

INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física IV

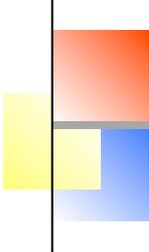
Condução Elétrica em Sólidos

(Cap 41; Halliday, Resnik, Walker 8^a ou 9^a ed.)

Prof. Daniel Jonathan

Niterói, Março 2016

baseado em parte em slides feitos por: Joniel Alves dos Santos – UTFPR
e Noah Finkelstein / Charles Baily (Colorado University)



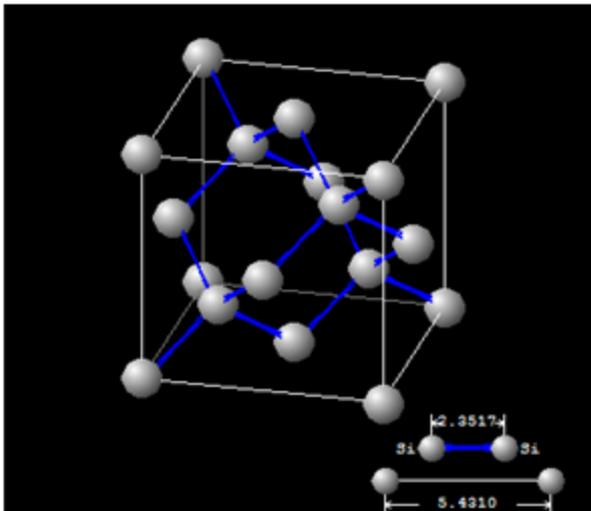
Propriedades Físicas dos Materiais

- Problema: entender as propriedades elétricas, magnéticas, ópticas, estruturais, etc dos materiais a partir das interações de seus constituintes microscópicos.
- Principal fator: estrutura eletrônica.
- Quais os mecanismos através dos quais um material conduz, ou não, eletricidade?
- Não há resposta exata:
 - Hidrogênio: resolver a equação de Schrödinger para um elétron (exata)
 - Átomos com Z elétrons: resolver a equação de Schrödinger para Z elétrons (aproximação)
 - Sólido: resolver a equação de Schrödinger para $\sim 10^{23}$ elétrons (impraticável!!!)

Sólidos cristalinos

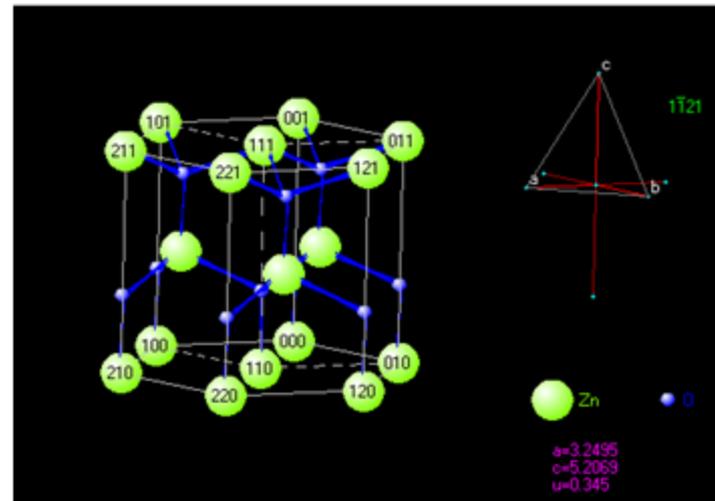
- Sólidos cristalinos: átomos estão dispostos em uma estrutura periódica (rede cristalina)
- Tijolo fundamental: célula unitária

Rede do diamante



Si, Ge, diamante

Rede hexagonal



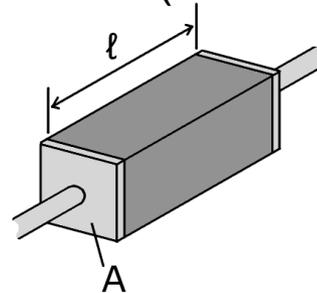
ZnO, GaN, AlN

Propriedades Elétricas de Sólidos

■ 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

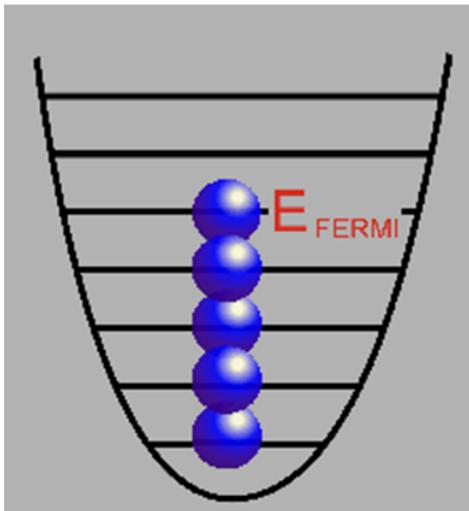
Os valores e comportamentos dessas propriedades nos permitem classificar a maioria dos sólidos em 3 categorias:

Metal, isolante, ou semicondutor

<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>Semicondutor</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}	

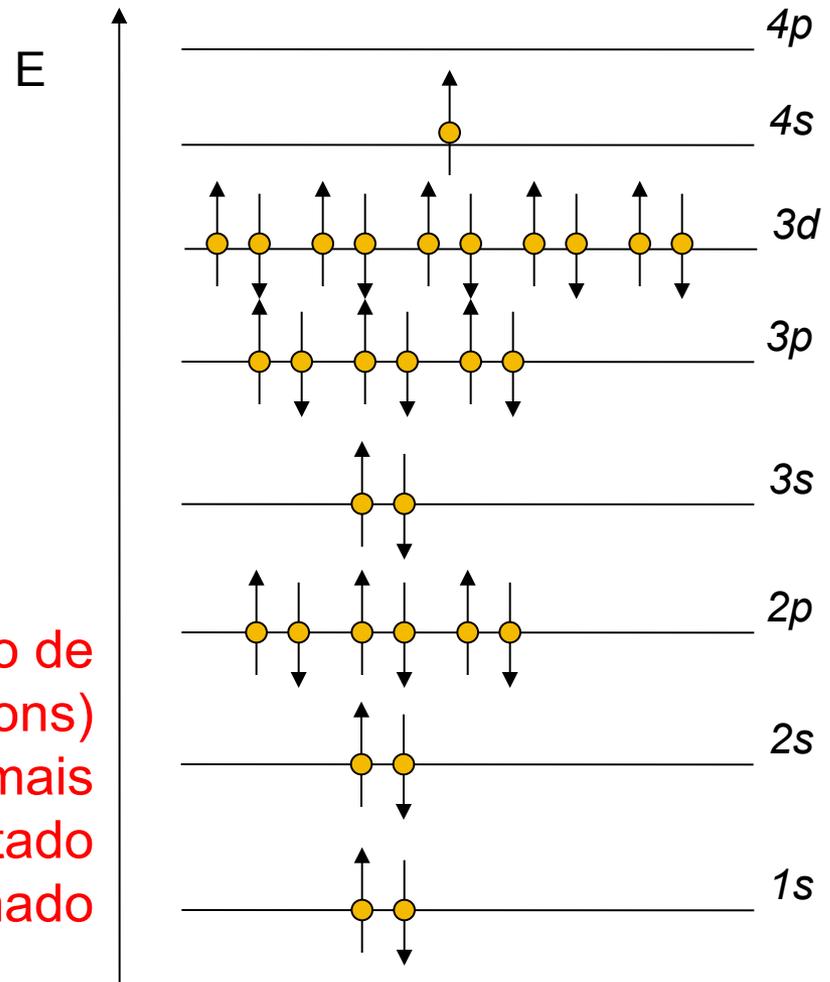
Pergunta chave: O que causa um diamante ser um isolante, o cobre um metal e o silício um semicondutor?

Níveis de energia: um átomo



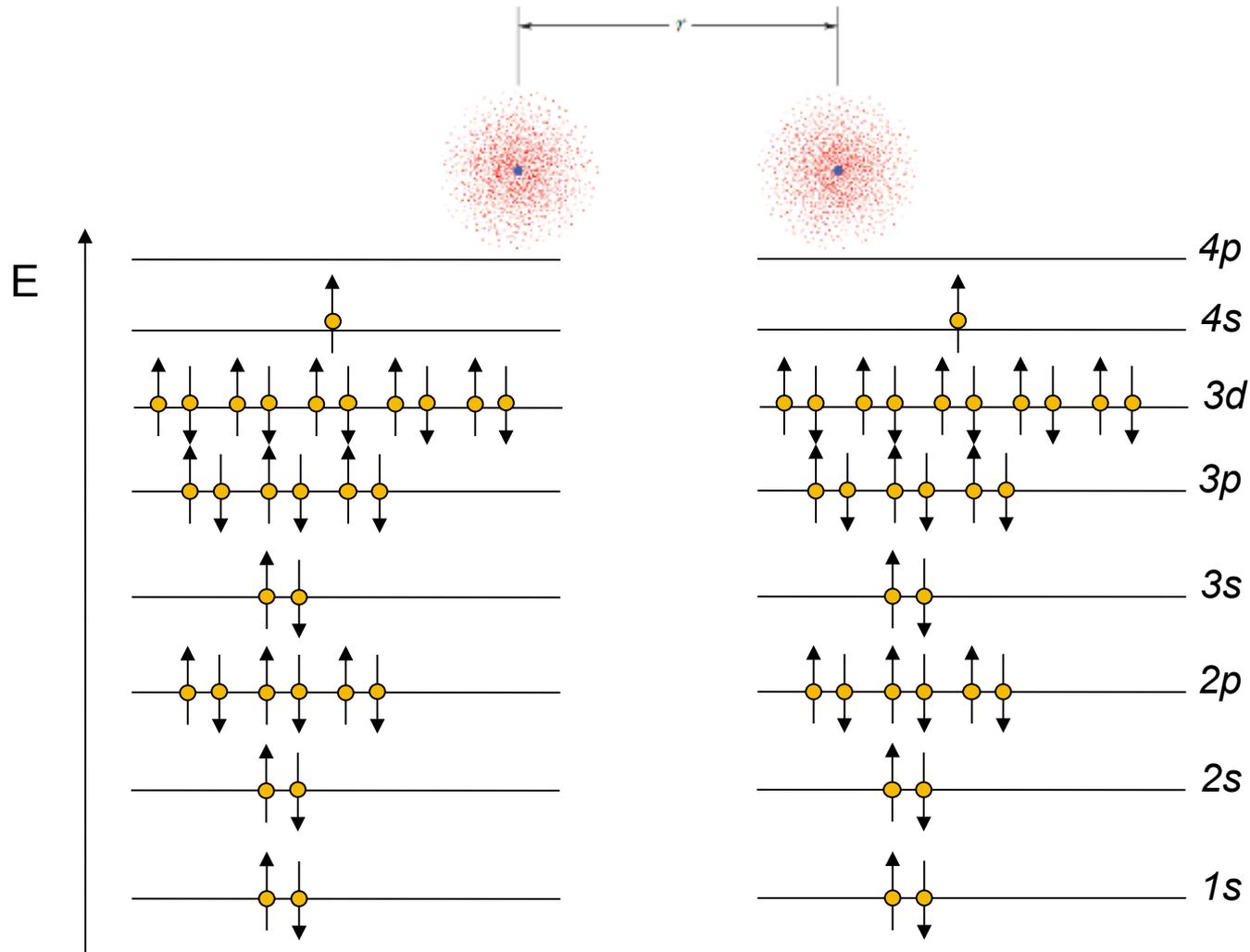
Férmions

(ex: Cobre $Z = 29$)



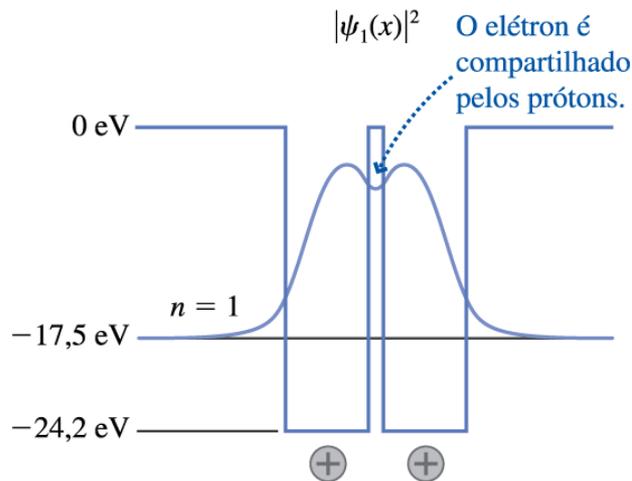
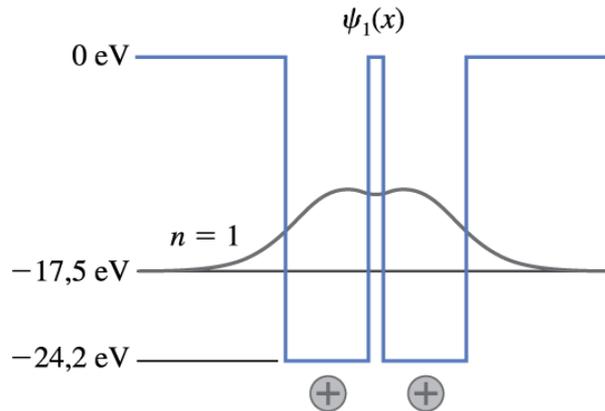
Partículas que obedecem o Princípio de Exclusão de Pauli (como os elétrons) são chamadas *férmions*. O nível mais alto de energia ocupado no estado fundamental do sistema é chamado **energia de Fermi**, ou E_F

Níveis de energia: dois átomos

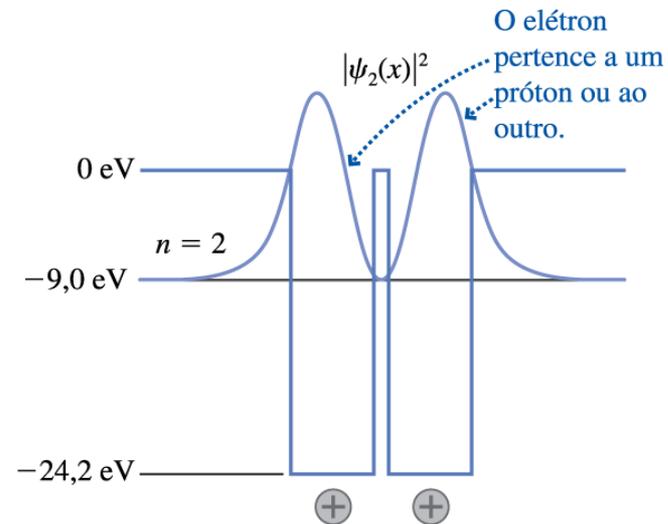
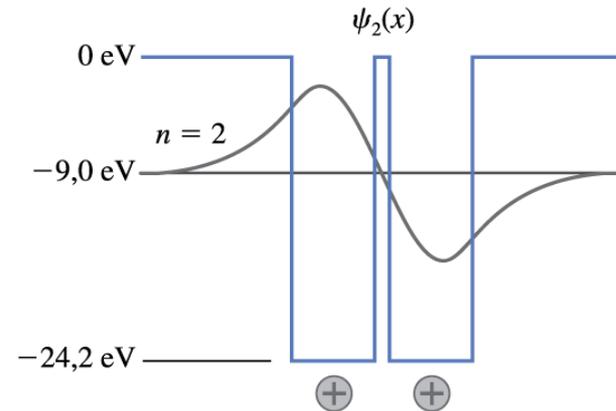


Recordando: Ligação química covalente (cap 41)

Orbital Ligante



Orbital Anti-Ligante

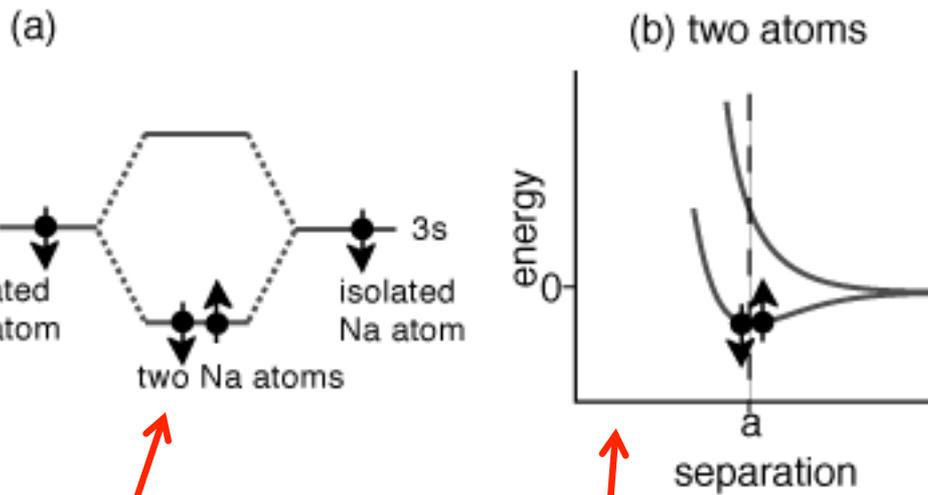


Energia **umenta** com a distância entre os núcleos → Força **atrativa**

Energia **diminui** com a distância entre os núcleos → Força **repulsiva**

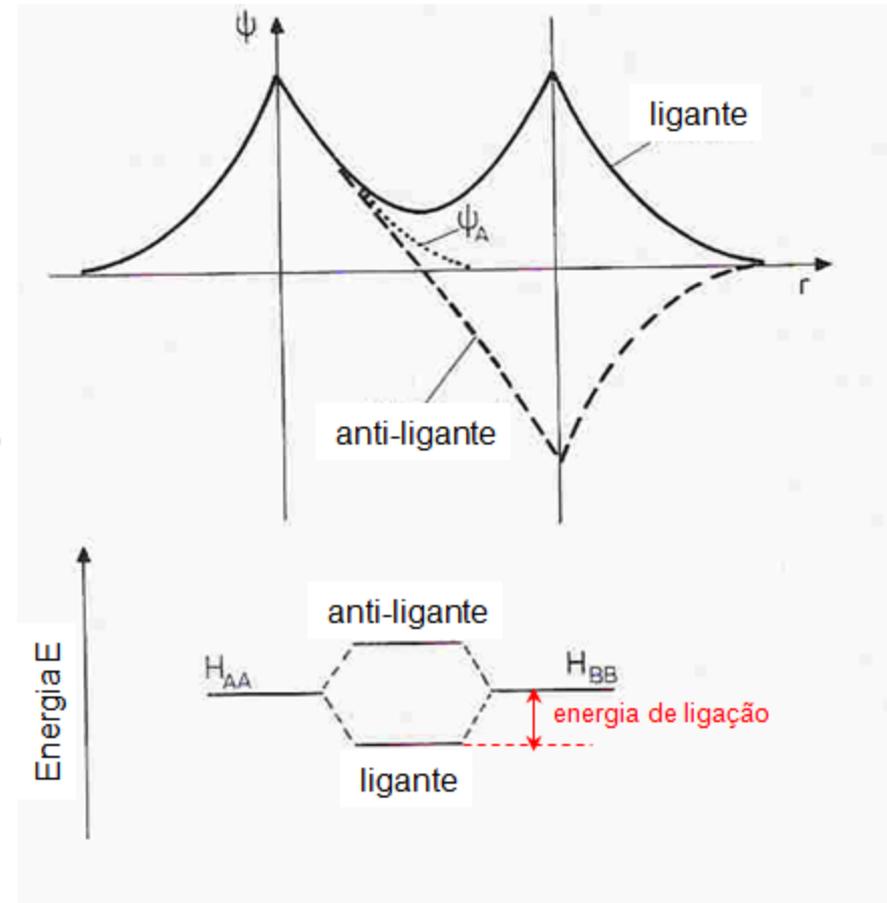
Níveis de energia: dois átomos

- Aproximando dois átomos:



