



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física 4

Condução de Eletricidade em Sólidos

(Cap 43; Halliday, Resnik, Walker 8^a ou 9^a ed.)

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo (Cadu)

18/07/2016

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.

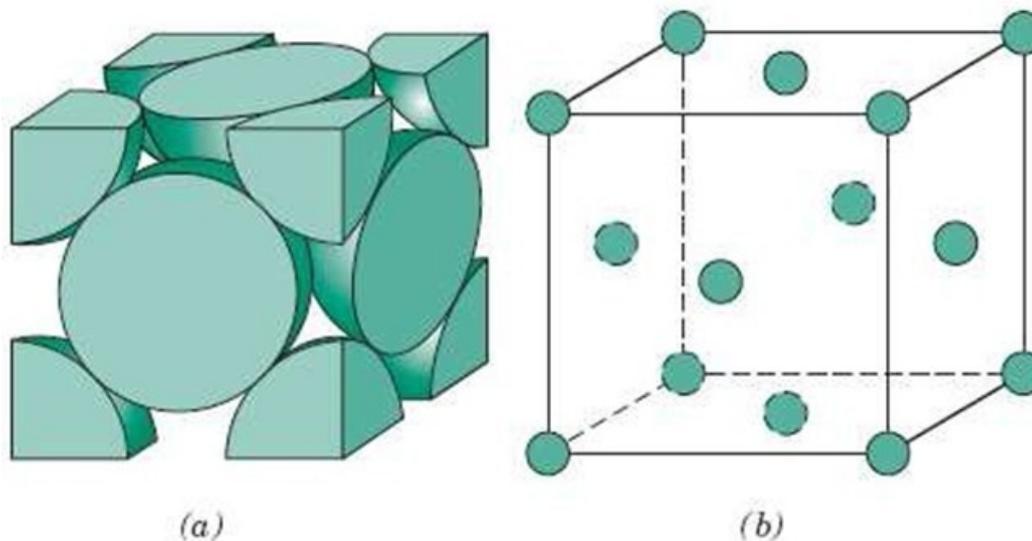
Quais os mecanismos através dos quais um material conduz, ou não, eletricidade?

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!!!)

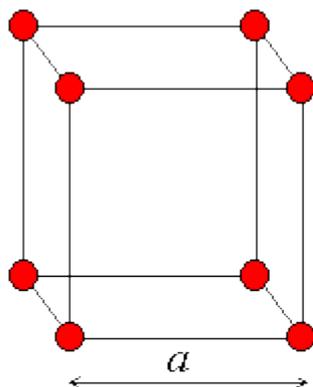
Propriedades Físicas dos Materiais

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

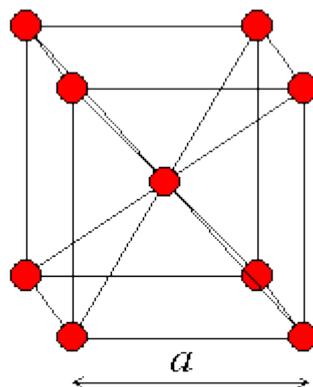


Propriedades Físicas dos Materiais

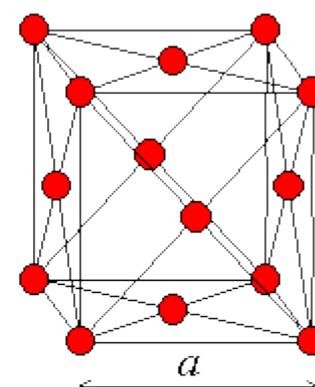
- Sólidos cristalinos: átomos estão dispostos em uma estrutura periódica (rede cristalina)
- Tijolo fundamental: células unitárias



(a)



(b)



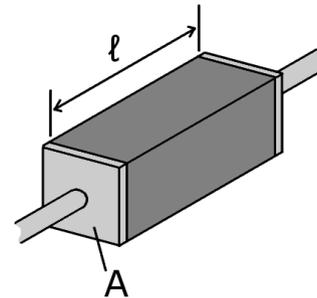
(c)

Propriedades Físicas dos Materiais

- 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})



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>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>Concentração de portadores de carga, n</i>	m^{-3}	9×10^{28}	1×10^{16}	

A resistividade de um semicondutor diminui rapidamente com o aumento da Temperatura, enquanto a dos metais aumenta lentamente com o aumento da Temperatura...

1) Considere as seguintes propriedades elétricas: (i) resistividade (ρ) (ii) variação percentual da resistividade com a temperatura (ou "coeficiente térmico da resistividade", α) e (iii) densidade de portadores de carga (n). Levando-se em conta o valor (inclusive o sinal) dessas propriedades, as três substâncias: cobre (C), silício (S) e diamante (D) podem ser ordenadas da seguinte forma:

- (i) $D < S < C$; (ii) $C < D < S$; (iii) $S < C < D$
- (i) $C < S < D$; (ii) $D < S < C$; (iii) $C < D < S$
- (i) $D < S < C$; (ii) $C < S < D$; (iii) $D < C < S$
- (i) $C < S < D$; (ii) $S < D < C$; (iii) $D < S < C$

1) Considere as seguintes propriedades elétricas: (i) resistividade (ρ) (ii) variação percentual da resistividade com a temperatura (ou "coeficiente térmico da resistividade", α) e (iii) densidade de portadores de carga (n). Levando-se em conta o valor (inclusive o sinal) dessas propriedades, as três substâncias: cobre (C), silício (S) e diamante (D) podem ser ordenadas da seguinte forma:

- (i) $D < S < C$; (ii) $C < D < S$; (iii) $S < C < D$
- (i) $C < S < D$; (ii) $D < S < C$; (iii) $C < D < S$
- (i) $D < S < C$; (ii) $C < S < D$; (iii) $D < C < S$
- (i) $C < S < D$; (ii) $S < D < C$; (iii) $D < S < C$



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

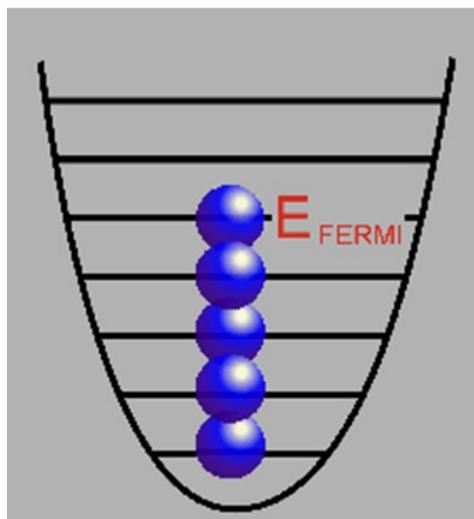
Metal, isolante, ou semicondutor

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Cobre</i>	<i>Silício</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>Concentração 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?

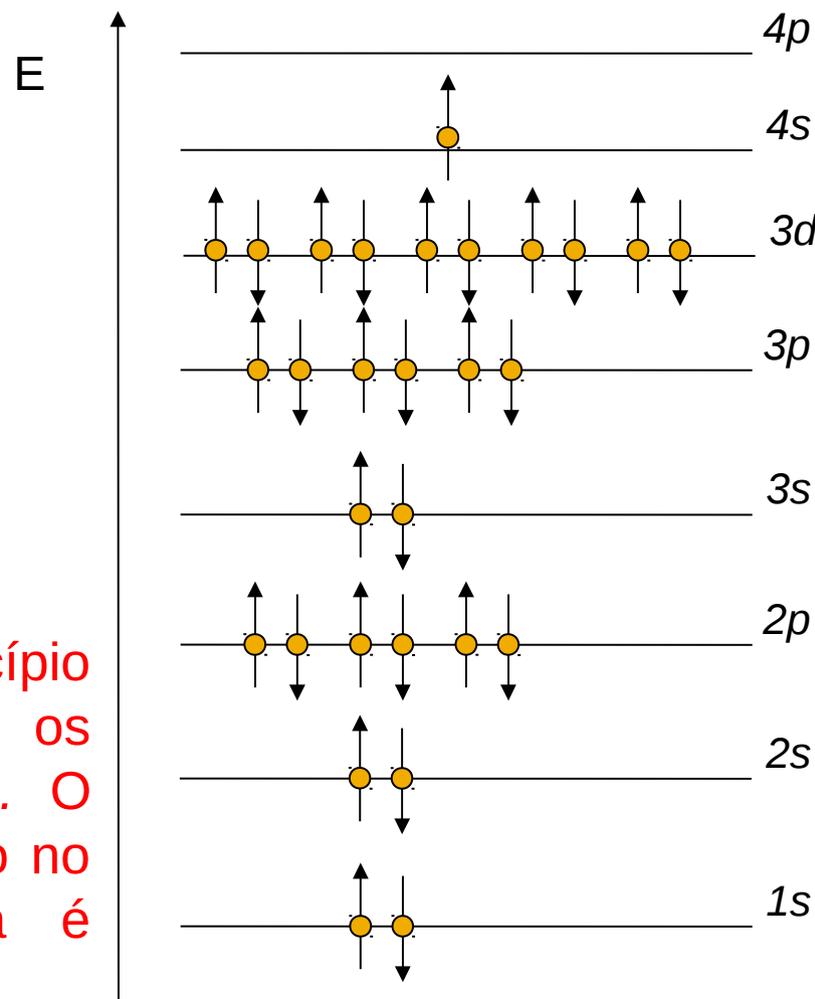
Um átomo de Cobre

(ex: Cobre $Z = 29$)



