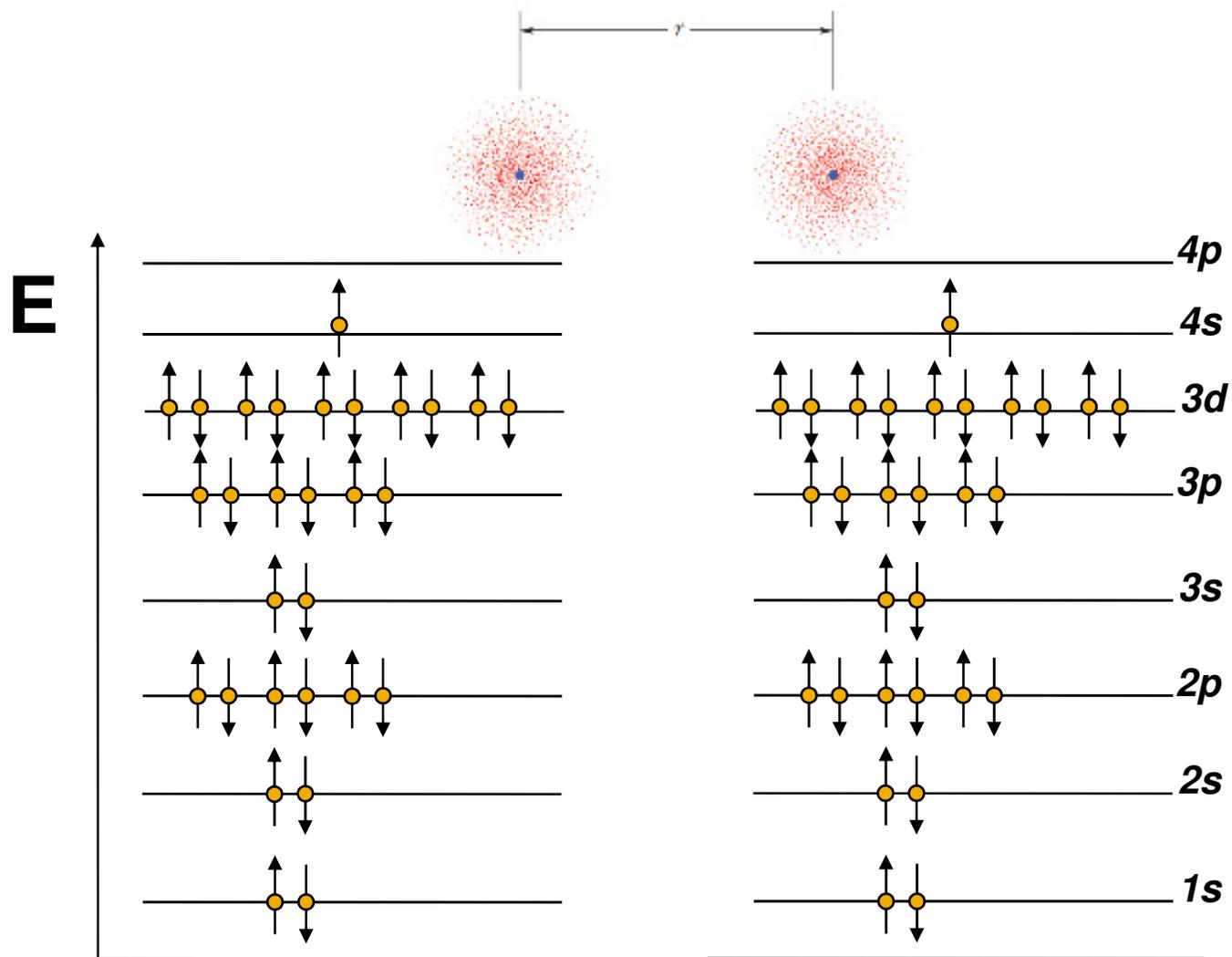


Estrutura cristalina



sólidos

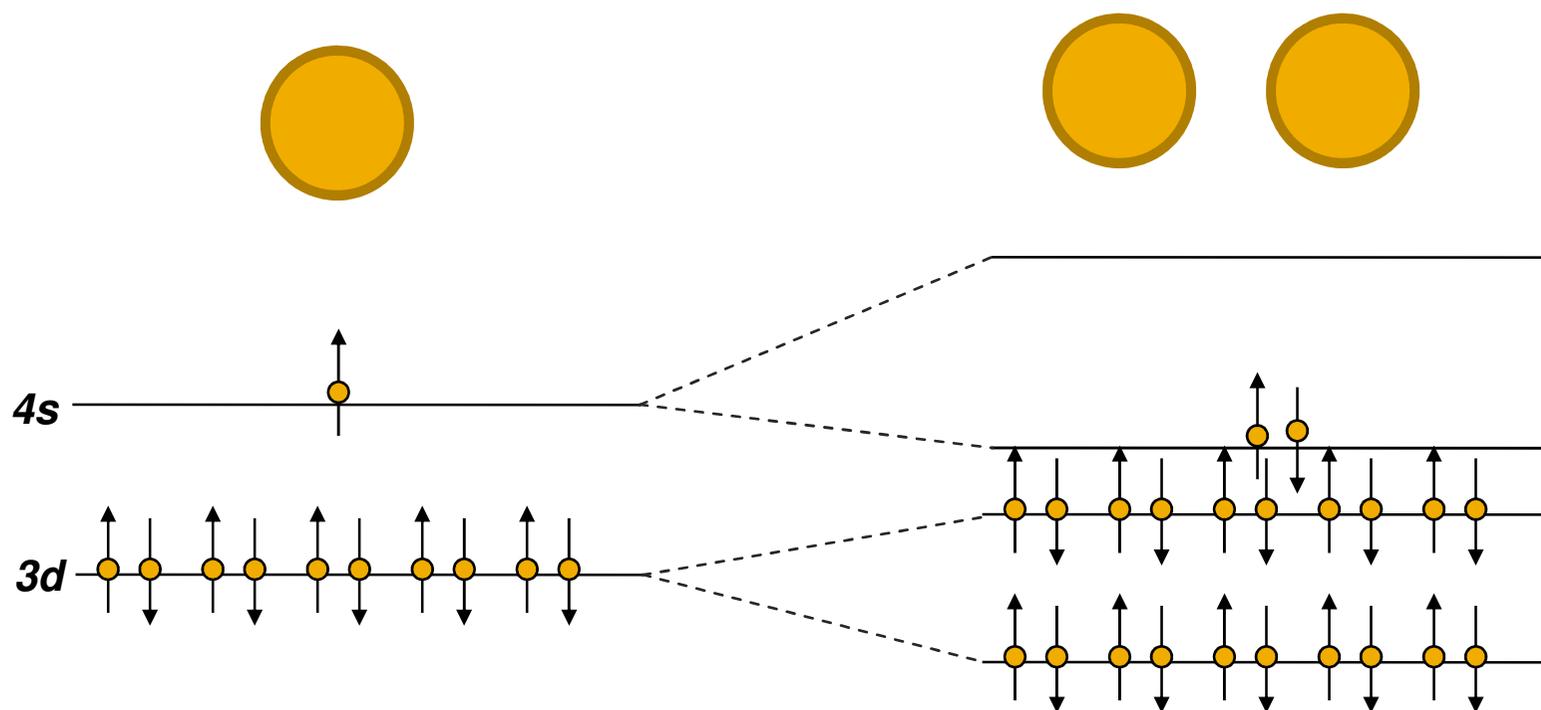
Níveis de energia: dois átomos



Níveis de energia: dois átomos

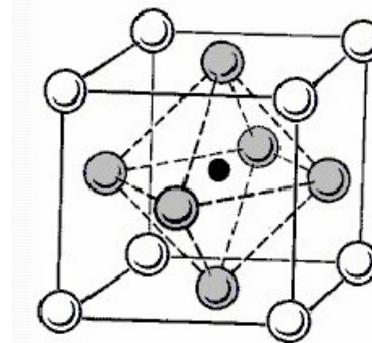
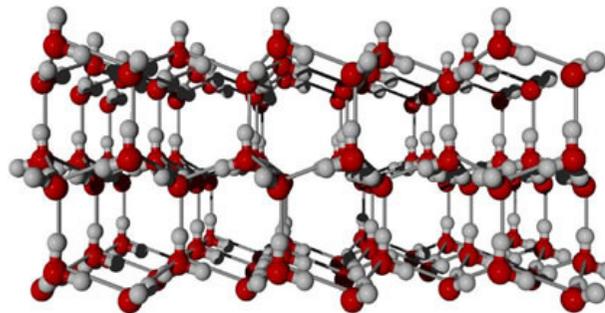
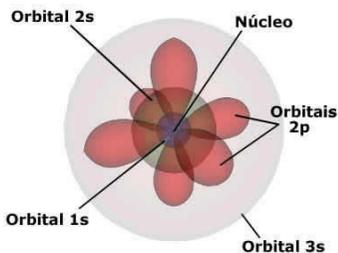
Átomo isolado (Cobre)

"Molécula"