Cada orbital atômico se separa em dois orbitais moleculares: **LIGANTE** e **ANTILIGANTE**

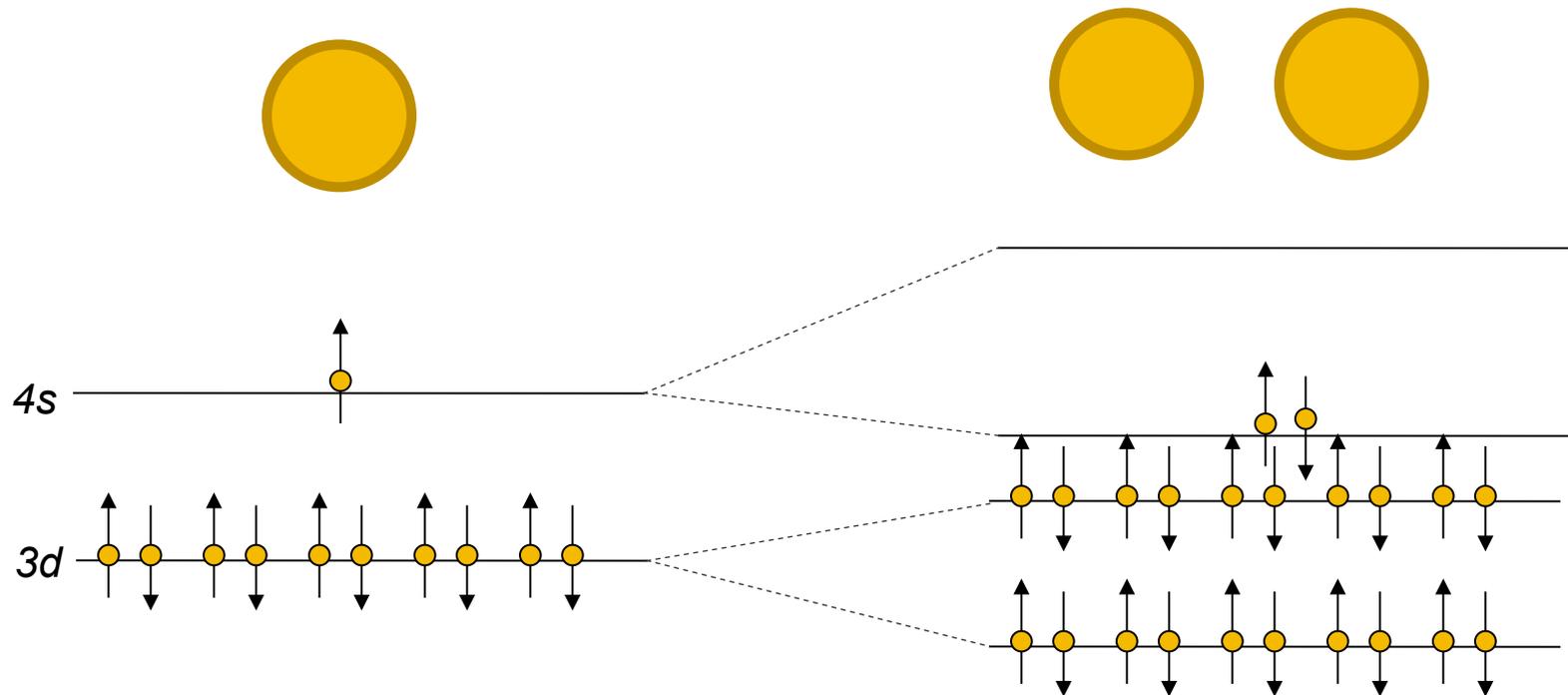
Energia em função da separação interatômica



Níveis de energia: dois átomos

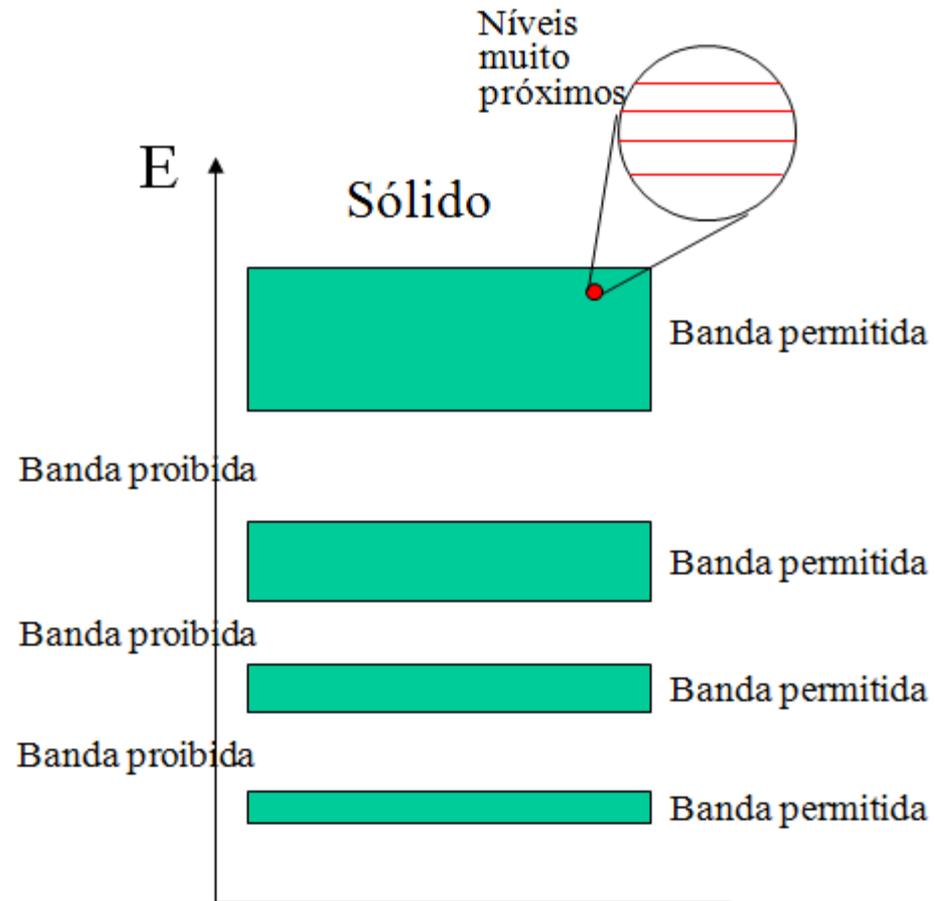
Átomo isolado (Cobre)

“Molécula”



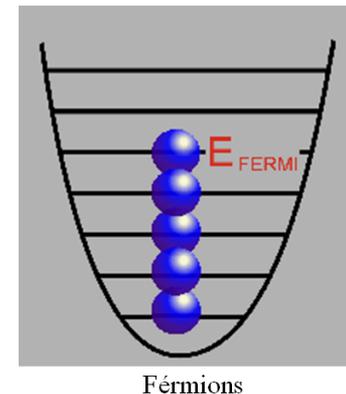
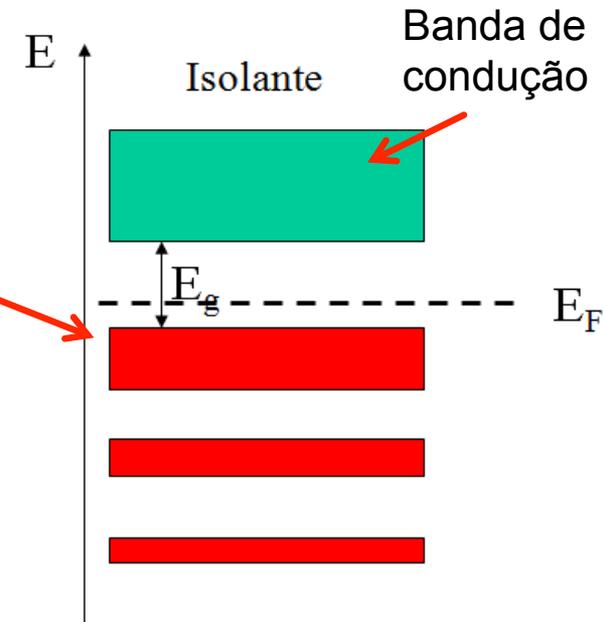
Níveis de energia: muitos átomos

- Sólido: $\sim 10^{23}$ átomos de cobre \rightarrow cada nível atômico se desdobra em 10^{23} níveis
- Níveis de energia muito próximos formam **bandas** de energia
- Tipicamente: bandas têm alguns eV de espessura, separadas tb por alguns eV. Dentro de cada banda separação é $\sim 10^{-24}$ eV



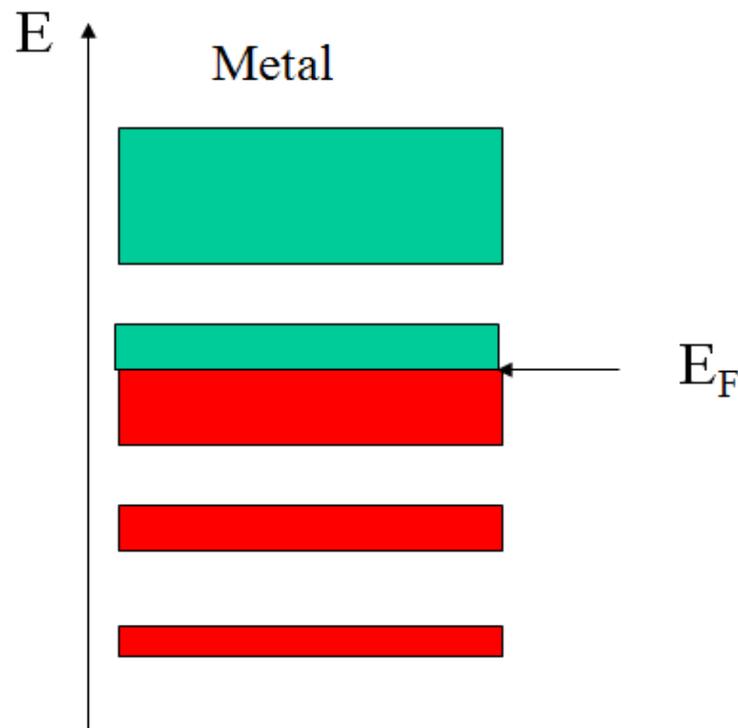
Isolantes

- **Sistema isolante:** ao aplicar uma diferença de potencial, não há corrente elétrica apreciável.
- Explicação: o nível mais alto de energia preenchido (**energia de Fermi E_F**) corresponde ao topo da última banda totalmente ocupada no estado fundamental (**banda de valência**)
- Primeira banda **desocupada** (**banda de condução**) está separada por uma energia E_g (*band gap*) muito maior que kT (energia térmica)
- Dessa forma, não há “espaço” para os elétrons “caminharem” pelo sistema



Metais são condutores

- Explicação: neste caso, o nível mais alto de energia preenchido no estado fundamental (**energia de Fermi E_F**) está **no meio** de uma banda **parcialmente** ocupada (**banda de condução**)
- Dessa forma, ao aplicarmos uma diferença de potencial há uma corrente elétrica, já que há níveis de energia ligeiramente acima dos ocupados para que os elétrons “caminhem” pelo sistema.



Metais: cálculo de n

- Quantos elétrons de condução existem na amostra?

$$n_e = n_a \cdot n_v$$

- Concentração de portadores (elétrons de condução) n :

$$\begin{aligned} n &= \frac{n_e}{V} = \frac{n_a n_v}{V} \\ &= \frac{m}{m_a} \frac{n_v}{V} = \frac{\mu n_v}{m_a} \end{aligned}$$

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

n_e = núm. de elétrons de condução na amostra

n_a = núm. de átomos na amostra

n_v = núm. de elétrons de valência por átomo

V = volume da amostra

m = massa da amostra

m_a = massa atômica = m / n_a

μ = densidade da amostra = m / V

N_A = número de Avogadro = $6,02 \times 10^{23}$

m_{mol} = massa de 1 mol = $N_A m_a$

Metais: cálculo de n

- Quantos elétrons de condução existem na amostra?

$$n_e = n_a \cdot n_v$$

- Concentração de portadores (elétrons de condução) n :

$$\begin{aligned} n &= \frac{n_e}{V} = \frac{n_a n_v}{V} \\ &= \frac{m}{m_a} \frac{n_v}{V} = \frac{\mu n_v}{m_a} \end{aligned}$$

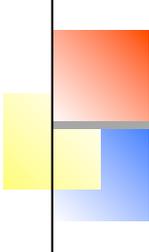
$$n = \frac{\mu n_v N_A}{m_{mol}}$$

Ex: Cobre

- $\mu = 8,96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $m_{mol} = 63,546 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- $n_v \sim 1$

$$n \sim 8,5 \times 10^{28}$$

bate bem com valor experimental...



Metais: Exemplo

- Quantos elétrons de condução existem em um cubo de magnésio com um volume de $2.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$? Dados:
 - $\rho_{\text{mag.}} = 1,738 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 - $M_{\text{mol. mag.}} = 24,312 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
 - Os átomos de magnésio são divalentes

R: $1,72 \times 10^{23}$

Metais: contando estados

- Quantos estados quânticos existem?

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

- Quantos estados existem por unidade de volume no intervalo de energias entre E e $E + dE$?

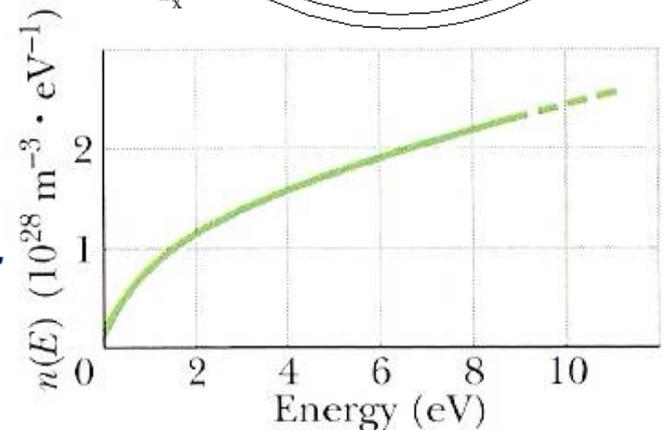
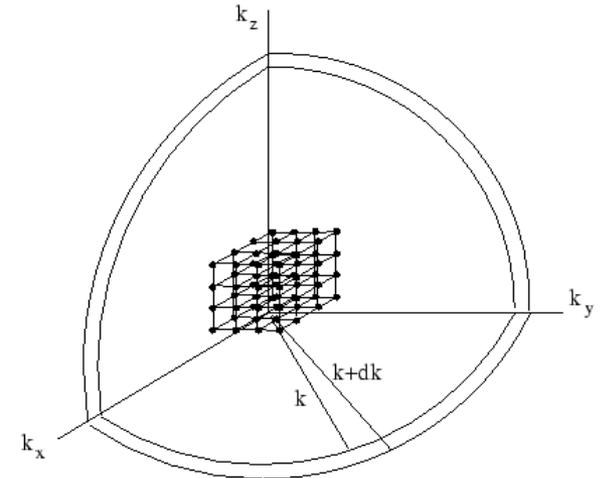
- Elétrons confinados em uma caixa 3D: n_x, n_y, n_z

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

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

$$N(n)dn = 2 \times \frac{1}{8} \times 4\pi n^2 dn$$

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



Metais: Contando Estados

A densidade de estados aumenta com a energia dentro de uma banda.

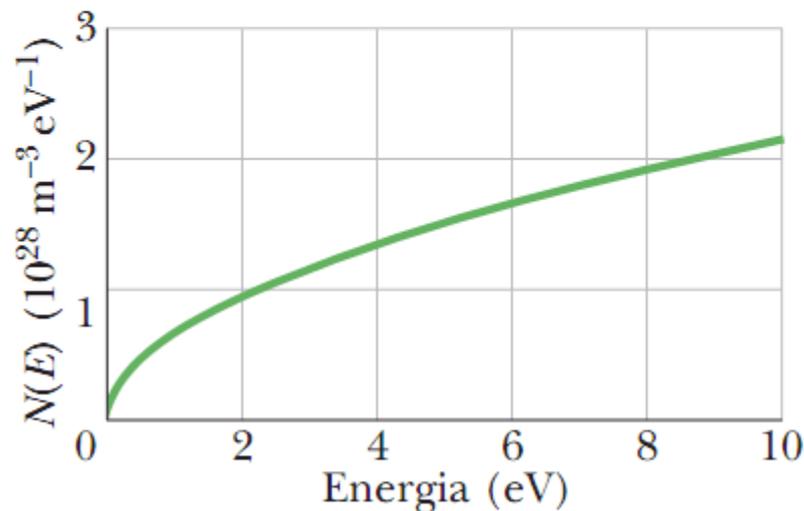


Figura 41-6 A função densidade de estados $N(E)$, definida como o número de níveis de energia disponíveis para os elétrons por unidade de energia e por unidade de volume, plotada em função da energia. A função densidade de estados expressa apenas o número de estados disponíveis; esses estados podem estar ou não ocupados por elétrons.

