



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

Sala: A2-15 (IF, andar 1P)

Email: carlooseduardosouza@id.uff.br

Site do curso: http://cursos.if.uff.br/fisicaIV_XXI_0216/



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Capítulo 42

Condução de Eletricidade nos Sólidos



Condução de Eletricidade nos Sólidos

**Qual o mecanismo que descreve a
condução da eletricidade nos sólidos???**



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Qual o mecanismo que descreve a condução da eletricidade nos sólidos???

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!!!)



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Contextualizando...

A condução da eletricidade nos sólidos é uma parte da chamada Física da Matéria Condensada, uma ciência que visa entender as propriedades

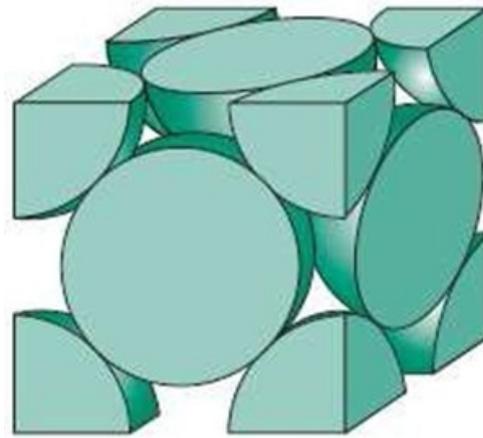
- Elétricas,
- Magnéticas,
- Ópticas e,
- Estruturais

dos materiais a partir das interações de seus constituintes microscópicos.

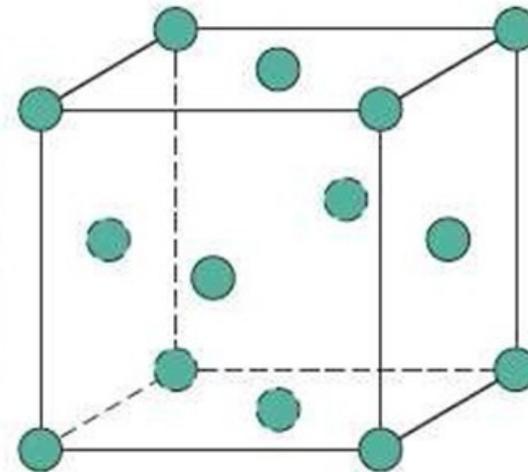


Condução de Eletricidade nos Sólidos

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



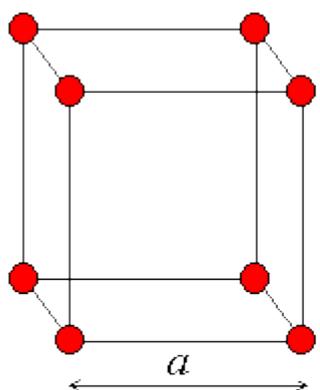
(a)



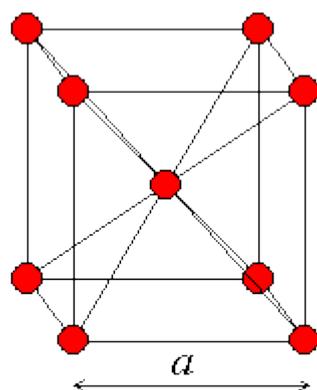
(b)



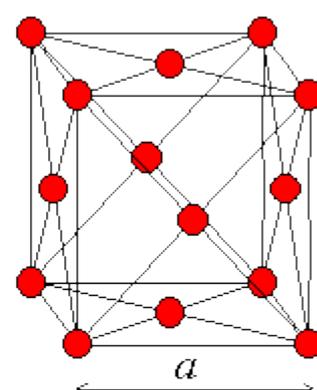
Condução de Eletricidade nos Sólidos



(a)



(b)

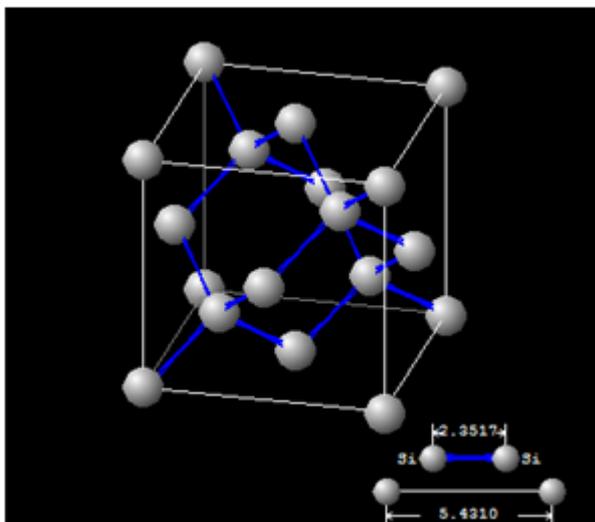


(c)



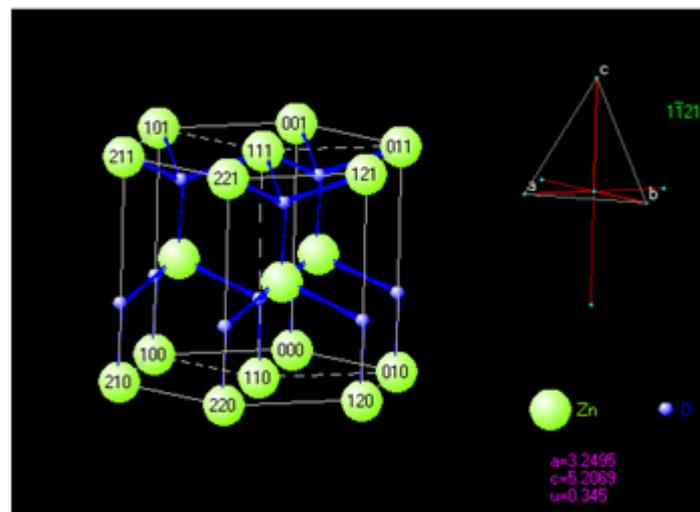
Condução de Eletricidade nos Sólidos

Rede do diamante



Si, Ge, diamante

Rede hexagonal



ZnO, GaN, AlN

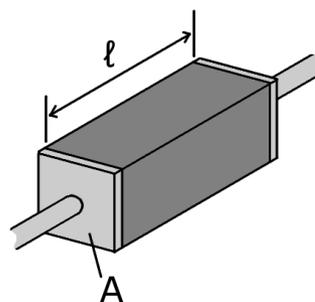


Condução de Eletricidade nos Sólidos

- 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

= nº de portadores de carga por unidade de volume (unid: m^{-3})



Condução de Eletricidade nos Sólidos

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

Metal, isolante, ou semicondutor

Propriedade	Unidade	Material		
		Cobre	Silício	Diamante
Tipo de condutor		Metal	Semicondutor	Isolante
Resistividade, ρ	$\Omega \cdot m$	2×10^{-8}	3×10^3	10^{16}
Coefficiente de temperatura da resistividade, α	K^{-1}	$+4 \times 10^{-3}$	-70×10^{-3}	
Concentração de portadores de carga, n	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...



Condução de Eletricidade nos Sólidos

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

Metal, isolante, ou semicondutor

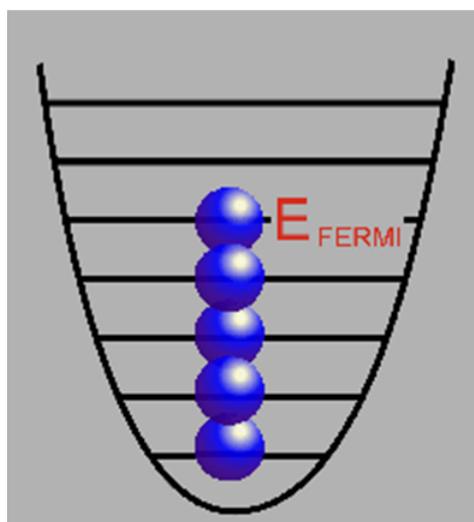
Propriedade	Unidade	Material		
		Cobre	Silício	Diamante
Tipo de condutor		Metal	Semicondutor	Isolante
Resistividade, ρ	$\Omega \cdot m$	2×10^{-8}	3×10^3	10^{16}
Coefficiente de temperatura da resistividade, α	K^{-1}	$+4 \times 10^{-3}$	-70×10^{-3}	
Concentração de portadores de carga, n	m^{-3}	9×10^{28}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

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



Condução de Eletricidade nos Sólidos

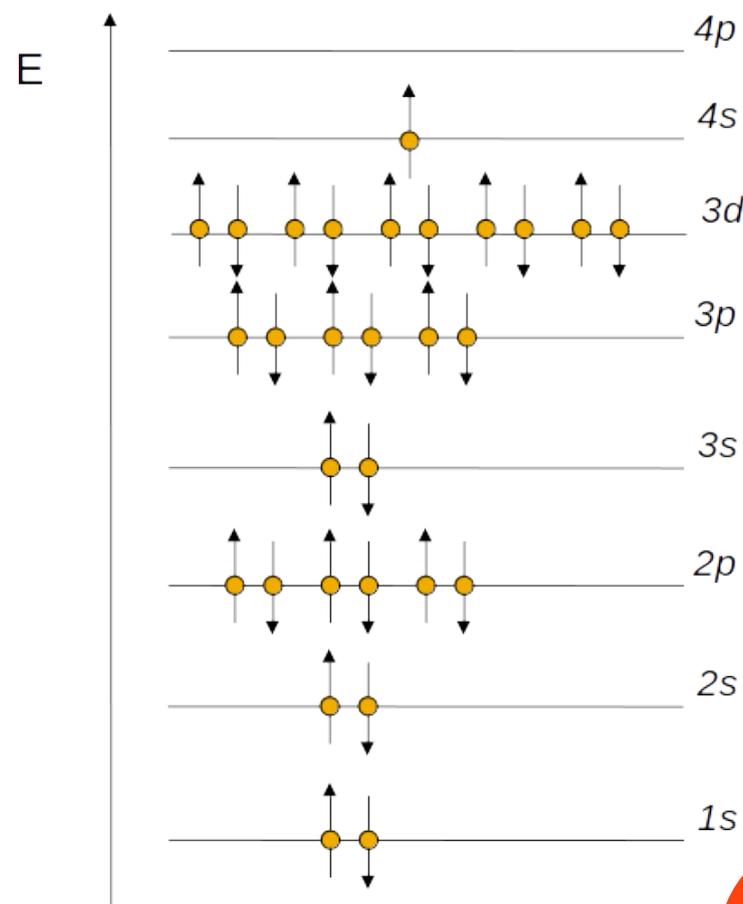
Antes de respondermos a essa pergunta
diretamente vejamos o caso do Um átomo de Cobre