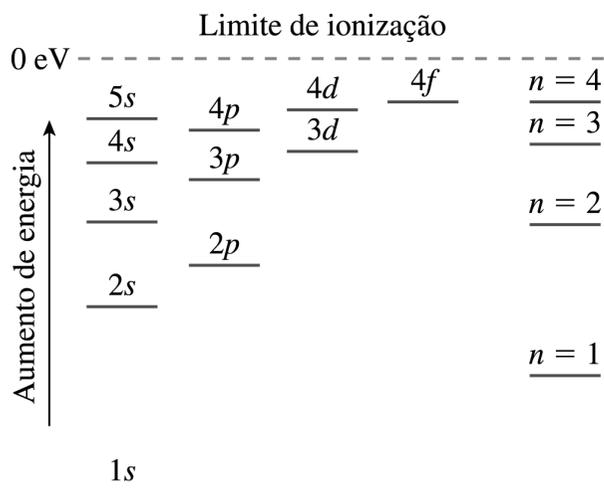


Átomo isolado e sólido

Existem diferenças drásticas entre um átomo isolado e um átomo em um sólido

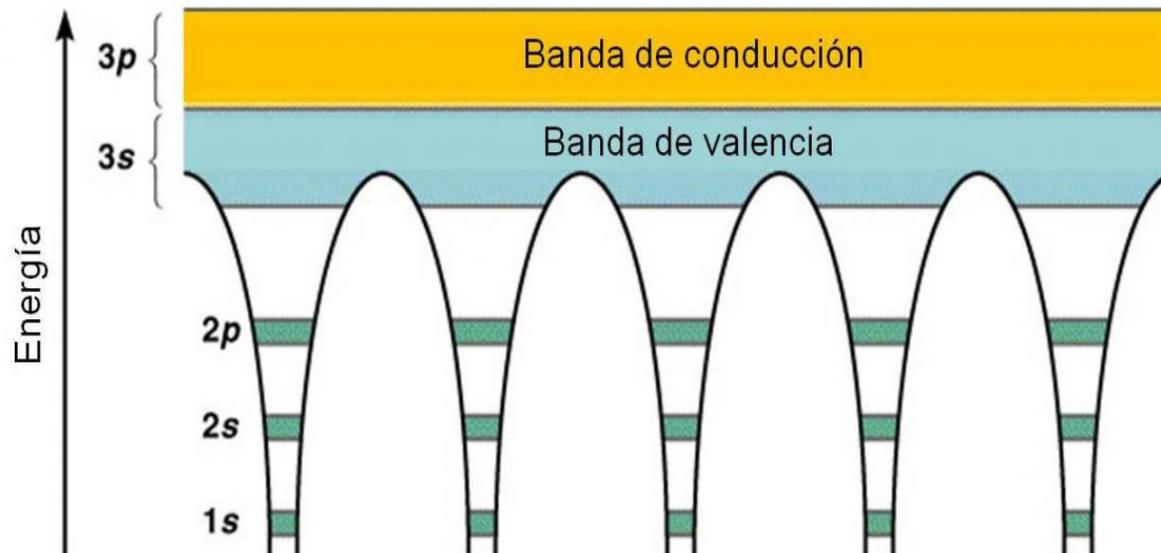


Átomo isolado



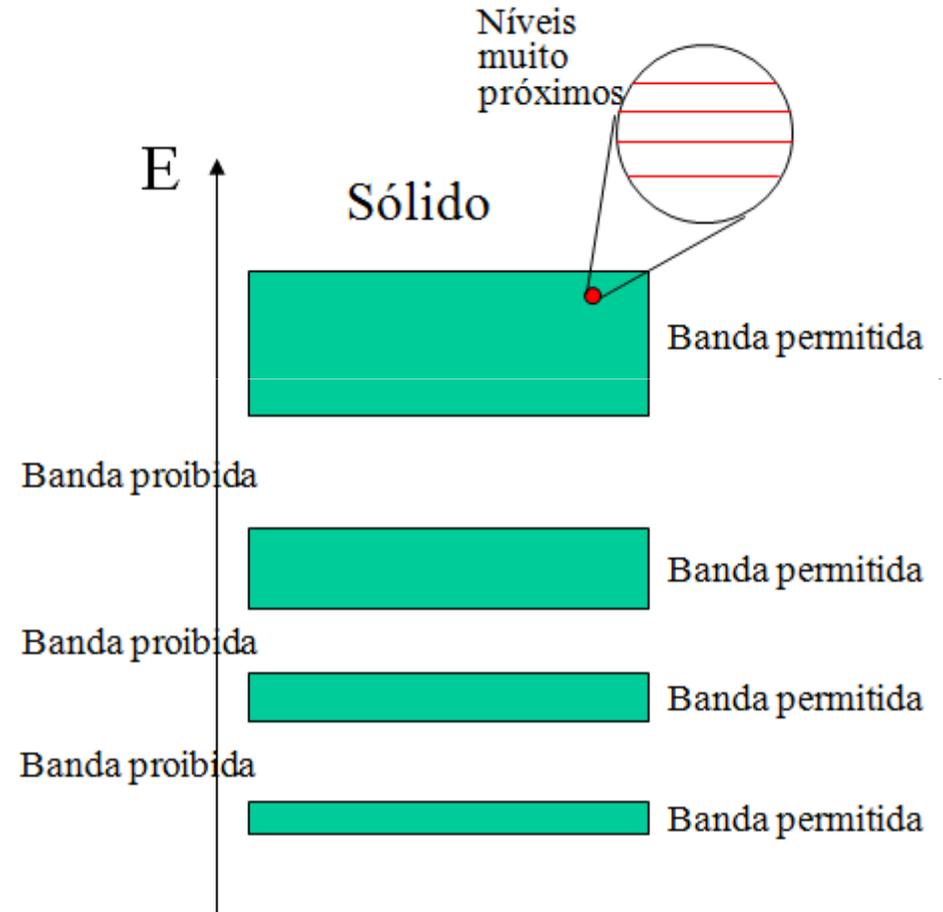
Átomo multieletrônico

Hidrogênio



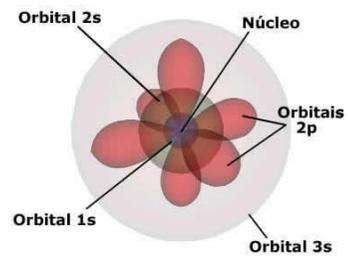
Níveis de energia: muitos átomos

- Sólido: $\sim 10^{23}$ átomos de cobre \rightarrow cada nível atômico se desdobra em 10^{23} níveis
- Níveis de energia muito próximos: bandas de energia



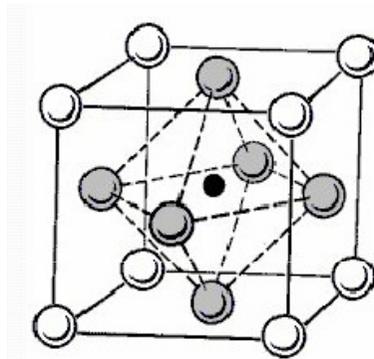
Átomo isolado e sólido

Existem diferenças drásticas entre um átomo isolado e um átomo em um sólido



Átomo isolado

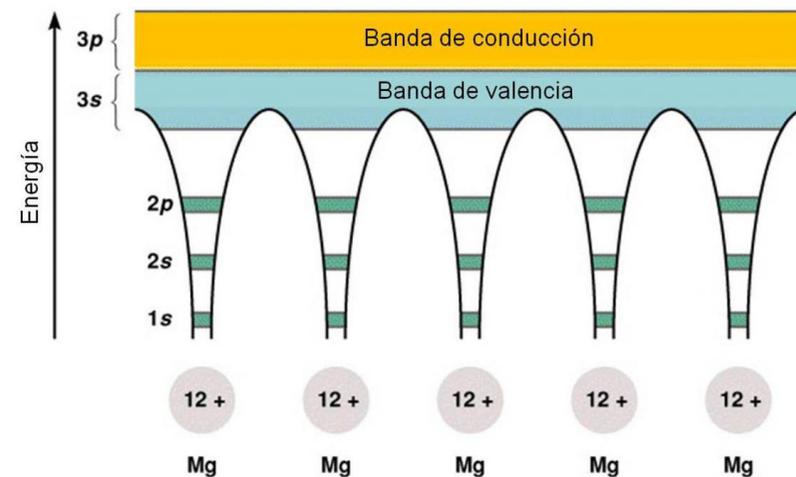
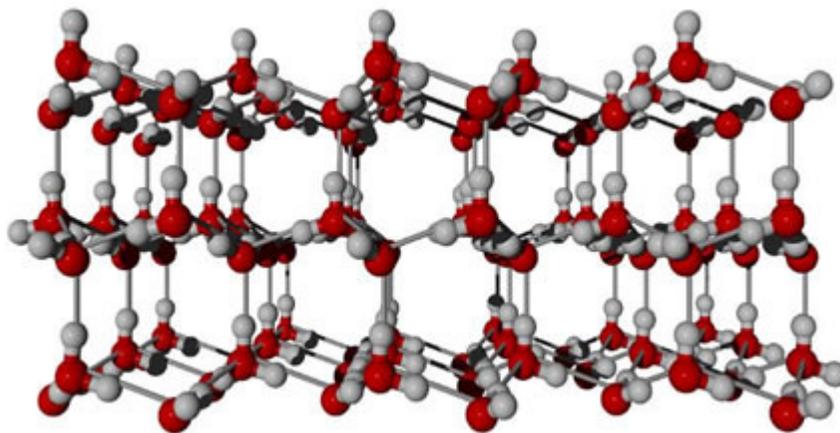
Célula unitária



Gás elétrons



Estrutura cristalina



Metais: contando estados



- Quantos estados quânticos existem?
- Quantos estados existem por unidade de volume no intervalo de energias entre E e $E + dE$?
- Elétrons confinados em uma caixa 3D:

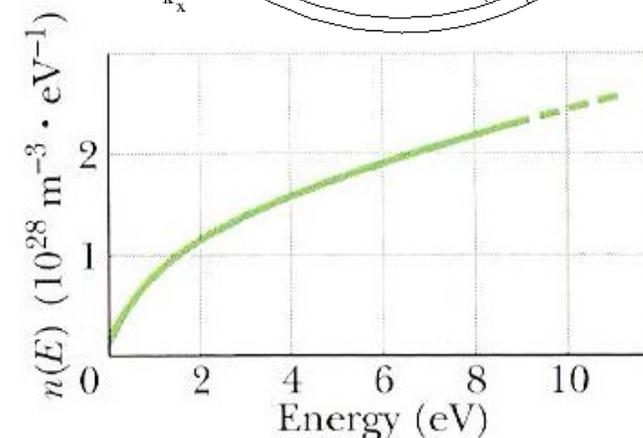
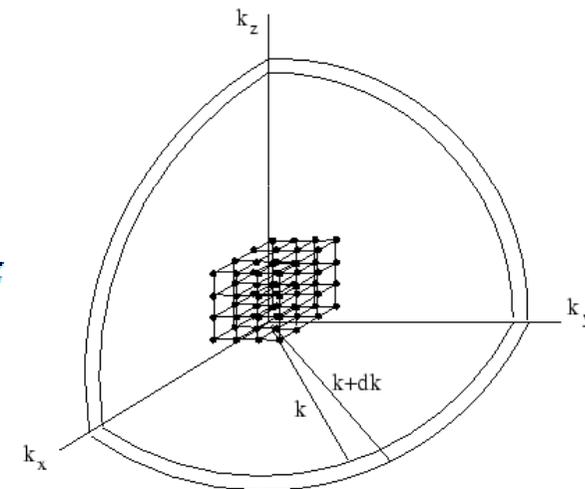
$$n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

$$E = n^2 \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right)$$

$$N(E)dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} E^{1/2} dE$$

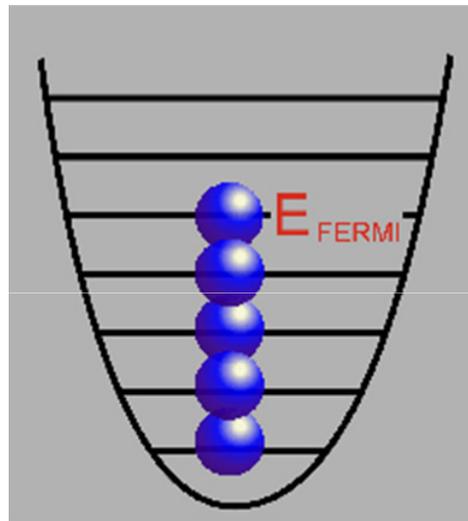
Modelo: ELÉTRONS LIVRES em um potencial tipo 'caixa' rígida' 3D