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} E^{1/2} \quad (\text{densidade de estados, } \text{m}^{-3} \text{ J}^{-1})$$

Metais: calculo da energia de Fermi

- A integral de $N(E)dE$ dá o número de elétrons de condução por unidade de volume do material. Para $T = 0$, a integral deve ser tomada de $E = 0$ até E_F , já que cada um dos estados nessa faixa de energia estão ocupados por um elétron.

$$n = \int_0^{E_F} N(E) dE$$

(Número de estados ocupados por unidades de volume para todas as energias entre $E = 0$ e $E = E_F$)

$$n = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \int_0^{E_F} E^{1/2} dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \frac{2E_F^{3/2}}{3}$$

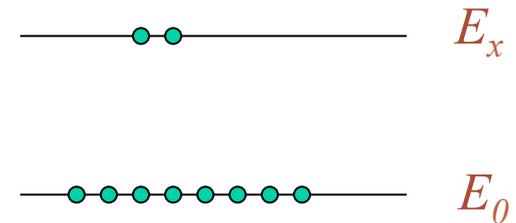
$$E_F = \left(\frac{3}{16\sqrt{2}\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m} n^{2/3} = \frac{0,121h^2}{m} n^{2/3}$$

Para o Cobre - cálculo: 7,1eV; experimental: 7,0eV

Efeito de temperatura $T > 0$

Um sistema de átomos em **equilíbrio térmico à temperatura T** é continuamente excitado e desexcitado pelo ambiente, mas o número de átomos excitados em um nível com energia E_x e' praticamente fixo e segue a *Estatística de Fermi-Dirac*

$$N_x = N_0 \left(\frac{1}{e^{(E_x - E_0)/kT} + 1} \right)$$



onde $k = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV} / \text{K}$ (constante de Boltzmann)

Metais: probabilidade para energias

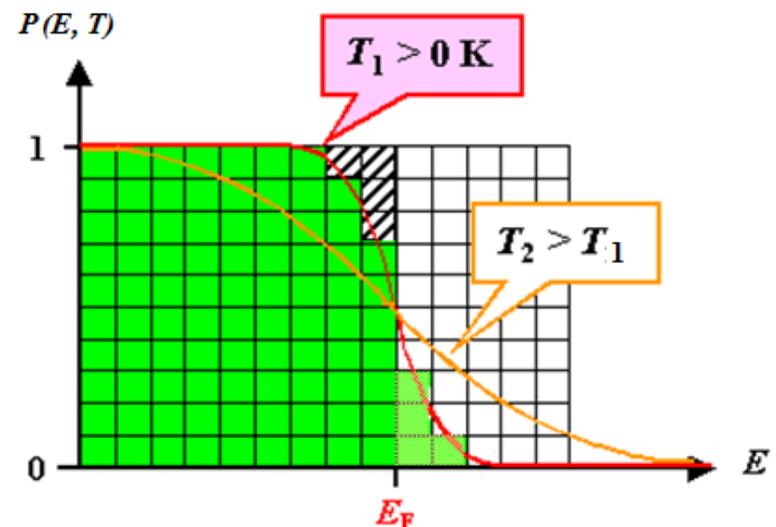
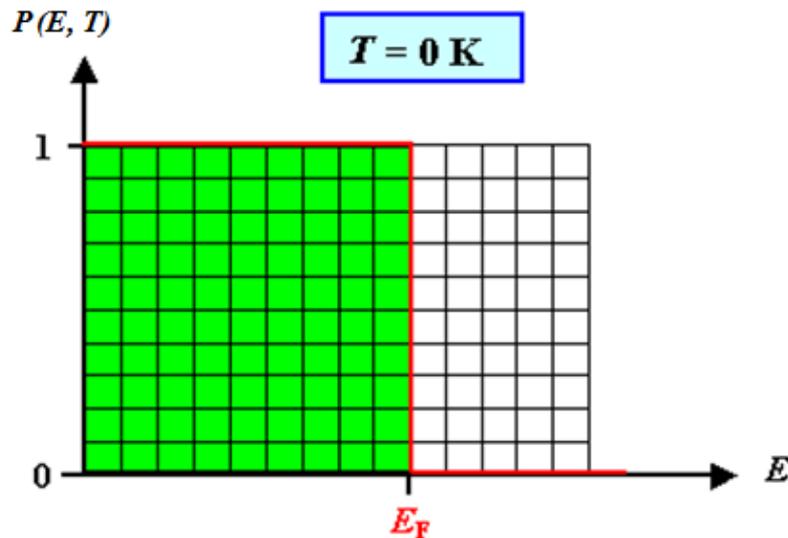
■ Probabilidade de Ocupação:
$$P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

■ Para $T = 0$:

- Se $E < E_F \rightarrow e^{-\infty} = 0 \rightarrow P(E) = 1$
- Se $E > E_F \rightarrow e^{\infty} \rightarrow P(E) = 0$

■ Para $T > 0$:

- Se $E - E_F \gg kT$: $P(E) \simeq e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$
- Se $E - E_F = 0$: $P(E) = 1/2$
- Se $E_F - E \gg kT$:



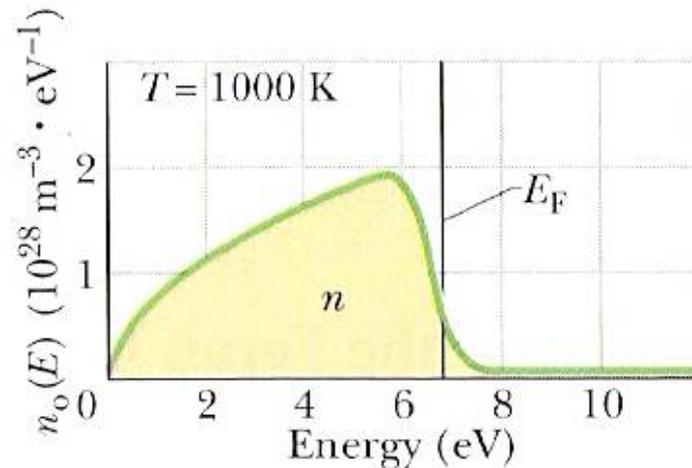
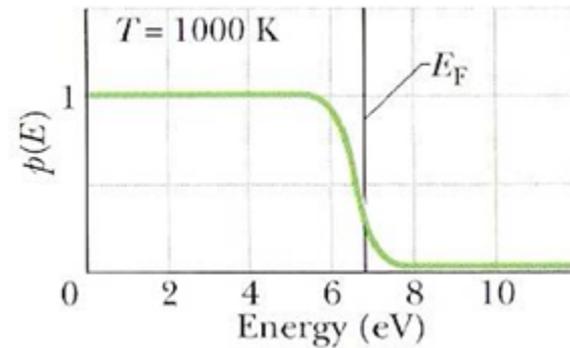
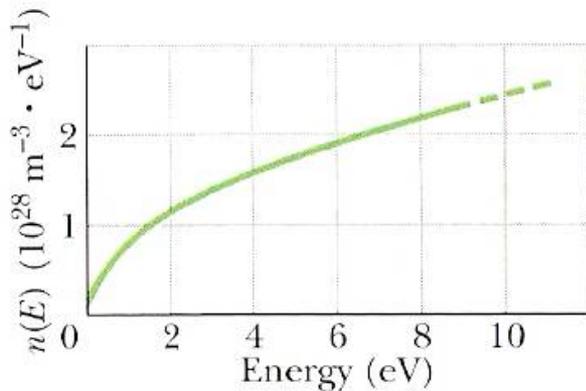
Metais: efeito de $T > 0$

- O que ocorre com a distribuição de elétrons em um metal quando T aumenta?
 - Elétrons próximos ao nível de Fermi ganham uma energia cinética adicional (de origem térmica) da ordem de $E = k_B T$. Isso modifica a distribuição de elétrons próximo ao nível de Fermi.
 - O número de portadores de carga não é afetado substancialmente (os elétrons já estão na banda de condução)
 - Rede de íons vibra mais – aumentam as colisões entre elétrons e íons – **aumenta a resistência -> daí o sinal (+) para α .**

Metais: no. de estados ocupados

- Quantos estados ocupados existem?

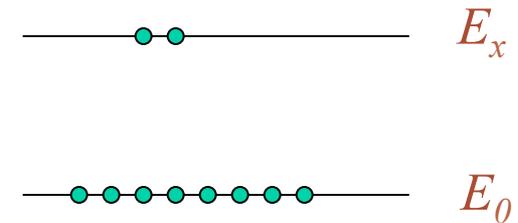
$$N_0(E) = N(E) P(E)$$



(c)

Isolantes: efeito de temperatura $T > 0$

$$N_x = N_0 \left(\frac{1}{e^{(E_x - E_0)/kT} + 1} \right)$$



onde $k = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (constante de Boltzmann)

Obs: se $E_x - E_0 \gg kT$, então $N_x \simeq N_0 e^{-(E_x - E_0)/kT}$

Exemplo: no diamante, $E_x - E_0 = E_g = 5,5 \text{ eV}$. Assim, a $T = 300\text{K}$:

$$\frac{N_x}{N_0} = e^{-(E_g/kT)} = e^{-213} \approx 3 \times 10^{-93}$$

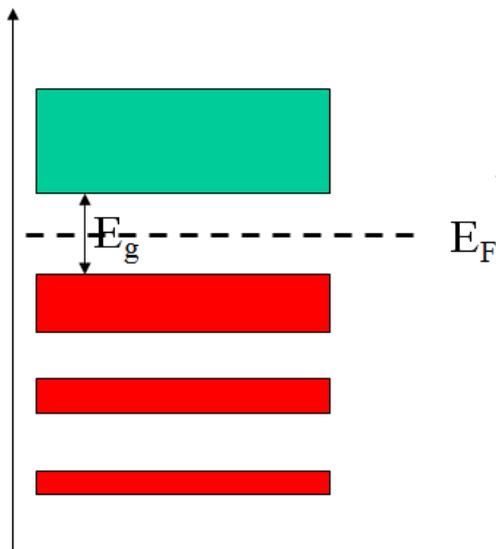
Como só há $\sim 10^{23}$ elétrons, essencialmente nenhum irá ser excitado termicamente para a banda de condução

Semicondutores

- À 1ª vista são como isolantes: para $T = 0$:
- A última banda **ocupada** está **totalmente ocupada (banda de valência)**
- A primeira banda **desocupada (banda de condução)** está separada por uma energia E_g (*band gap*).

Diferença Fundamental:

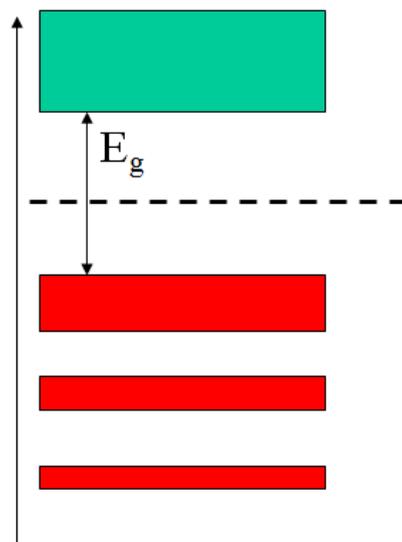
Semicondutor $T=0$



num semicondutor típico, $E_g \lesssim 2\text{eV}$, bem menor que num isolante (onde E_g vale alguns eV)

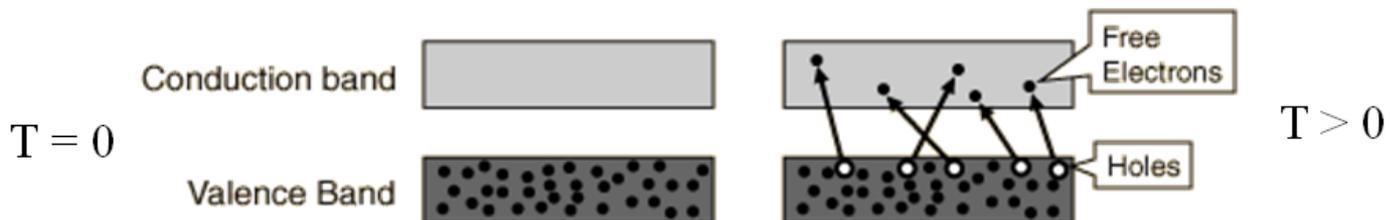
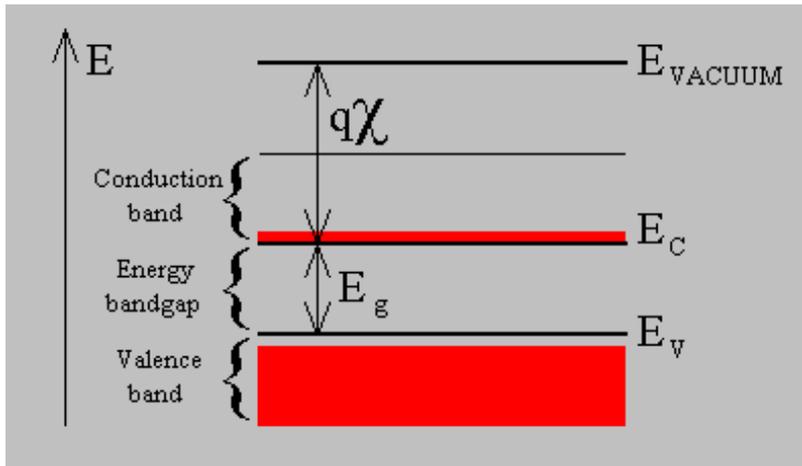
Parece pouco, mas isso faz uma diferença colossal!

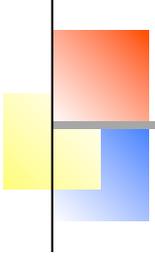
Isolante



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**!





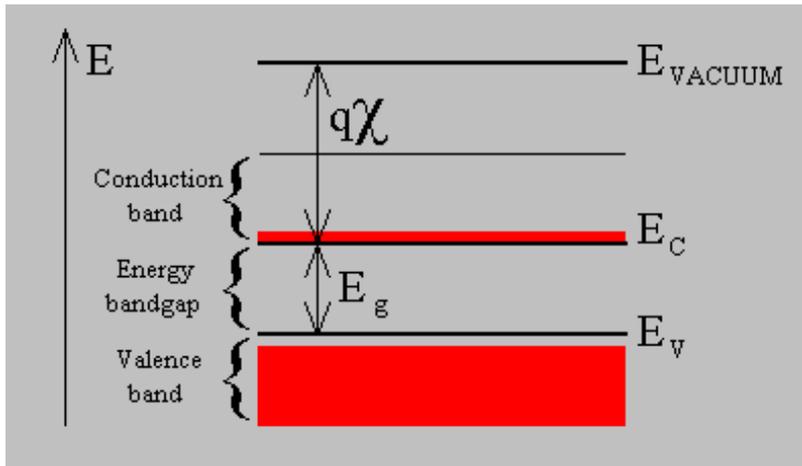
Teste Conceitual

Os valores de E_g para os semicondutores silício e germânio são, respectivamente, 1,12 e 0,67 eV. Quais das seguintes afirmações são verdadeiras?

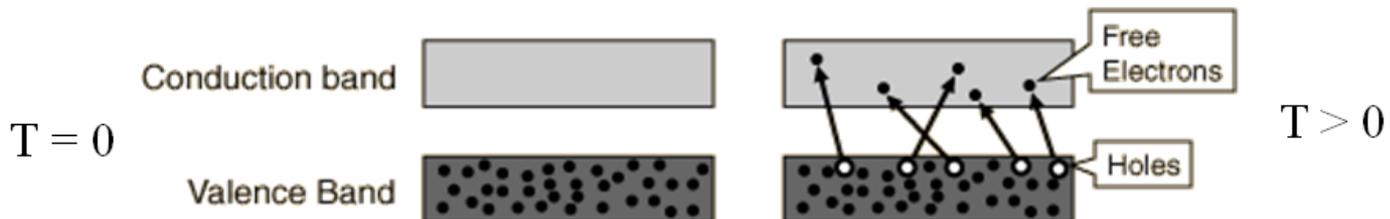
- (i) As duas substâncias têm a mesma concentração de portadores à temperatura ambiente.
 - (ii) À temperatura ambiente, a concentração de portadores no germânio é maior que no silício.
 - (iii) As duas substâncias têm uma concentração maior de elétrons de condução que de buracos.
 - (iv) Nas duas substâncias, a concentração de elétrons de condução é igual à de buracos.
- A) (i) e (iii) B) (i) e (iv) C) (ii) e (iii) D) (ii) e (iv)

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



Propriedades Elétricas de Sólidos

Comparando novamente as propriedades de **Metais**, **isolantes**, e **semicondutores**

	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	n/a	pequeno ($E_g \sim 0 - 2 \text{ eV}$)	grande ($E_g \gtrsim 2 \text{ eV}$)
Coefficiente de temperatura da resistividade α	positivo	negativo	desprezível
Concentração de portadores n	$\sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$	$\sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$	desprezível

Propriedades Elétricas de Sólidos

Comparando novamente as propriedades de **Metais**, **isolantes**, e **semicondutores**

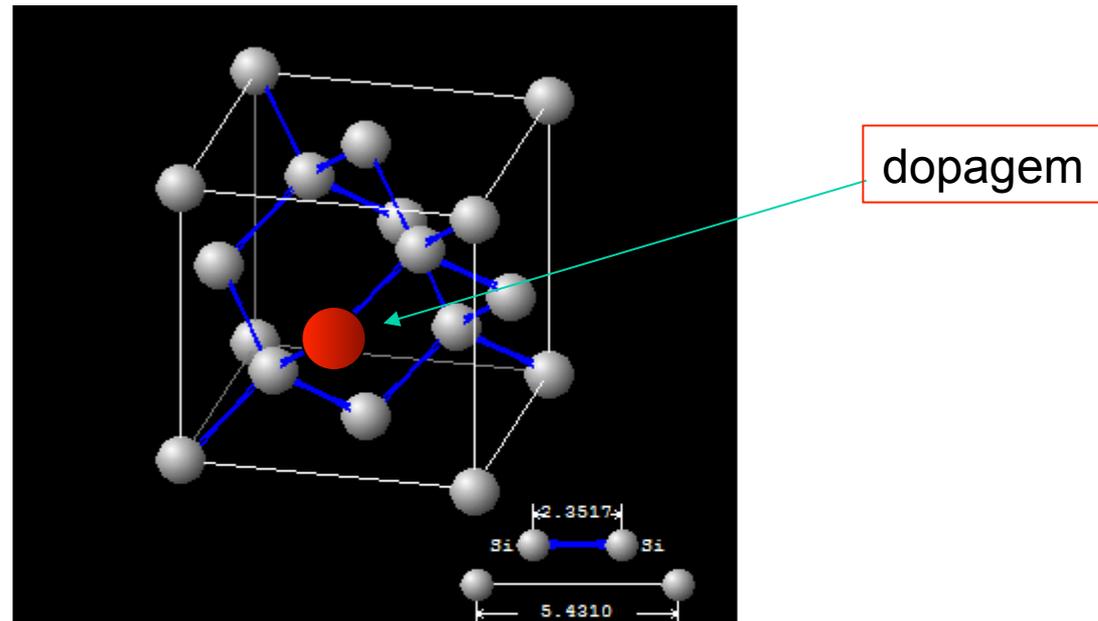
	Metal	Semicondutor	Isolante
Exemplo	Cobre	Silício	Diamante
Resistividade ρ	$\sim 10^{-8} \Omega.m$	$\sim 10^3 \Omega.m$	$\sim 10^{16} \Omega.m$
<i>Band gap</i> E_g	n/a	pequeno ($E_g \sim 0 - 2 \text{ eV}$)	grande ($E_g \gtrsim 2 \text{ eV}$)
Coefficiente de temperatura da resistividade α	positivo	negativo	desprezível
Concentração de portadores n	$\sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$	$\sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$	desprezível

Num semicondutor o número de portadores **n aumenta com T** , portanto a resistividade diminui com T : **$\alpha < 0$**

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!)