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

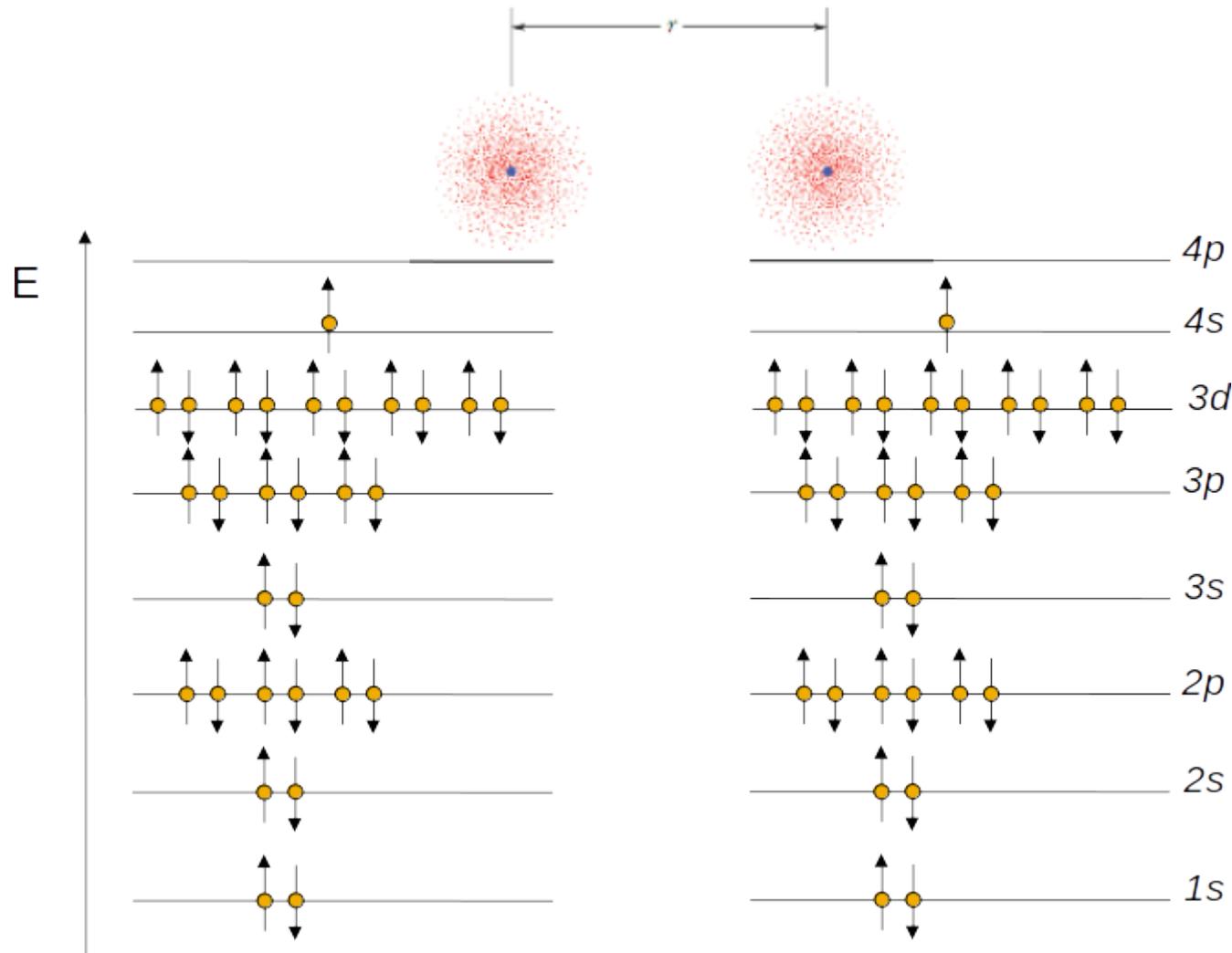
(ex: Cobre $Z = 29$)





Condução de Eletricidade nos Sólidos

Dois átomos de Cobre isolados...

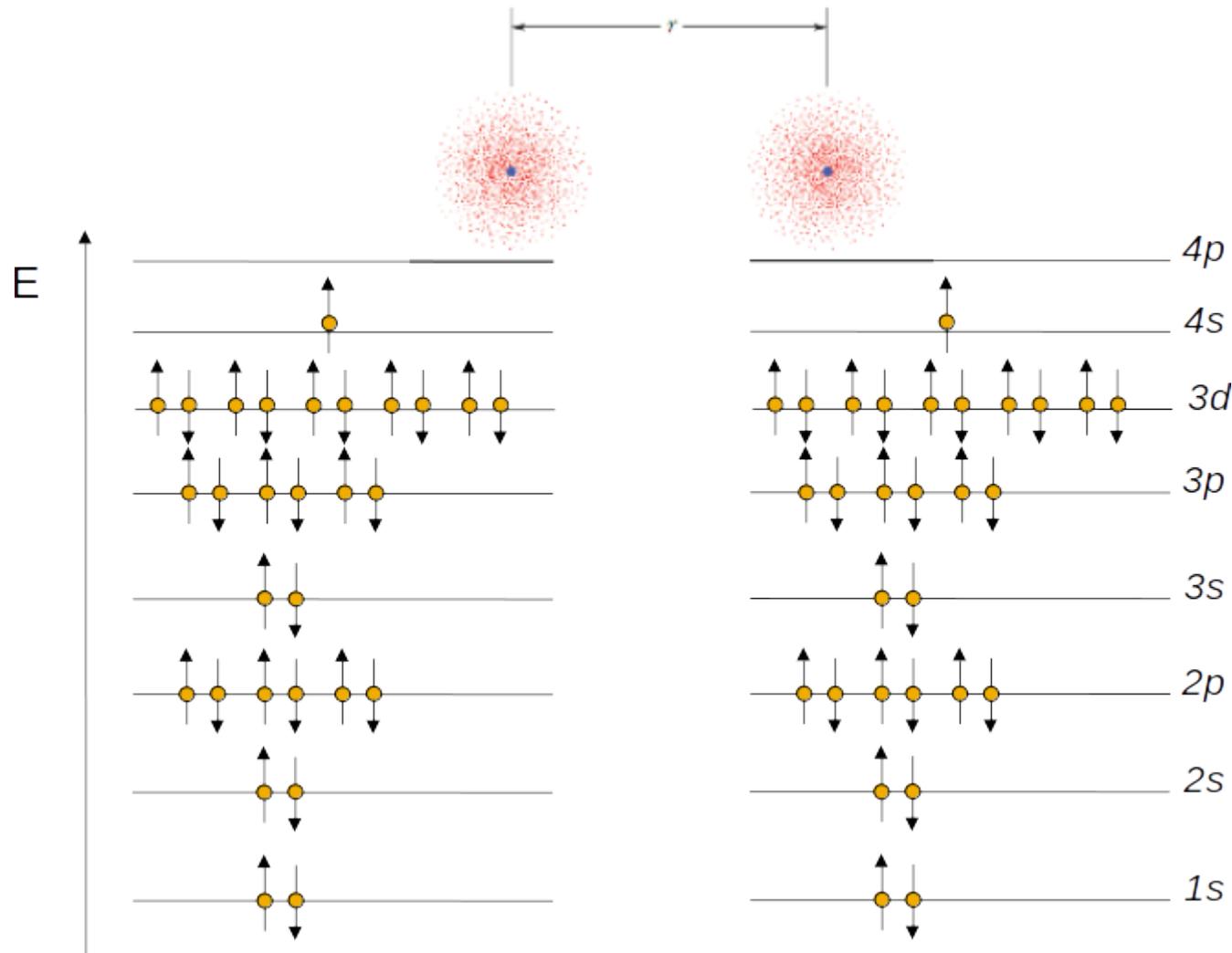


Para 2 átomos distantes (r grande), o nível de Fermi é o mesmo de 1 átomo.



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Dois átomos de Cobre isolados...

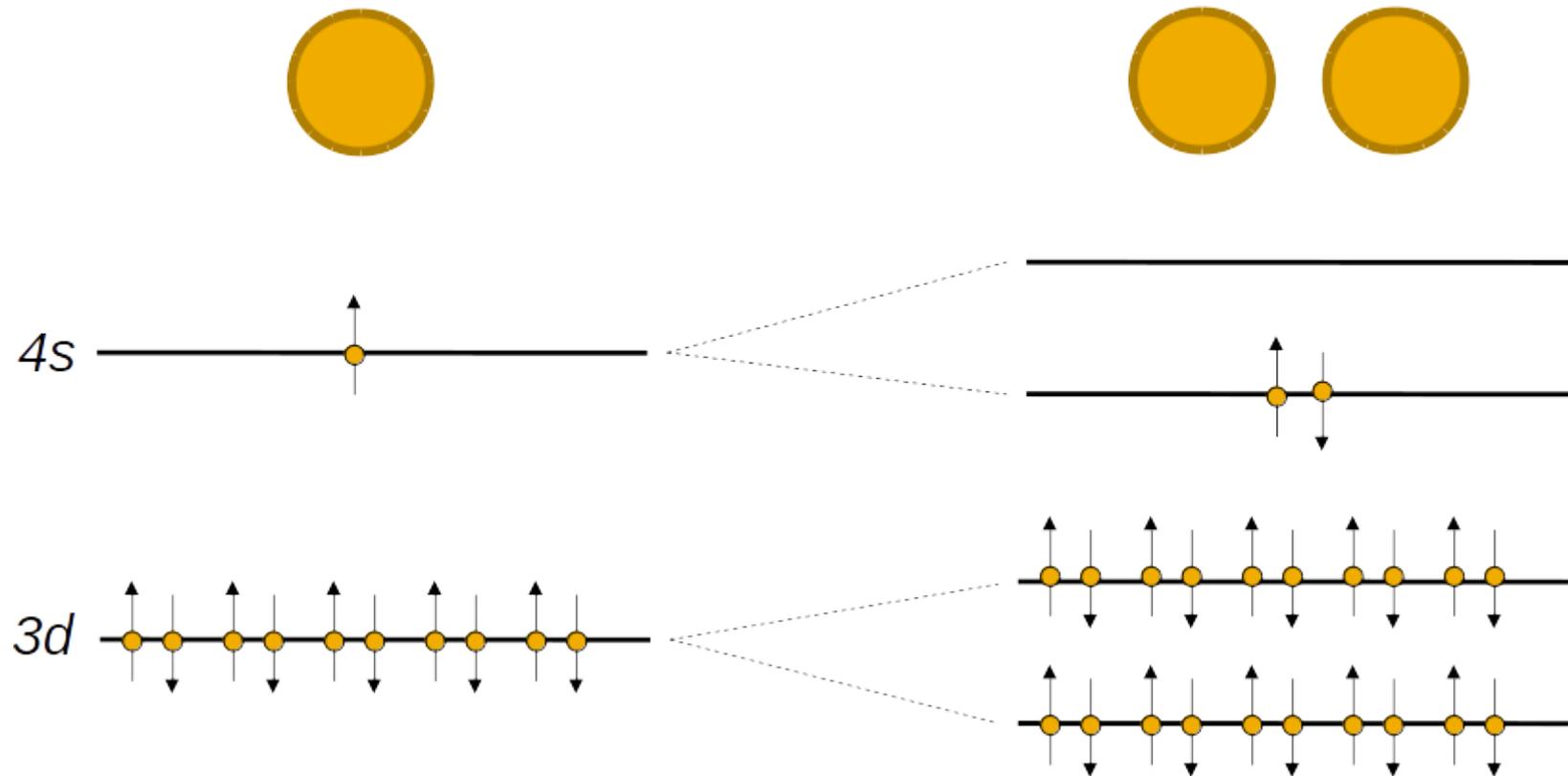


Para 2 átomos distantes (r grande), o nível de Fermi é o mesmo de 1 átomo.



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Dois átomos de Cobre interagindo à curta distância...