n_x, n_y, n_z



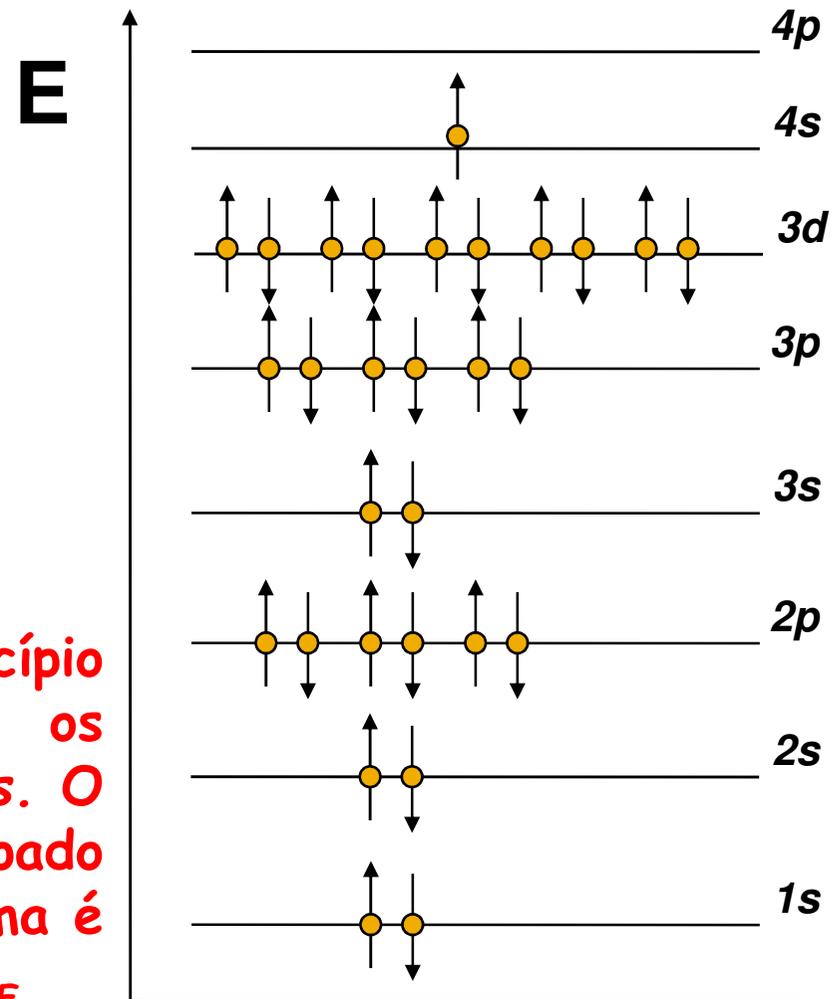
Níveis de energia: um átomo

Átomo isolado (ex: Cobre $Z = 29$)



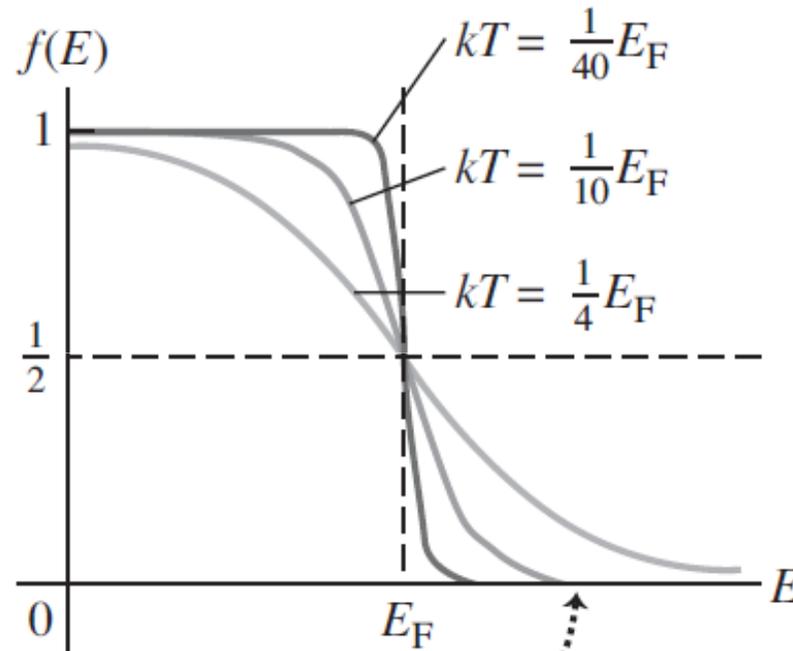
Férmions

Partículas que obedecem o Princípio de Exclusão de Pauli (como os elétrons) são chamadas *férmions*. O nível mais alto de energia ocupado no estado fundamental do sistema é chamado *energia de Fermi*, ou E_F



Isolantes, semicondutores e condutores

Distribuição de Fermi-Dirac para $T \neq 0$



À medida que T aumenta, cresce o número de elétrons excitados até estados com energia $E > E_F$

Isolantes, semicondutores e condutores

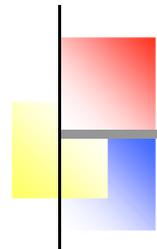


Diagrama de níveis/bandas

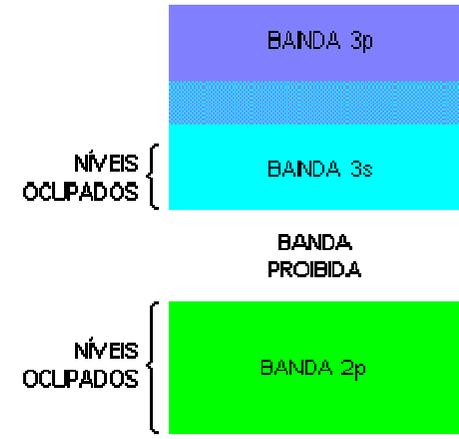
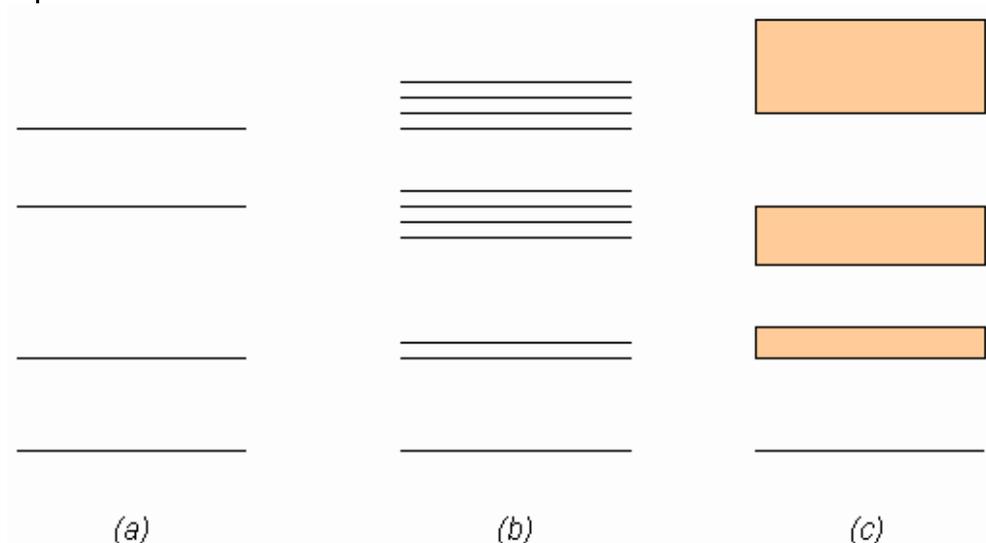
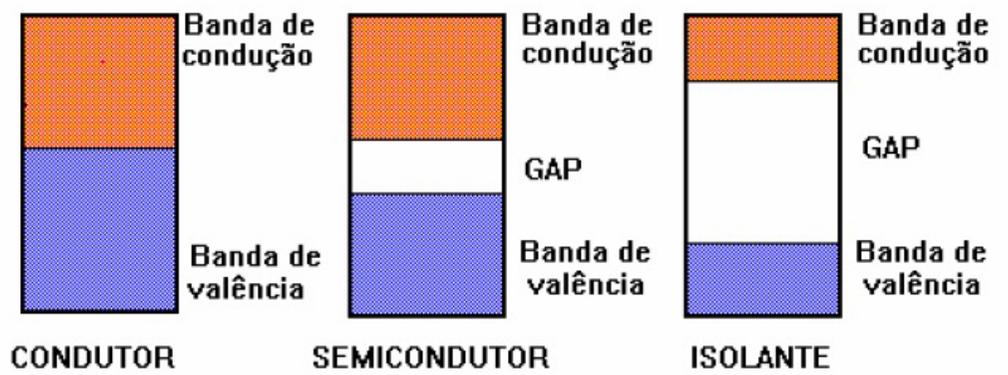


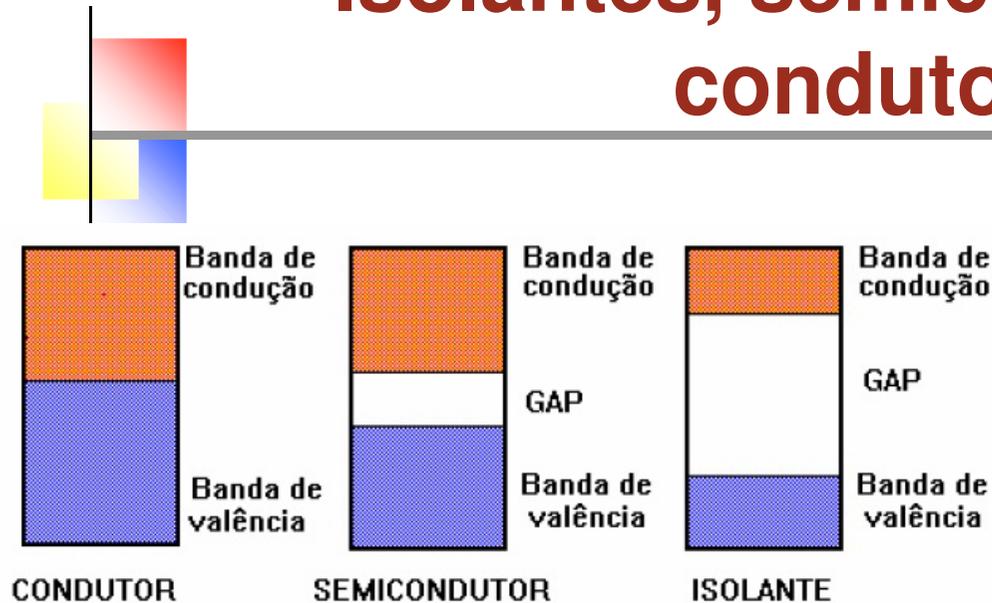
Fig.27

Diagrama do sódio (sódio = $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1 - [Ne]3s^1$)



Gap (Si) = 1,1 eV
Gap (Ge) = 0,67 eV

Isolantes, semicondutores e condutores



Gap (Si) = 1,1 eV
Gap (Ge) = 0,67 eV

Valores de energia do gap (lacuna)

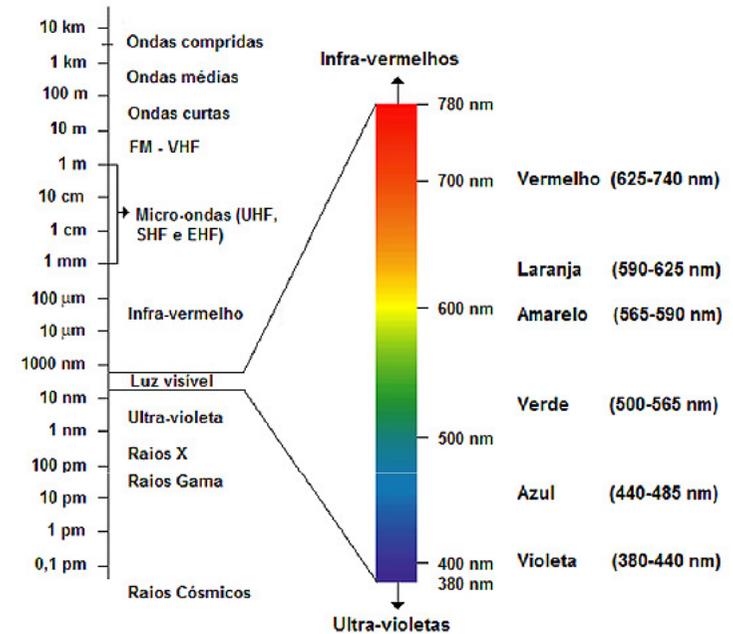
Isolante – 5,5 eV (carbono) (225 nm – ultravioleta)