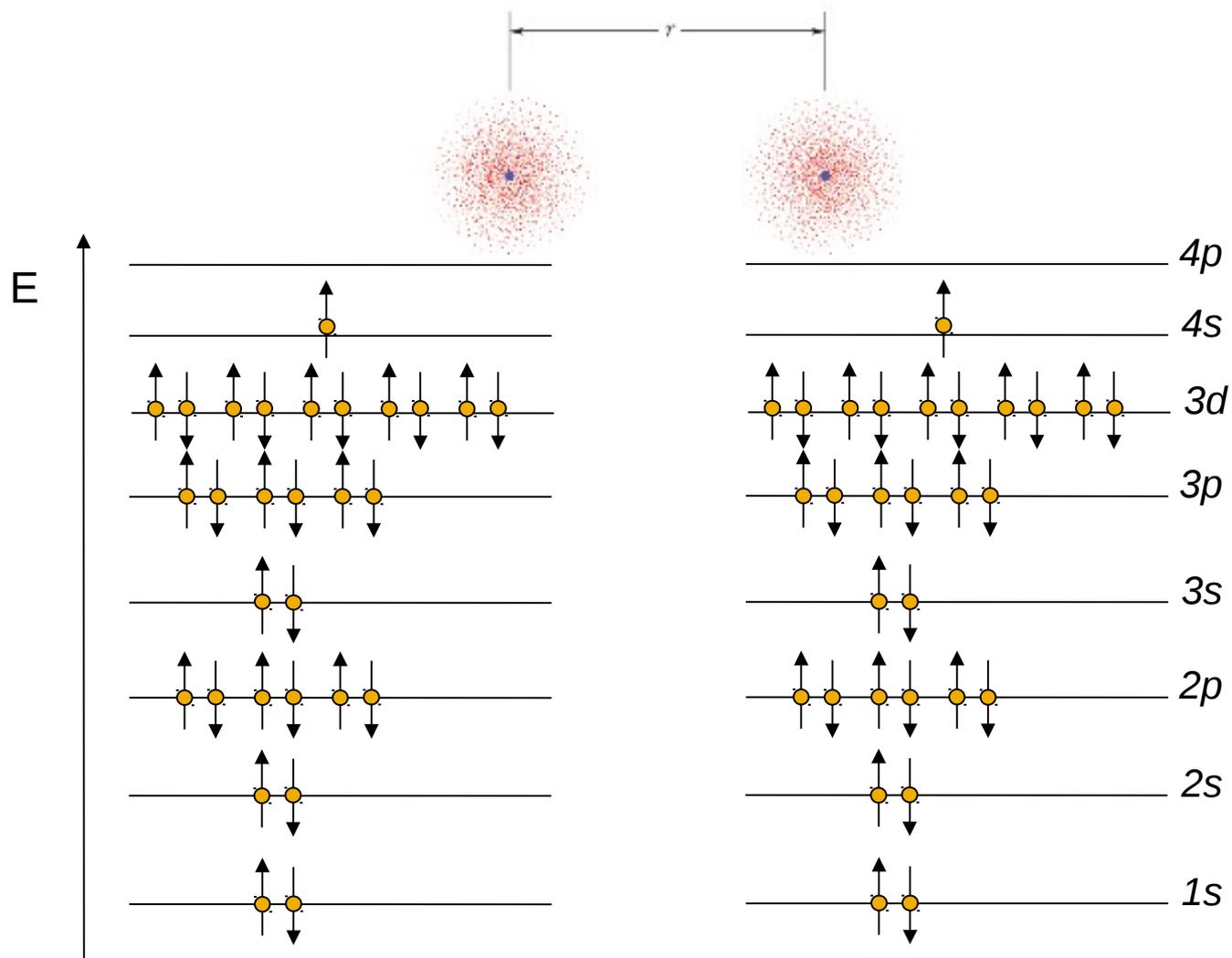
Férmions

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





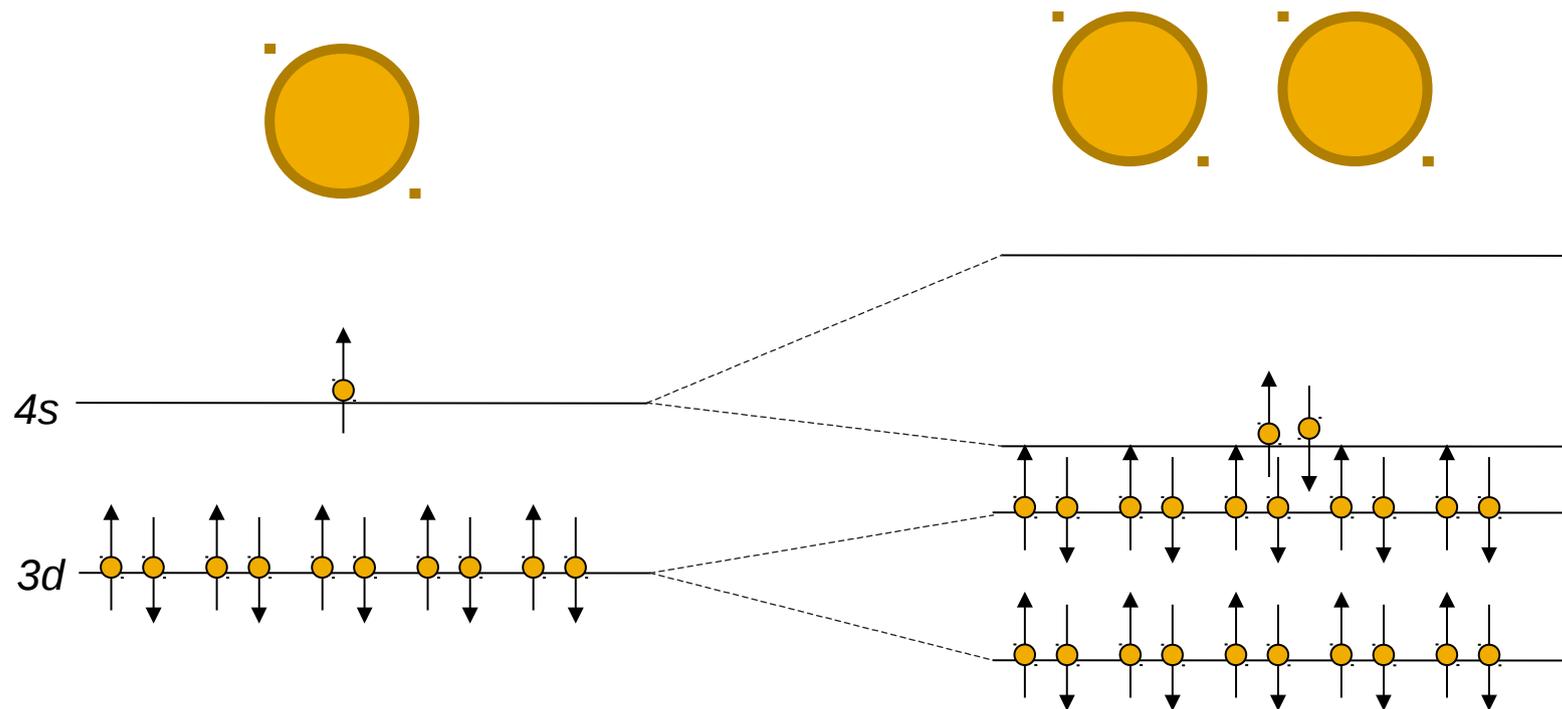
Dois átomos de Cobre isolados



Para 2 átomos distantes (r grande), o nível de Fermi é o mesmo de 1 átomo



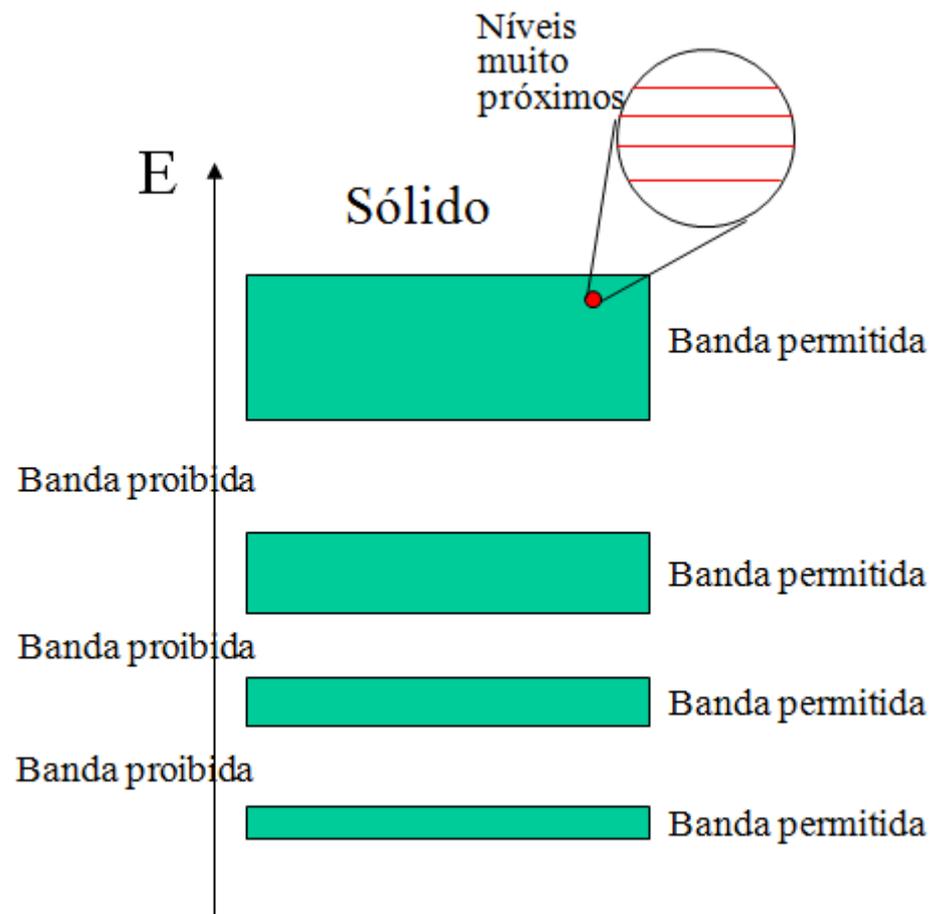
Dois átomos de Cobre Interagentes: ocorre a superposição das funções de onda





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



(i) $C < S < D$; (ii) $S < D < C$; (iii) $D < S < C$



2) Num pedaço macroscópico de um sólido cristalino, quanto vale tipicamente a separação (em eV) entre dois níveis de energia no interior de uma mesma 'banda'?

da ordem de $10^{(24)}$ eV

da ordem de alguns MeV

da ordem de alguns eV

da ordem de $10^{(-24)}$ eV

2) Com relação às bandas de energia num isolante e num metal, podemos



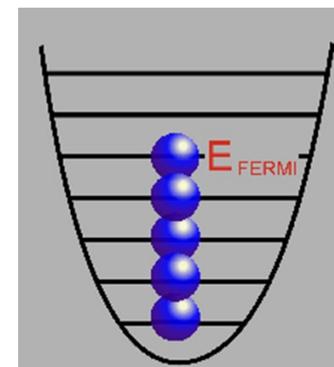
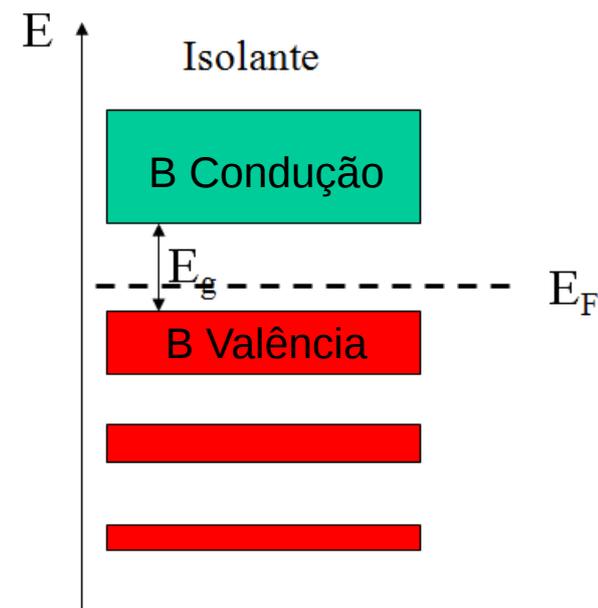


Isolantes

- **Sistema isolante:** ao aplicar uma diferença de potencial, não há corrente elétrica apreciável.

Para existir corrente, a E^c dos e^- deve aumentar...

- 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

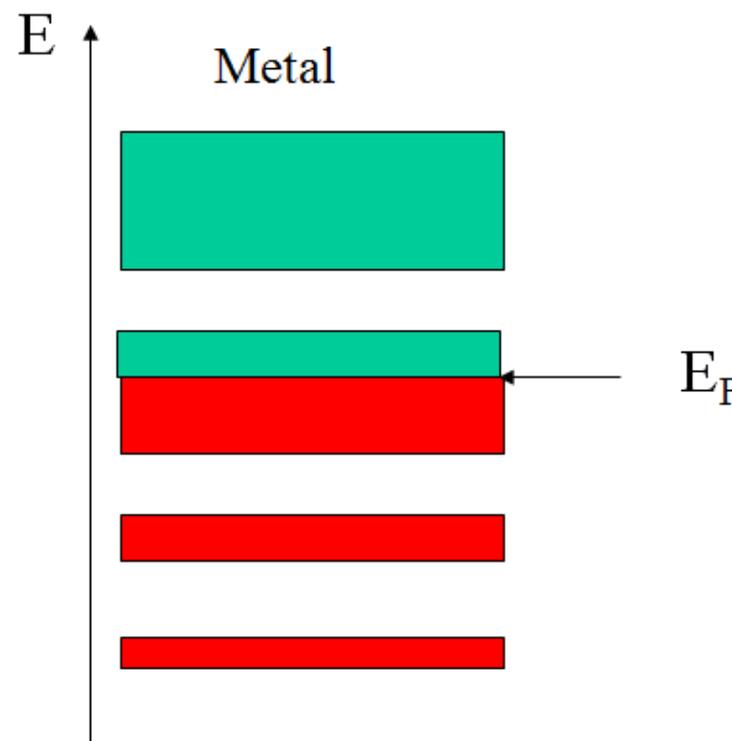


Férmions



Os 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 = $N_A m_a$



- 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: 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

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

$$n \sim 8,5 \times 10^{28} / \text{m}^3$$

bate bem com valor experimental...



Exemplo Resolvido

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

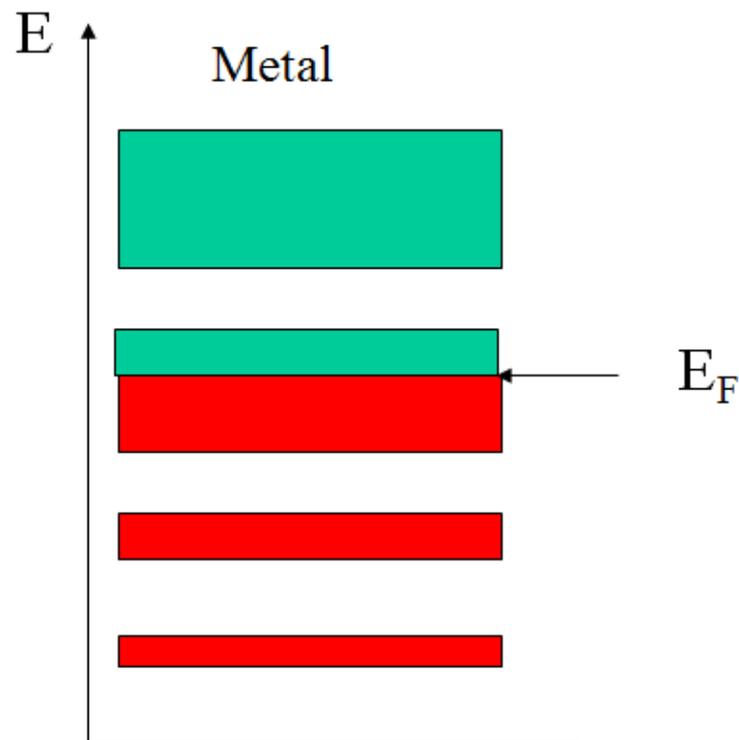
Aula 2



Lembrando...

“Os Metais são condutores”

- 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**)

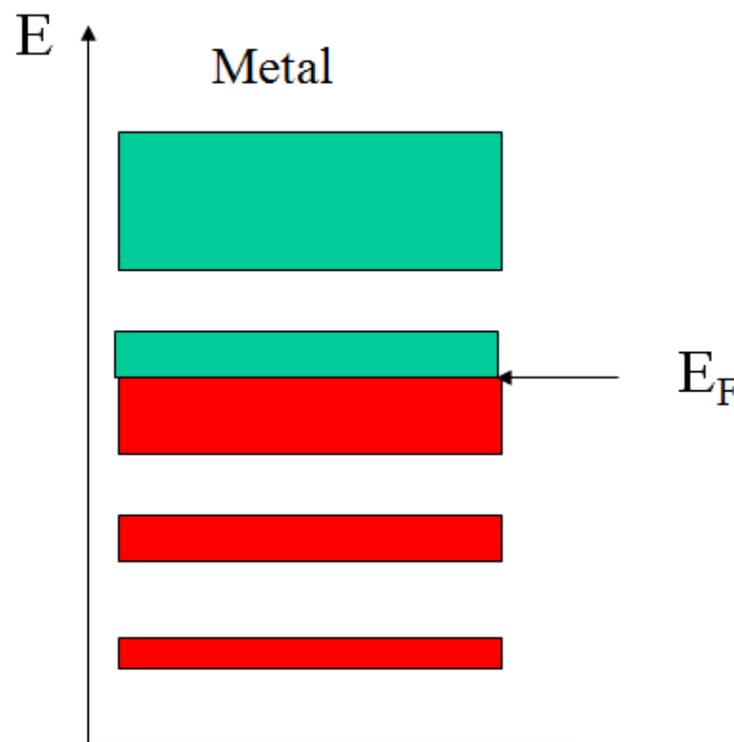




Lembrando...

“Os Metais são condutores”

- 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**)



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.