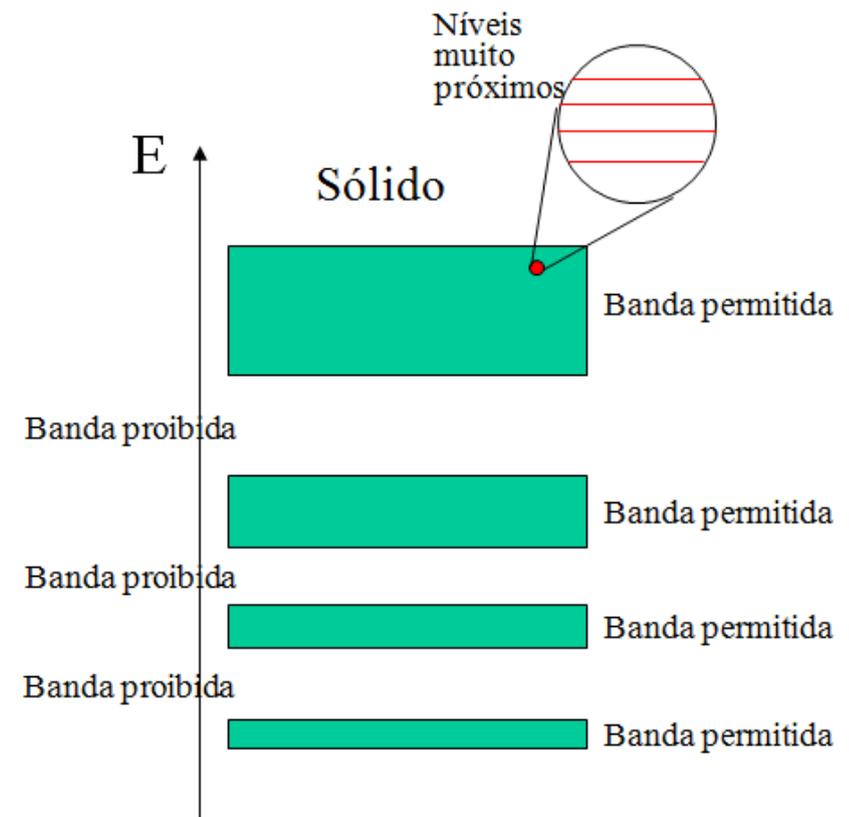
... Os níveis de energia se separam de forma a corresponder ao Princípio da Exclusão de Pauli.



Condução de Eletricidade nos Sólidos

Muitos átomos de Cobre interagindo à curta distância...

- 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

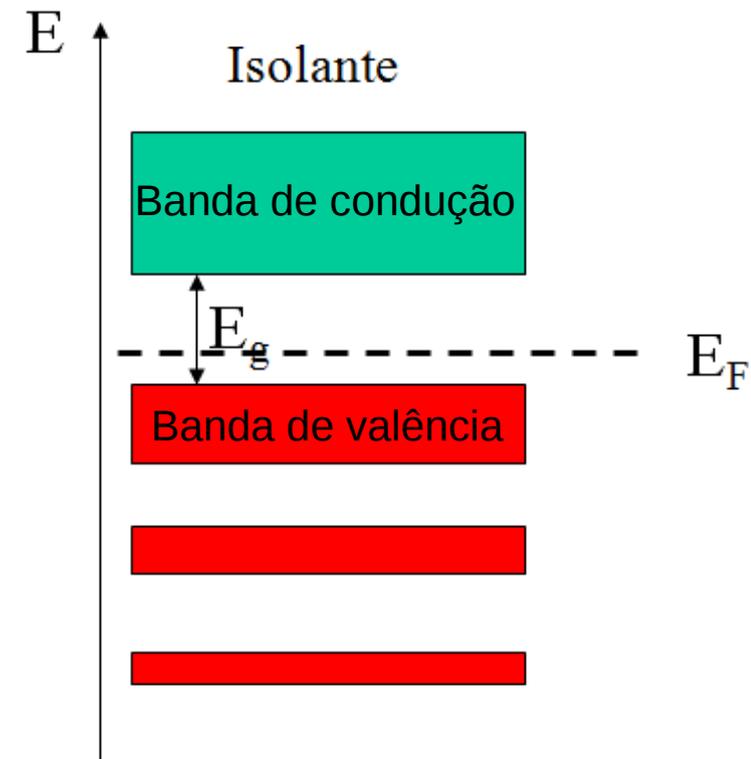


... Os níveis de energia se separam de forma a corresponder ao Princípio da Exclusão de Pauli.



Isolantes:

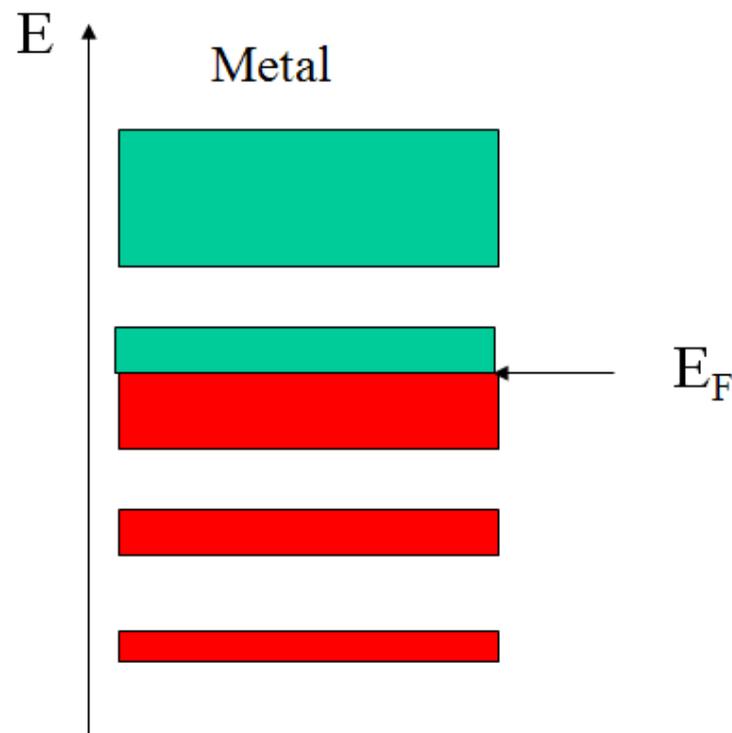
- **Sistema isolante:** ao aplicar uma diferença de potencial, não há corrente elétrica apreciável.
- Explicação: o nível mais alto de energia preenchido (**energia de Fermi E_F**) corresponde ao topo da última banda totalmente ocupada no estado fundamental (**banda de valência**)
- Primeira banda **desocupada** (**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





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**)



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.

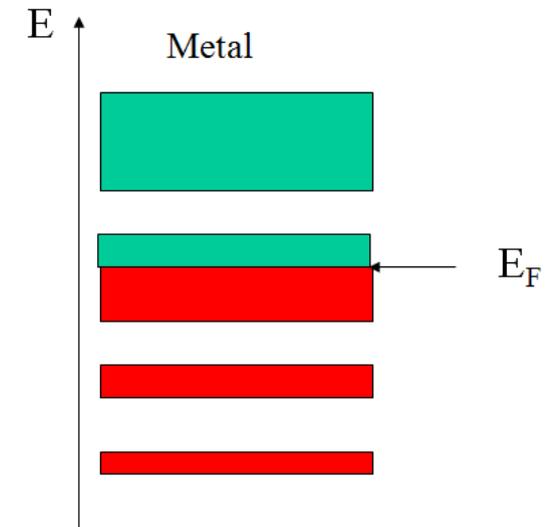


Os metais são condutores

Problema: Quantos elétrons de condução existem em uma amostra?

Ex.: Magnésio

- $\rho_{\text{Mg}} = 1,783 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $m_{\text{mol}} = 24,312 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- $n_{\text{valência}} \sim 2$



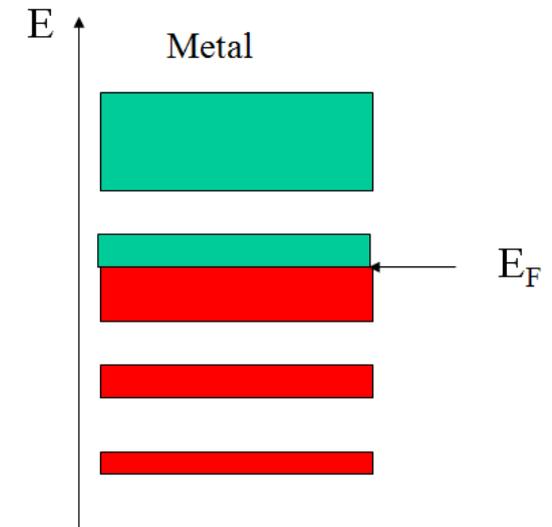


Os metais são condutores

Problema: Concentração de Portadores

Ex.: Cobre

- $\mu_{\text{Cu}} = 8,96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- $m_{\text{mol}} = 63,546 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- $n_{\text{valência}} \sim 1$





Os metais são condutores

Resumo:

- 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

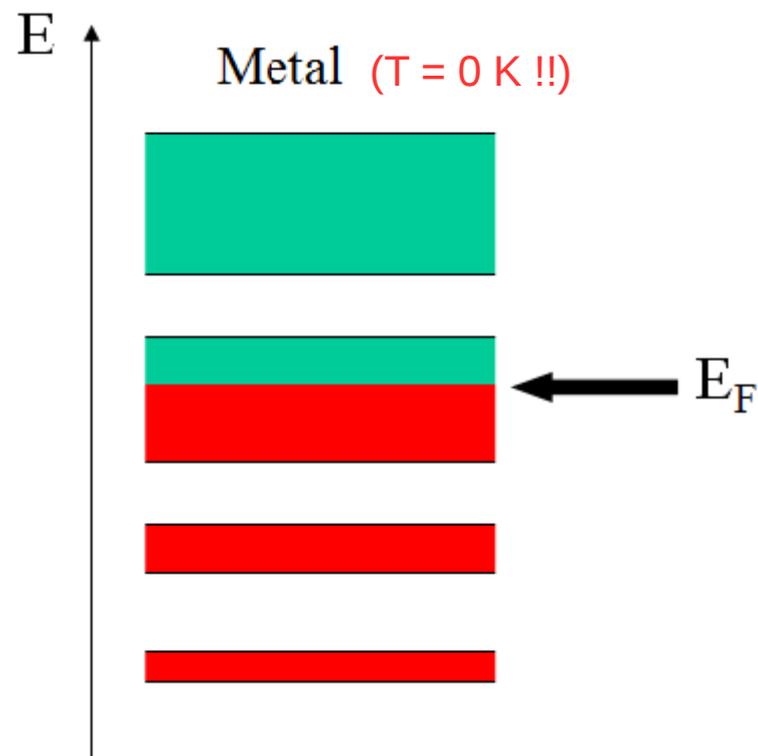
N_A = número de Avogadro = $6,02 \times 10^{23}$

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



Os metais são condutores

O que acontece com os elétrons quando a Temperatura do metal aumenta?