Semicondutor – 1,1 eV (Silício) (1170 nm)

Densidade de portadores:

$n = 9 \times 10^{28}$ portadores/m³ (Cobre)

$n = 1 \times 10^{16}$ portadores/m³ (Silício)



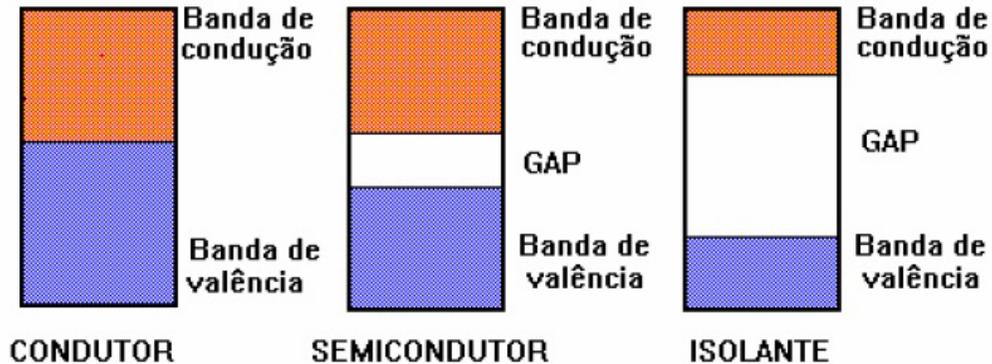
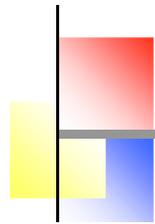
$$kT(1K) = 0,86 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$$kT(10K) = 0,86 \times 10^{-3} \text{ eV}$$

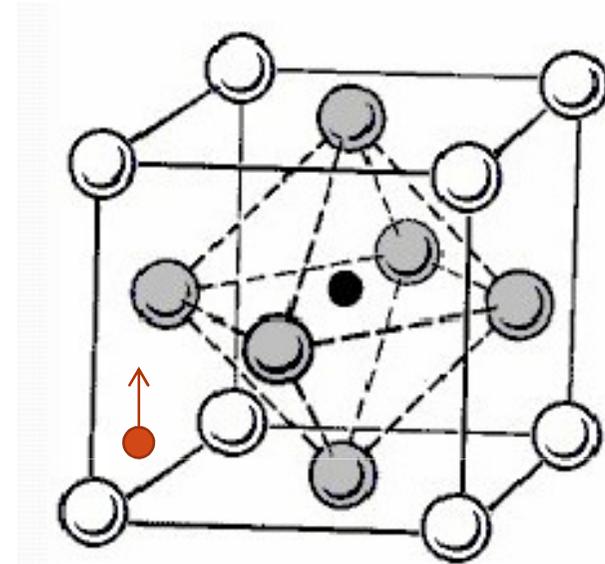
$$KT(1000K) = 0.086 \text{ eV}$$

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \text{ sendo } \tau = \frac{\lambda}{\bar{v}}$$

Isolantes, semicondutores e condutores



Gap (Si) = 1,1 eV
Gap (Ge) = 0,67 eV



Resistividade em função da temperatura

- 1) Condutor (ρ aumenta)
- 2) Semicondutor (ρ diminui)

$$kT(1K) = 0,86 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$$kT(10K) = 0,86 \times 10^{-3} \text{ eV}$$

$$KT(1000K) = 0.086 \text{ eV}$$

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \text{ sendo } \tau = \frac{\lambda}{\bar{v}}$$

Densidade de Estados e E_F

Ex. 41.3 – Qual o número de estados por elétron-volt para $E = 7$ eV em um material metálico de volume $V = 2 \times 10^{-9} \text{ m}^3$?

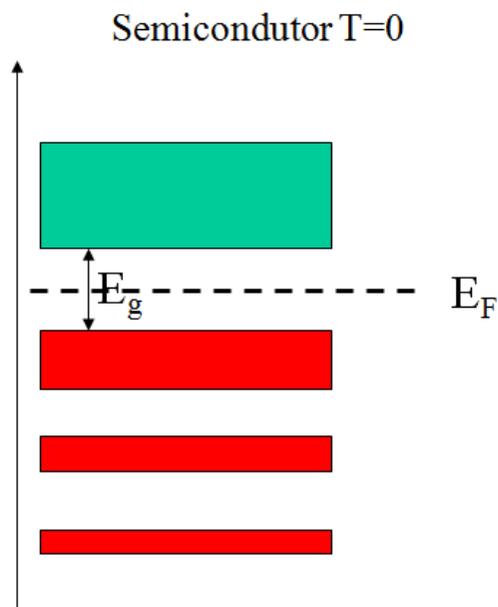
R: $n(E) = 3,6 \times 10^{19} \text{ eV}^{-1}$ (estados por eV)

Ex. Qual o número de estados em um pequeno intervalo de energia de largura 0,003 eV, centrado em 7 eV?

R = $1,1 \times 10^{17}$ estados

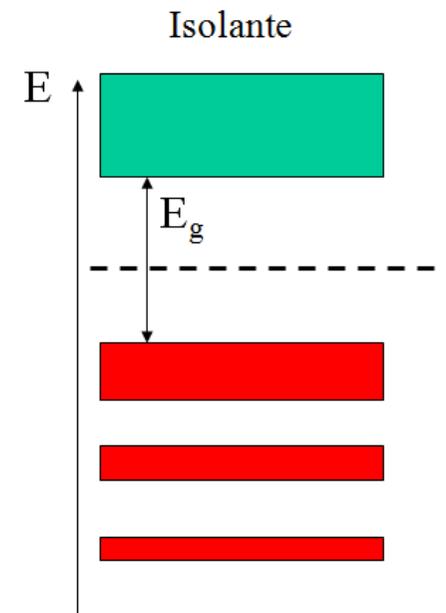
Semicondutores

- Para $T = 0$:
- A energia do último elétron a ser preenchida define a **energia de Fermi E_F**
- Última banda **ocupada** está **totalmente ocupada (banda de valência)**
- Primeira banda **desocupada (banda de condução)** está separada por uma energia E_g (*band gap*).



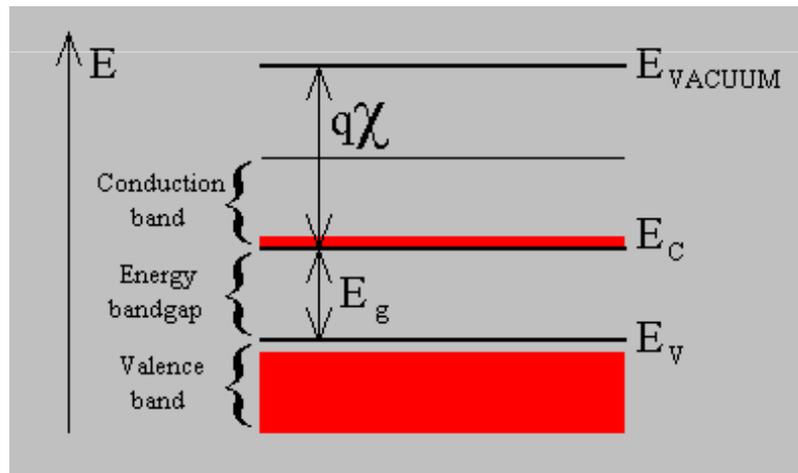
Semicondutor :

**E_g é muito menor
que num isolante!!**

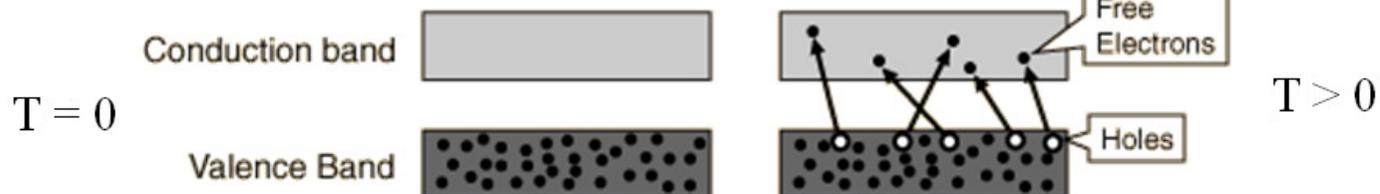


Semicondutores

- Para $T > 0$:
- A probabilidade que um elétron, por agitação térmica passe para um estado da banda de condução não é desprezível no caso do semicondutor.
- Condução por **elétrons** e **buracos**!



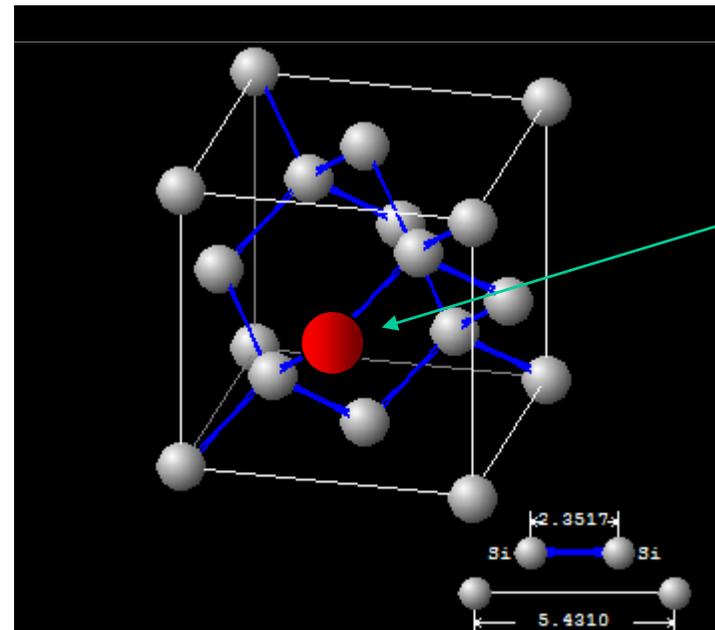
	$E_g [eV]$	$n_i [cm^{-3}]$
<i>Ge</i>	0,67	$2,4 \times 10^{13}$
<i>Si</i>	1,12	$1,5 \times 10^{10}$
<i>GaAs</i>	1,43	5×10^7



Semicondutores dopados

As propriedades (e portanto aplicações) dos semicondutores podem ser radicalmente alteradas **dopando-os** com impurezas (i.e., misturando ao sólido semicondutor alguns átomos diferentes)

Exemplo: silício dopado (apenas 1 impureza para cada $\sim 10^7$ átomos de silício já faz enorme diferença!)