Densidade de Estados

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

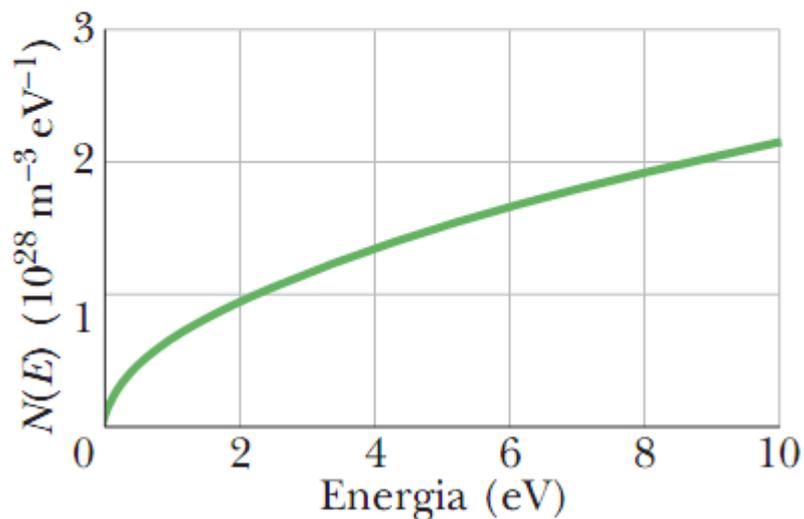


Figura 41-6 A função densidade de estados $N(E)$, definida como o número de níveis de energia disponíveis para os elétrons por unidade de energia e por unidade de volume, plotada em função da energia. A função densidade de estados expressa apenas o número de estados disponíveis; esses estados podem estar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

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

$m =$ massa do e^-

Densidade de Estados

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

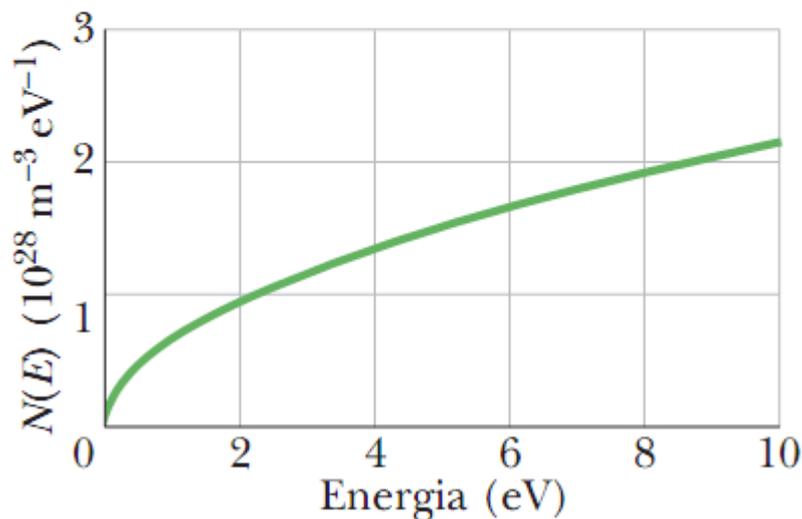


Figura 41-6 A função densidade de estados $N(E)$, definida como o número de níveis de energia disponíveis para os elétrons por unidade de energia e por unidade de volume, plotada em função da energia. A função densidade de estados expressa apenas o número de estados disponíveis; esses estados podem estar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

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

$m =$ massa do e^-



Metais: cálculo 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

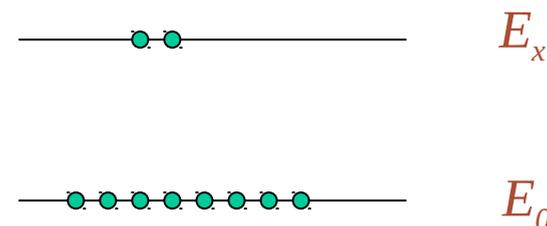
* → fundo da banda de valência.



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

Metais: probabilidade para energias

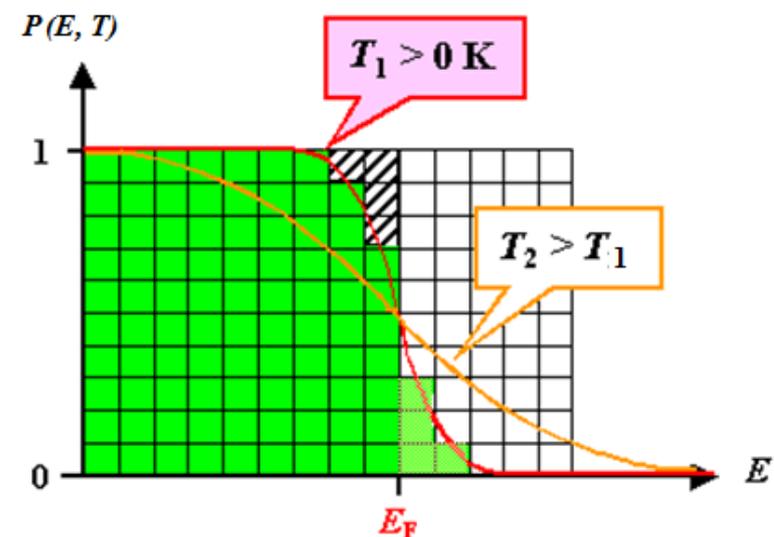
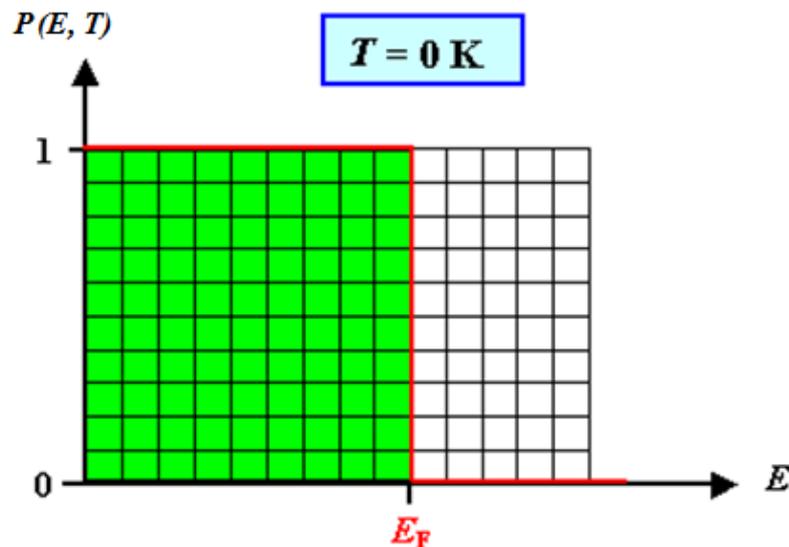
■ Probabilidade de Ocupação:
$$P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

■ 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 $E_F - E \gg kT$: $P(E) \simeq 1 - e^{-\frac{E_F-E}{kT}}$



Metais: efeito de $T > 0$

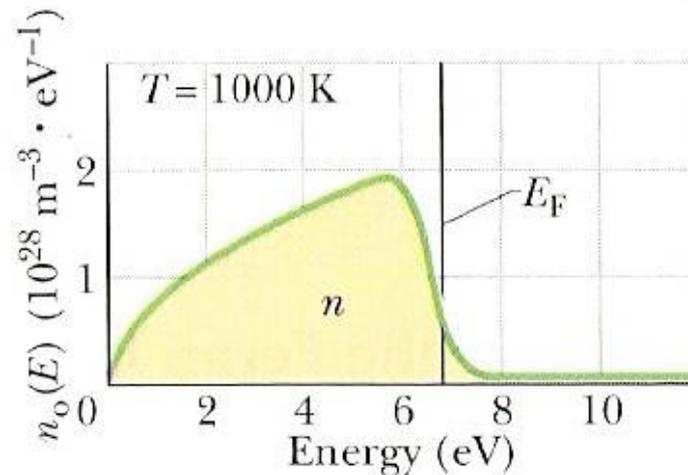
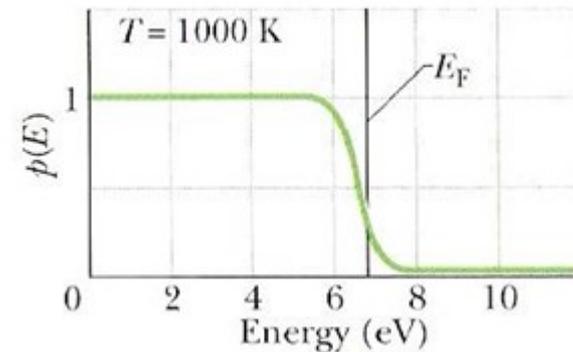
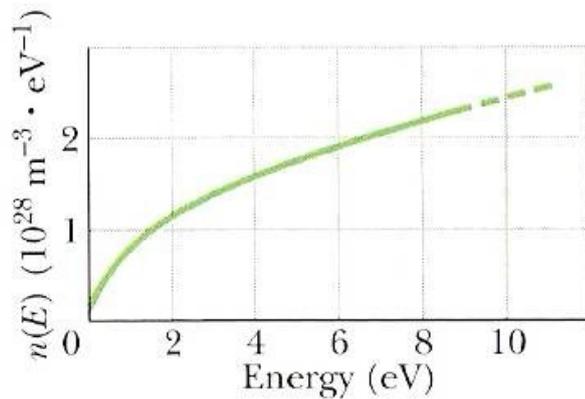
O que ocorre com a distribuição de elétrons em um metal quando T aumenta?

- 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?

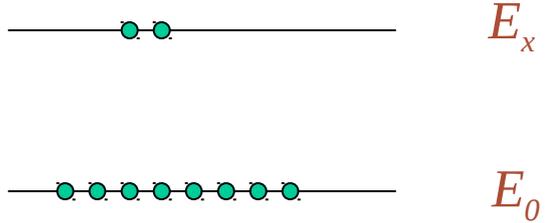
$$N_0(E) = N(E) P(E)$$



(c)

→ somente os elétrons com energias próximas a E_F foram afetados...

Isolantes: efeito de temperatura $T > 0$

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


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

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

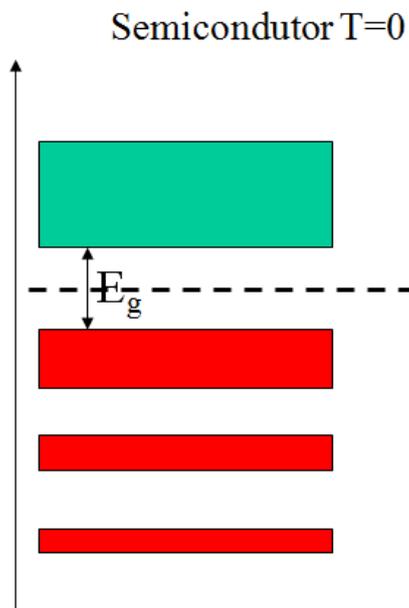
Exemplo: no diamante, $E_x - E_0 = E_g = 5,5 \text{ eV}$. Assim, a $T = 300\text{K}$:

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

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

Semicondutores

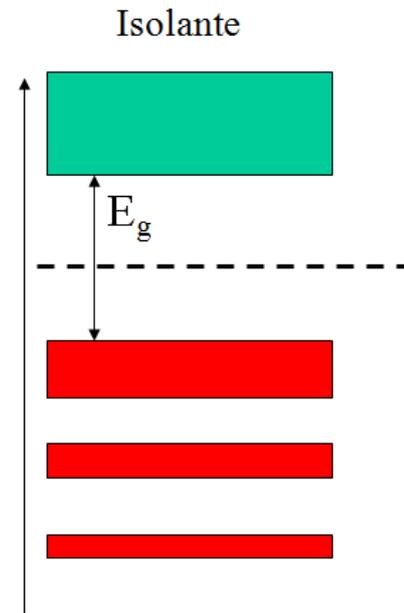
- À 1ª vista são como isolantes: para $T = 0$:
- A última banda **ocupada** está **totalmente ocupada (banda de valência)**
- A primeira banda **desocupada (banda de condução)** está separada por uma energia E_g (*band gap*).



Diferença Fundamental:

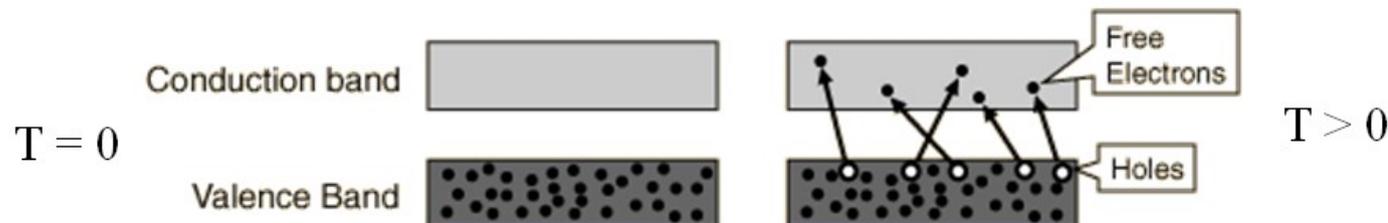
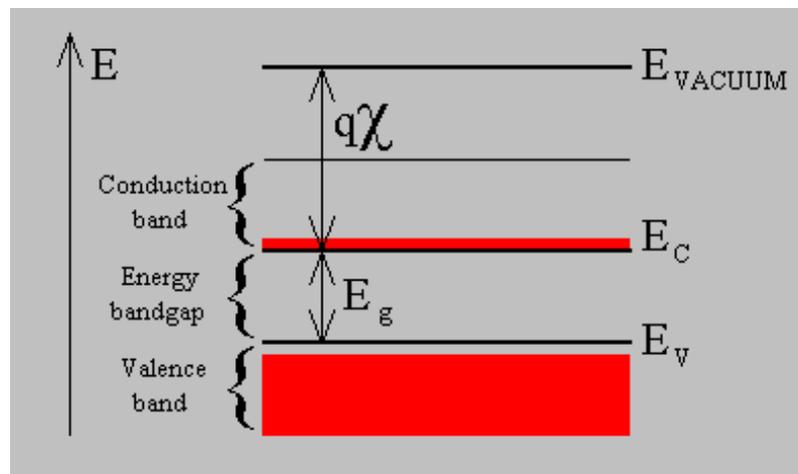
num semicondutor típico, $E_g \lesssim 2\text{eV}$, bem menor que num isolante (onde E_g vale alguns eV)

Parece pouco, mas isso faz uma diferença colossal!