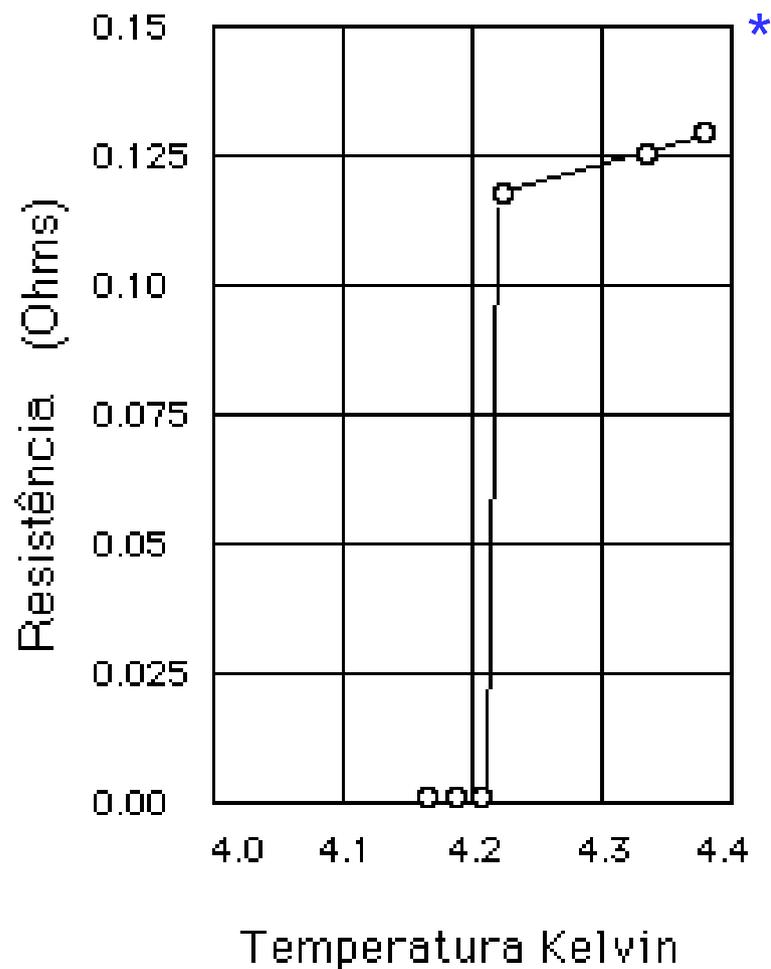




Os metais são condutores

[*http://www.seara.ufc.br](http://www.seara.ufc.br)

Kammergingh-Onnes em 1911...



Resistividade do Hg

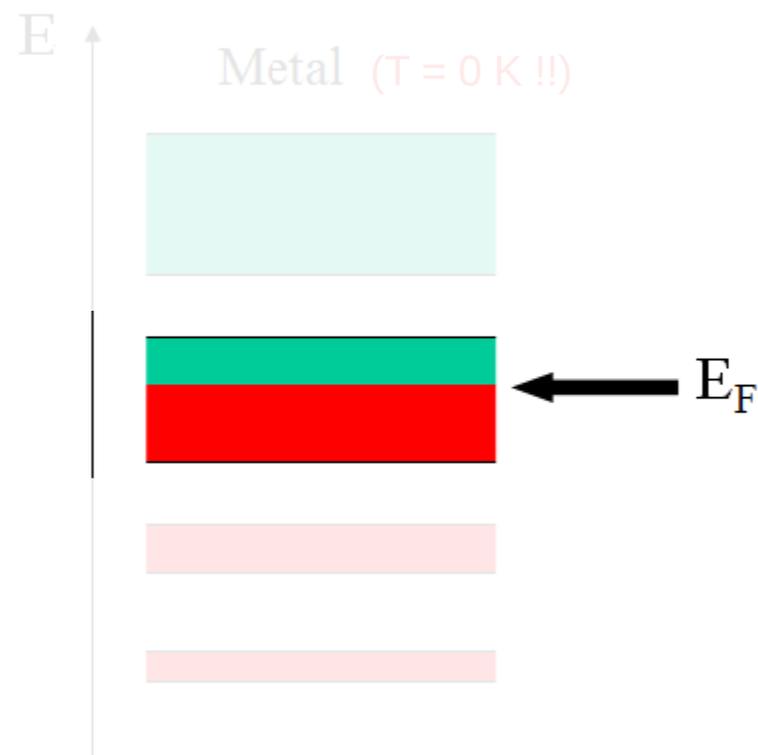
Esse trabalho deu origem ao que chamamos hoje de **supercondutividade.**



Os metais são condutores

O que acontece com os elétrons quando a Temperatura do metal aumenta?

A capacidade de condução elétrica depende do número de estados disponíveis para os elétrons e da energia desses estados...



Olhemos para a banda parcialmente ocupada!

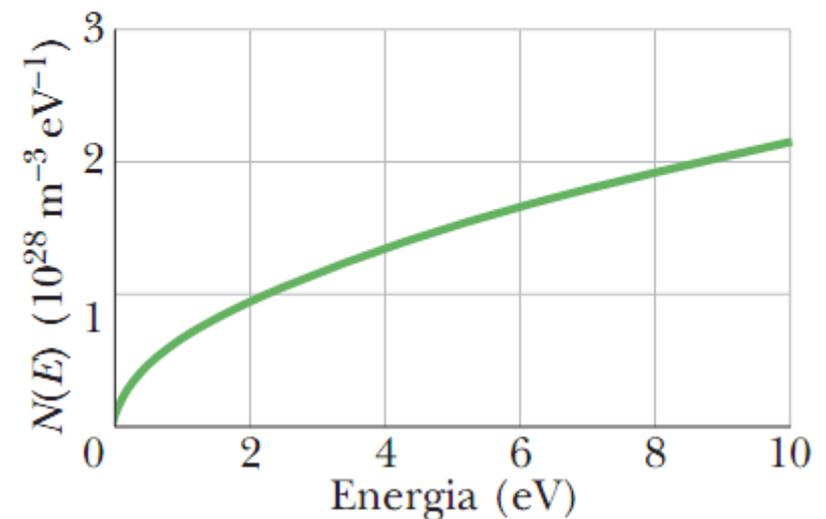
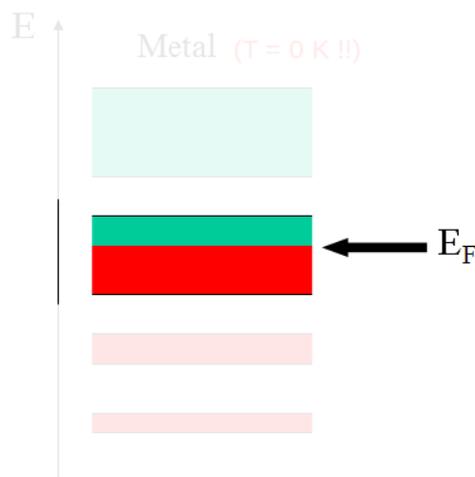


Os metais são condutores

Quantos estados Quânticos existem entre E e $E + dE$?

Normalmente a resposta a essa pergunta é dada em termos da expressão

$$N = N(E)dE :$$





Os metais são condutores

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

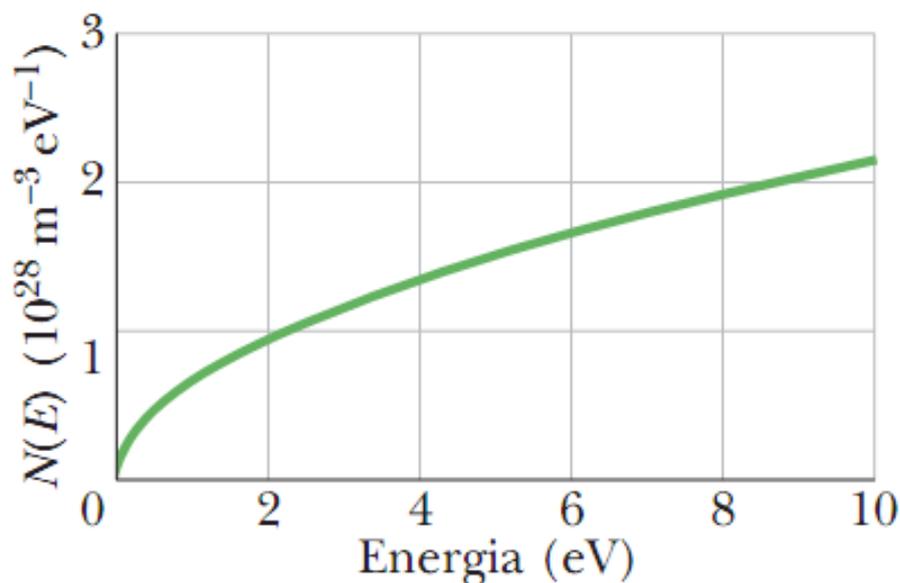


Figura 41-6 A função densidade de estados $N(E)$, definida como o número de níveis de energia disponíveis para os elétrons por unidade de energia e por unidade de volume, plotada em função da energia. A função densidade de estados expressa apenas o número de estados disponíveis; esses estados podem estar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

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



Os metais são condutores

- 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.

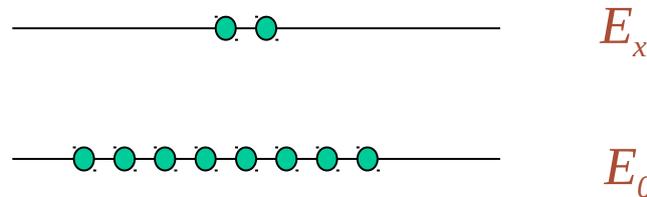
$$n = \int_0^{E_F} N(E) dE \quad \begin{array}{l} \text{(Número de estados ocupados por unidades de} \\ \text{volume para todas as energias entre } E = 0 \text{ e } E = E_F) \\ \text{= concentração de elétrons de condução} \end{array}$$

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

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



Os metais são condutores



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 é praticamente fixo e segue a ***Estatística de Fermi-Dirac...***

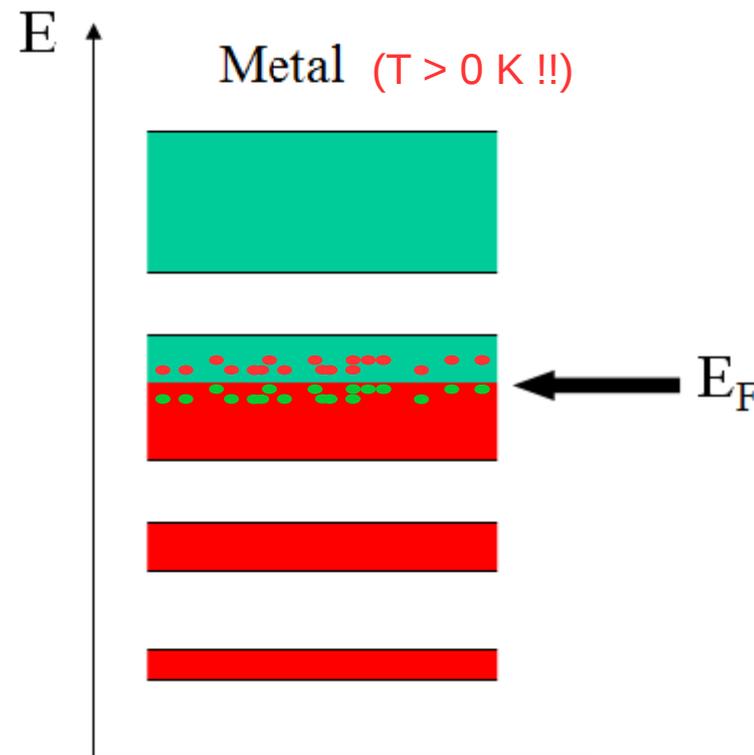
$$N_x = N_0 \left(\frac{1}{e^{(E_x - E_0)/kT} + 1} \right)$$

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



Os metais são condutores

- 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.