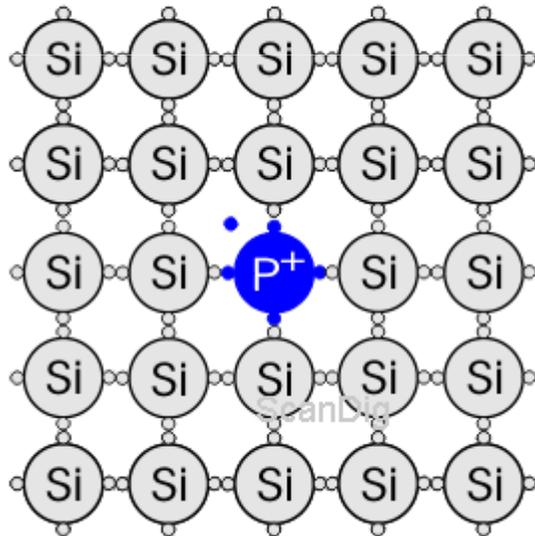


dopagem

Dopagens tipo *n* e tipo *p*

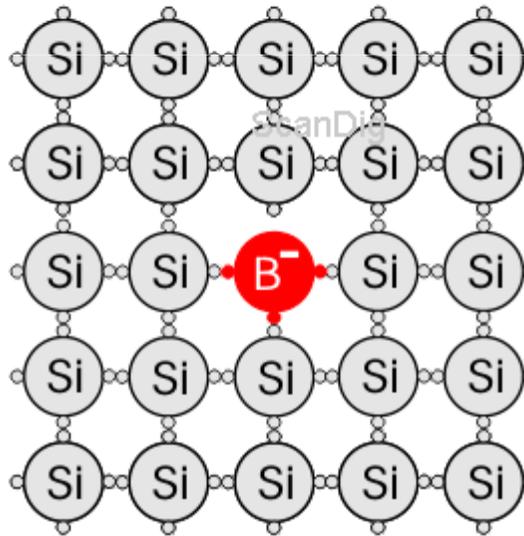
2 tipos de dopagem

Tipo *n*: impureza tem um elétron de valência **a mais** que a matriz de Si



impureza 'doadora' de elétrons

Tipo *p*: impureza tem um elétron de valência **a menos** que a matriz de Si



impureza 'aceitadora' de elétrons

elétrons de valência

Exemplo:

Silício: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

Fósforo: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$

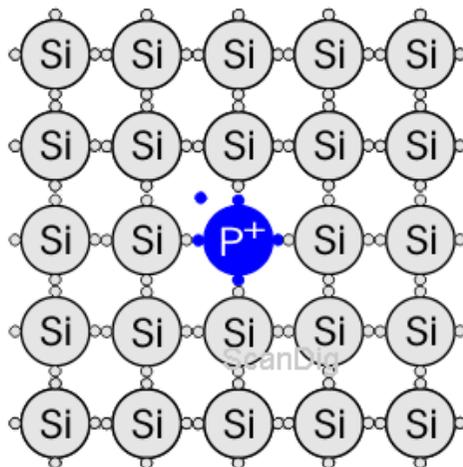
Boro: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$

obs: todos são materiais eletricamente neutros!

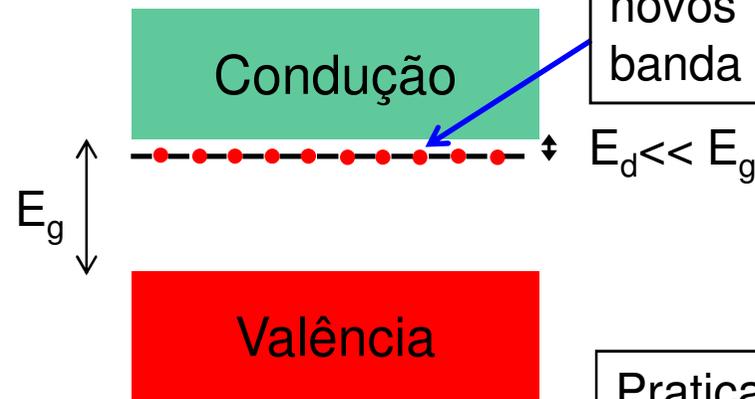
Semicondutores tipo *n*

doadores para Si

					0	
	III A	IV A	VA	VIA	VII A	He
5	B	C	N	O	F	Ne
13	Al	Si	P	S	Cl	Ar
31	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
49	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
81	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
113						

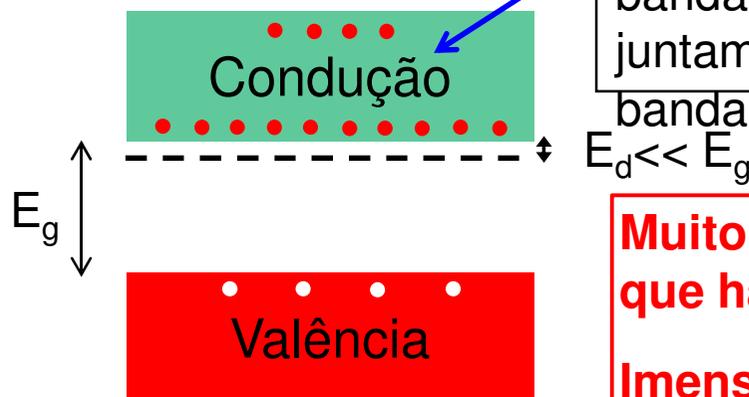


$T = 0$



Elétrons 'extras' são fracamente ligados, e ocupam novos níveis logo abaixo da banda de condução

$T > 0$



Praticamente todos os elétrons 'extras' são facilmente excitados para a banda de condução, juntamente com alguns da banda de valência

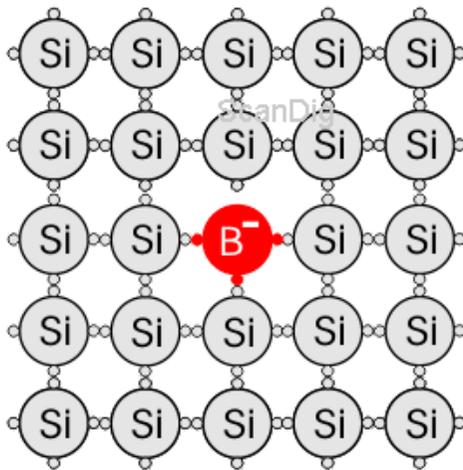
Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem

Imensa maioria dos portadores são elétrons !

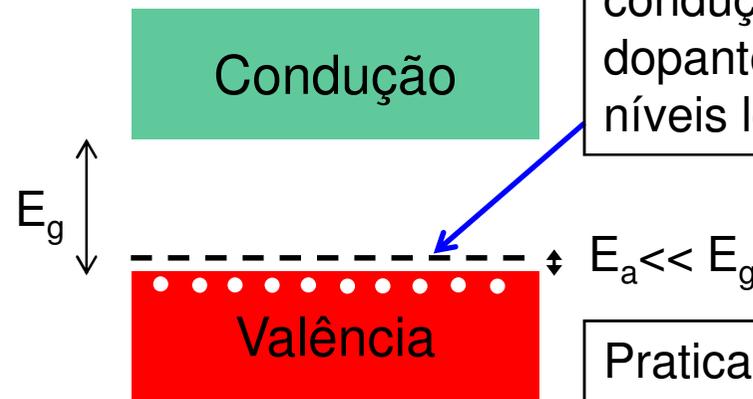
Semicondutores tipo p

aceitadores para Si

						0
						He
	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
	5	6	7	8	9	10
	B	C	N	O	F	Ne
	13	14	15	16	17	18
	Al	Si	P	S	Cl	Ar
IIIB	31	32	33	34	35	36
Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
49	50	51	52	53	54	
Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
81	82	83	84	85	86	
Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
113	114	115	116	117	118	
112	113	114	115	116	117	118

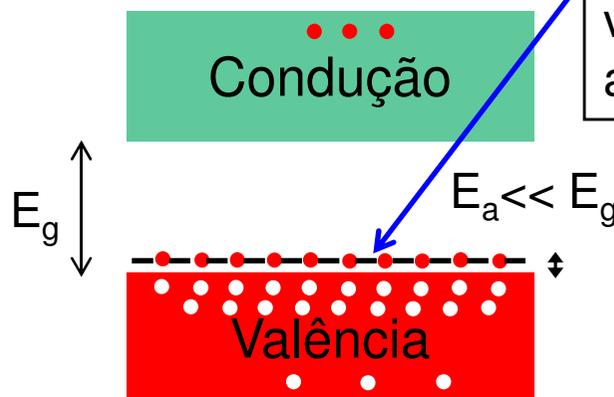


$T = 0$



Além de buracos na banda de condução, a presença do dopante leva a surgirem novos níveis logo acima dessa banda

$T > 0$



Praticamente todos os níveis 'extras' são facilmente preenchidos por elétrons excitados da banda de valência, criando um excesso ainda maior de buracos

Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem

Imensa maioria dos

Exemplo: Silício dopado com P ou Al

Propriedade	Tipo de Semicondutor	
	<i>n</i>	<i>p</i>
Material da matriz	Silício	Silício
Carga nuclear da matriz	+14 e	+14 e
E_g da matriz	1,2 eV	1,2 eV
Dopante	Fósforo	Alumínio
Tipo de dopante	Doador	Aceitador
Portadores em maioria	Elétrons	Buracos
Portadores em minoria	Buracos	Elétrons
ΔE do dopante	$E_d = 0,045$ eV	$E_a = 0,067$ eV
Valência do dopante	5	3
Carga nuclear do dopante	+15 e	+13 e
Carga total do íon do dopante	+ e	- e

Exercício: Silício dopado com P

No Si puro, a concentração de elétrons de condução a T ambiente é aproximadamente $n_0 = 10^{16} \text{ m}^{-3}$.

a) Quantos elétrons de condução existem para cada átomo de Si no material? Dados:

- $\mu_{\text{Si}} = 2330 \text{ kg/m}^3$
- $M_{\text{mol Si}} = 28,1 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$

$$n = \frac{\mu n_v N_A}{m_{\text{mol}}}$$

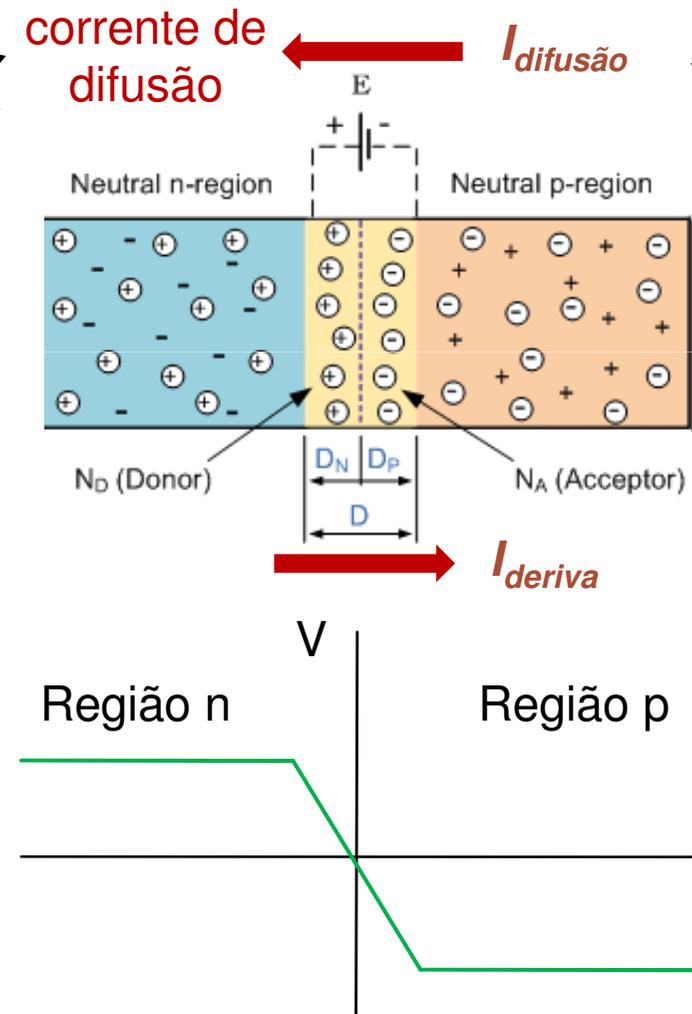
R: 2×10^{-13} !

b) Queremos multiplicar n_0 por 10^6 dopando o Si com P. Que fração de átomos de Si devemos substituir por átomos de P? (Considere que a agitação térmica é capaz de transferir todos os elétrons do nível de doação para a banda de condução).