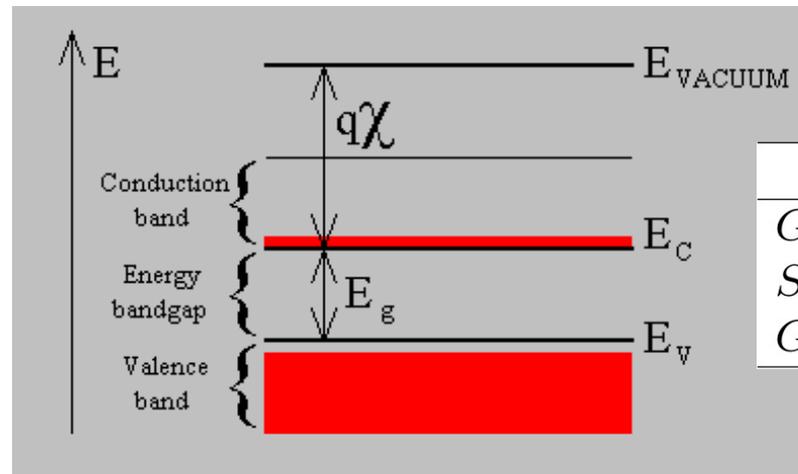
Semicondutores

- 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**!

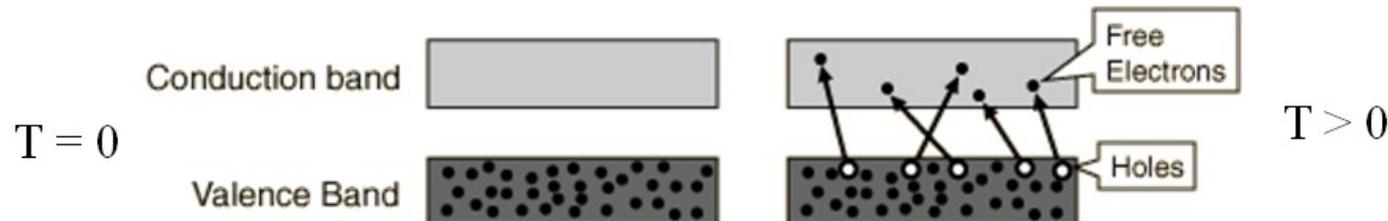


Semicondutores

- 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 semiconductor.
- 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**

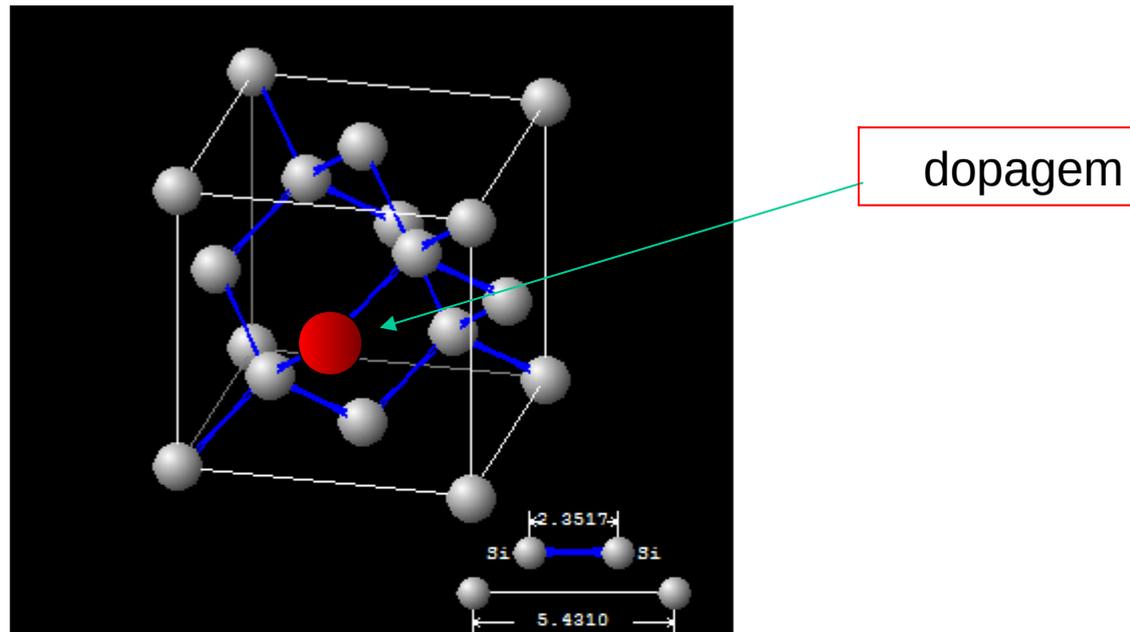
	Metal	Semicondutor	Isolante
Exemplo	Cobre	Silício	Diamante
Resistividade ρ	$\sim 10^{-8} \Omega.m$	$\sim 10^3 \Omega.m$	$\sim 10^{16} \Omega.m$
<i>Band gap</i> E_g	n/a	pequeno ($E_g \sim 0 - 2 \text{ eV}$)	grande ($E_g \gtrsim 2 \text{ eV}$)
Coeficiente de temperatura da resistividade α	positivo	negativo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

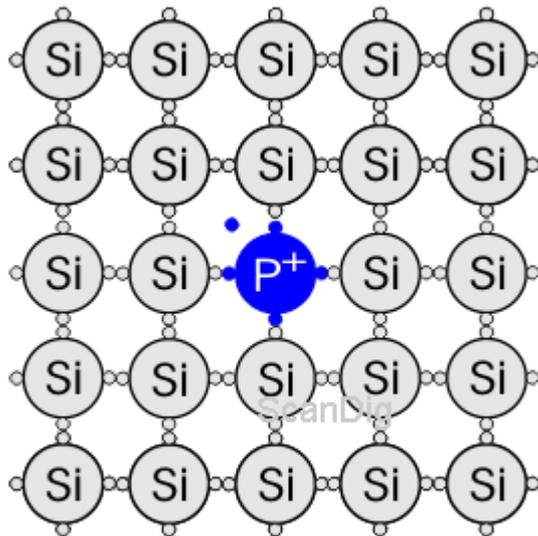


Si

Dopagens tipo *n* e tipo *p*

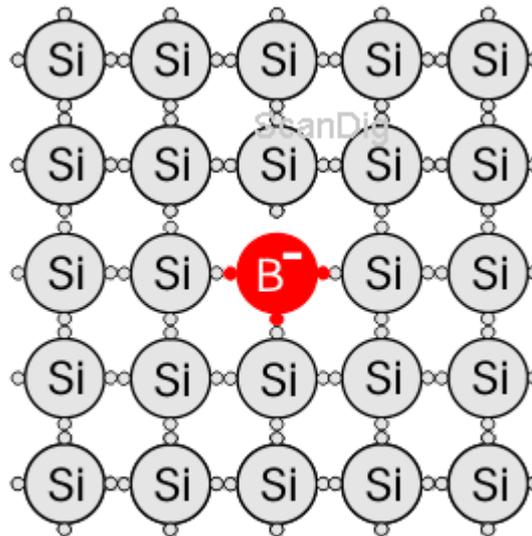
2 tipos de dopagem

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



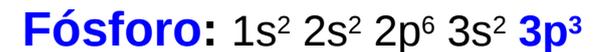
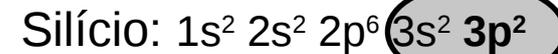
impureza
'doadora' de
elétrons

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

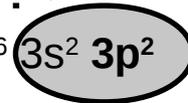


impureza
'aceitadora' de
elétrons

Exemplo:



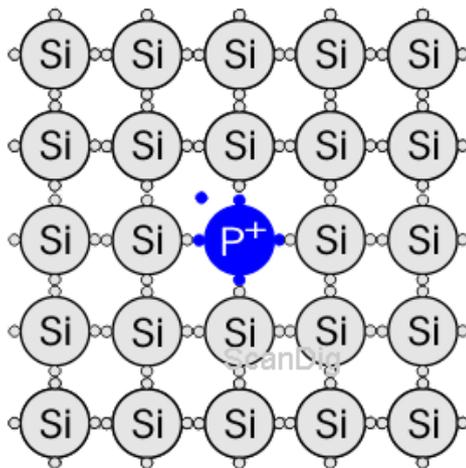
elétrons
de
valência



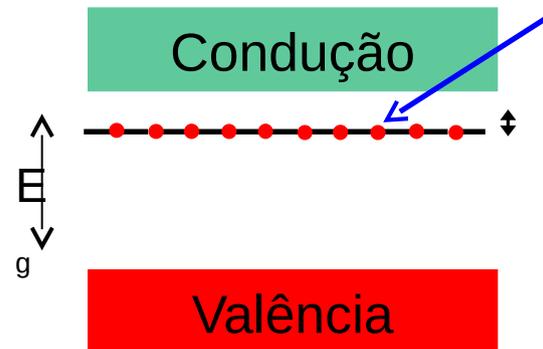
Semicondutores tipo *n*

doadores para Si

	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
2						He
3	B	C	N	O	F	Ne
4	Al	Si	P	S	Cl	Ar
5	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
6	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
7	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
8						
9						
10						
11						
12						



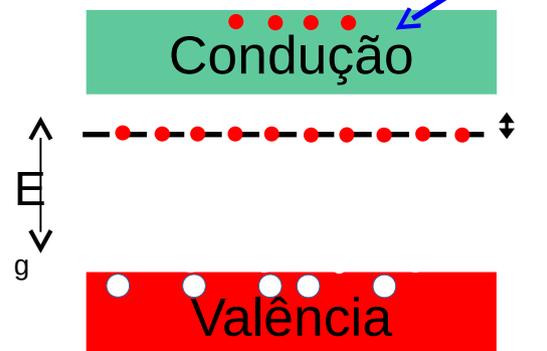
$T = 0K$



$$E_d \ll E_g$$

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

$T > 0K$



$$E_d \ll E_g$$

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

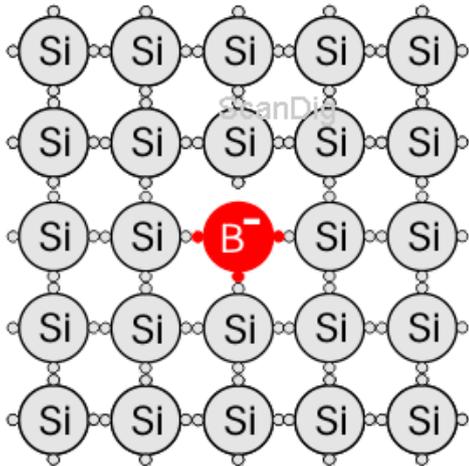
Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem

Imensa maioria dos portadores são elétrons !

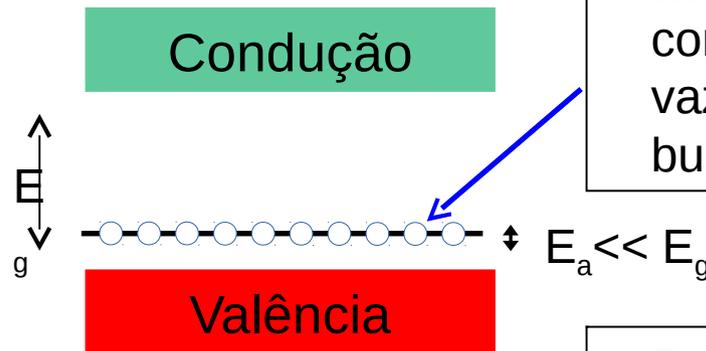
Semicondutores tipo p

aceitadores para Si

						0
						2
	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
	B	C	N	O	F	Ne
	13	14	15	16	17	18
IIIA	Al	Si	P	S	Cl	Ar
8	31	32	33	34	35	36
	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
	49	50	51	52	53	54
CA	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
8	81	82	83	84	85	86
	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At
	112	113	114	115	116	117
	112	113	114	115	116	117

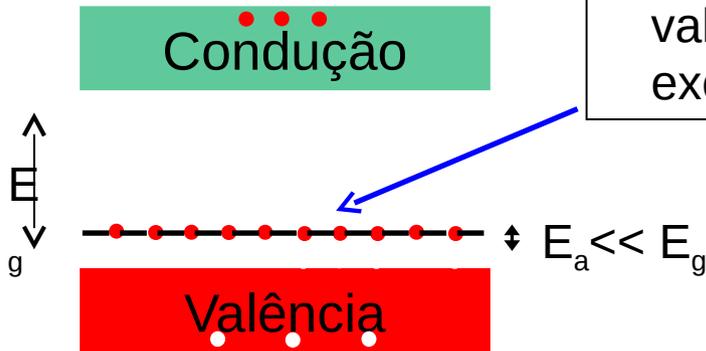


T = 0K



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

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 !

Silício dopado com Fósforo ou Alumínio

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

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).

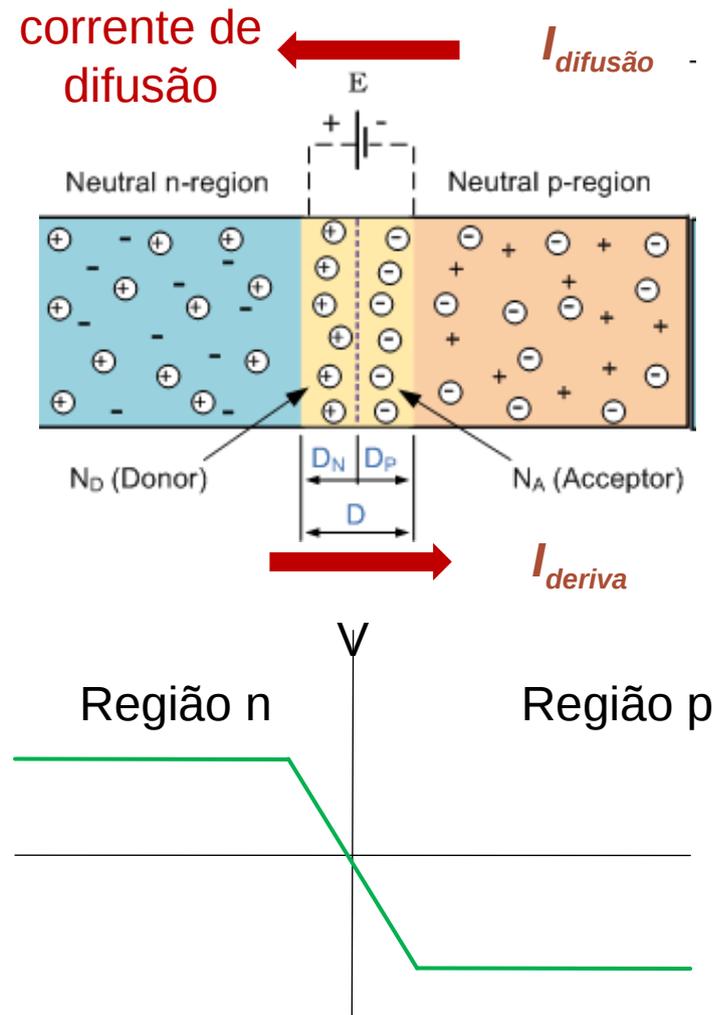
- **Ao mesmo tempo, buracos em excesso da região p (direita) tendem a se difundir para a região n (esquerda).**

- 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).