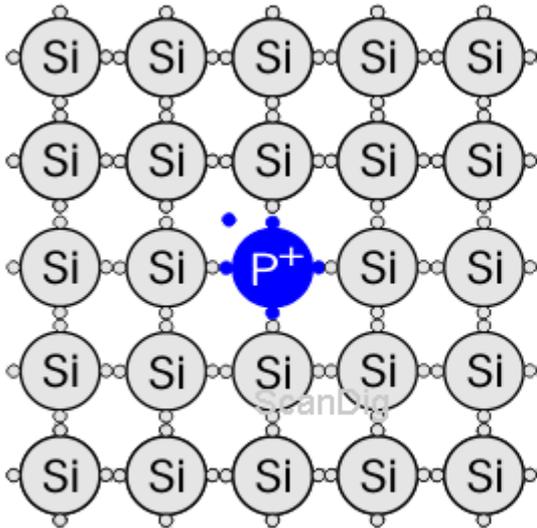
Si

Dopagens tipo n e tipo p

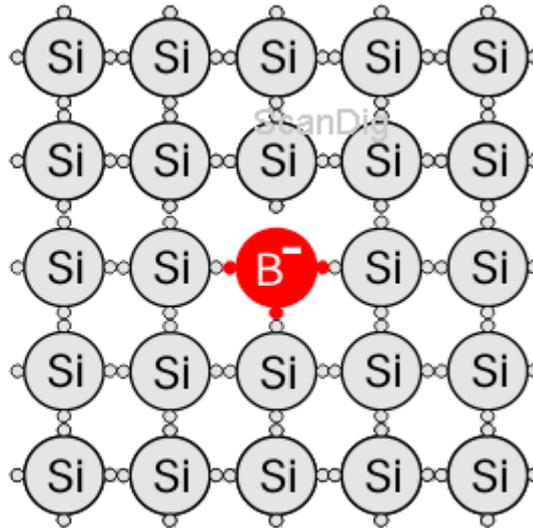
2 tipos de dopagem

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

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



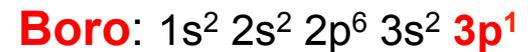
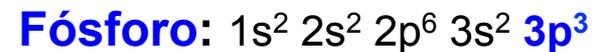
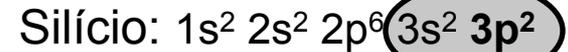
impureza 'doadora' de elétrons



impureza 'aceitadora' de elétrons

elétrons de valência

Exemplo:



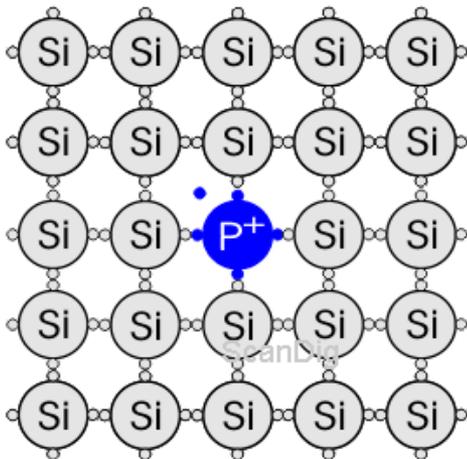
P: um pedaço de Si dopado com B tem carga total

- A) Positiva
- B) Zero
- C) Negativa
- D) Depende

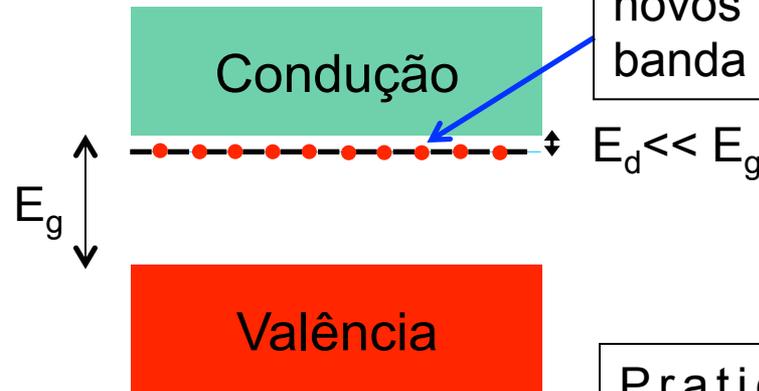
Semicondutores tipo *n*

doadores para Si

				0			
	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	0
	5	6	7	8	9	10	2
	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							
2	113						

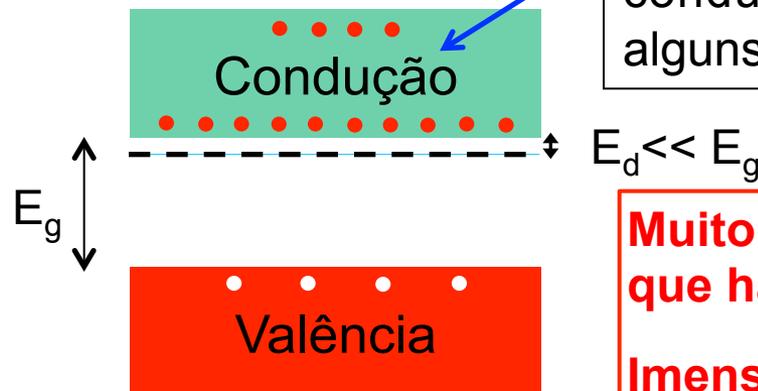


$T = 0K$



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

$T > 0K$



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

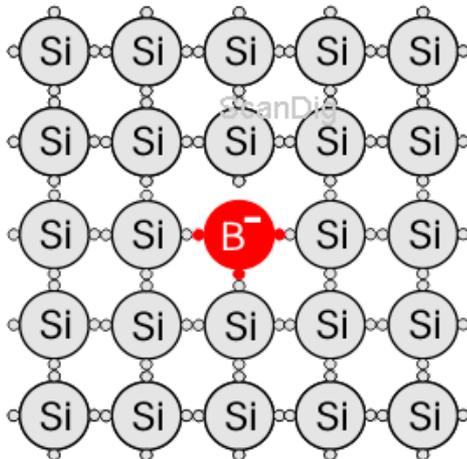
Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem

Imensa maioria dos portadores são elétrons !

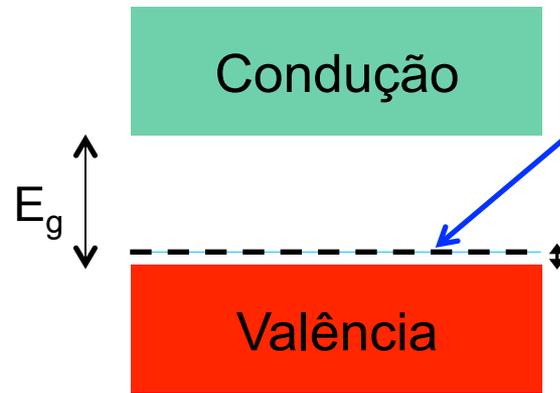
Semicondutores tipo *p*

aceitadores para Si

										0
										2
										10
										18
										36
										54
										86
										118



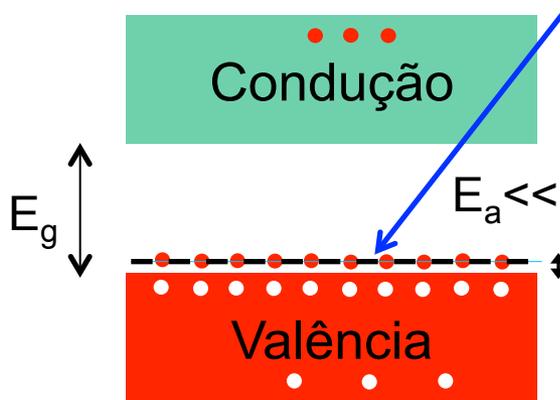
$T = 0K$



A presença do dopante leva a surgirem novos níveis logo acima da banda de condução, os quais estão vazios (ocupados por buracos) a $T=0$

$E_a \ll E_g$

$T > 0K$



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

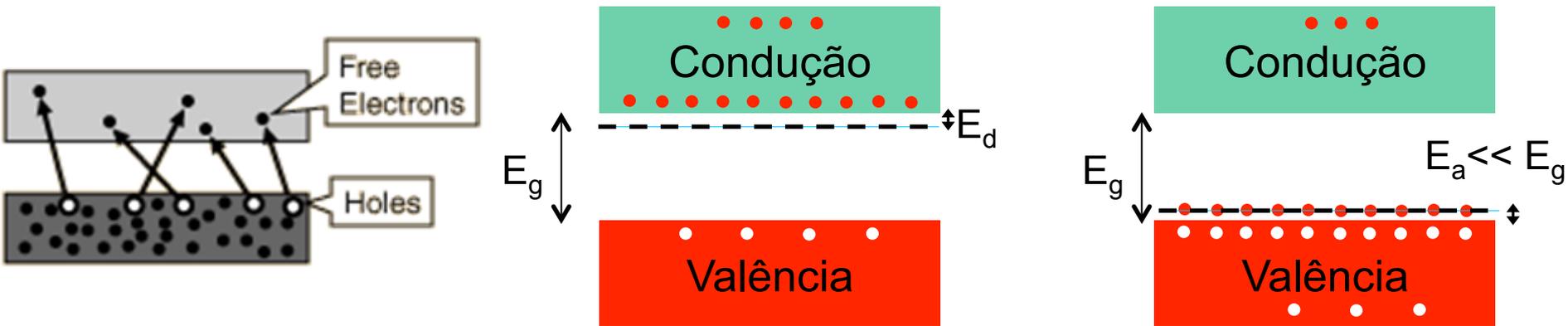
Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem

Imensa maioria dos portadores são buracos !

obs: atenção para erro no texto do livro (p. 290)!

Dopagem

Quem conduz eletricidade melhor à temperatura ambiente?
Um semiconductor puro, um dopado n, ou um dopado p?



- | | |
|-------------|------------------|
| a) Puro | c) Dopado P |
| b) Dopado N | d) Dopado N ou P |

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 <i>e</i>	+14 <i>e</i>
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 <i>e</i>	+13 <i>e</i>
Carga total do íon do dopante	+ <i>e</i>	- <i>e</i>

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 n_v 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

- Semicondutor dopado **tipo-p** em uma região e **tipo-n** em outra região bem ao lado

- Elétrons em excesso da região n (esquerda) tendem a se difundir para a região p (direita).

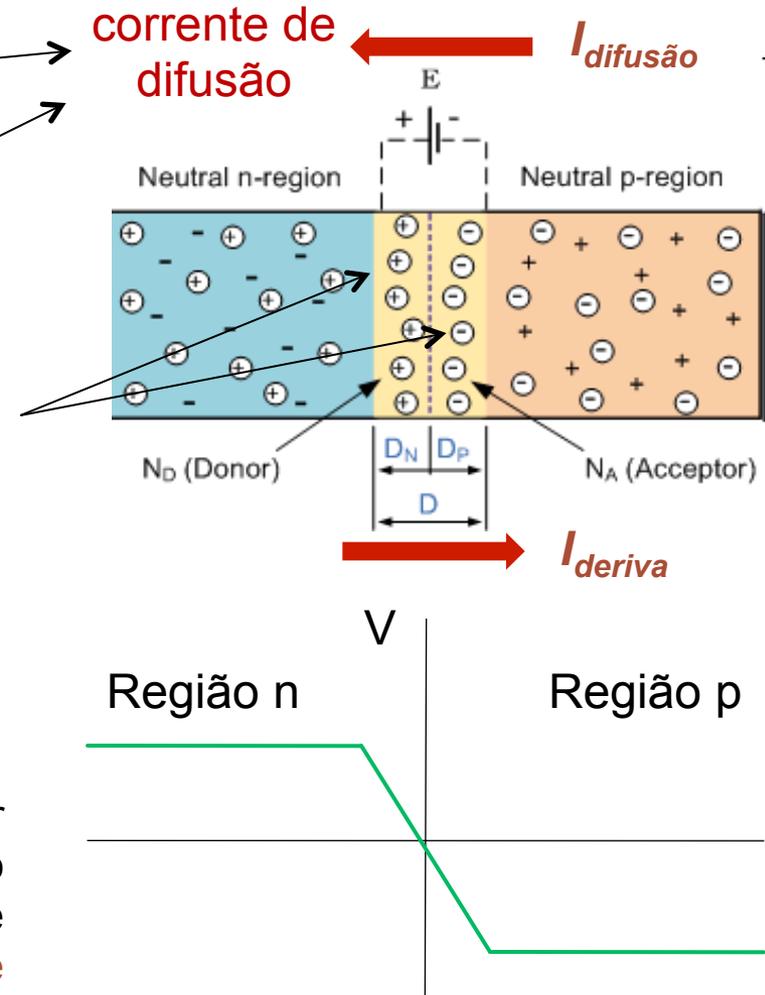
- **Ao mesmo tempo, buracos em excesso da região p (direita) tendem a se difundir para a região n (esquerda).**

- Ao passar p/ o outro lado da junção, se recombinam (respectiv.) com os buracos e elétrons inicialmente excedentes lá, eliminando a grande maioria das cargas móveis próximas à junção: **“Zona de Depleção”**.

- Cargas excedentes/faltantes dos núcleos dopantes não são mais canceladas → **carga líquida $\neq 0$** nos dois lados da ZD (+ do lado n, - do lado p).

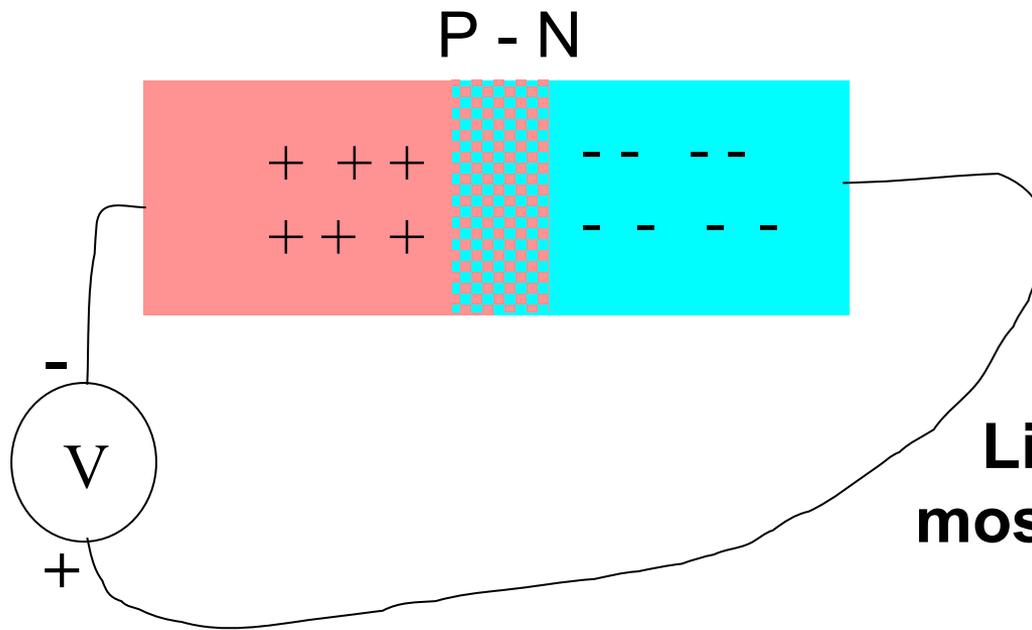
Resultado: Diferença de potencial

- DDP se contrapõe à difusão (i.e., tende a empurrar elétrons (portadores minoritários) 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

Junção P-N com ddp aplicada

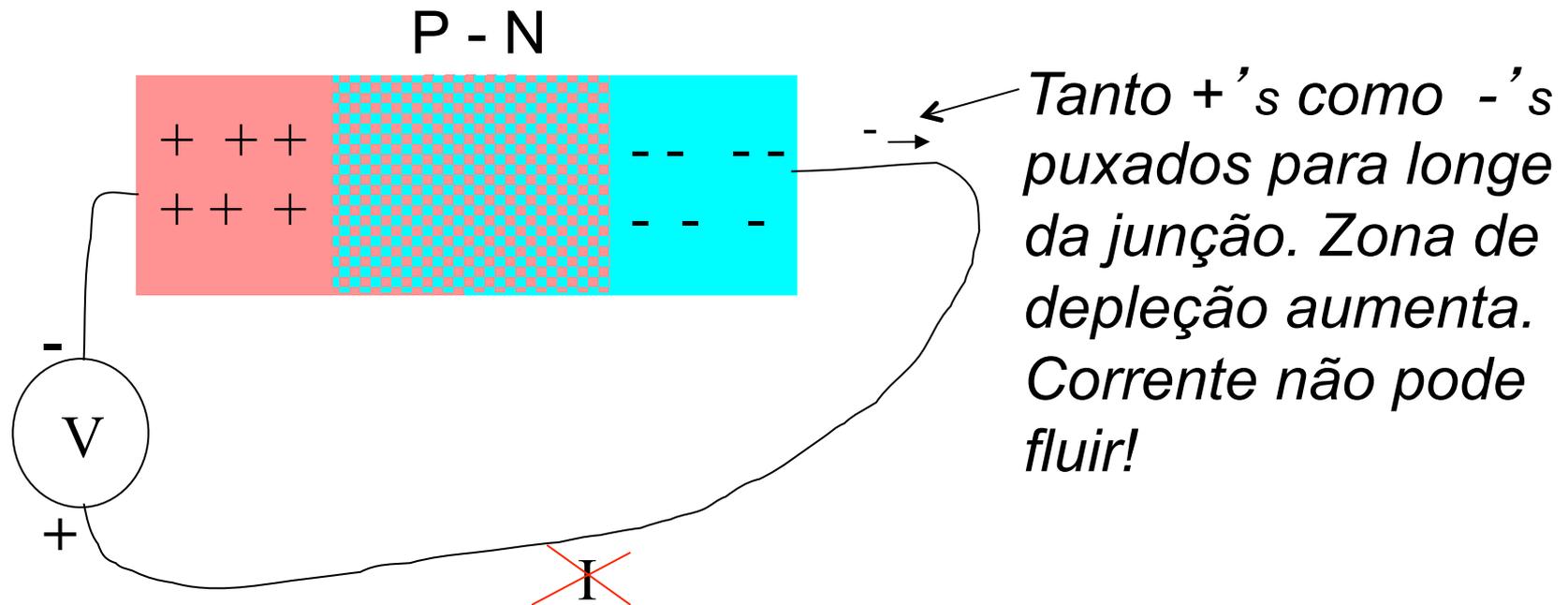


obs: aqui +, - representam as cargas móveis (cargas fixas não estão mostradas)

Ligando a voltagem, mostrada, o que ocorre?
(por que?)