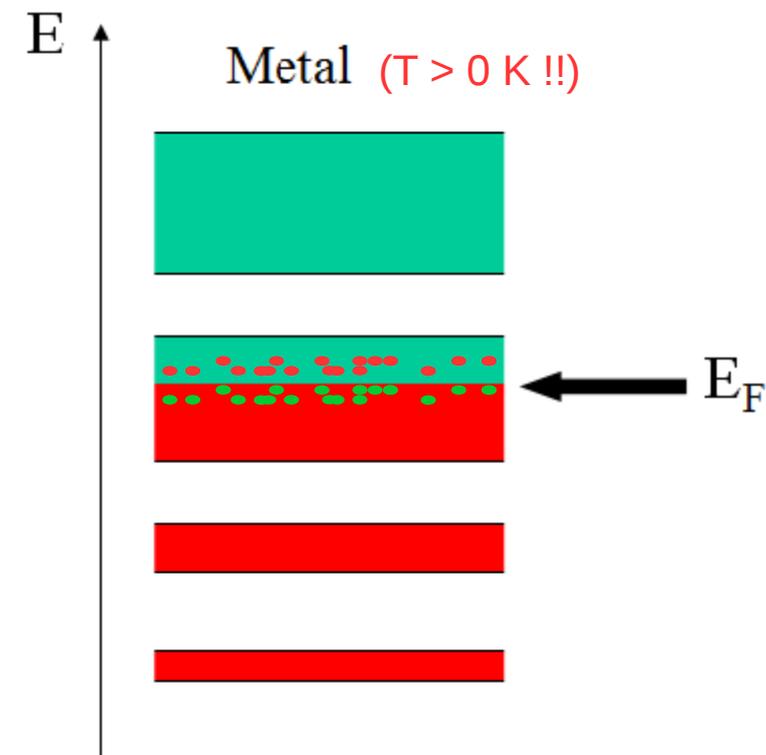
Os metais são condutores

- 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 .**





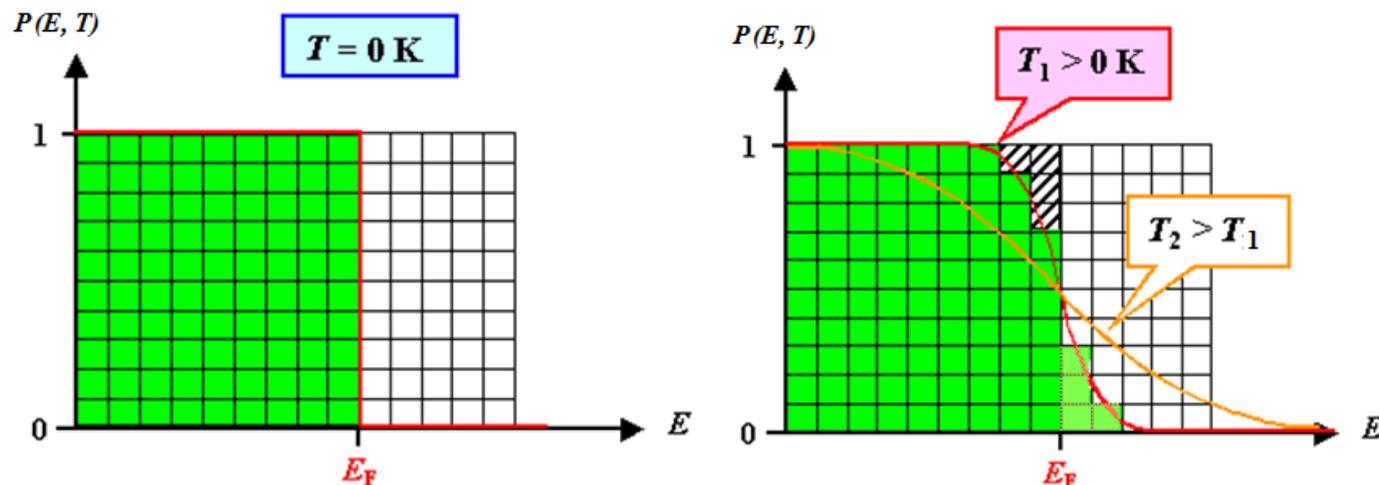
Os metais são condutores

- 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.

Probabilidade de Ocupação

$$P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$





Os metais são condutores

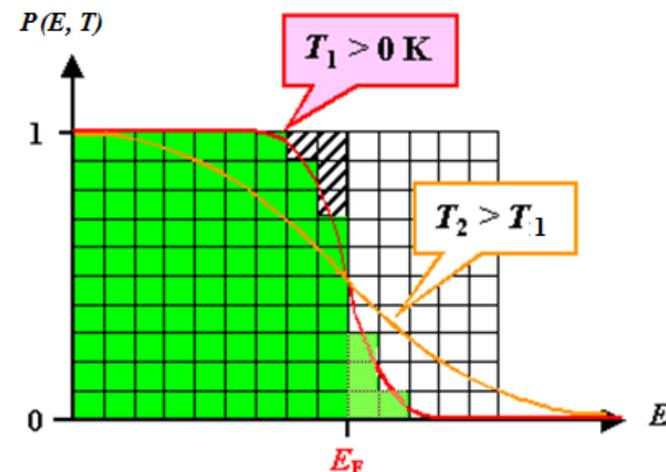
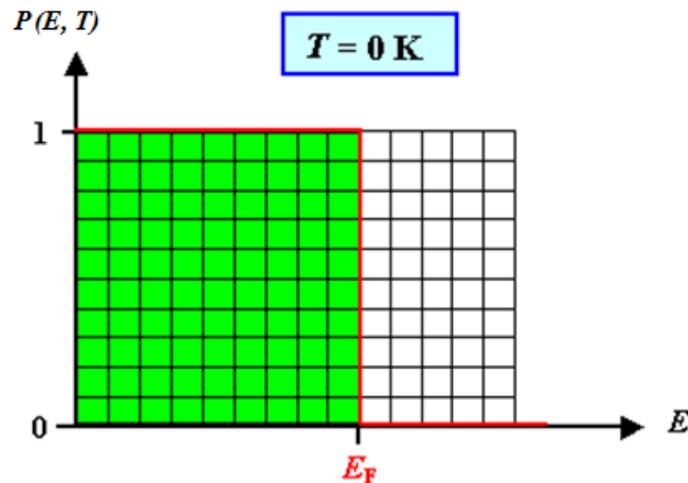
$$P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}$$

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

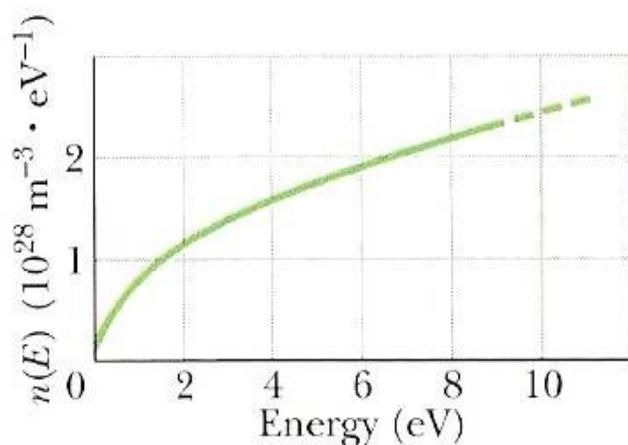




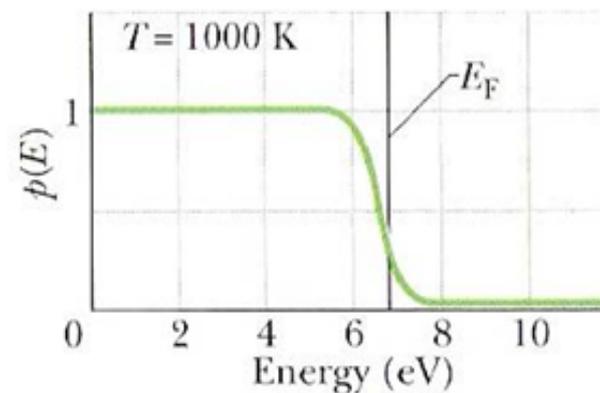
Os metais são condutores

Quantos estados ocupados existem?

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



x

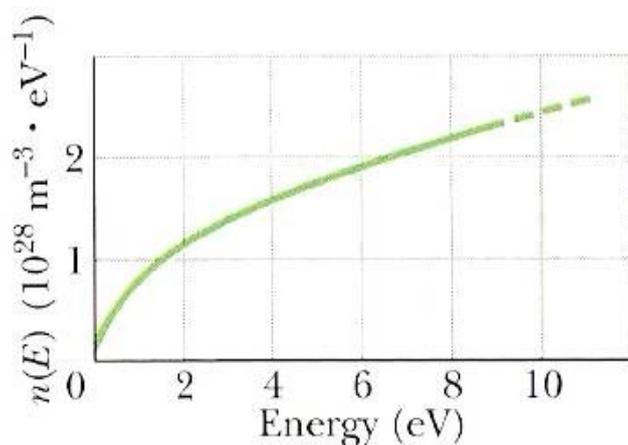




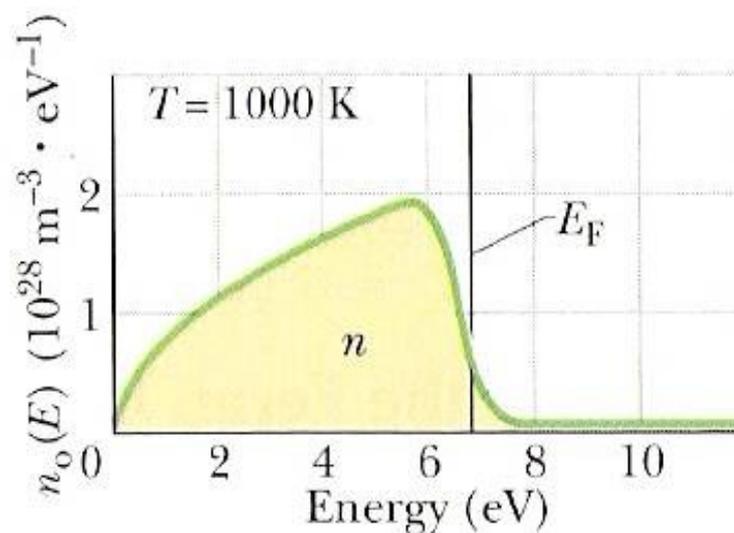
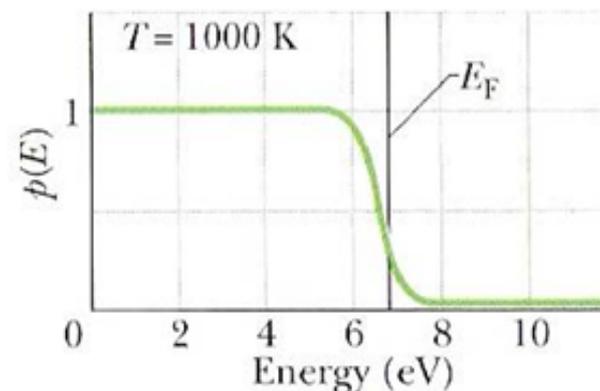
Os metais são condutores

Quantos estados ocupados existem?