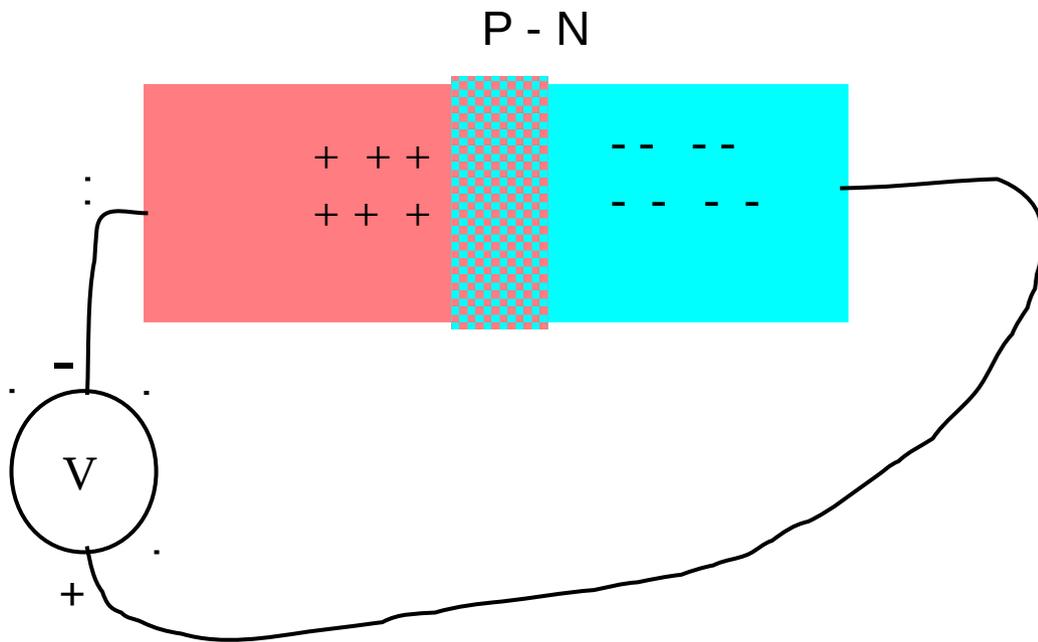
Resultado: Diferença de potencial

- 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

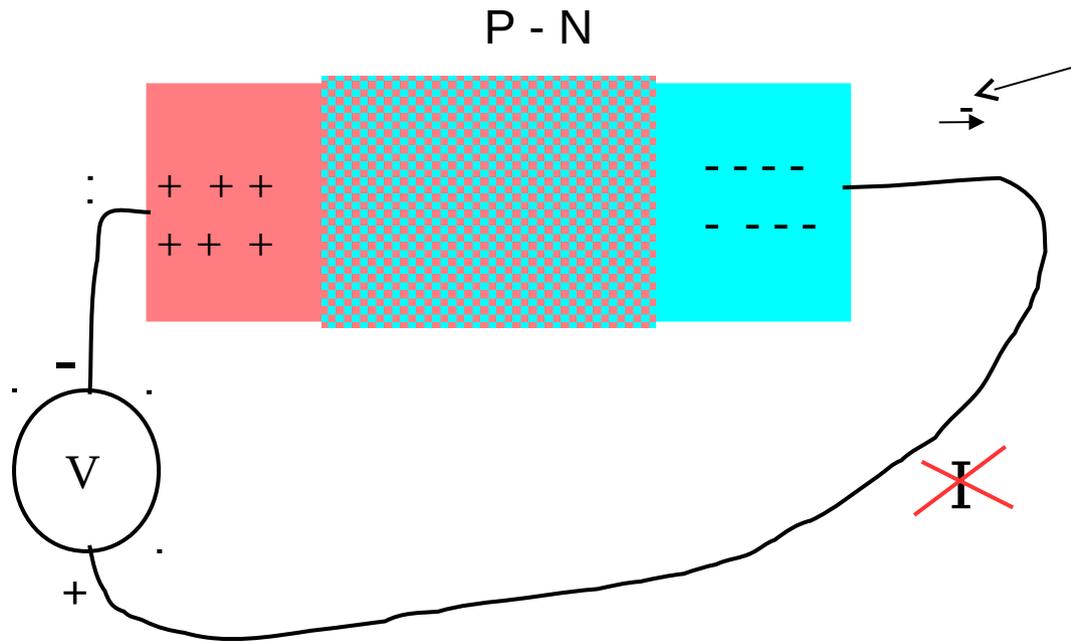


obs: aqui +, - representam as cargas móveis (cargas fixas não estão mostradas)

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

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

Junção P-N com ddp aplicada

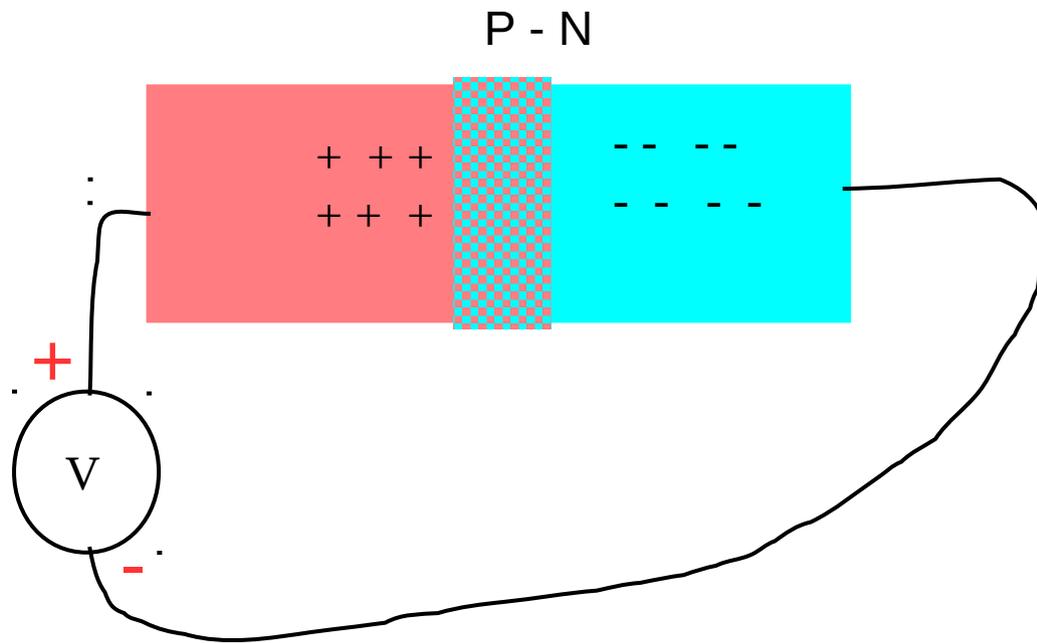


*Tanto as cargas positivas (+) como as cargas negativas (-) são puxados para longe da junção. A Zona de Depleção (ZD) aumenta!
Corrente não pode fluir!*

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

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

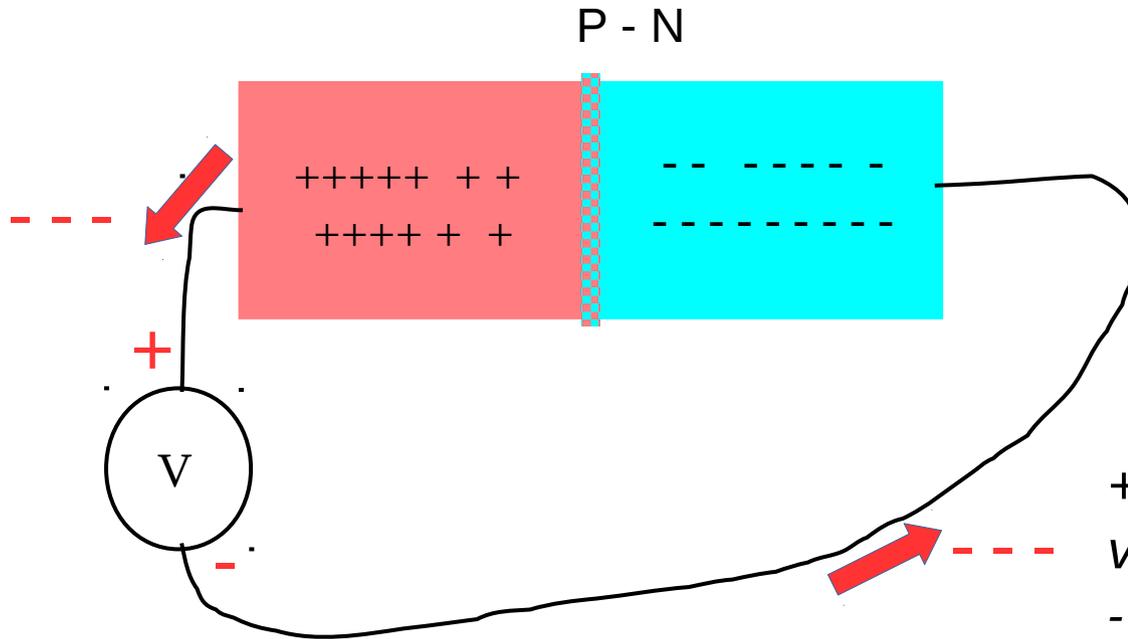
Junção P-N com ddp aplicada



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 é sufic. grande em um sentido, há corrente.
- V no sentido oposto: não há corrente!

Diodo: via de mão-única p/ corrente!.

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

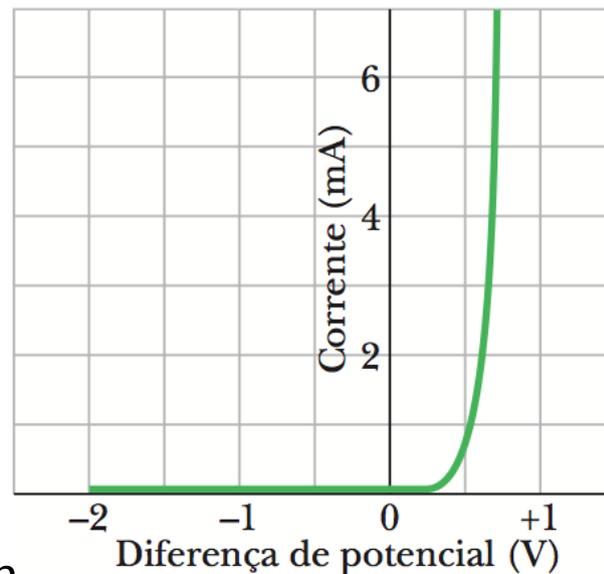
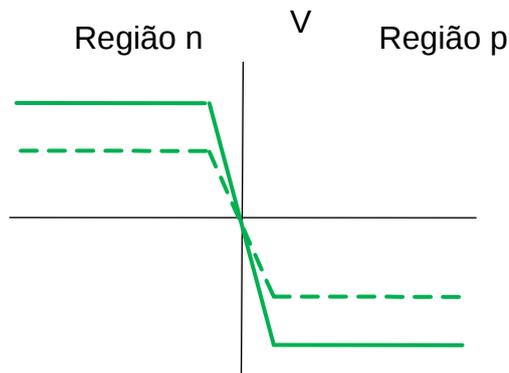
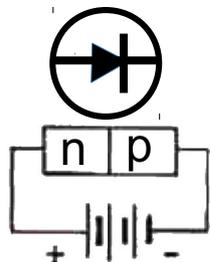


O diodo retificador

Aplice uma tensão adicional em uma junção p-n:

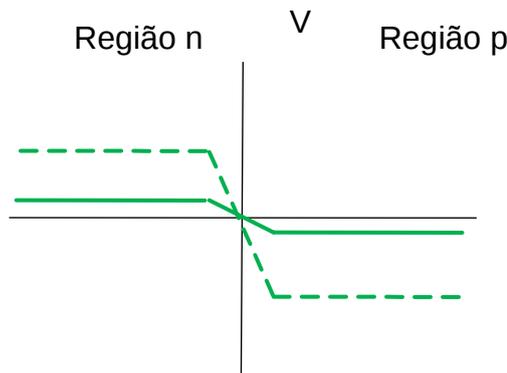
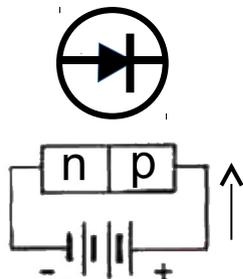
- ‘Polarização inversa’: tensão positiva aplicada do lado *n*

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

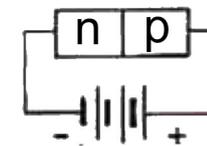
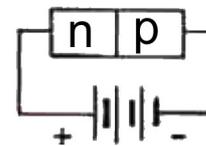