- R: 1 átomo de P para cada 5×10^6 átomos de Si

A junção p – n

- Cristal semiconductor que foi dopado em uma região com impureza aceitadora (tipo-p) e em outra região com impureza doadora (tipo-n).
- Os elétrons em excesso da região n (esquerda) tendem a se difundir para a região da direita.
- **Ao mesmo tempo, os buracos em excesso da região p (direita) tendem a se difundir para a região da esquerda.**
- O movimento de elétrons para a direita (buracos para a esquerda) cria uma região com excesso de carga próxima ao plano da junção, de largura D . Ela é chamada **zona de depleção** (pois as cargas recém-chegadas se recombinam com os buracos e elétrons inicialmente excedentes em cada lado)
- Essa carga espacial gera uma **diferença de potencial de contato** que se contrapõe à difusão (i.e., tende a empurrar elétrons de volta para o lado n e buracos de volta para o lado p). Esse movimento é chamado **corrente de deriva**. Um **V de equilíbrio** é atingido qdo $I_{dif} = I_{der}$.

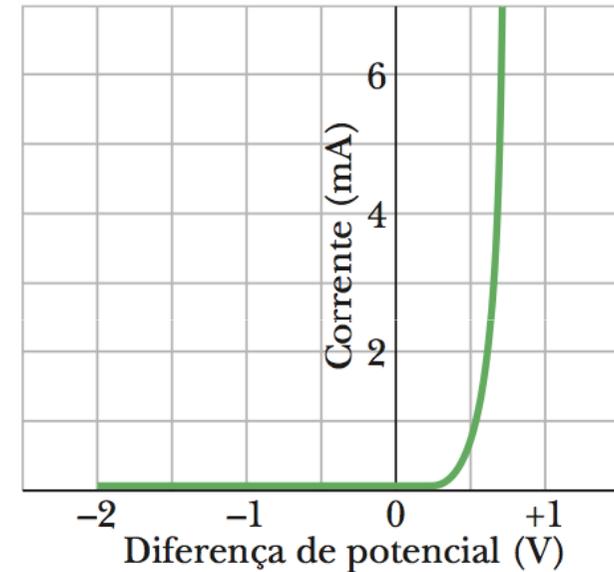
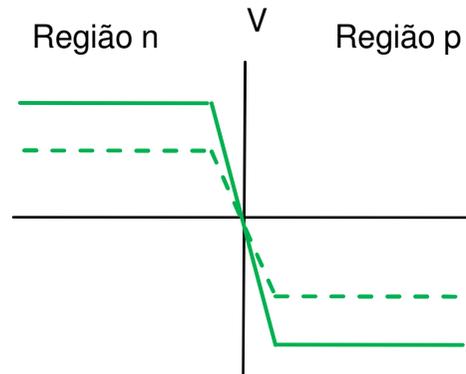


Lembre-se: carga positiva → potencial positivo

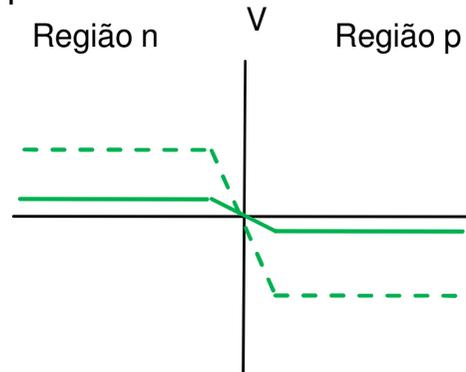
O diodo retificador

Aplique uma tensão adicional em uma junção p-n:

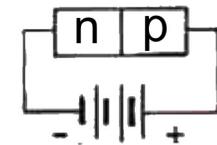
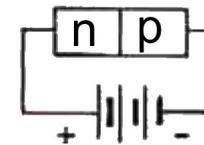
- 'Polarização inversa': tensão positiva aplicada do lado n
 - Reforça a diferença de potencial já existente
→ cria (mais) resistência ao movimento das cargas difusivas
→ não há corrente



- 'Polarização direta': tensão positiva aplicada do lado p
 - Reduz a diferença de potencial → facilita o movimento de cargas
 - → há corrente



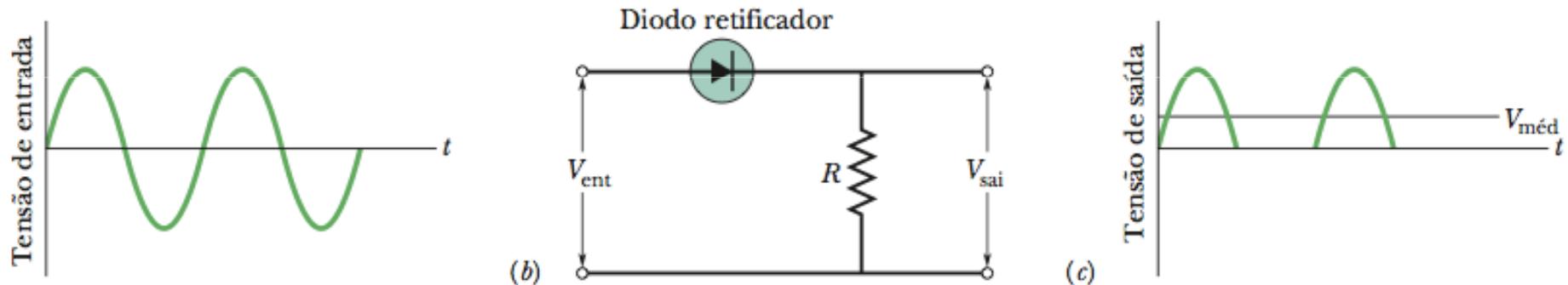
← Polarização inversa | Polarização direta →



O diodo retificador

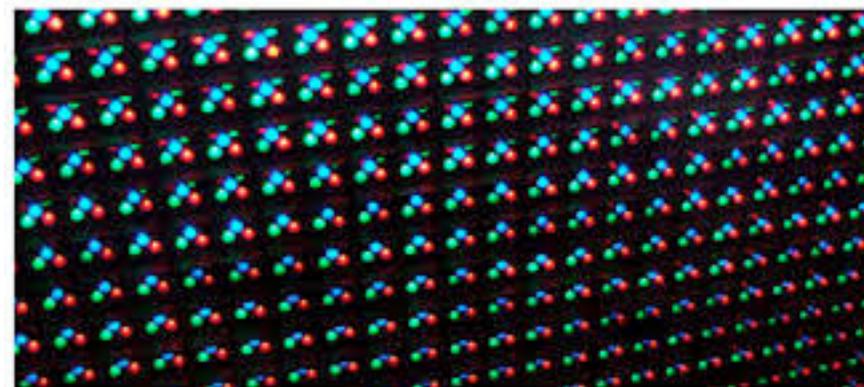
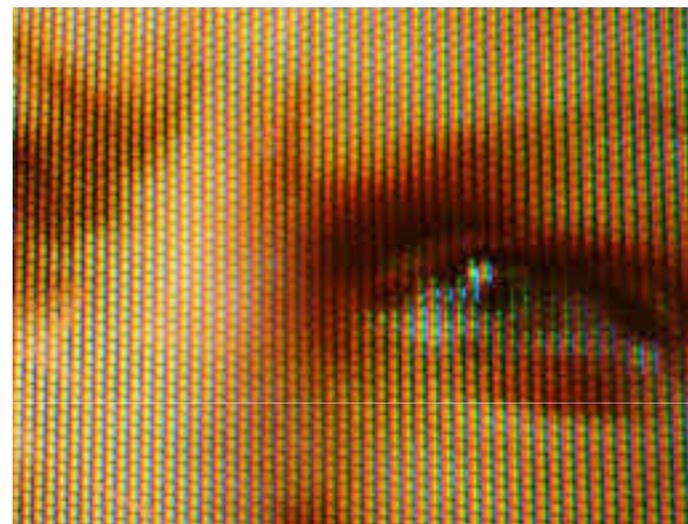
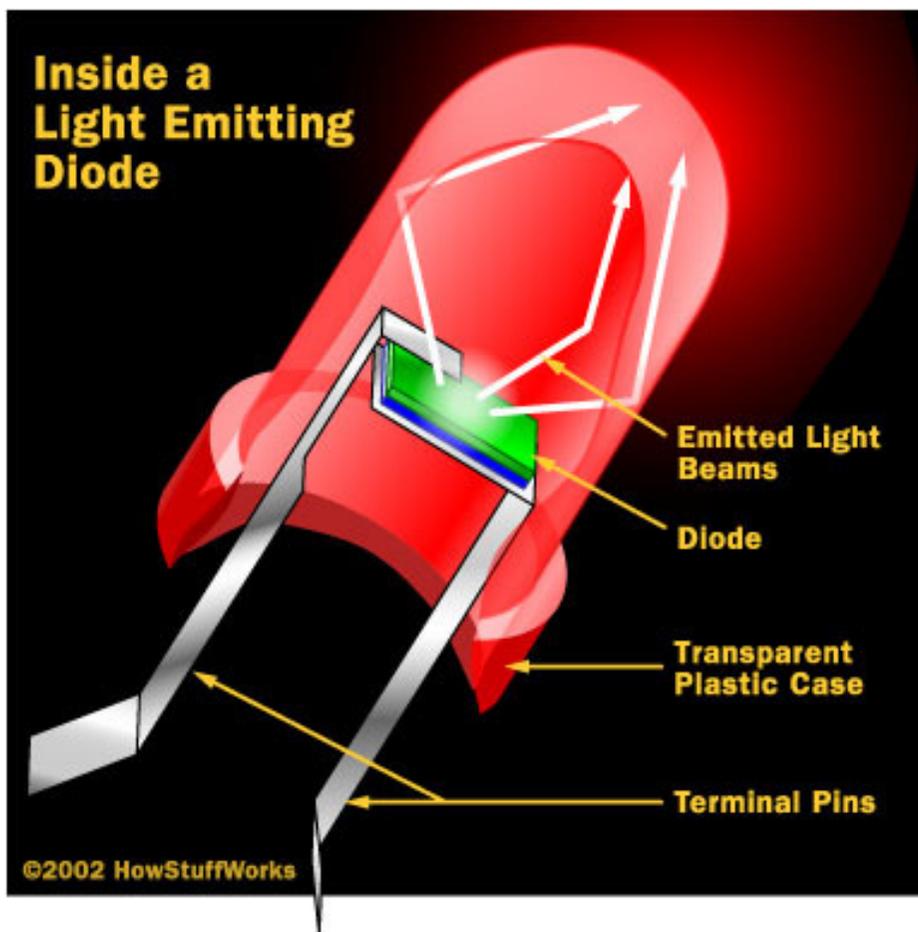
Aplicação simples em eletrônica: 'retificação'

- Tensão de entrada senoidal
 - Valor médio temporal = 0
 - Diodo só permite a passagem de corrente quando a tensão for no sentido de polarização direta.