- elétrons fluem de P p/ N pela junção.
- elétrons não fluem pela junção
- elétrons fluem de N p/ P pela junção.

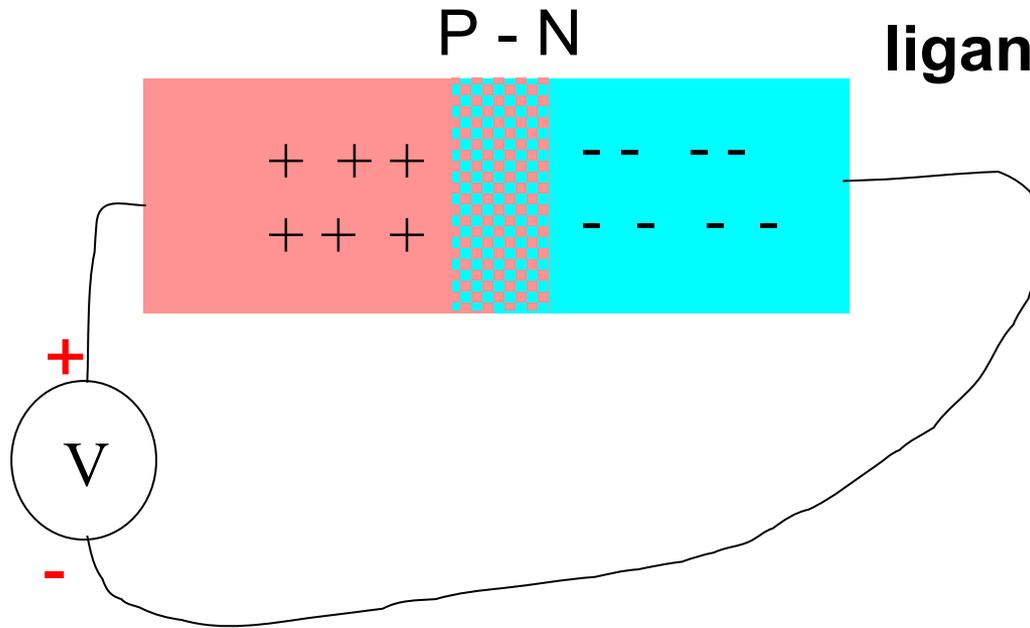
Junção P-N com ddp aplicada



Obs: Na ZD há muitas cargas negativas e positivas, mas nenhuma carga móvel !

- elétrons fluem de P p/ N pela junção.
- elétrons não fluem pela junção**
- elétrons fluem de N p/ P pela junção.

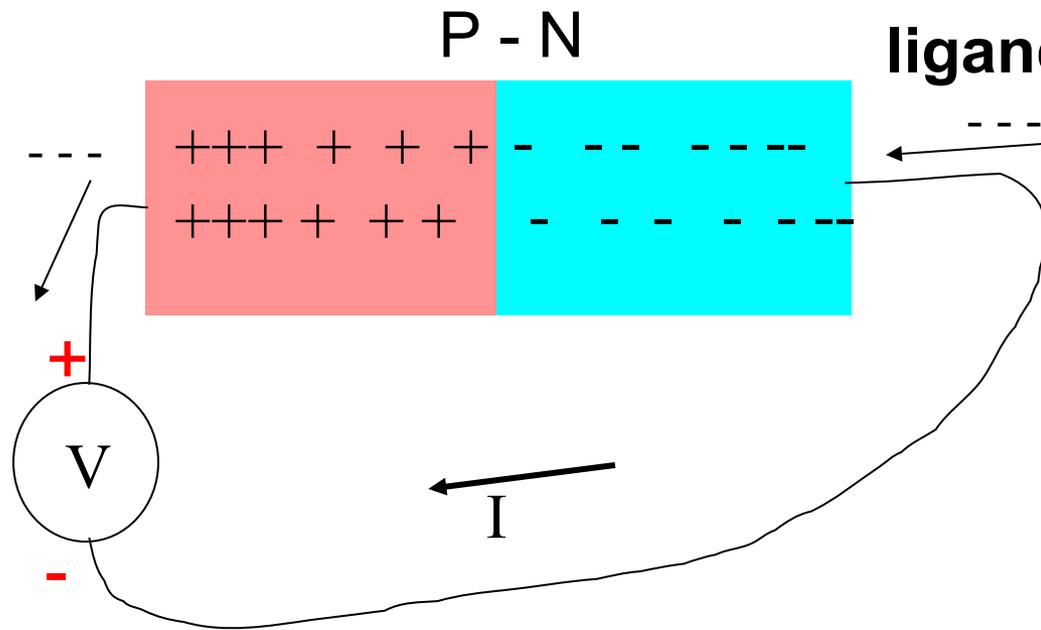
Junção P-N com ddp aplicada



**ligando voltagem oposta,
o que acontece?
(por que?)**

- elétrons fluem de P p/ N pela junção.
- elétrons não fluem pela junção
- elétrons fluem de N p/ P pela junção.

Junção P-N com ddp aplicada



ligando voltagem oposta,
o que acontece?
(por que?)

*+ 's móveis empurrados para a ZD vindos da esq,
- 's móveis empurrados para a ZD vindos da dir.
=> ZD é reduzida*

Assim: se V sufic. grande em um sentido, há corrente.
 V no sentido oposto: não há corrente
Diodo: via de mão-única p/ corrente!.

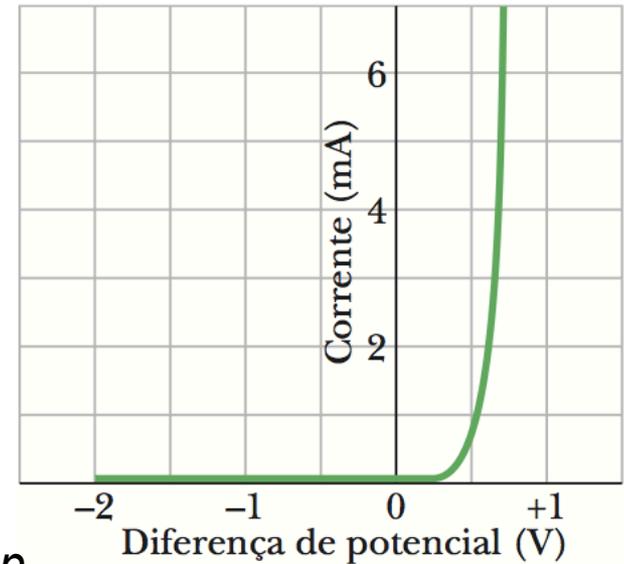
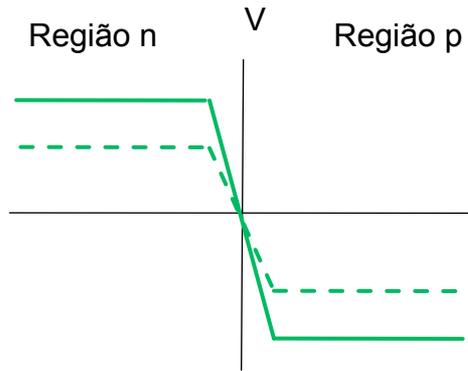
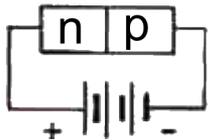
- elétrons fluem de P p/ N pela junção.
- elétrons não fluem pela junção
- elétrons fluem de N p/ P pela junção.

O diodo retificador

Aplique uma tensão adicional em uma junção p-n:

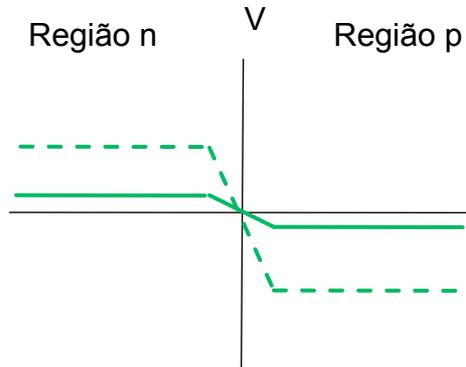
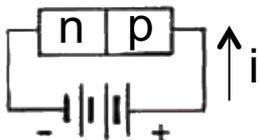
- 'Polarização inversa': tensão positiva aplicada do lado *n*

- Reforça a diferença de potencial já existente
→ cria (mais) resistência ao movimento das cargas difusivas
→ não há corrente

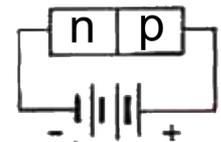
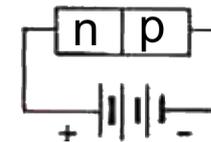


- 'Polarização direta': tensão positiva aplicada do lado *p*

- Reduz a diferença de potencial → facilita o movimento de cargas
- → há corrente



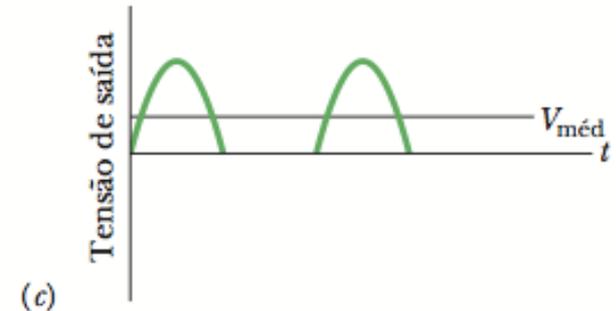
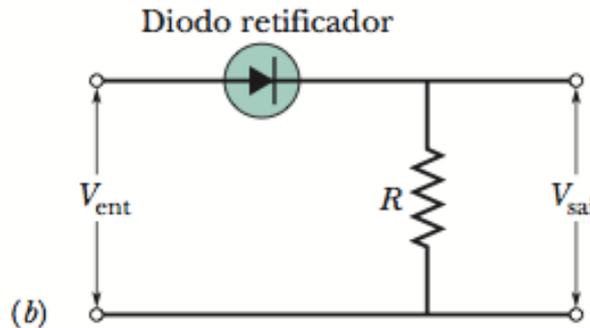
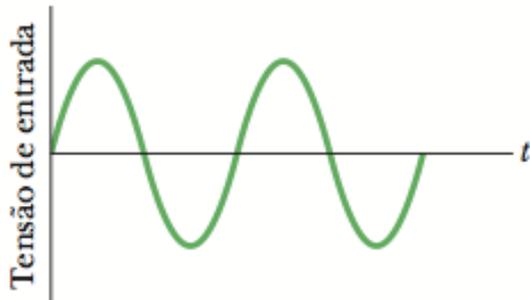
← Polarização inversa | Polarização direta →



O diodo retificador

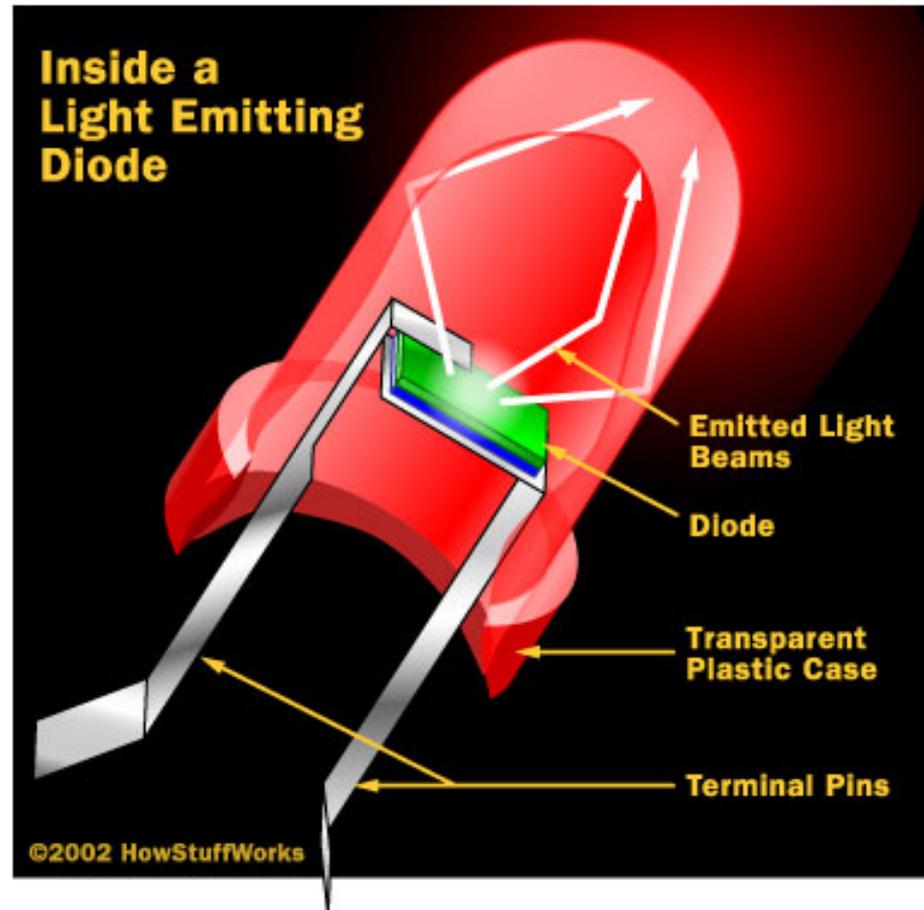
Aplicação simples em eletrônica: 'retificação'

- 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)

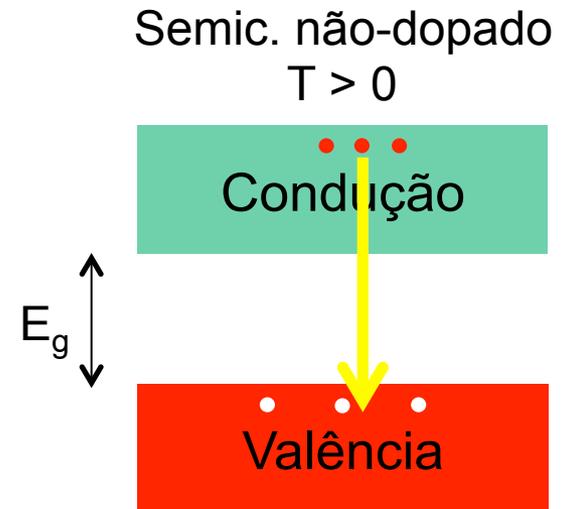


Diodo Emissor de Luz (LED)

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)

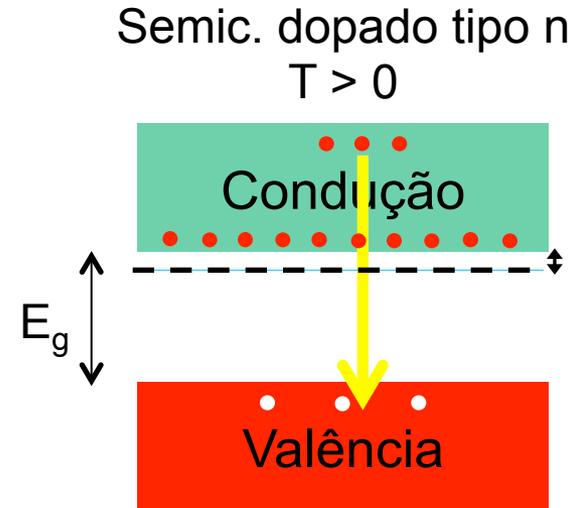
Recombinação: num semiconductor (dopado ou não) a $T > 0$, um elétron excitado para a banda de condução pode decair de volta para a banda de valência, eliminando um buraco

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...)



Solução: Junção p – n !!



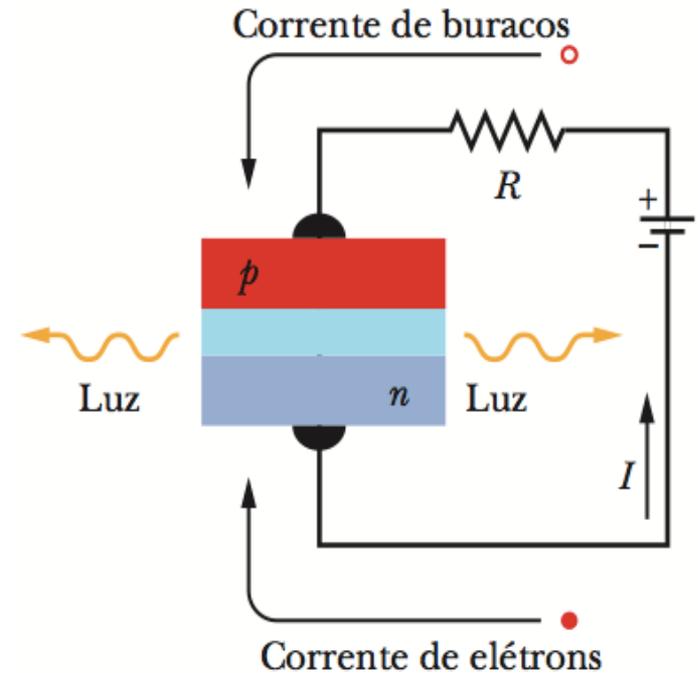
À medida em que o elétron se move pela junção indo do tipo N para o tipo P:

- ele se mantém com a mesma energia
- ele ganha energia potencial (se sim, aonde?)
- ele perde energia potencial (se sim, para onde?)

c. energia emitida como i) calor (vibrações da rede) ou ii) (em materiais apropriados): **luz** (diodo emissor de luz - LED)

Diodo Emissor de Luz (LED)

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



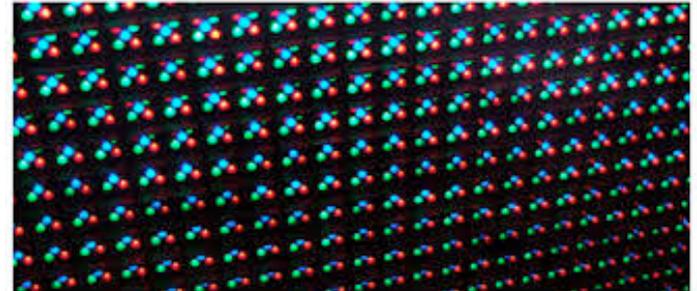
Exemplo: junção GaAs com GaAsP tem $E_g = 1,8\text{eV}$ (luz vermelha).