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



x



(c)



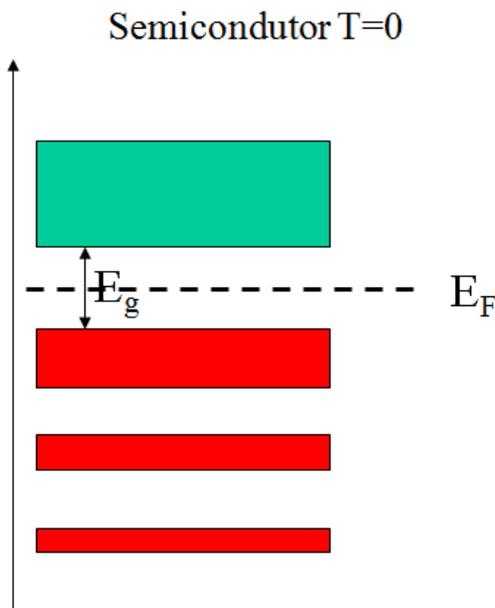
Semicondutores



Semicondutores

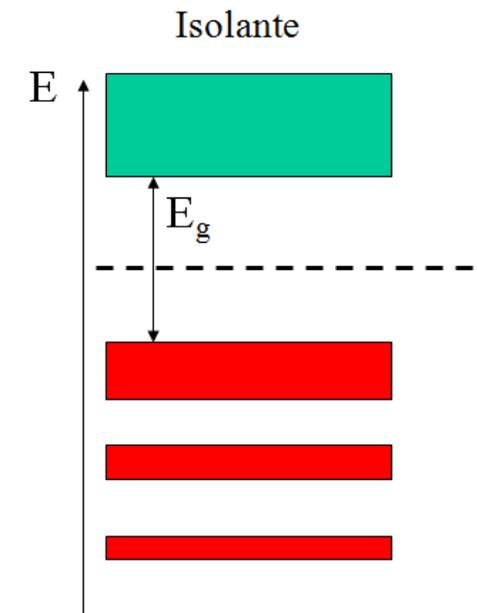
- À 1ª vista são como isolantes: para $T = 0$:
- A última banda **ocupada** está **totalmente ocupada (banda de valência)**
- A primeira banda **desocupada (banda de condução)** está separada por uma energia E_g (*band gap*).

Diferença Fundamental



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

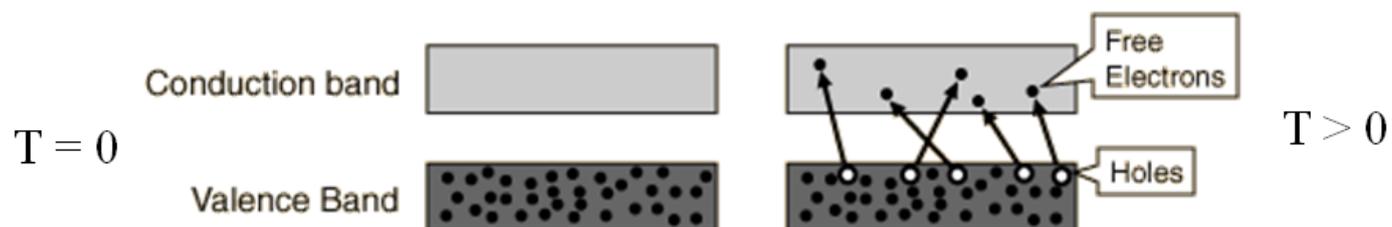
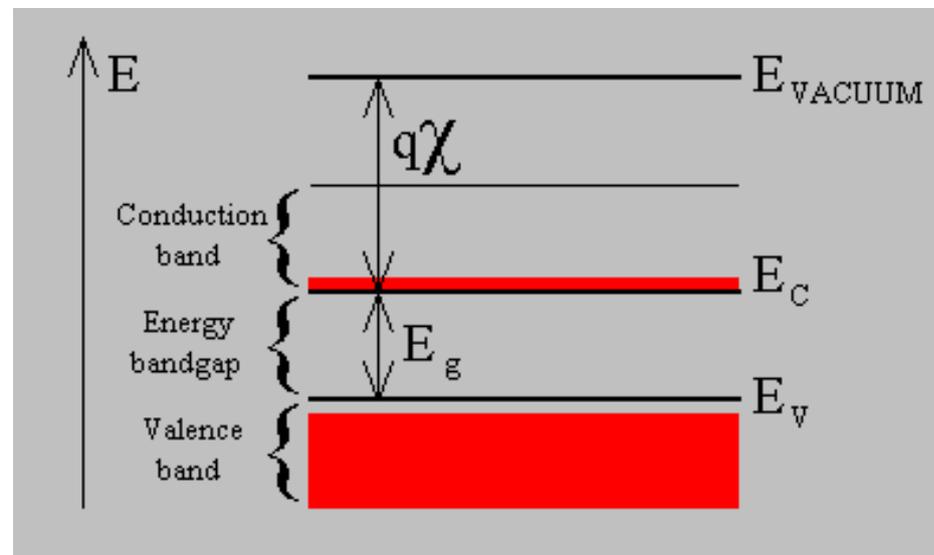
Parece pouco, mas isso faz uma
diferença colossal!





Semicondutores

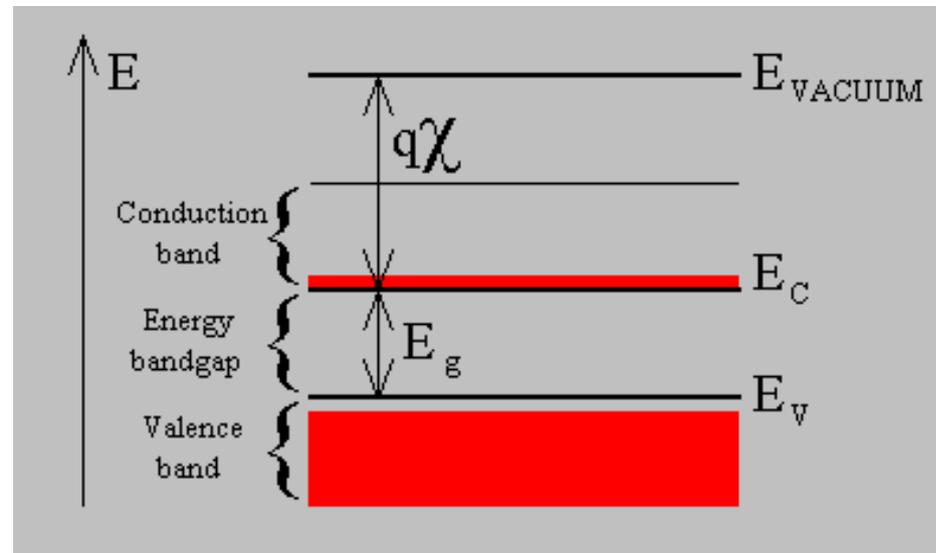
- Para $T > 0$:
- A probabilidade que um elétron, por agitação térmica, passe para um estado da banda de condução não é desprezível no caso do semicondutor.
- Condução por **elétrons** e **buracos**!





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 semicondutor.
- Condução por **elétrons e buracos!**



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



Semicondutores

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 : $\alpha < 0$**



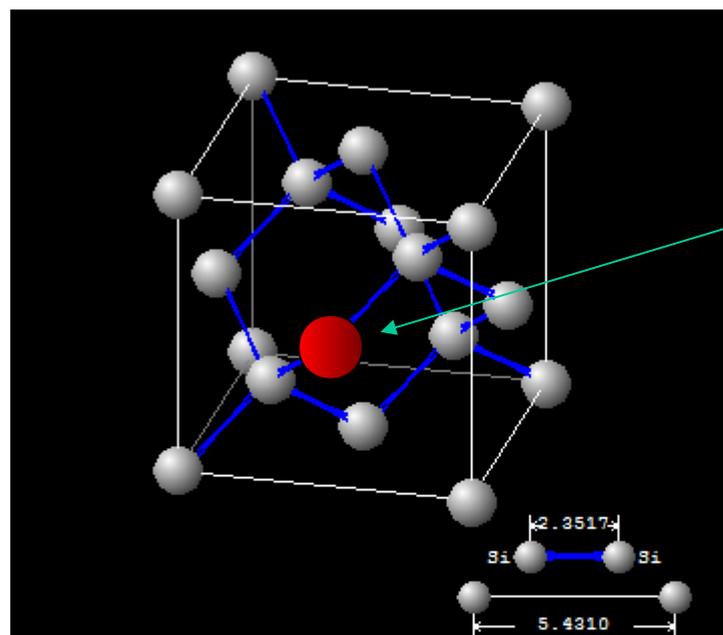
Semicondutores dopados



Semicondutores dopados

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

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



dopagem

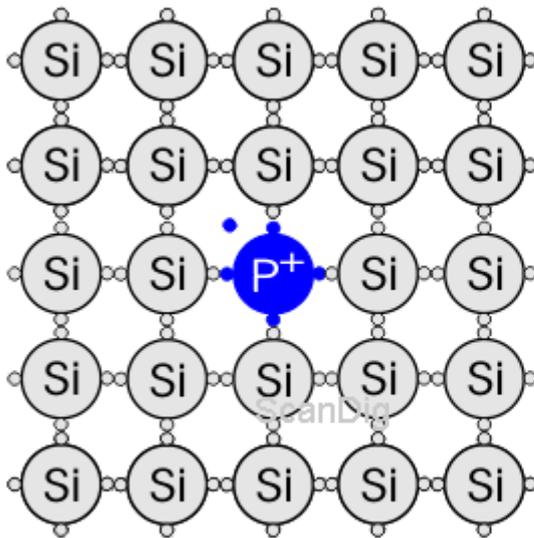
Si



Semicondutores dopados

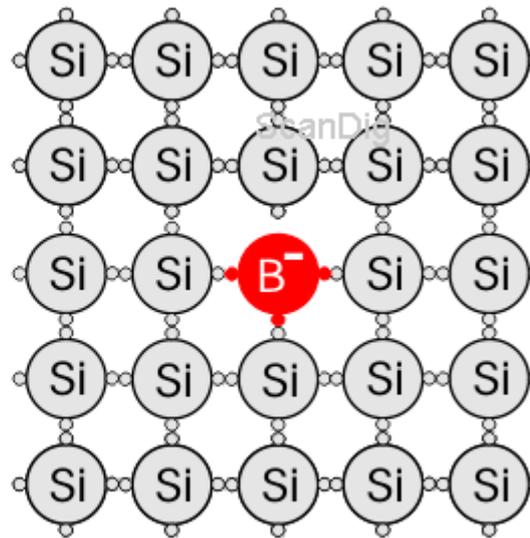
2 tipos de dopagem

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



impureza
'doadora' de
elétrons

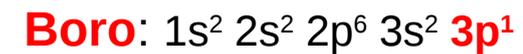
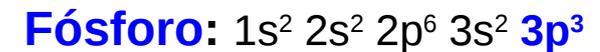
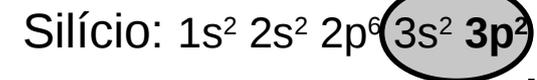
Tipo *p*: impureza tem um elétron de valência a menos que a matriz de Si



impureza
'aceitadora' de
elétrons

elétrons de valência

Exemplos:

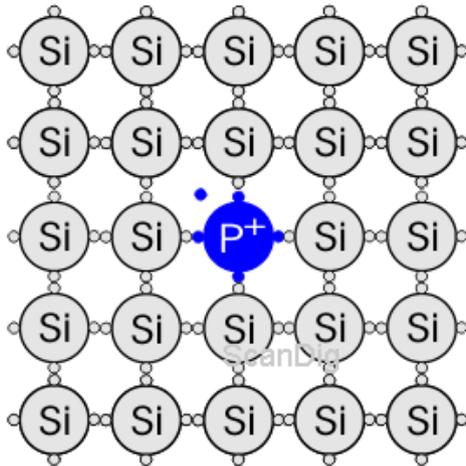




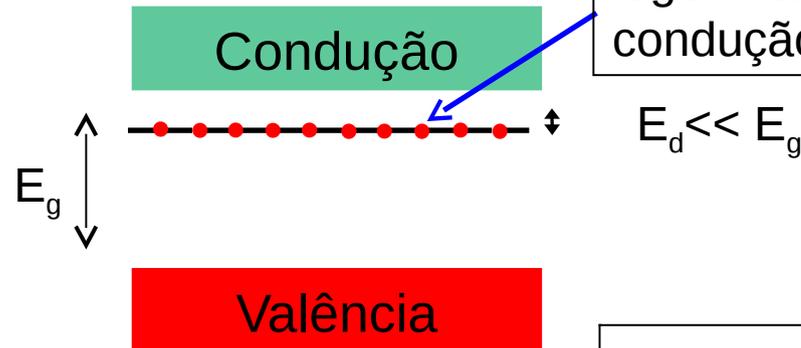
Semicondutores dopados – Tipo n

doadores para Si

					0	
	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	10
5	B	C	N	O	F	Ne
13	Al	Si	P	S	Cl	Ar
31	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
49	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
81	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
113						
2	113					