- Tensão de saída
 - Valor médio temporal $\neq 0$
- Conversor de tensão alternada para tensão contínua

O Diodo Emissor de Luz (LED)

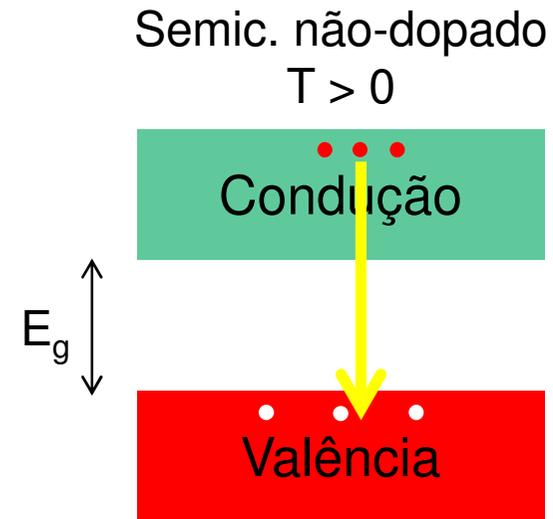


Diodo Emissor de Luz (LED)

Recombinação: num semicondutor (dopado ou não) a $T > 0$, um elétron excitado para a banda de condução pode decair de volta para a banda de valência, eliminando um buraco

Dependendo do material, a energia E_g que é liberada pode ser emitida na forma de um fóton. Ex: AsGa. (Em outros casos, pode ser perdida para vibrações da rede de íons, i.e, 'esquentar' o material).

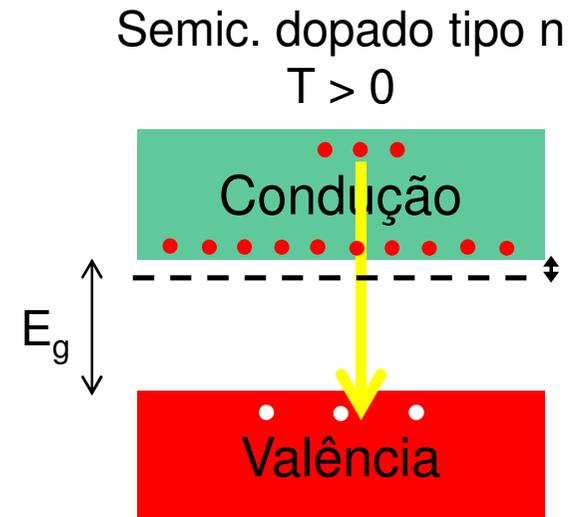
Problema: muito poucos pares elétron-buraco
-> muito poucos fótons emitidos!



Diodo Emissor de Luz (LED)

Recombinação: num semiconductor (dopado ou não) a $T > 0$, um elétron excitado para a banda de condução pode decair de volta para a banda de valência, eliminando um buraco

Dependendo do material, a energia E_g que é liberada pode ser emitida na forma de um fóton. Ex: AsGa. (Em outros casos, pode ser perdida para vibrações da rede de íons, i.e, 'esquentar' o material).



Problema: muito poucos pares elétron-buraco
-> muito poucos fótons emitidos!

Dopagem apenas não resolve!

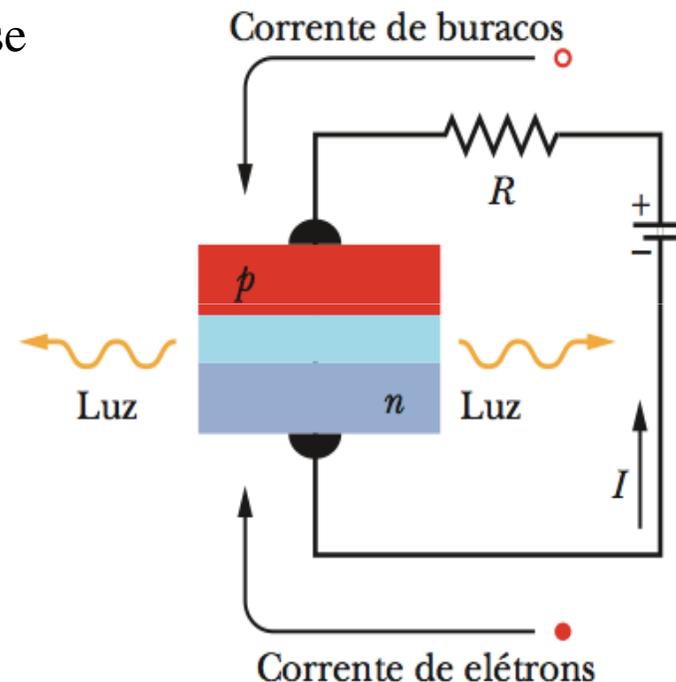
(Muitos elétrons mas poucos buracos, ou vice-versa...)

Diodo Emissor de Luz (LED)

Solução: Junção $p - n$!!

Num diodo diretamente polarizado e muito dopado há muitos buracos e elétrons se recombinando na zona de depleção!!

Figura 41-16 Junção $p-n$ polarizada diretamente, mostrando elétrons sendo injetados no lado n e buracos sendo injetados no lado p . (Os buracos se movem no sentido convencional da corrente I ; os elétrons se movem no sentido oposto.) A luz é emitida. Perto da zona de depleção, tanto do lado n como do lado p , elétrons e buracos se recombinam, emitindo luz no processo.



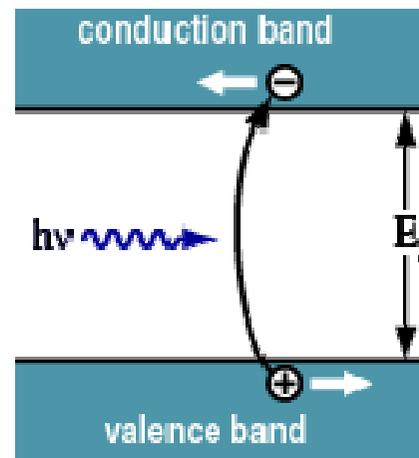
Exemplo: junção GaAs com GaAsP tem $E_g = 1,8\text{eV}$ (luz vermelha). Só nos anos 1990 se descobriu materiais capazes de fazer um LED azul!



Fotodiodo

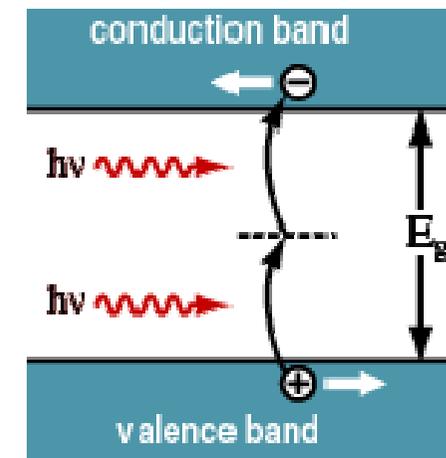
Fotodiodo: processo inverso do LED

- Diodo: corrente elétrica produz recombinação de elétrons e buracos gerando fótons
- Fotodiodo: fótons produzem elétrons e buracos gerando uma corrente elétrica
- Usado em sensores de movimento, detectores de controle remoto, etc.



$$i = RP$$

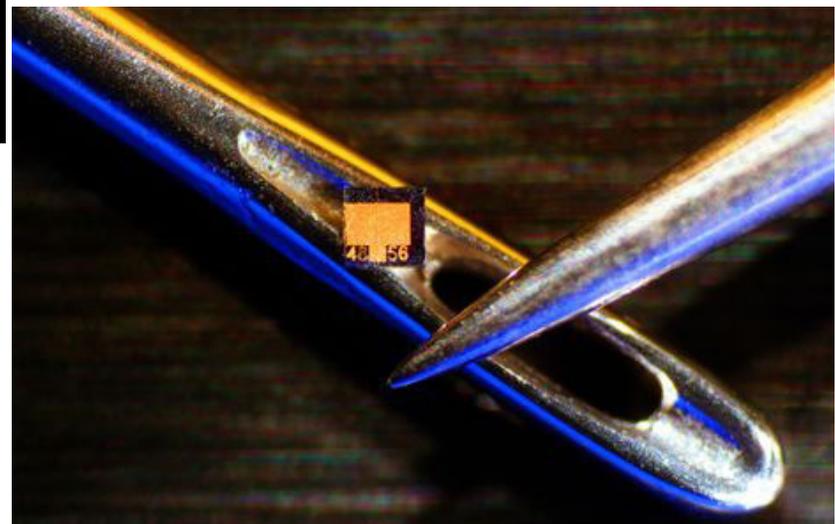
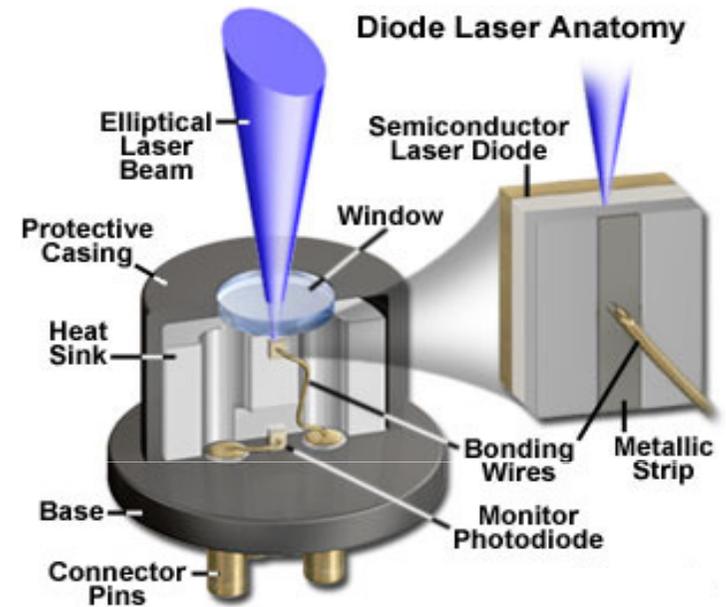
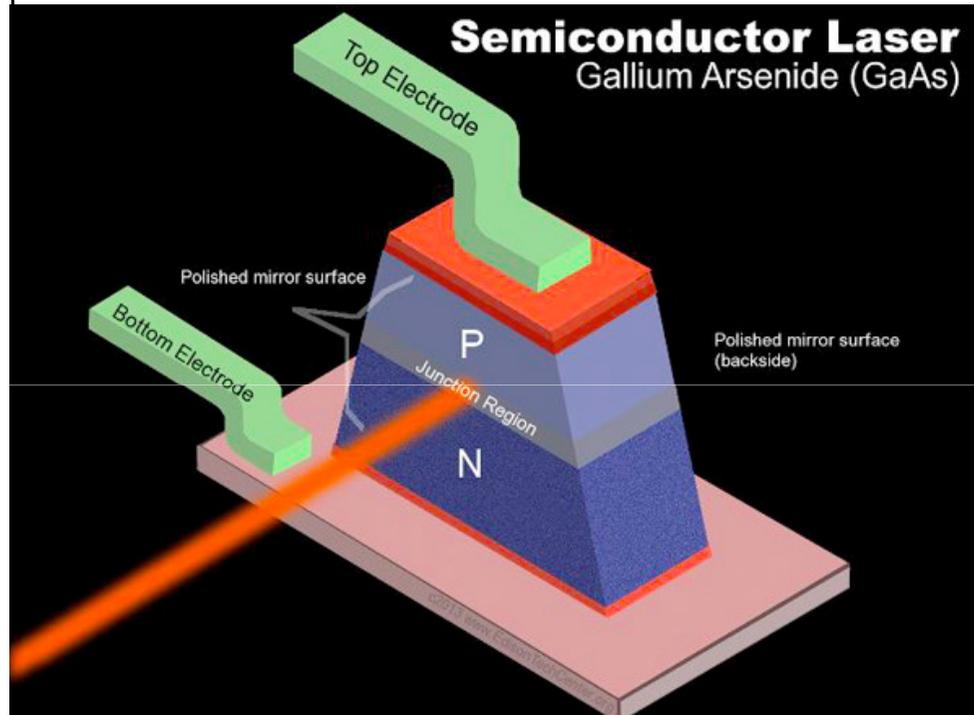
(a)