O LED azul

Só nos anos 1990 se descobriu um modo prático de produzir um LED azul, usando materiais à base de GaN (Nitreto de Gálio) (antes: problemas para crescer o material dopado, espec. tipo p)

Resultado: discos blu-ray (que utilizam lasers semicondutores azuis), lâmpadas LED brancas para iluminação, telas LED RGB para TVs, etc

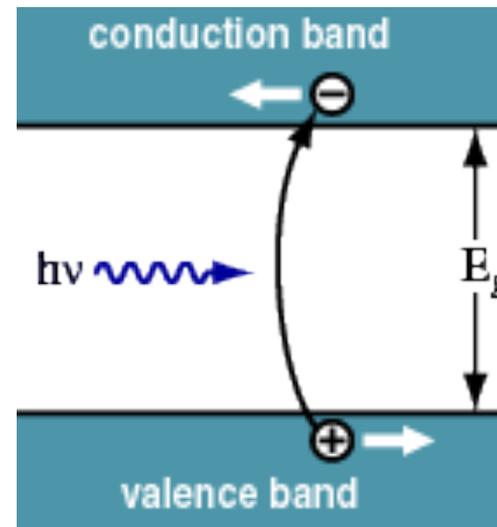


Devido à importância prática da descoberta, os pesquisadores japoneses Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura receberam o **Prêmio Nobel de Física de 2014**

Fotodiodo

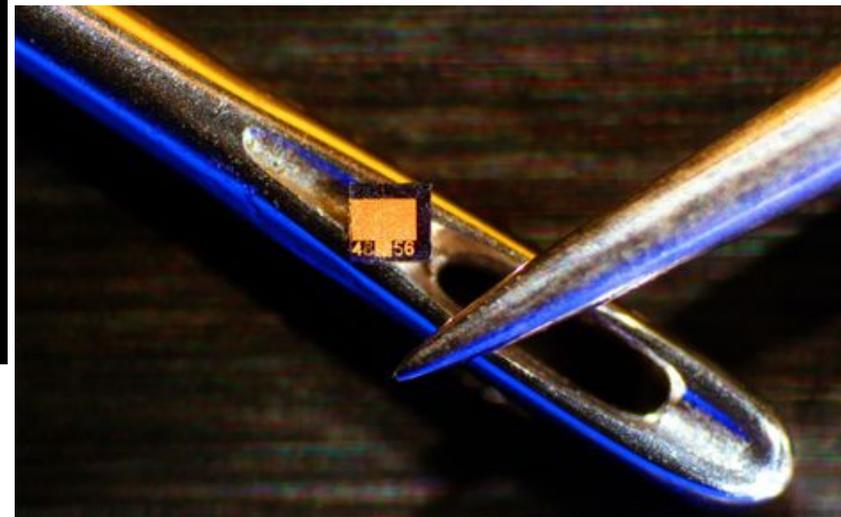
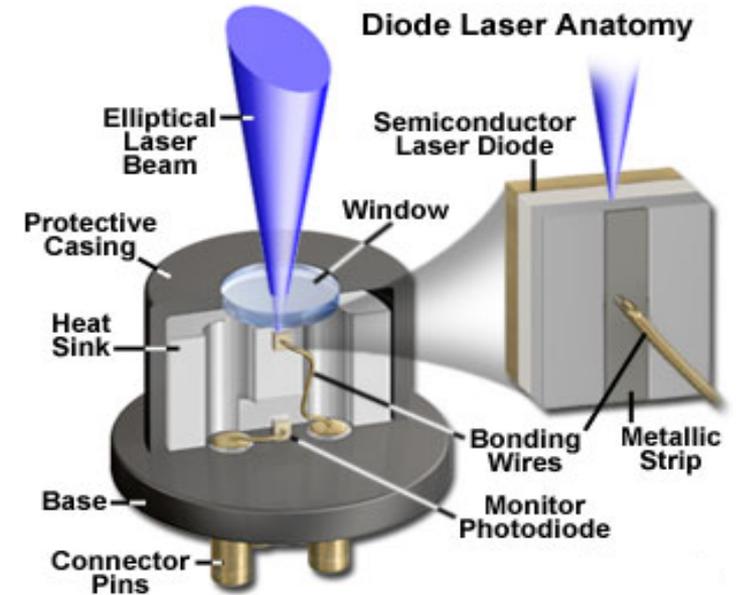
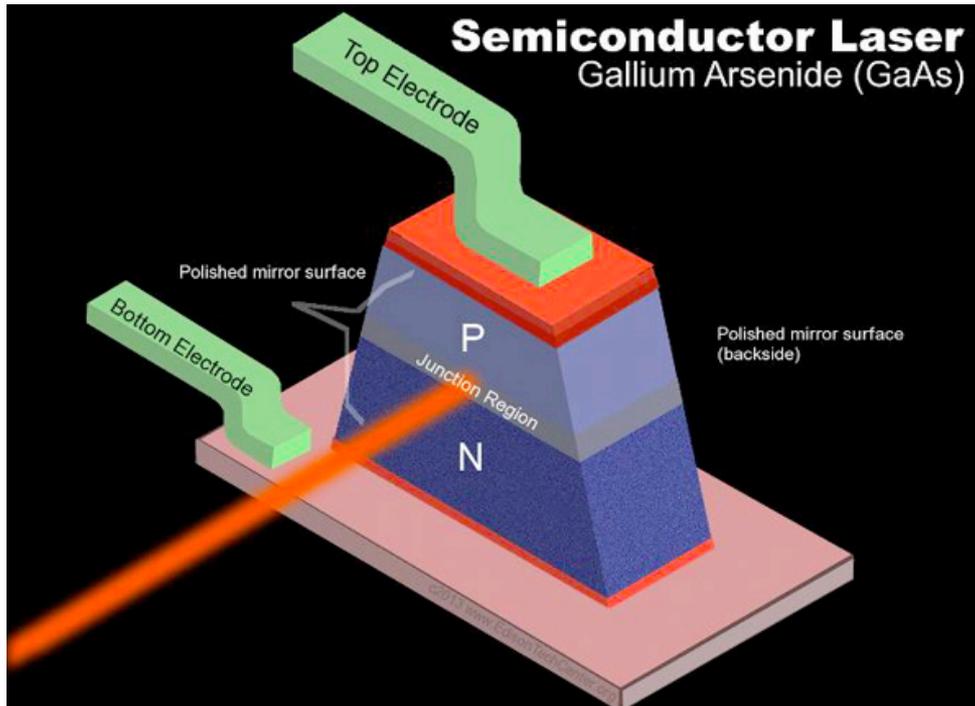
Fotodiodo: processo inverso do LED

- 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.

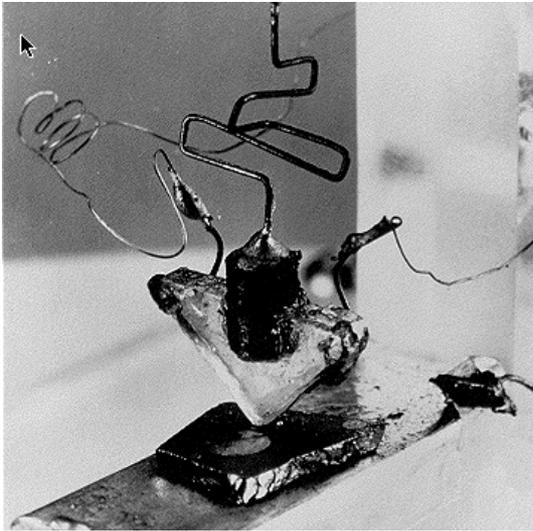


O laser semiconductor

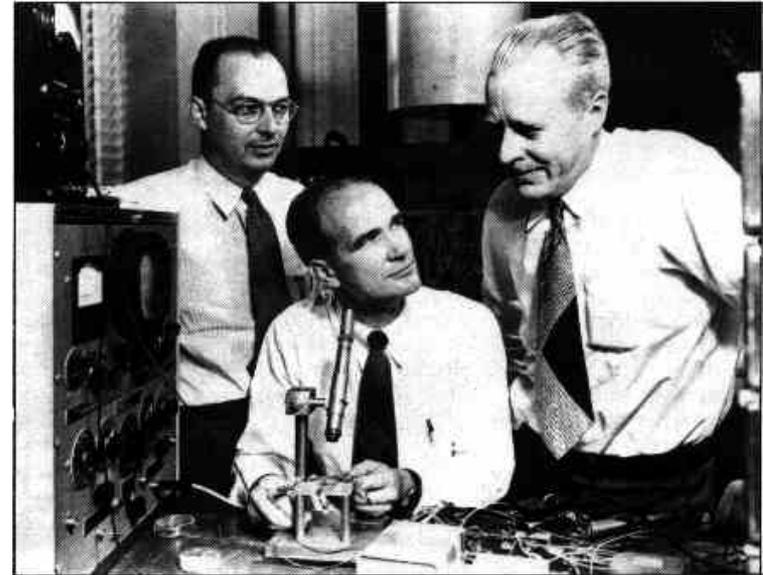
LED + espelhos !



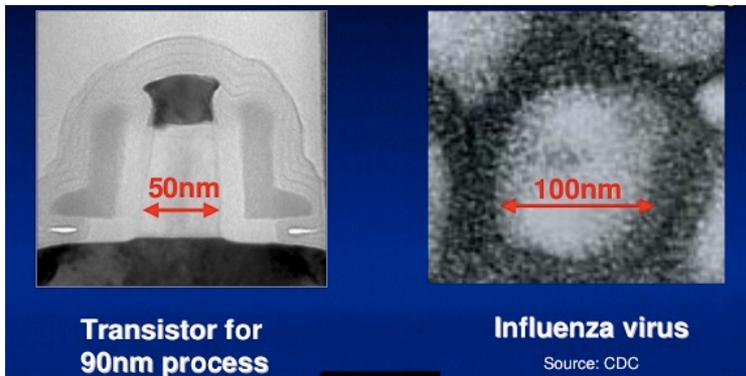
O transistor



1º transistor (Bell Labs, EUA, 1947)



John Bardeen, William Shockley e Walter Brattain (Nobel 1956)



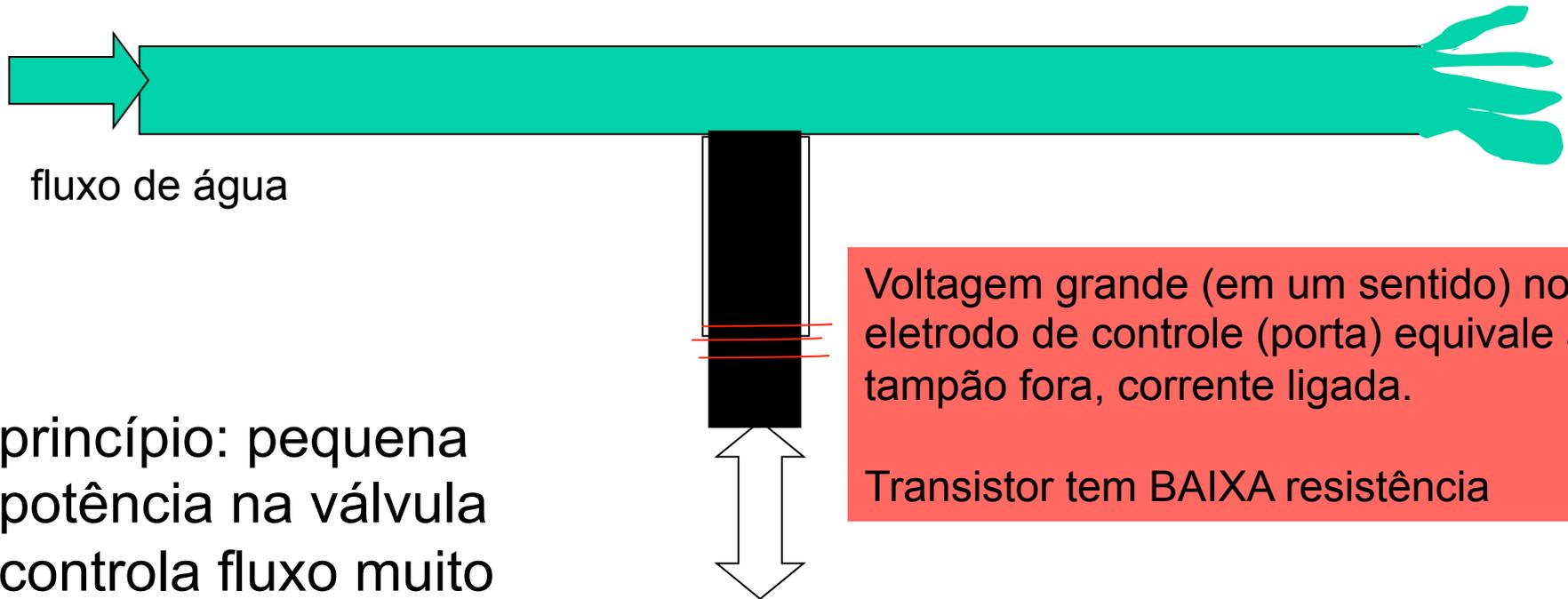
nanotransistor da Intel em 2003 (!)



transistores comerciais

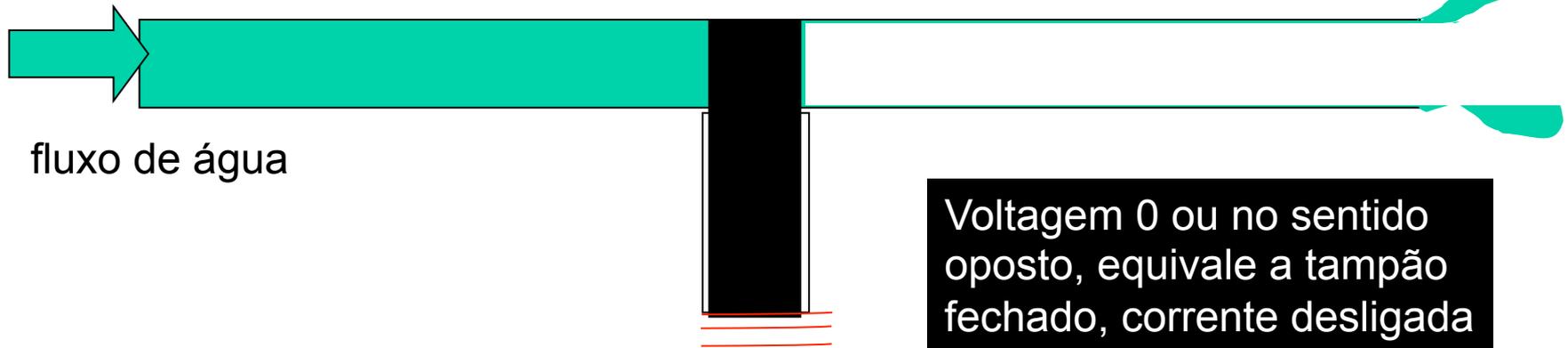
Transistor: Ideia básica

É como válvula num cano: controla a corrente.
No transistor, voltagem de controle = ajustar posição da válvula.



Transistor: Ideia básica

É como válvula num cano: controla a corrente.
No transistor, voltagem de controle = ajustar posição da válvula.



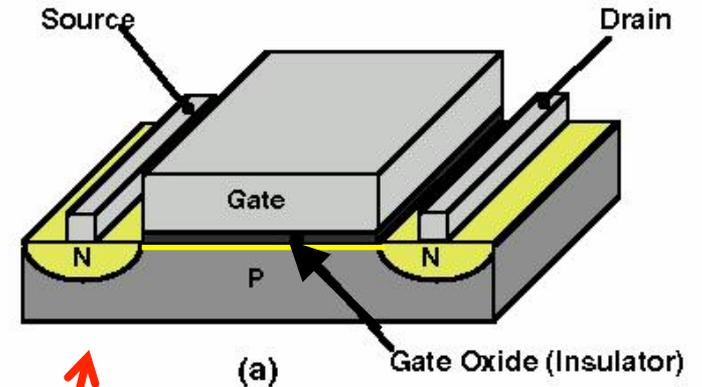
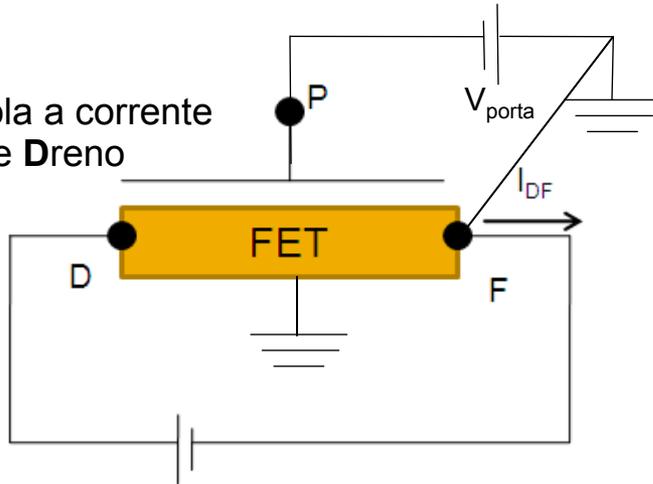
princípio: pequena
potência na válvula
controla fluxo muito
maior

Transistor tem
RESISTÊNCIA GRANDE.
(se comporta como isolante
agora)

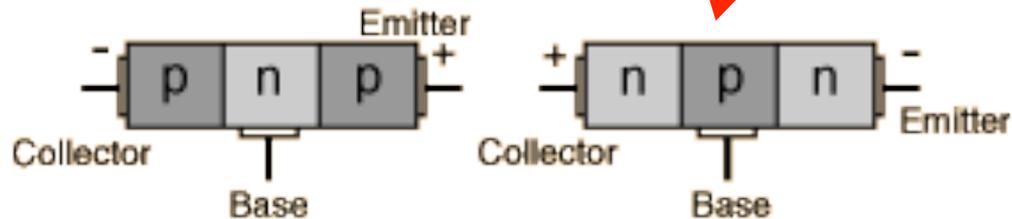
Transistor: tipos

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

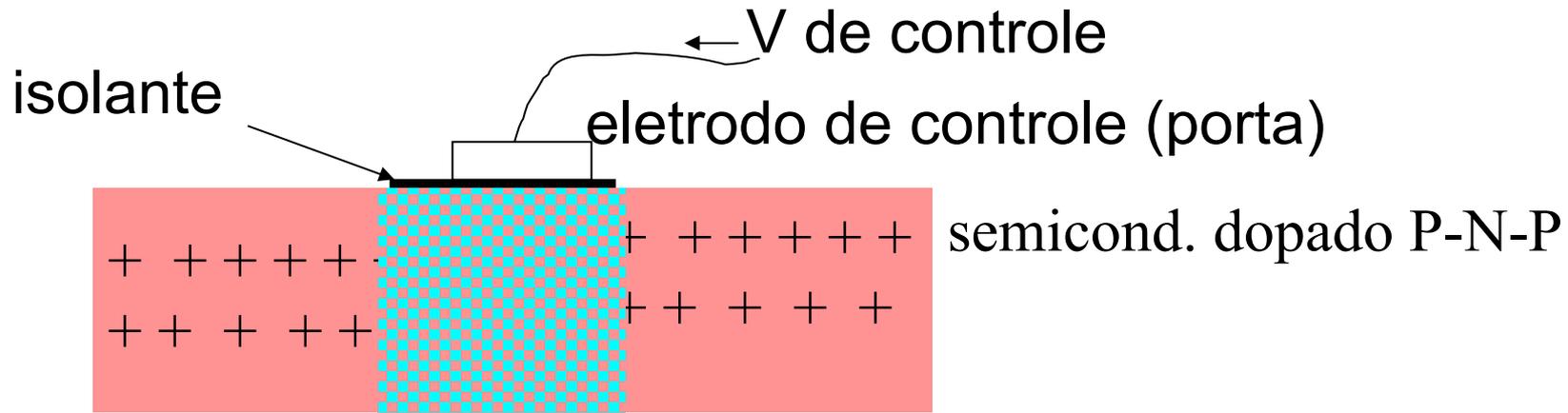
Porta: controla a corrente entre Fonte e Dreno