- ‘Polarização direta’: tensão positiva aplicada do lado *p*

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



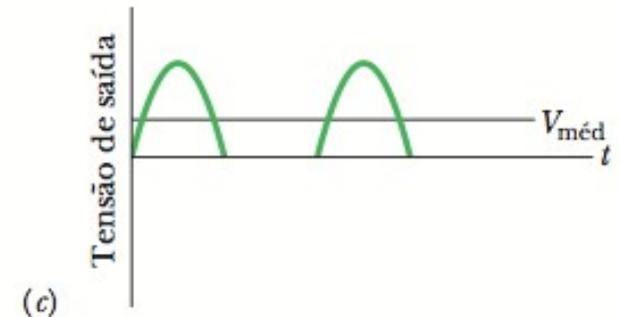
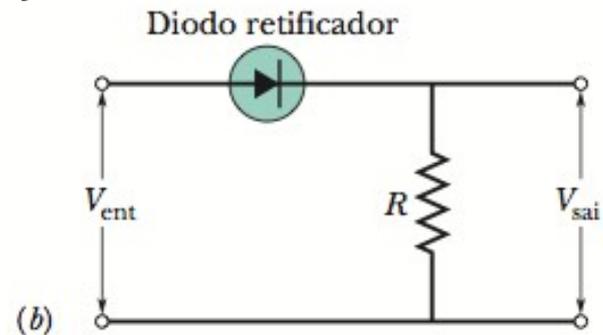
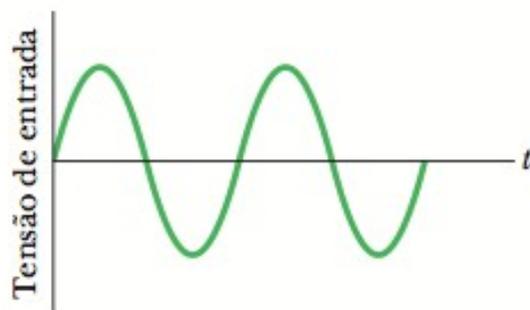
← Polarização inversa | Polarização direta →



O diodo retificador

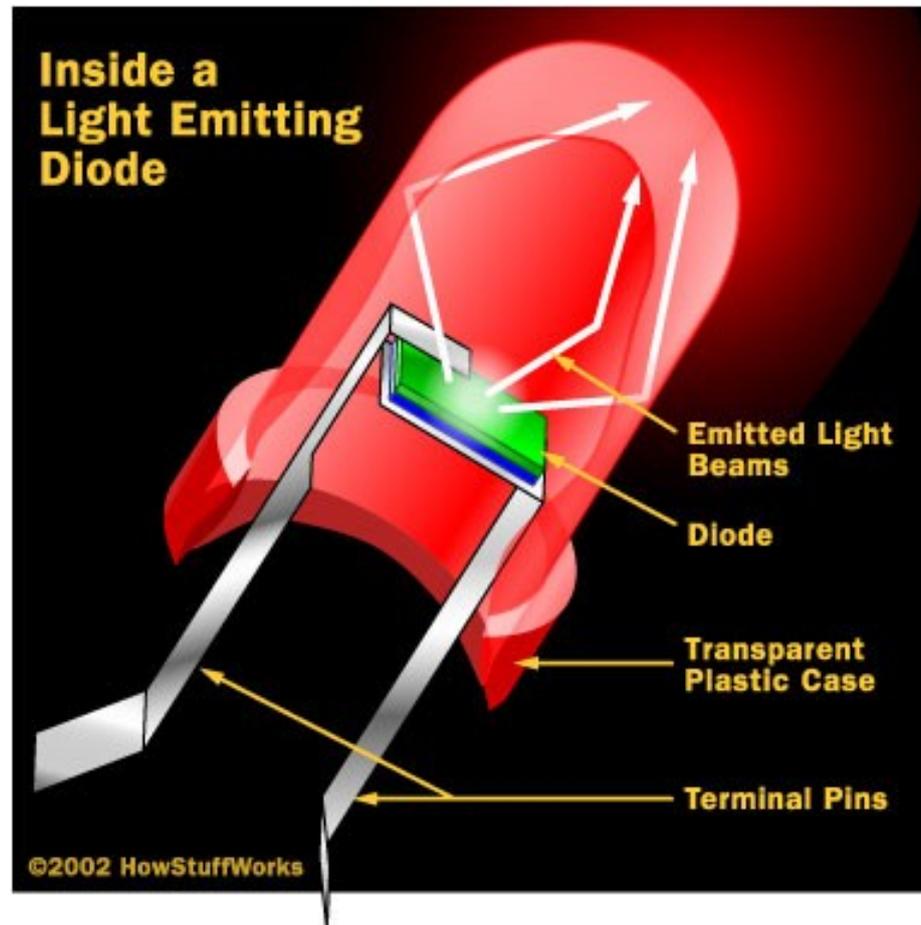
Aplicação simples em eletrônica: 'retificação'

- 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

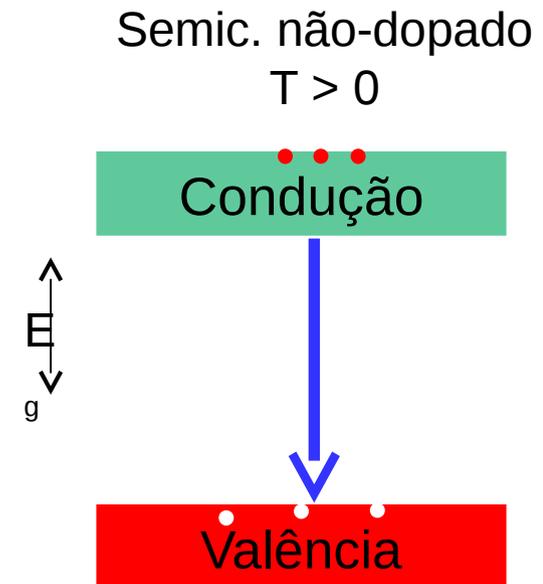
O Diodo Emissor de Luz (LED)



O 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

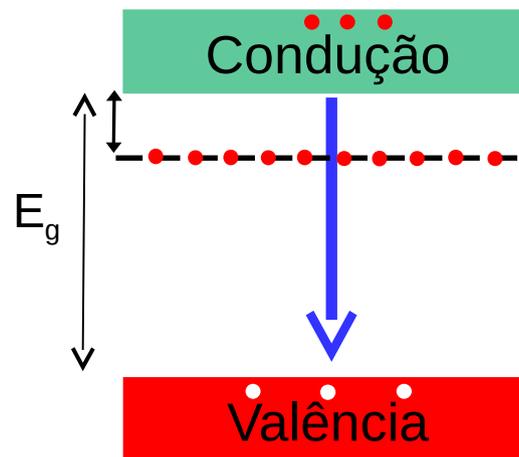
Dependendo do material, a energia E_g que é liberada pode ser emitida na forma de um fóton. Ex: AsGa. (Em outros casos, pode ser perdida para vibrações da rede de íons, i.e, 'esquentar' o material).



Problema: muito poucos pares elétron-buraco \rightarrow muito poucos fótons emitidos!

O Diodo Emissor de Luz (LED)

Semicondutor dopado tipo n
($T > 0$)

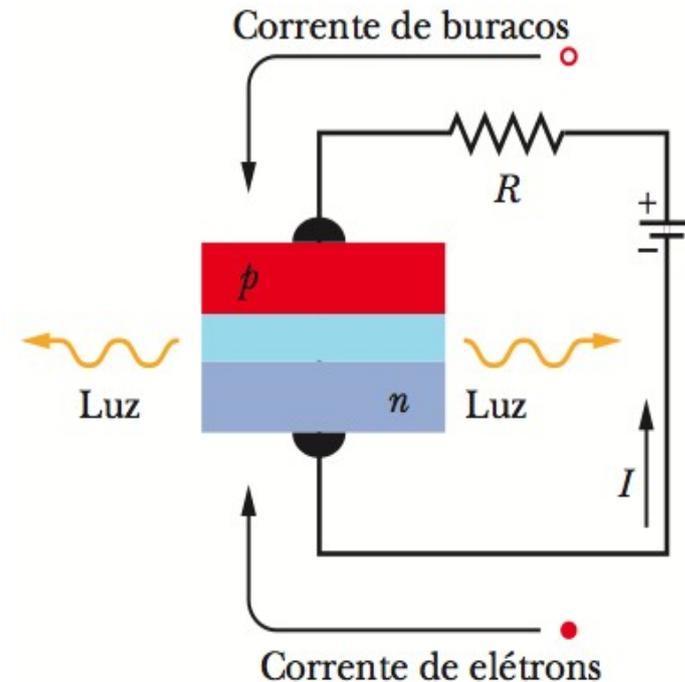


Dopagem apenas não resolve!

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

O 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).

GaAs (n)

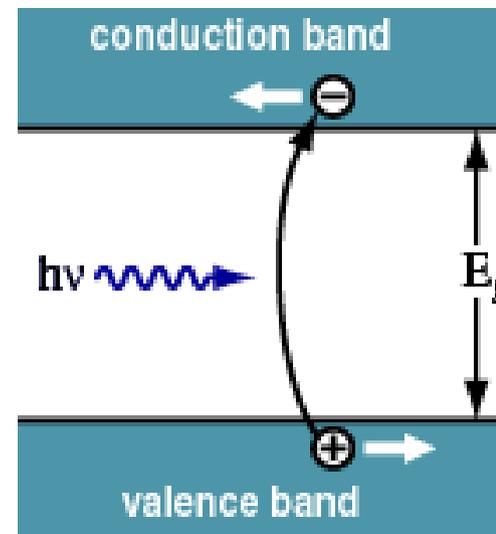
GaAsP (p)

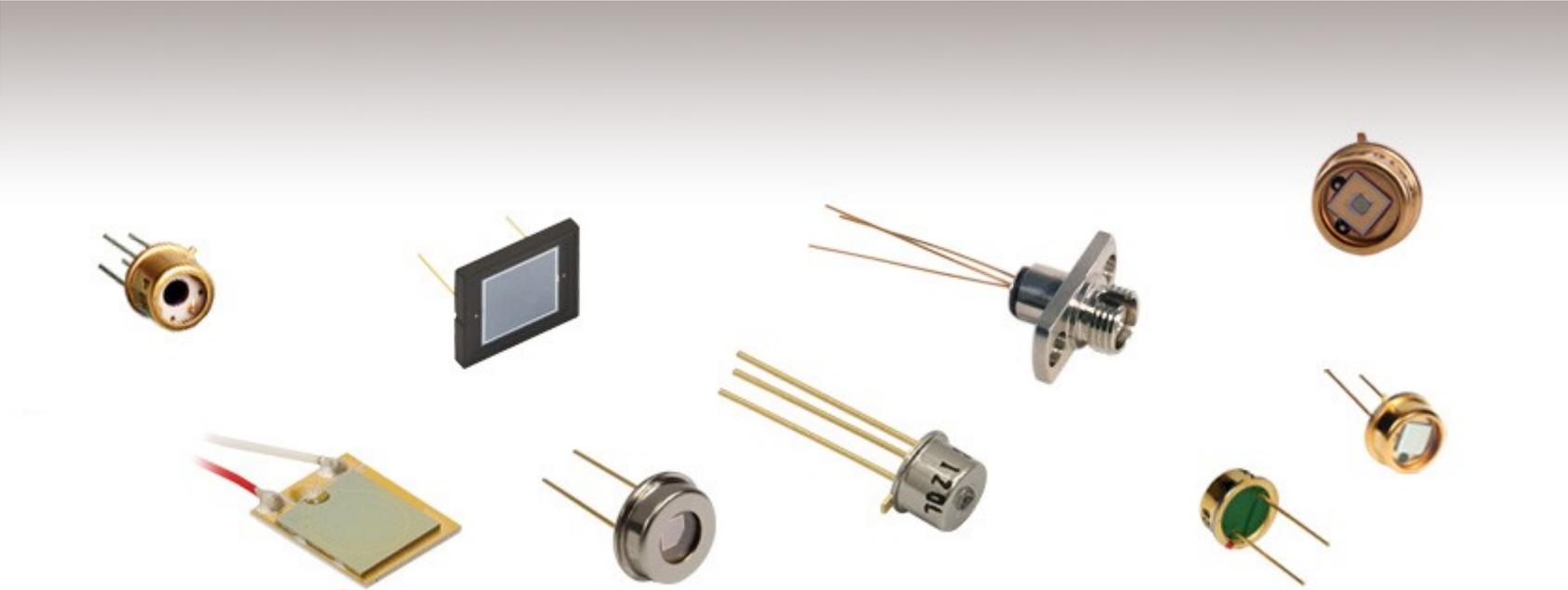
Fotodiodos



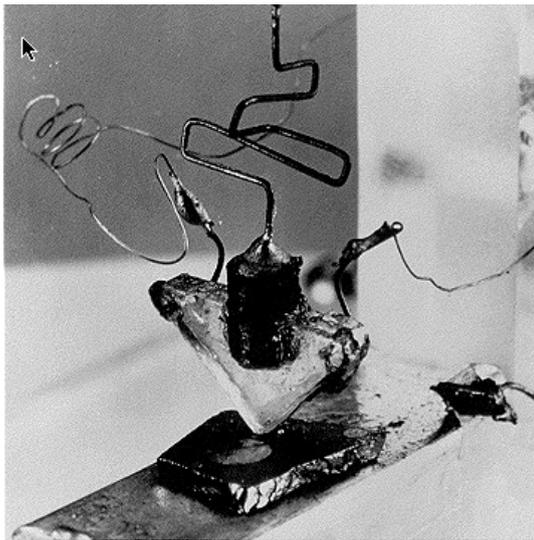
Fotodiodo: processo inverso do LED

- 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.