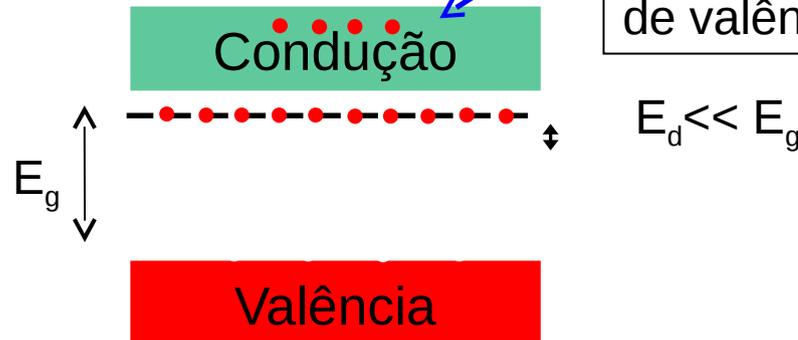
T = 0K



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

$$E_d \ll E_g$$

T > 0K



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

$$E_d \ll E_g$$

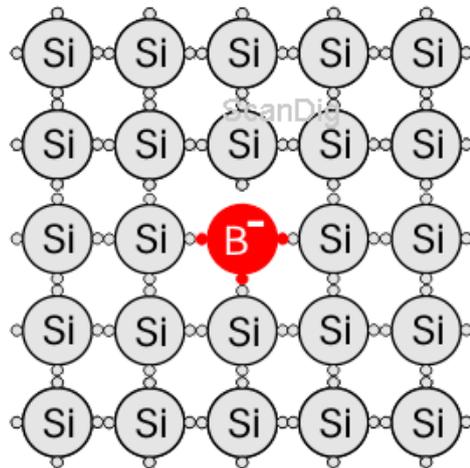
**Muito mais portadores do que haveria sem a dopagem
Imensa maioria dos portadores são elétrons !**



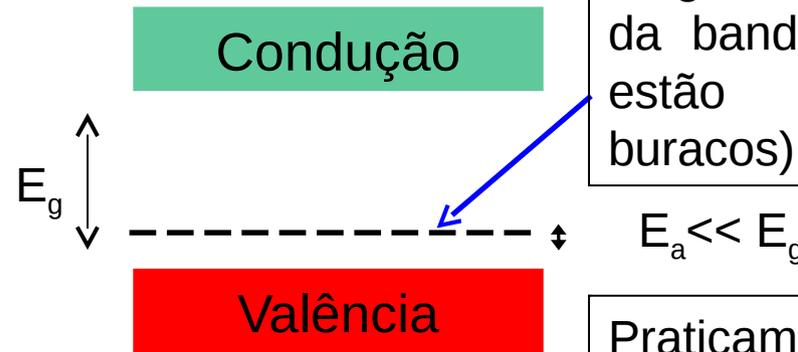
Semicondutores dopados – Tipo p

aceitadores para Si

					0	
	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He
	5	6	7	8	9	10
	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						
115						

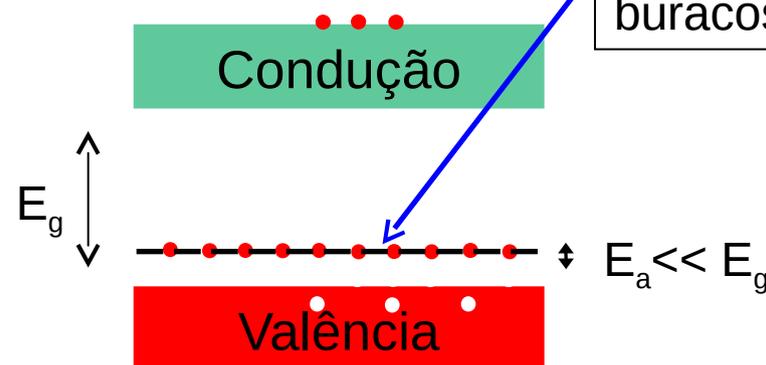


$T = 0\text{K}$



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

$T > 0\text{K}$



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 !



Semicondutores dopados

Exemplo: Silício dopado com P ou Al

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



Exercício

No Si puro, a concentração de elétrons de condução a T ambiente é aproximadamente $n_0 = 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Para que aumentemos a concentração de elétrons em 10^6 , que fração de átomos de Si devemos substituir por P?

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

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



Exercício

O gap entre as Bandas de Valência (BV) e Banda de Condução (BC) do Silício vale $1,11\text{eV}$. A 300K , o nível de Fermi está aproximadamente a meia distância entre as BV e BC.

Supondo o Si dopado com átomos que introduz um estado $0,15\text{eV}$ abaixo da BC e que, neste caso, E_f está $0,11\text{eV}$ abaixo da BC.

Qual a probabilidade de um estado na base da BC esteja ocupado

- (a) antes da dopagem
- (b) depois da dopagem



Junção p-n

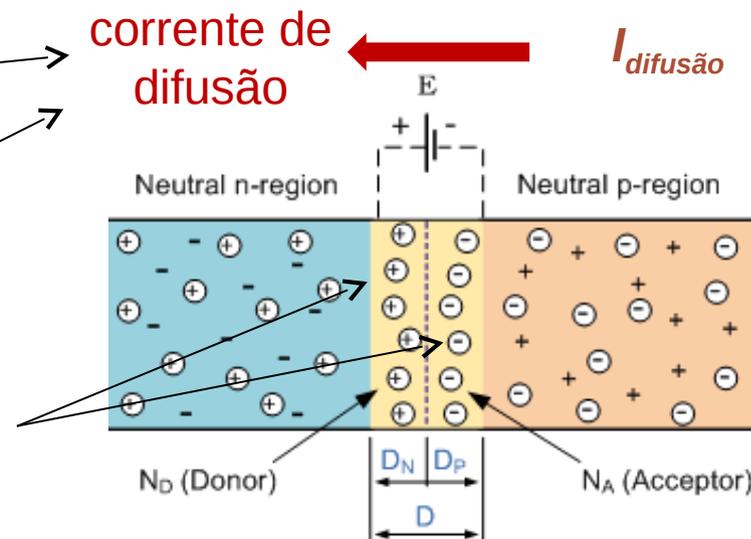


Semicondutor dopado **tipo-p** em uma região e **tipo-n** em outra região bem ao lado



Junção p-n

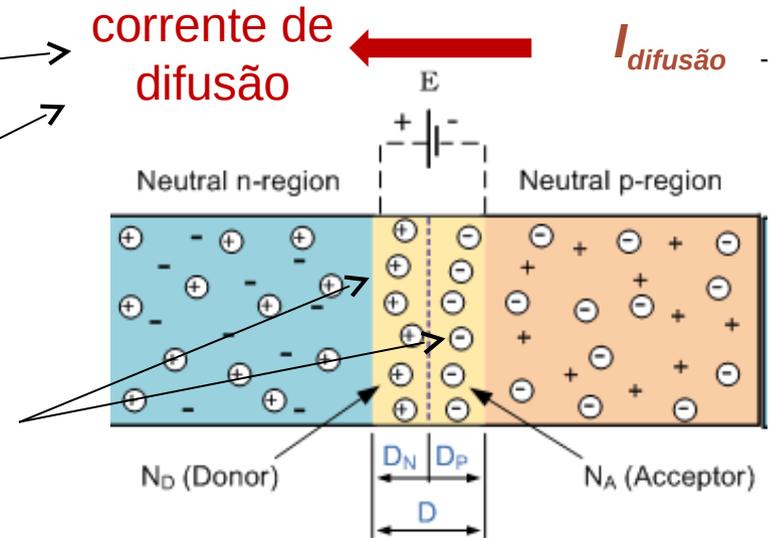
- Elétrons em excesso da região n (esquerda) tendem a se difundir para a região p (direita).
- Ao mesmo tempo, buracos em excesso da região p (direita) tendem a se difundir para a região n (esquerda).





Junção p-n

- 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”.



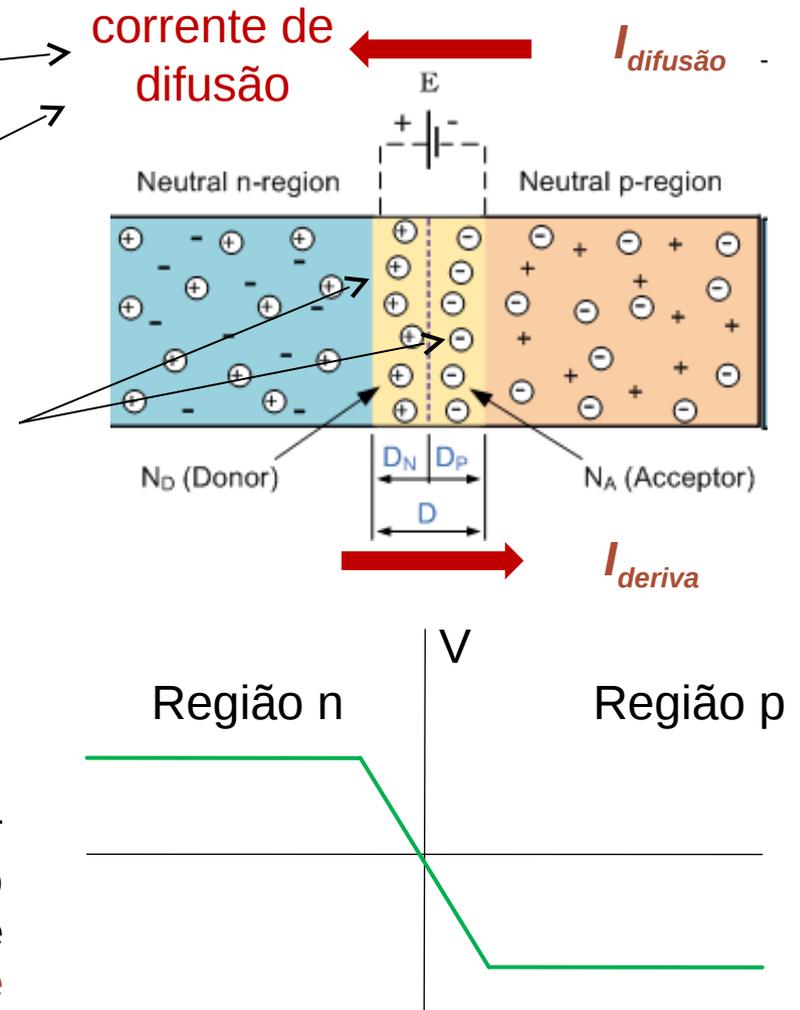


Junção p-n

- 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

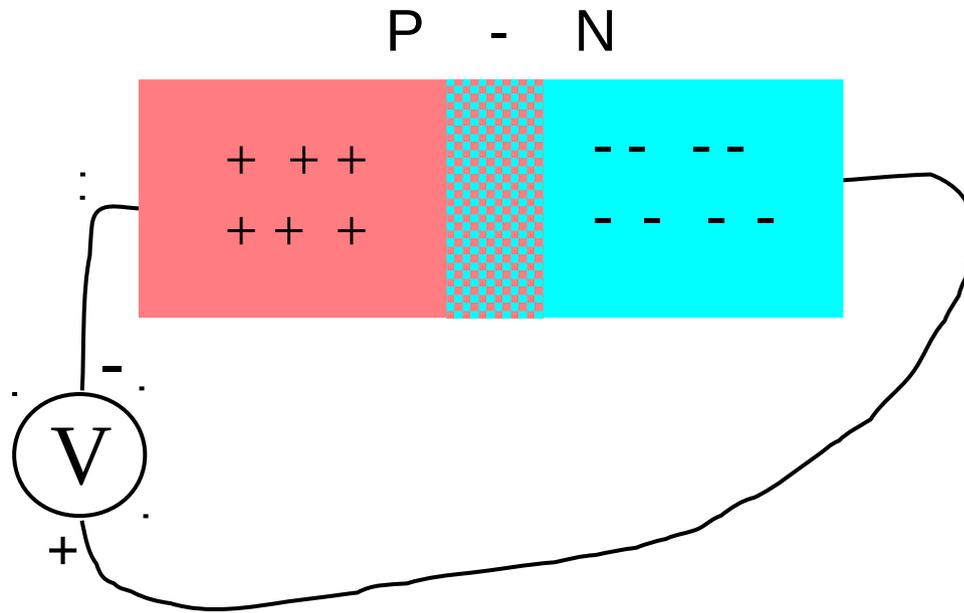
- DDP se contrapõe à difusão (i.e., tende a empurrar elétrons (portadores minoritários) de volta para o lado n e buracos de volta para o lado p. Esse movimento é chamado **corrente de deriva**. Um **V de equilíbrio** é atingido qdo $I_{dif} = I_{der}$.