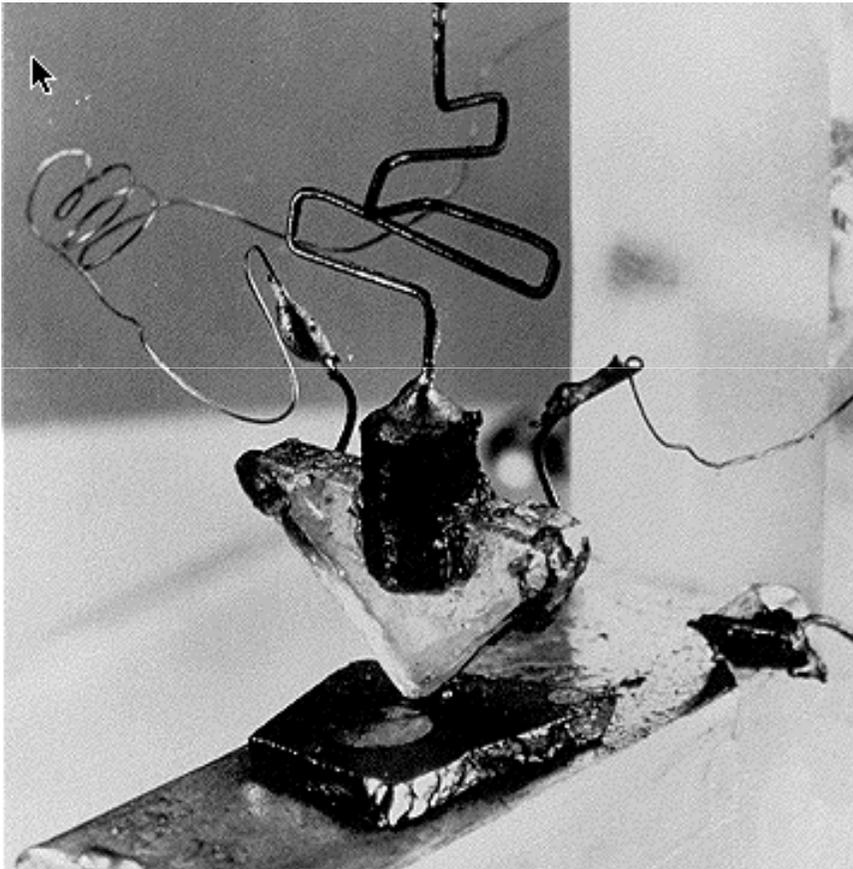
$$i = R_2 P^2$$

(b)

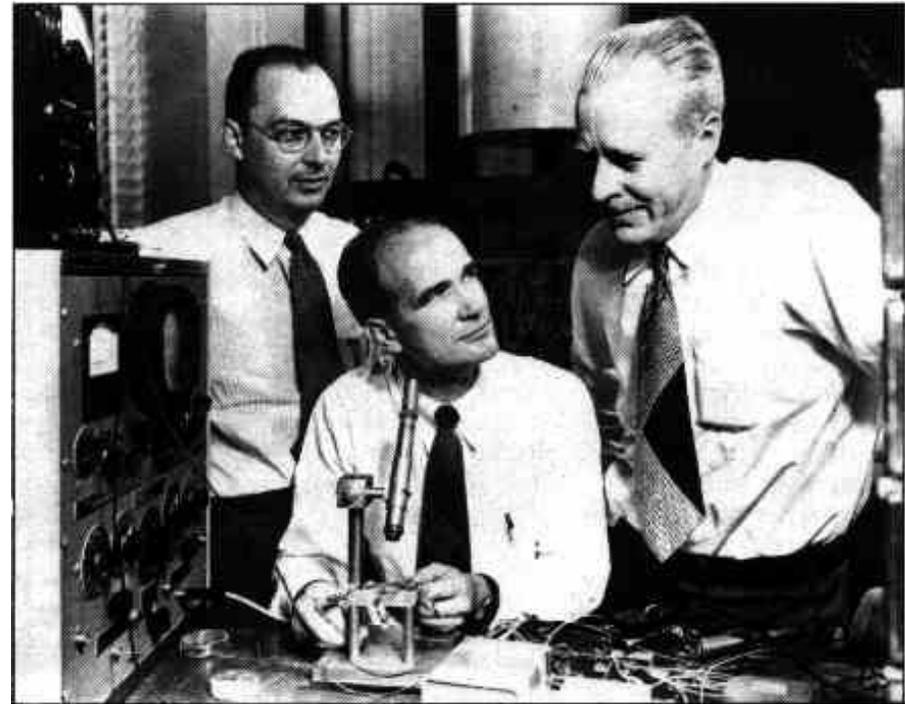
0 laser semiconductor



O transistor

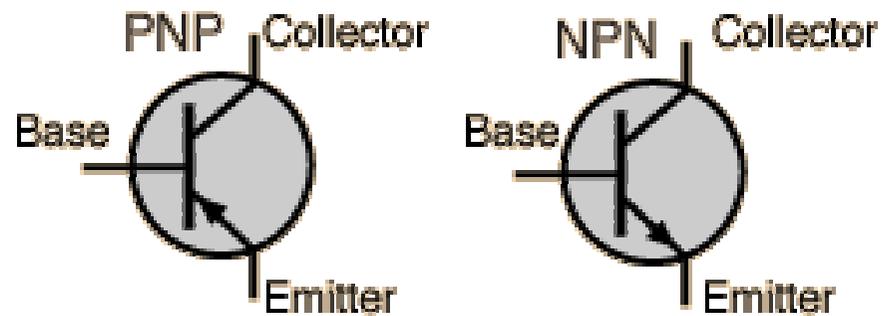
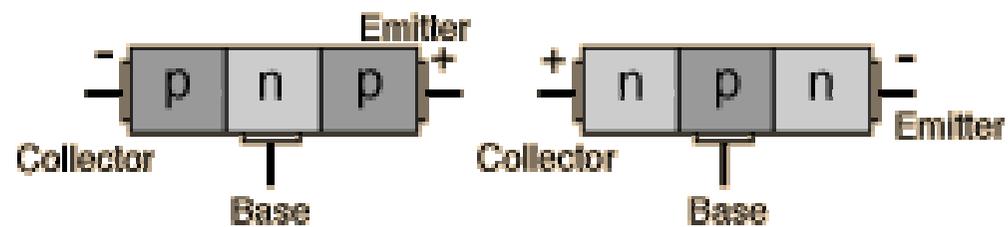


1o transistor (Bell Labs, EUA, 1947)



John Bardeen, William Shockley e
Walter Brattain

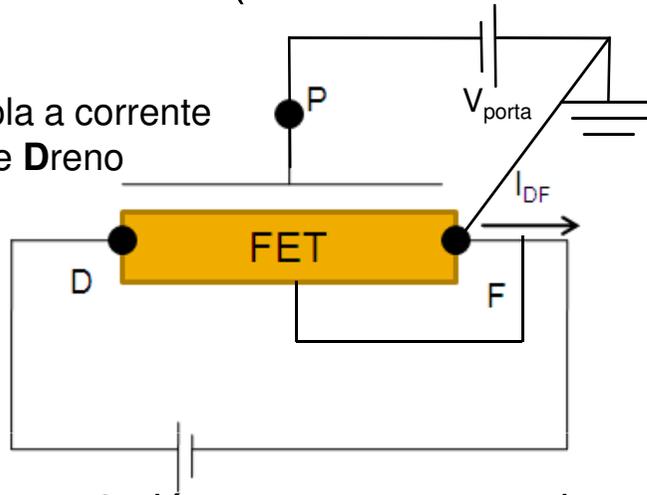
Transistor bipolar NPN ou PNP



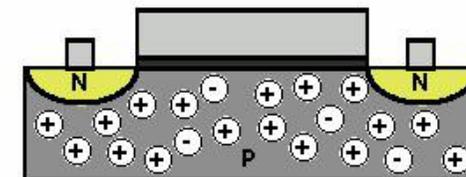
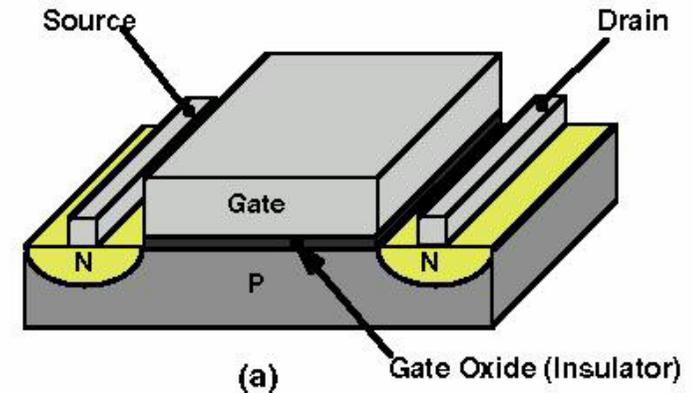
Transistor MOSFET

MOSFET: (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

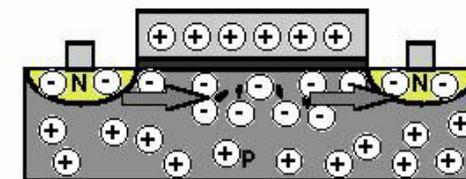
Porta: controla a corrente entre Fonte e Dreno



- Se $V_{porta} > 0$ elétrons se movem ao longo do canal n (fonte - dreno)
- Se $V_{porta} < 0$ há um campo elétrico no interior do dispositivo que repele os elétrons do canal n para o substrato.
 - Aumento da zona de depleção
 - Diminuição da corrente (que pode ser zero!!)
- MOSFET pode trabalhar nos regimes ON – OFF
 - ON = 1, OFF = 0 (sistema binário)
 - Circuitos lógicos



(b)



(c)