Transistor bipolar PNP ou NPN



Transistor FET – princípio básico

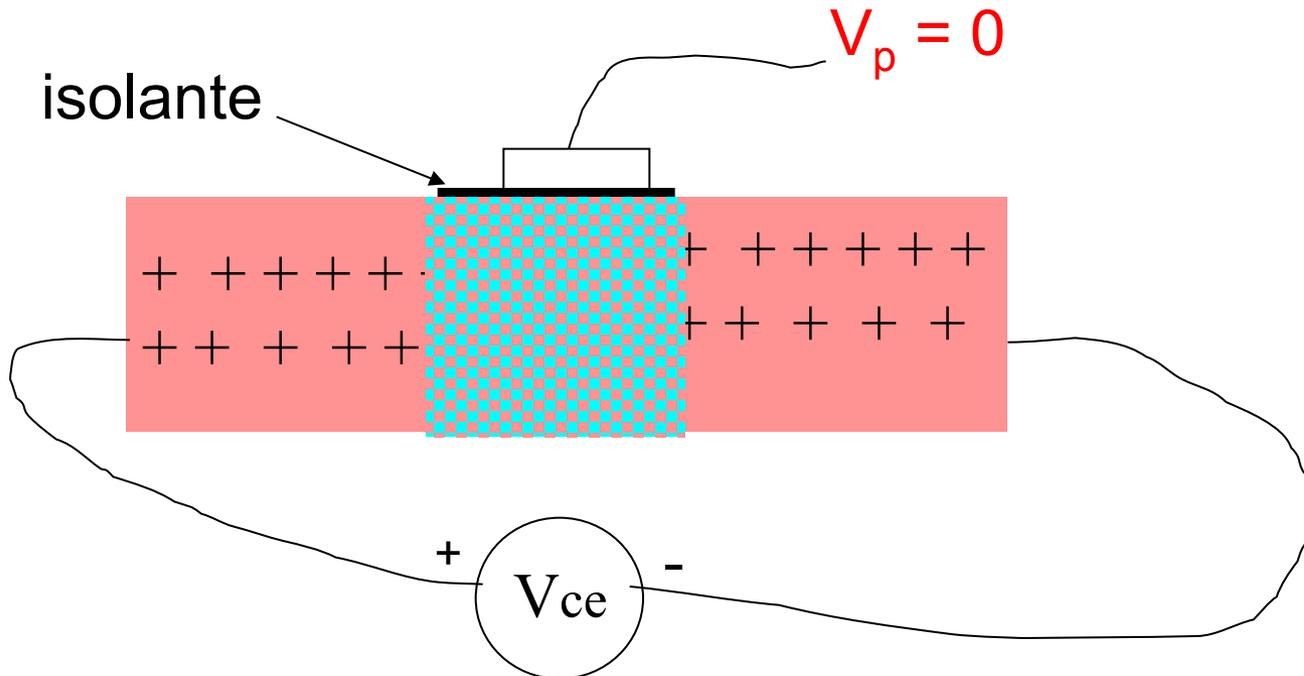


usam duas junções NP (“Sanduíche”)
mais um eletrodo “porta” para controlar a ZD.

Devido à dupla junção, a ZD é bem grande

Ideia: usar a voltagem de controle para atrair ou repelir elétrons de/para Zona de Depleção, e assim controlar o fluxo de corrente

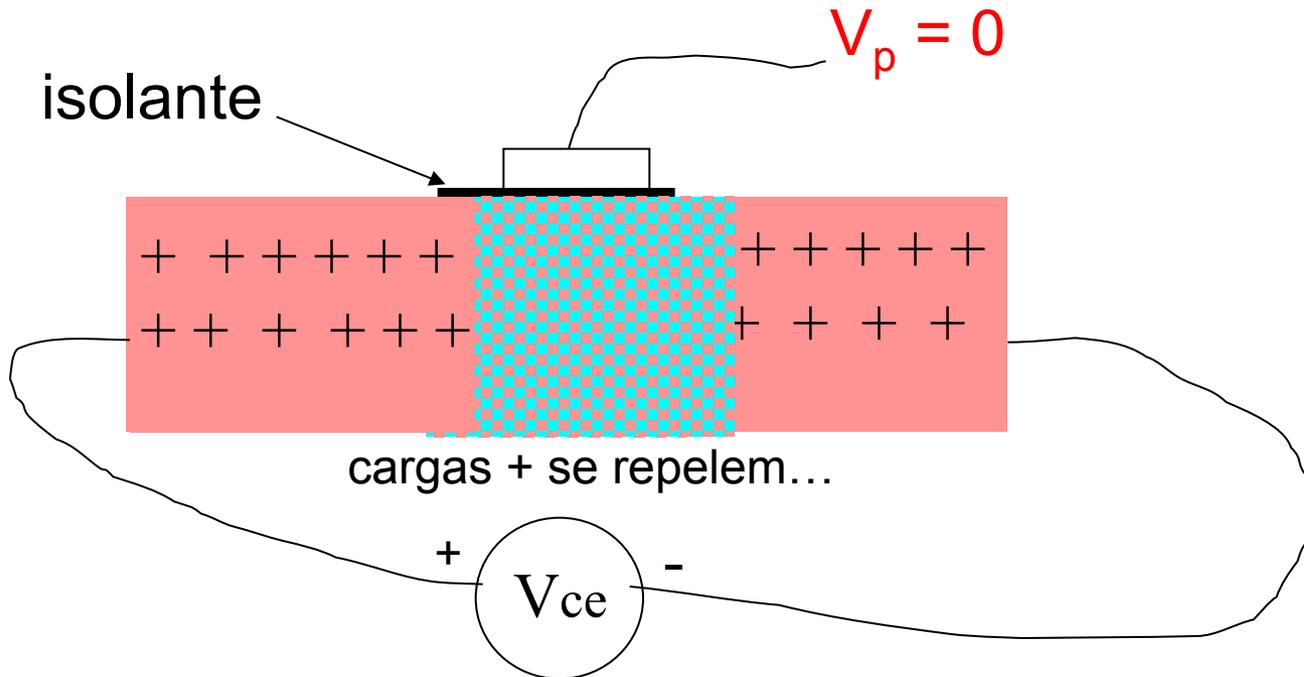
Transistor FET – princípio básico



O que acontece se ligamos $V_{CE} > 0$?

- A) Nada muda
- B) A ZD se contrai e aparece corrente no circuito CE
- C) A ZD se expande mas não há corrente CE
- D) A ZD se desloca de posição, mas não há corrente CE

Transistor FET – princípio básico

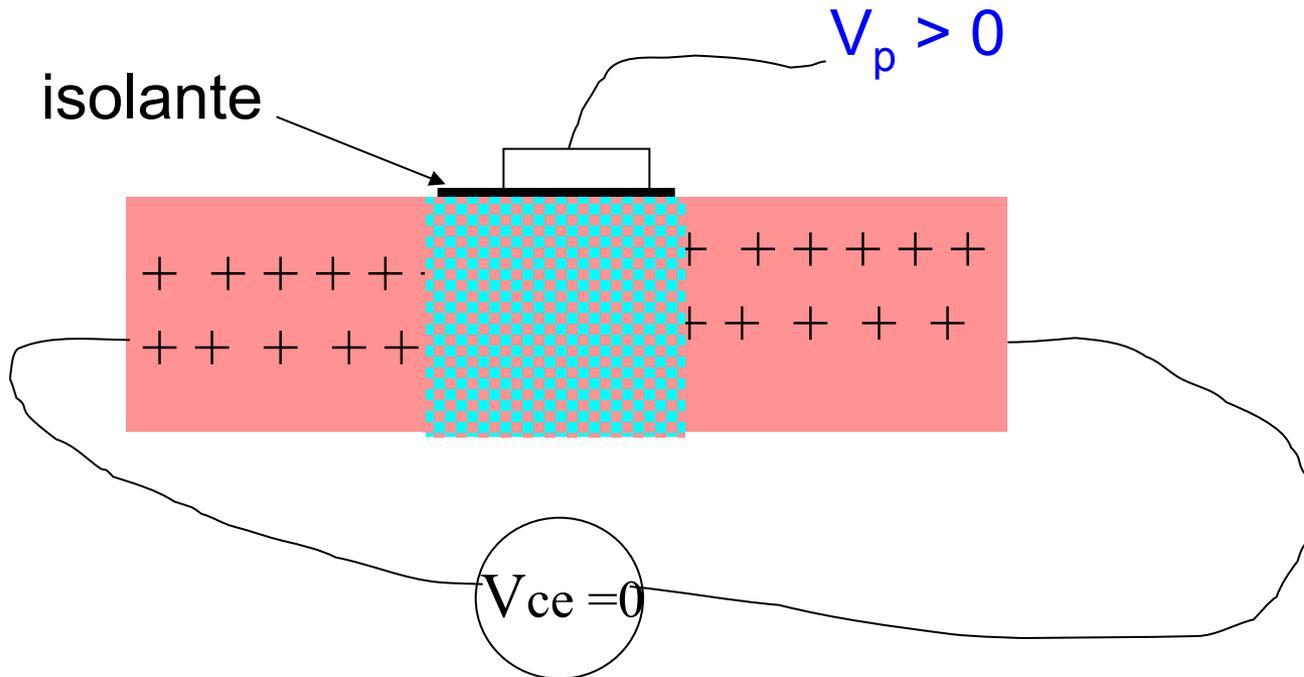


O que acontece se ligamos $V_{CE} > 0$?

- A) Nada muda
- B) A ZD se contrai e aparece corrente no circuito
- C) A ZD se expande mas não há corrente
- D) **A ZD se desloca de posição, mas não há corrente**

Obs: se $V_{CE} < 0$,
ZD desloca no
sentido oposto

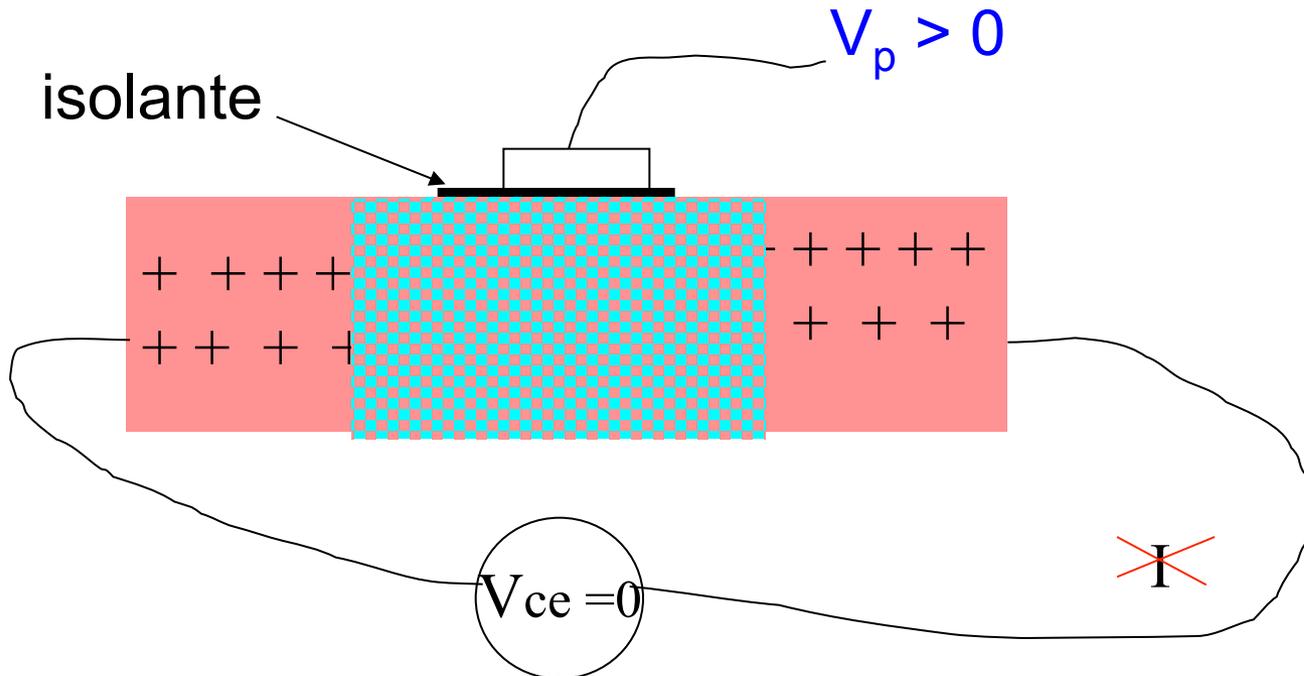
Transistor FET – princípio básico



O que acontece se ligamos $V_p > 0$ (com $V_{CE} = 0$)?

- A) Nada muda
- B) A ZD se contrai e aparece corrente no circuito CE
- C) A ZD se expande mas não há corrente CE
- D) A ZD se desloca de posição, mas não há corrente CE

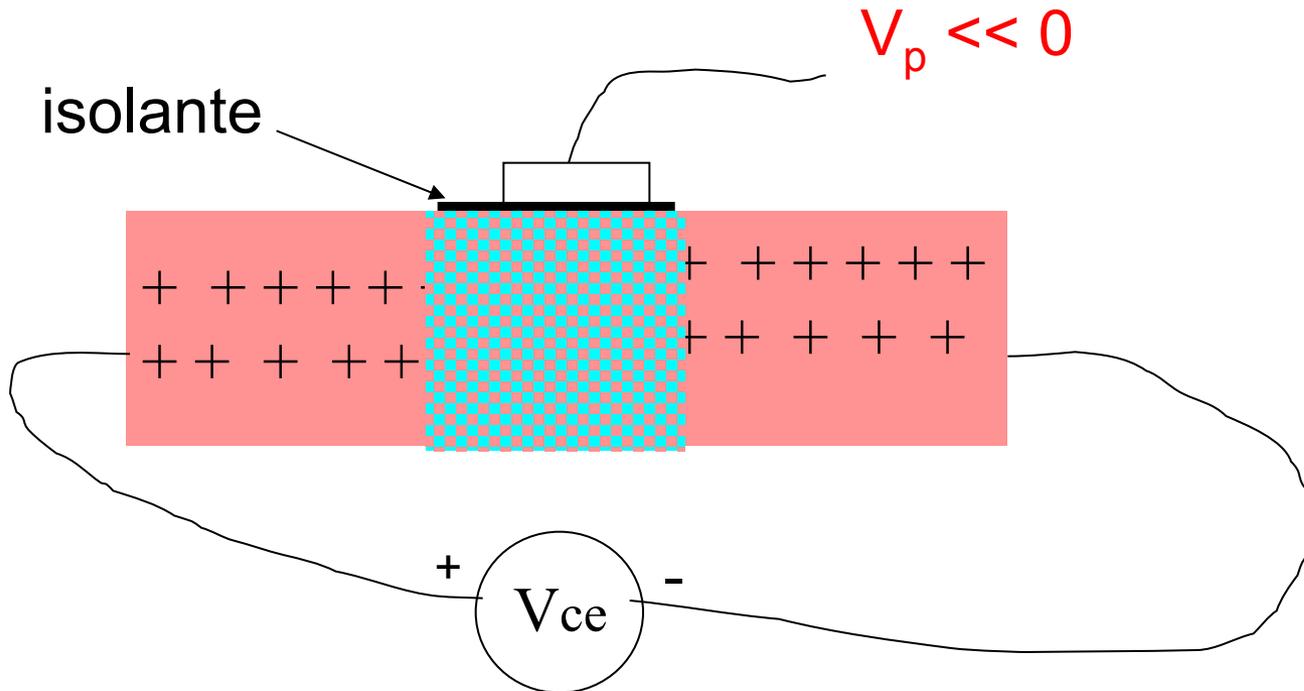
Transistor FET – princípio básico



O que acontece se ligamos $V_p > 0$ (com $V_{CE} = 0$)?