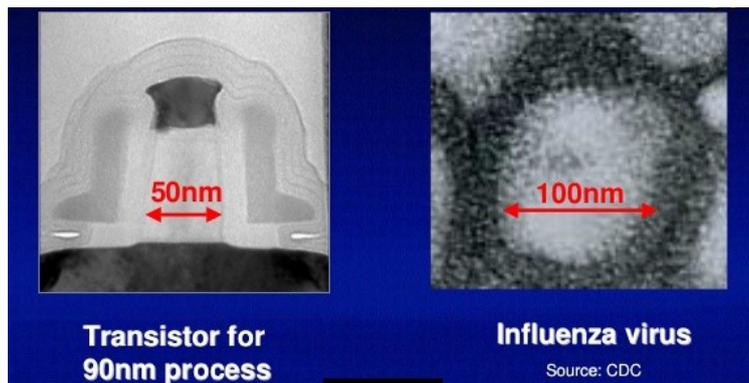
O transistor



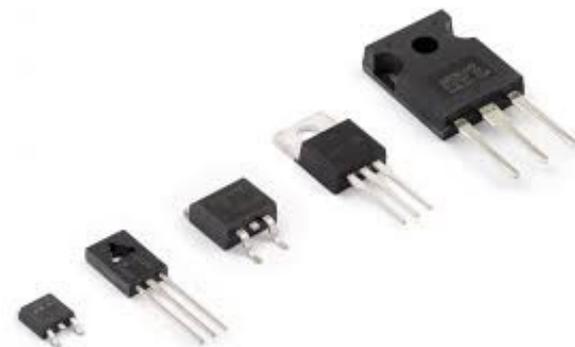
1º transistor (Bell Labs, EUA, 1947)



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



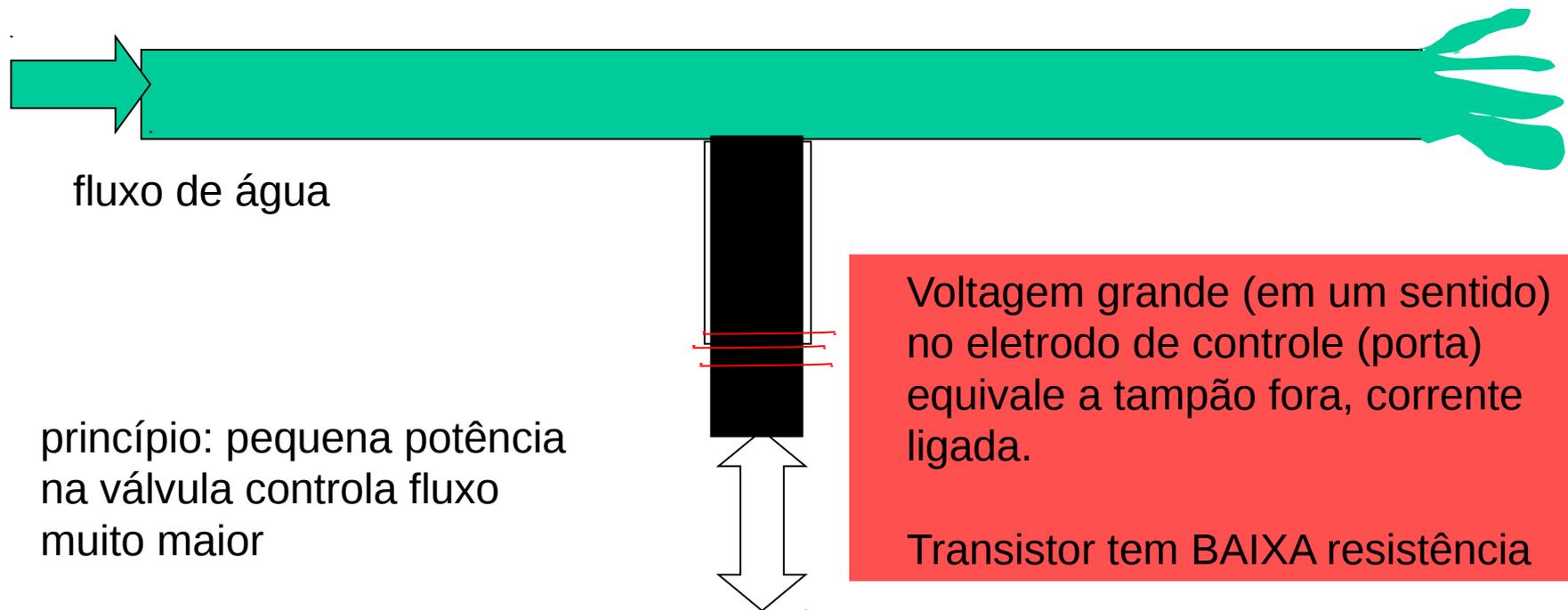
nanotransistor da Intel em 2003 (!)



transistores comerciais

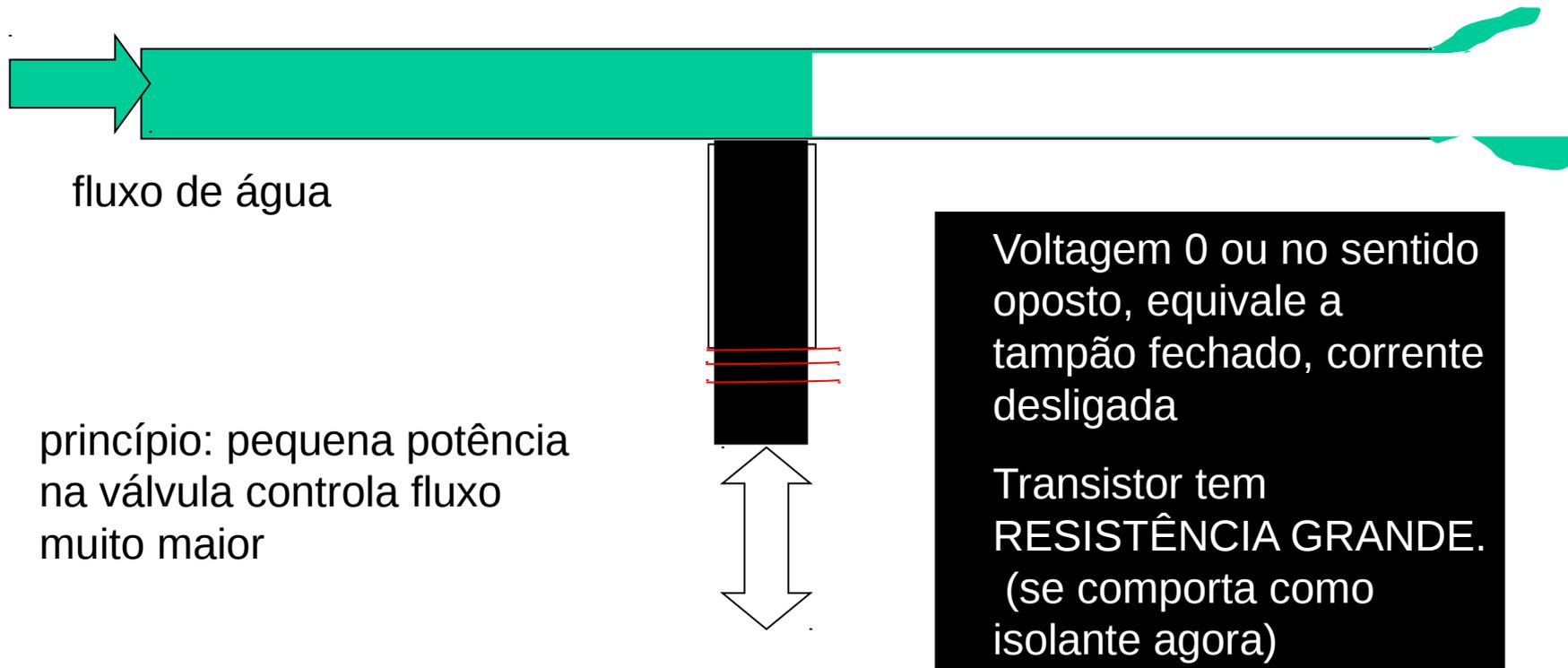
Transistor: Ideia básica

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

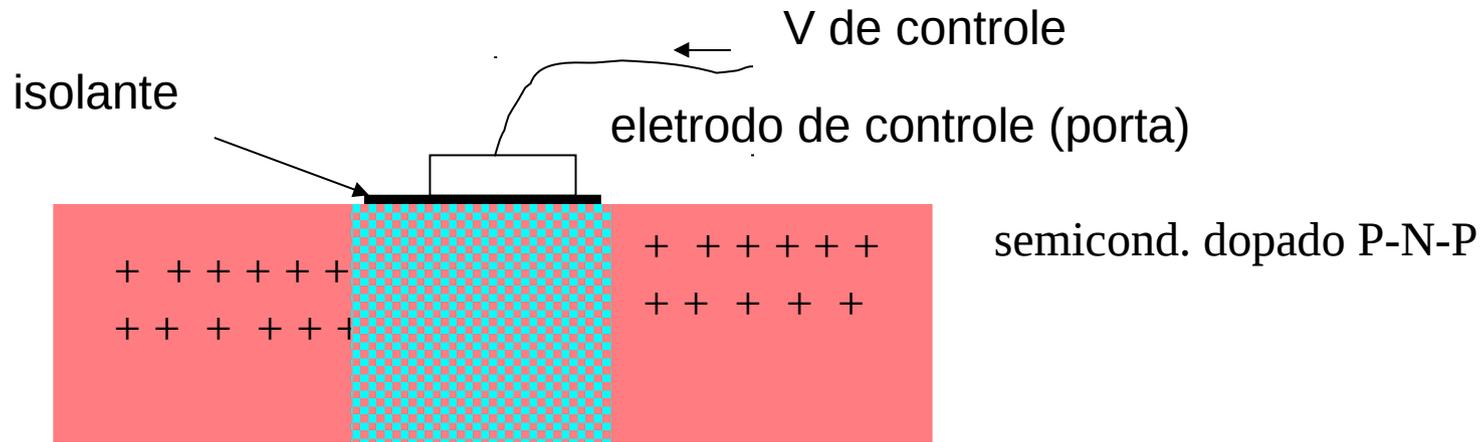


Transistor: Ideia básica

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



Transistor FET – princípio básico

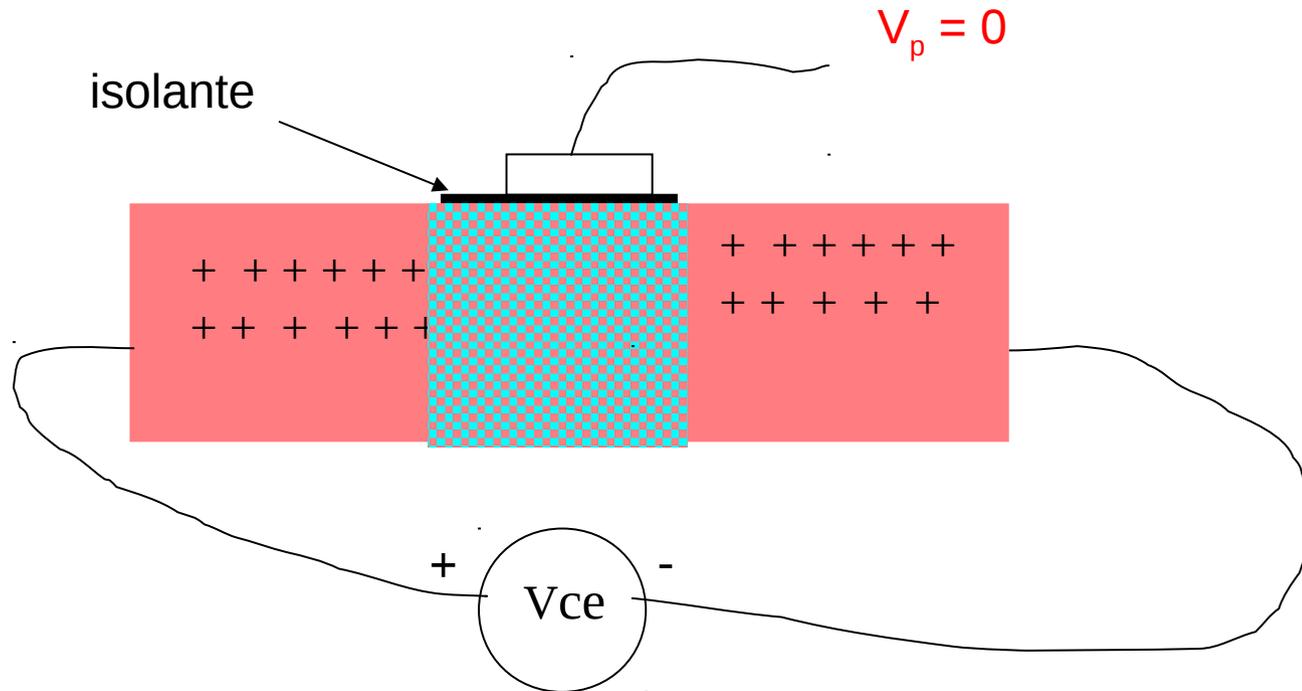


usam duas junções NP (“Sanduíche”)
mais um eletrodo “porta” para controlar a ZD.