- A) Nada muda
- B) A ZD se contrai e aparece corrente no circuito CE
- C) **A ZD se expande mas não há corrente CE**
- D) A ZD se desloca de posição, mas não há corrente CE

Transistor FET – princípio básico



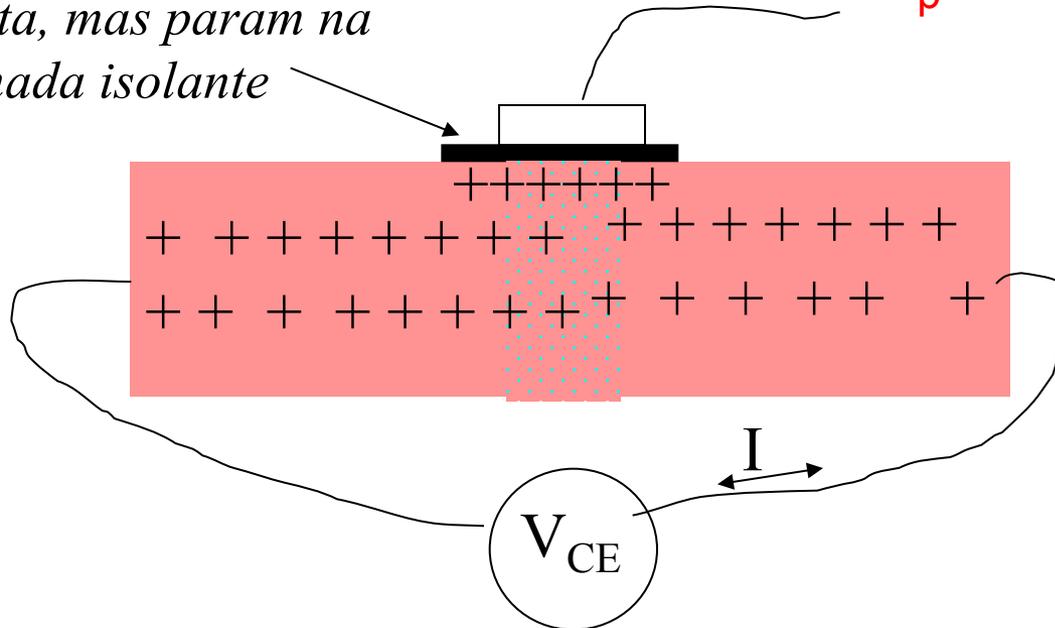
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- A) Nada muda
- B) A ZD se contrai e aparece corrente no circuito CE
- C) A ZD se expande mas não há corrente CE
- D) A ZD se desloca de posição, mas não há corrente CE

Transistor FET – princípio básico

cargas + atraídas para a Porta, mas param na camada isolante

$$V_p \ll 0$$



ZD eliminada, preenchida por buracos + móveis. Corrente flui facilmente em ambas as direções (dep do sinal de V_{CE})

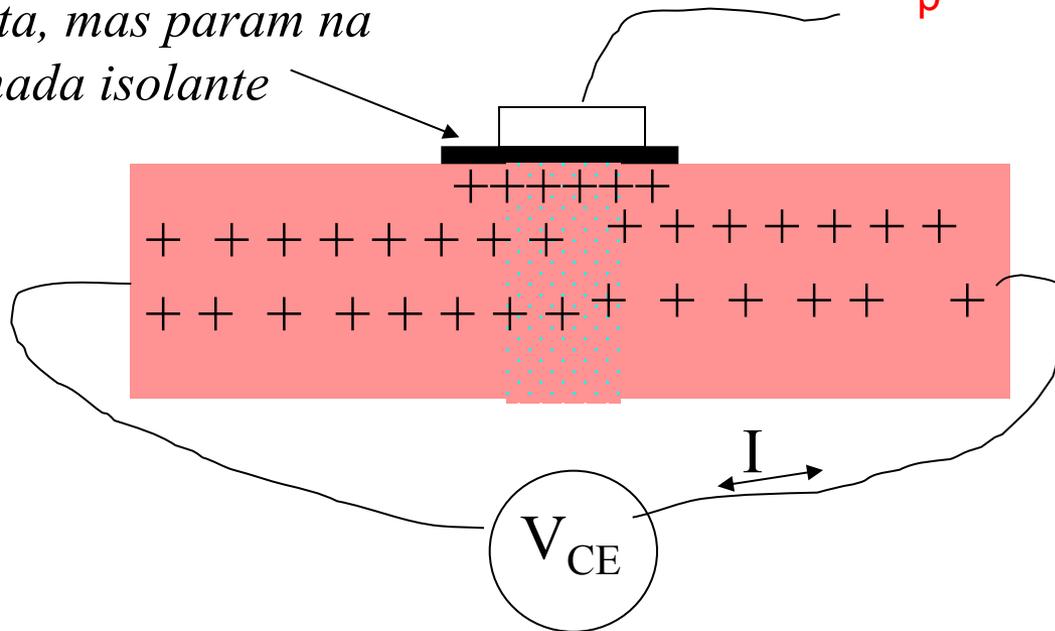
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- A) Nada muda
- B) **A ZD se contrai e aparece corrente no circuito CE**
- C) A ZD se expande mas não há corrente CE
- D) A ZD se desloca de posição, mas não há corrente CE

Transistor FET – princípio básico

cargas + atraídas para a Porta, mas param na camada isolante

$$V_p \ll 0$$

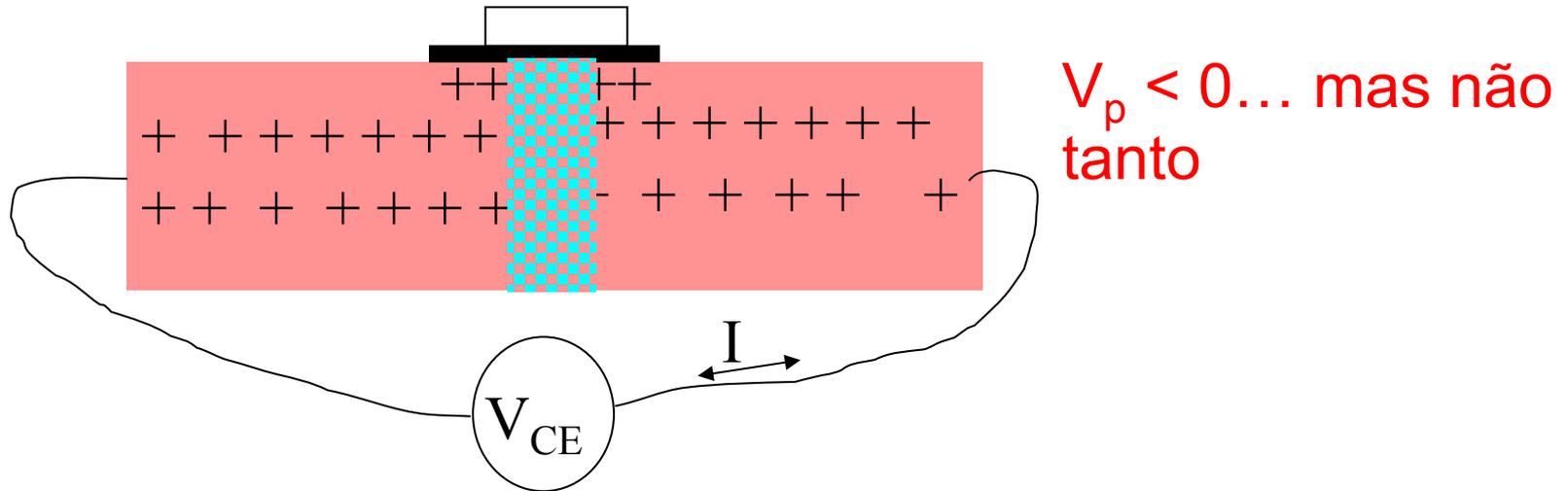


ZD eliminada, preenchida por buracos + móveis. Corrente flui facilmente em ambas as direções (dep do sinal de V_{CE})

Temos uma válvula!!

- Aplicação: circuitos lógicos binários
 - Corrente ON = 1, OFF = 0 (1 bit)
 - Podemos controlar o seu valor de acordo com V_p

Outra aplicação: amplificador de corrente



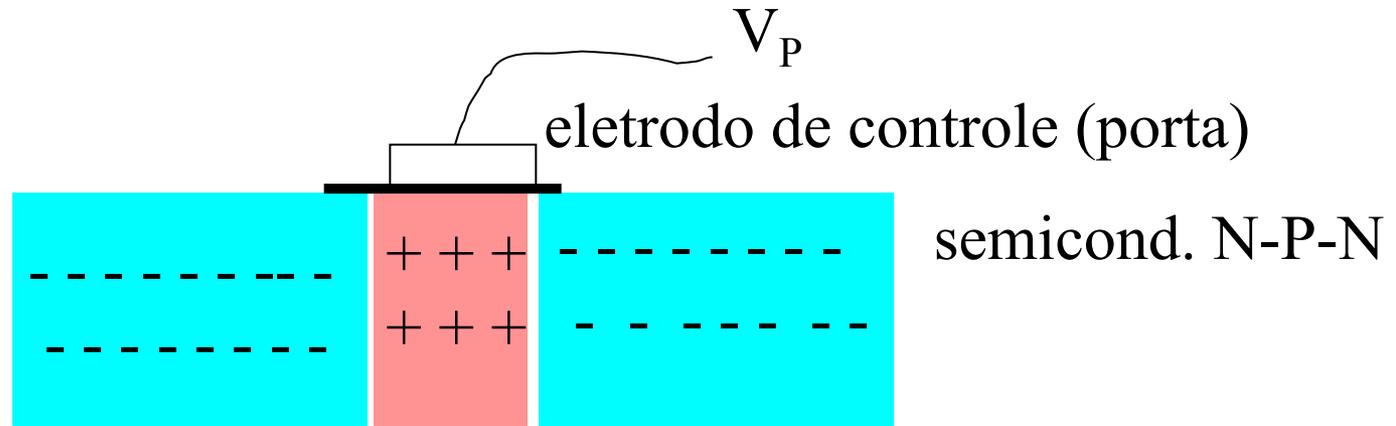
Se V_p moderado, ZD reduzida mas não destruída...
há alguns ++s para carregar corrente, mas menor (mais resistência)

Conclusão: tamanho da corrente CE varia de zero a um valor GRANDE dependendo do tamanho da voltagem de controle V_p

Como V_p pode ser muito pequeno, obtemos uma AMPLIFICAÇÃO controlada

E se quisermos amplificar voltagens positivas?

Revertendo Ps e Ns



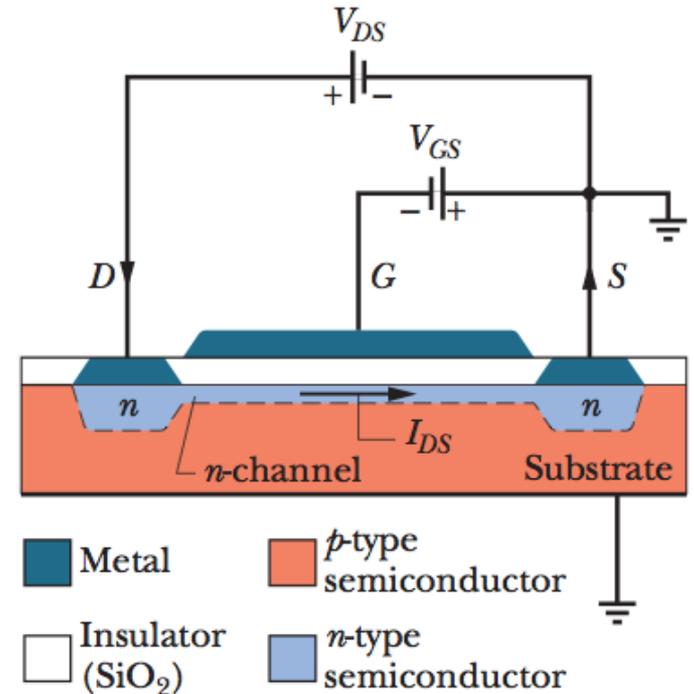
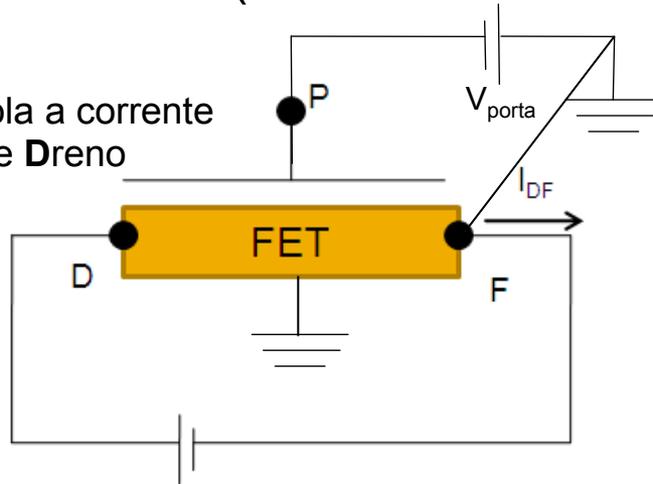
Tudo igual mas com cargas voltagens invertidas.

(Corrente pode fluir se $V_P \gg 0$)

Transistor MOSFET

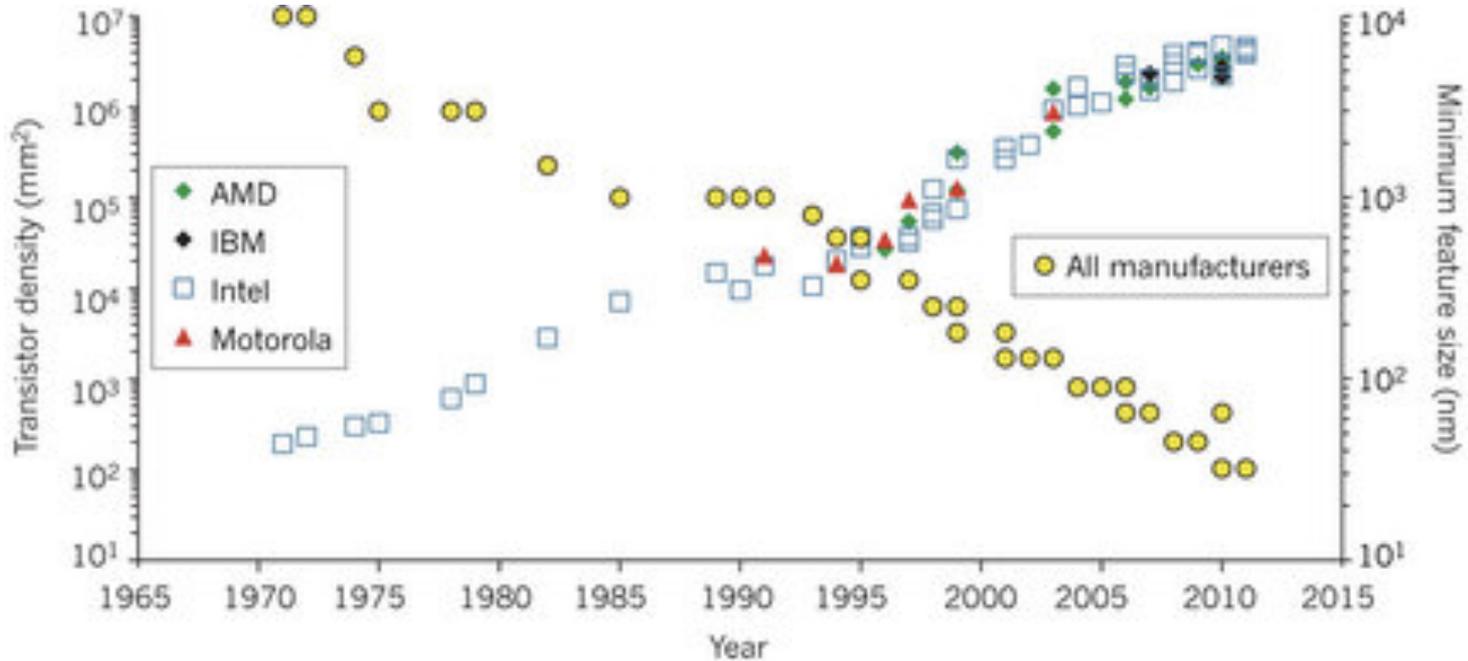
MOSFET: (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

Porta: controla a corrente entre **F**onte e **D**reno



- Há uma Zona de depleção no “canal n” entre Dreno e Fonte
- Se $V_{porta} < 0$: elétrons do canal n repelidos, buracos do substrato atraídos
 - Aumento da ZD – sem corrente
- Se $V_{porta} > 0$: buracos repelidos, elétrons móveis atraídos para canal n
 - Redução da ZD – corrente pode passar
- MOSFET são o tipo de transistor mais usado em microcircuitos atuais

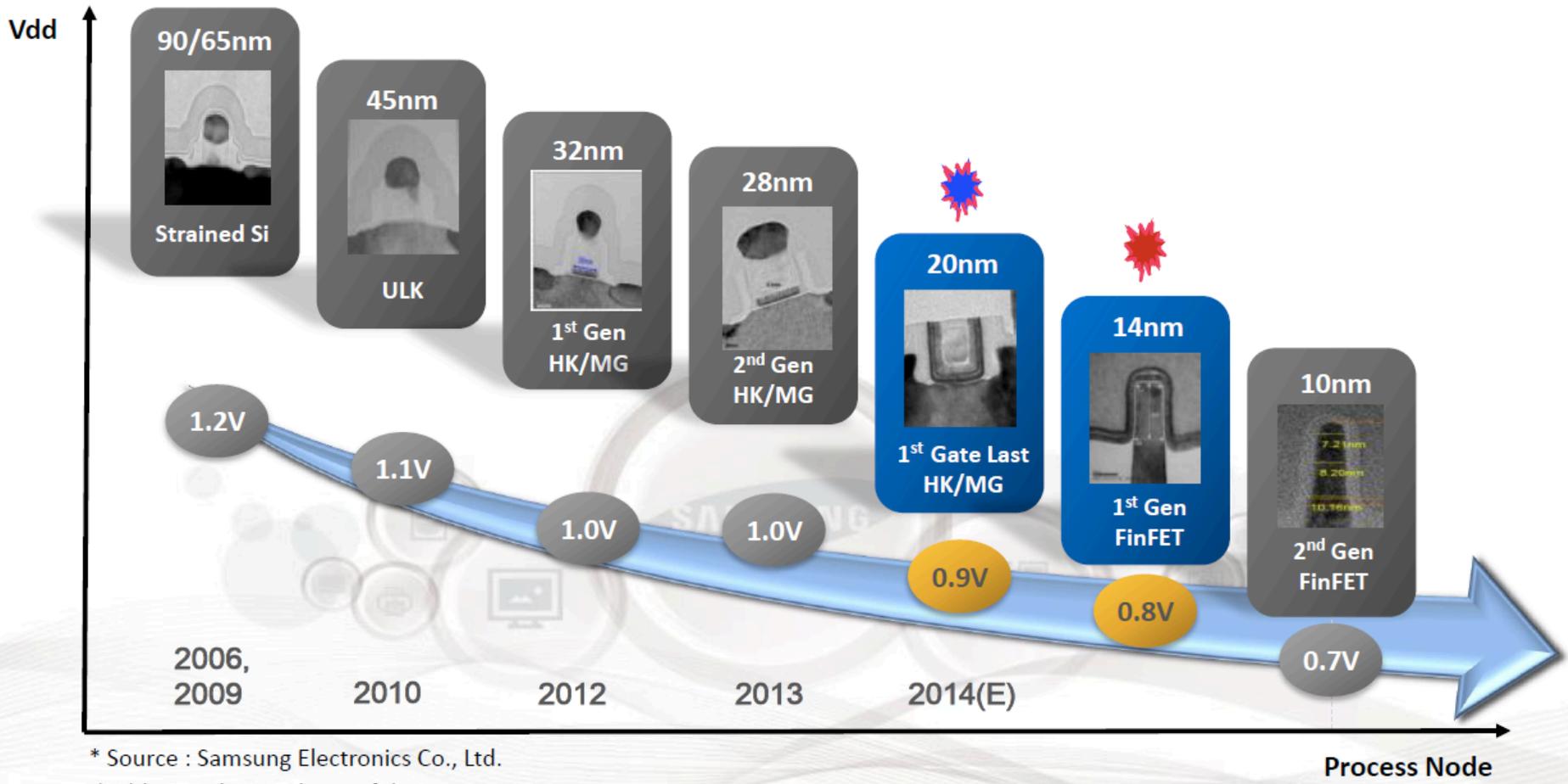
“Lei” de Moore



De 1965 até hoje, o tamanho dos transistores (amarelo) vem caindo **exponencialmente**, reduzindo-se pela metade a cada 2.5 anos aprox.

Há indícios porém que esta “Lei” do mercado está chegando ao seu limite

O Futuro?



* Source : Samsung Electronics Co., Ltd.

*V_{dd} : Supplying voltage of drain



THE END!