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

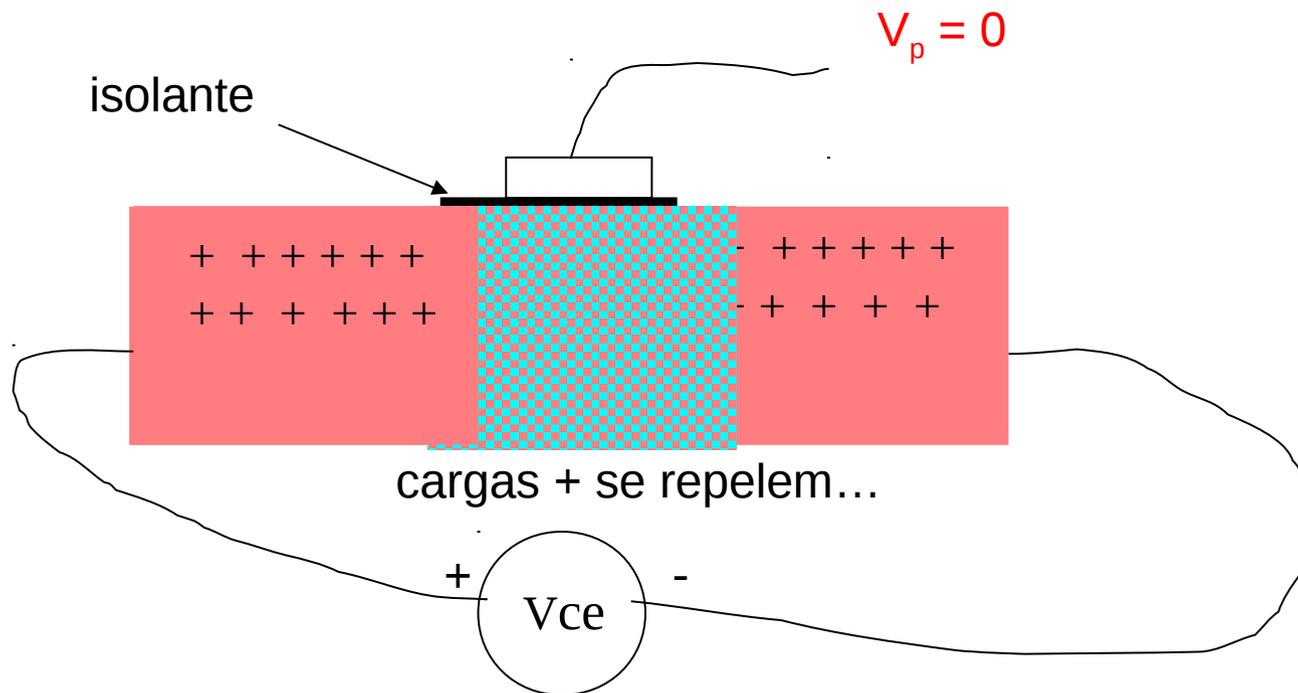
Transistor FET – princípio básico



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

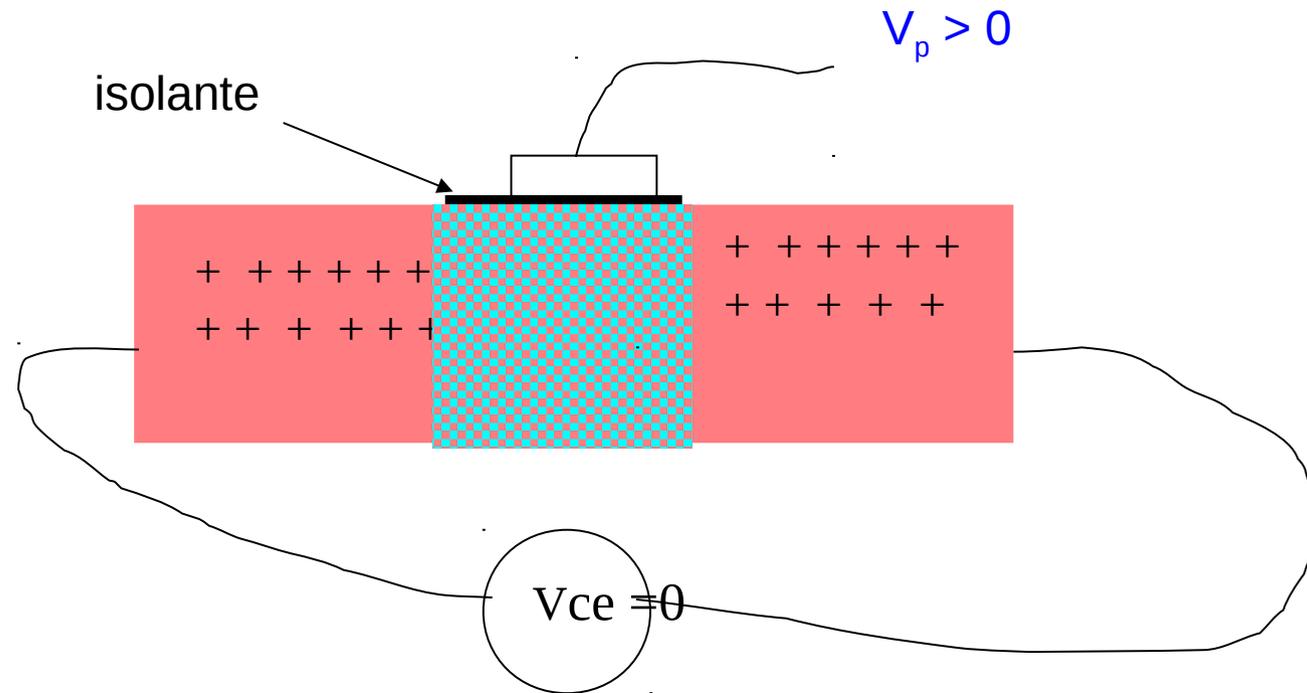


O que acontece se ligamos $V_{CE} > 0$?

- 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

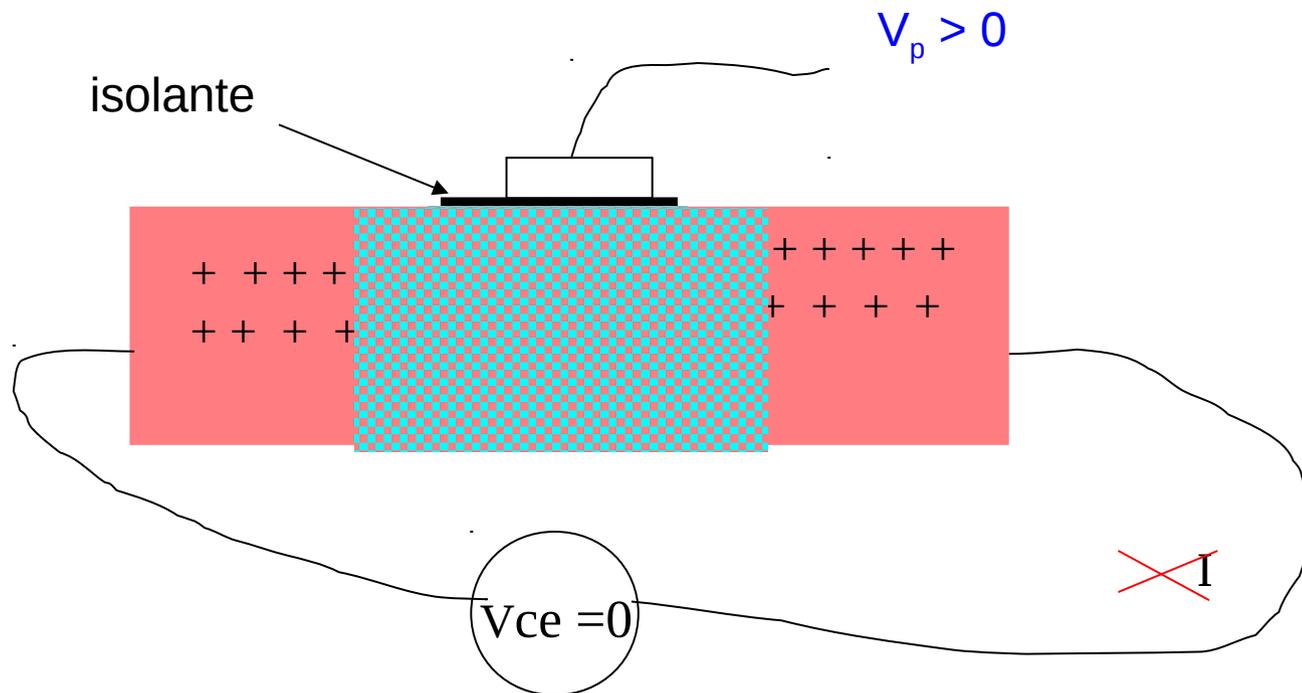
Transistor FET – princípio básico



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

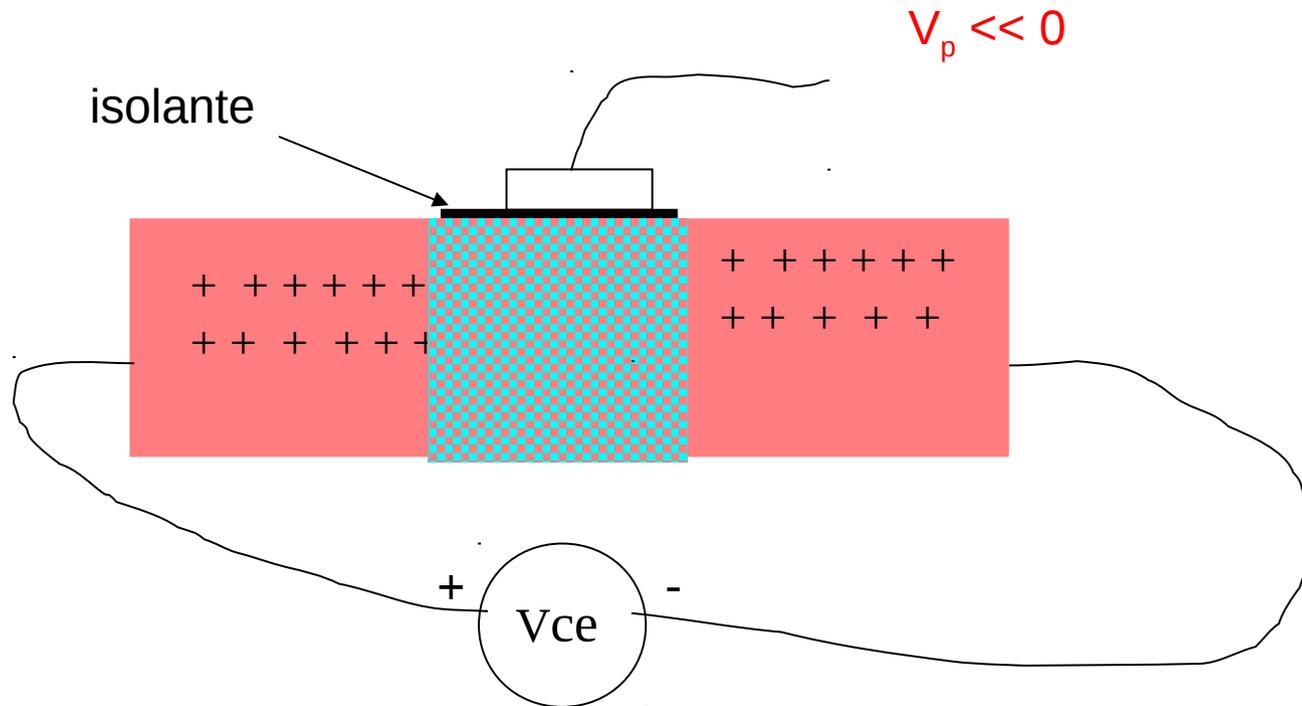
Transistor FET – princípio básico



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



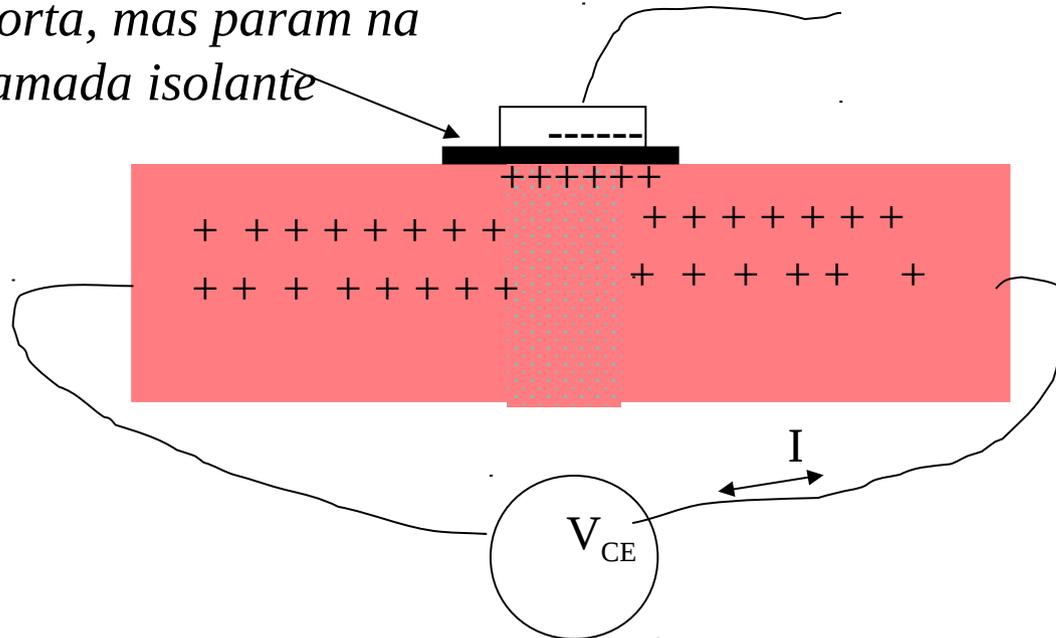
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- 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})

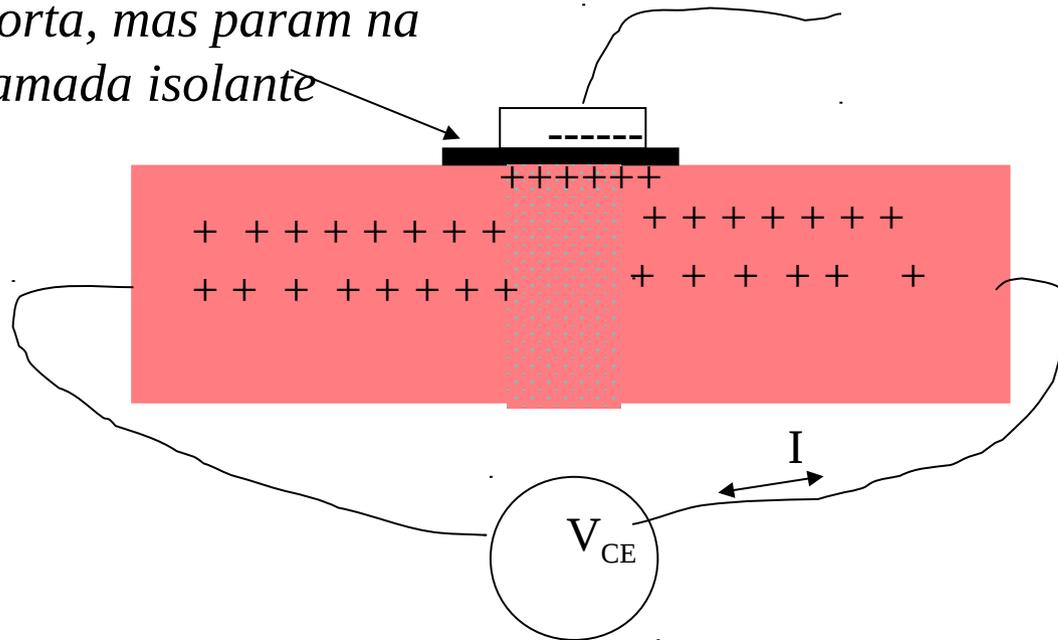
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- 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 bidirecional!!

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

Fim..