Lembre-se: carga positiva → potencial positivo



Junção p-n com DDP aplicada



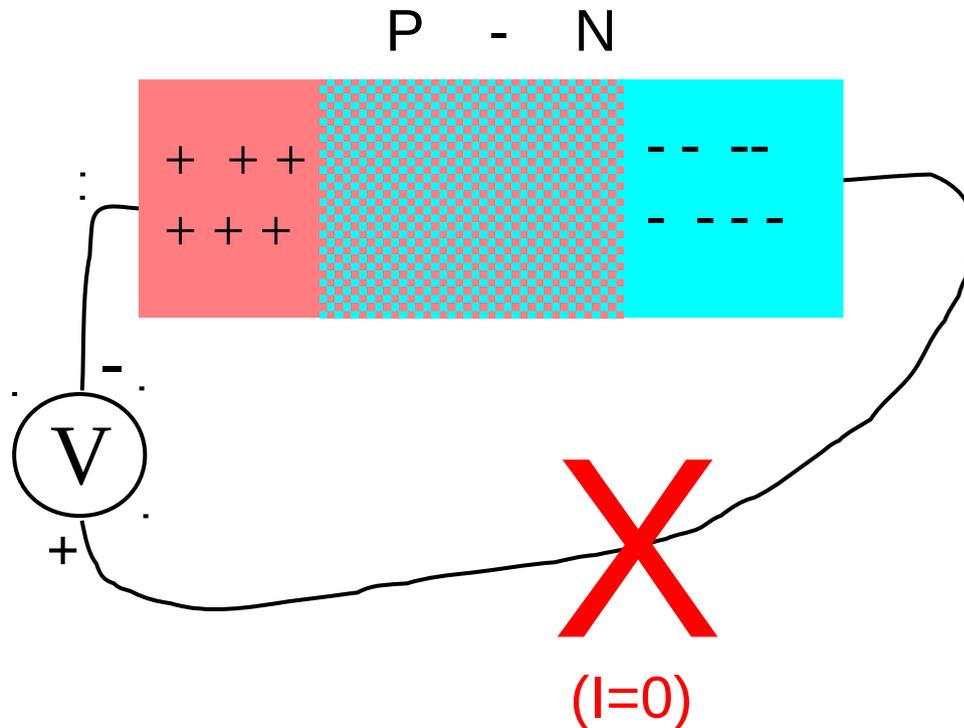
obs: aqui +, - representam as cargas móveis (cargas fixas não estão mostradas)

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 +’s como -’s puxados para longe da junção. Zona de depleção aumenta. Corrente não pode fluir!

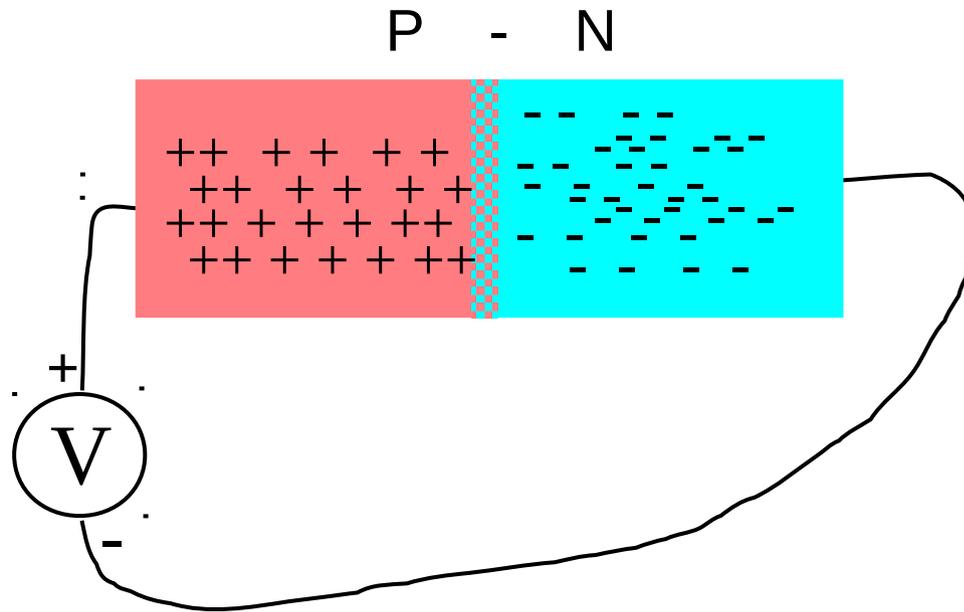
Ligando a voltagem, mostrada, o que ocorre? (por que?)

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

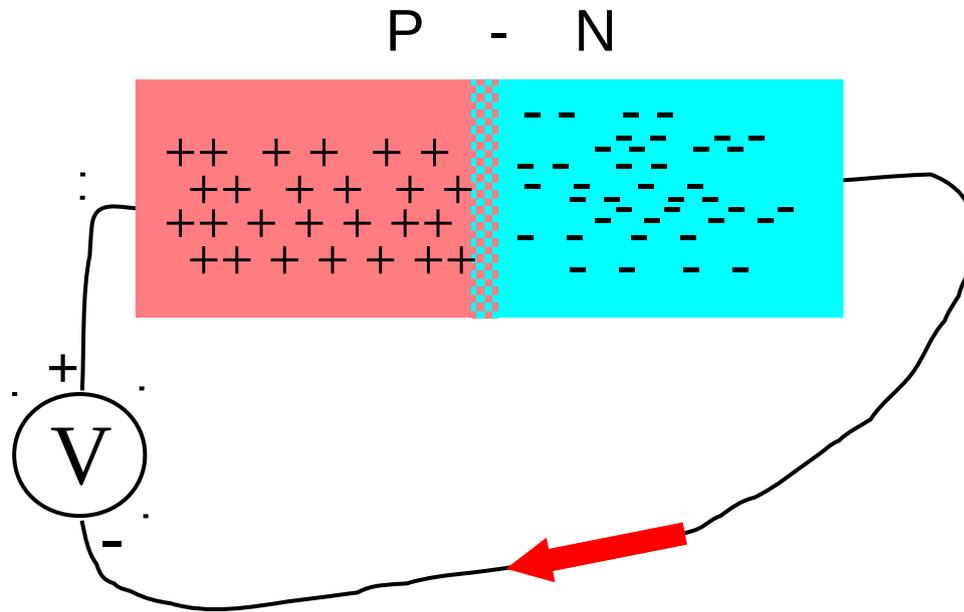


**ligando voltagem oposta,
o que acontece?
(por que?)**

- 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



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

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

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

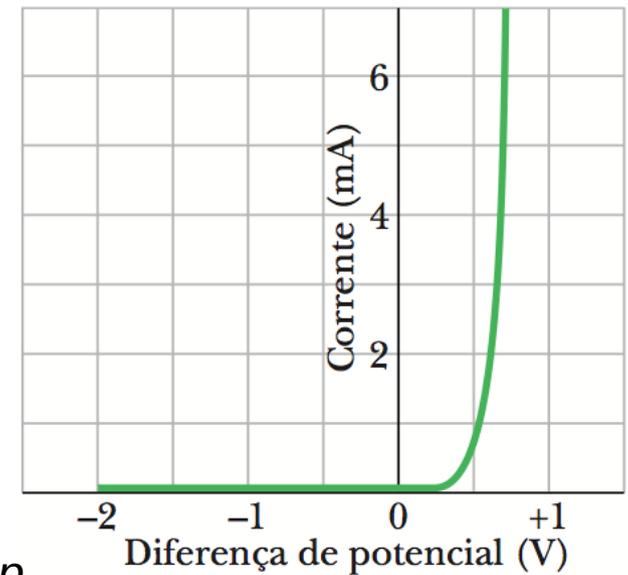
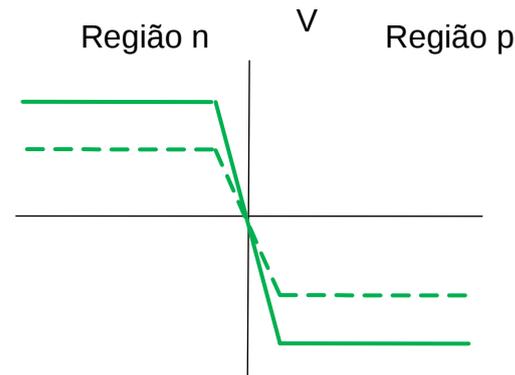
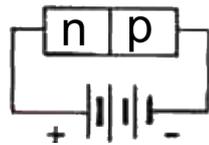
- a) elétrons fluem de P p/ N pela junção.
- b) elétrons não fluem pela junção
- c) **elétrons fluem de N p/ P pela junção.**



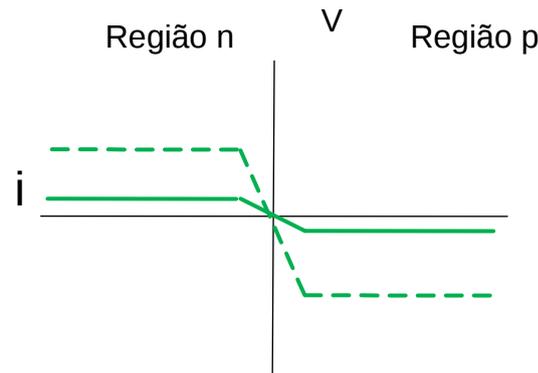
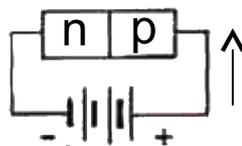
Diodo Retificador

Aplique uma tensão adicional em uma junção p-n:

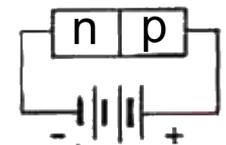
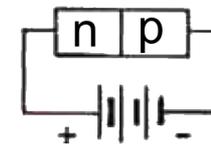
- ‘Polarização inversa’: tensão positiva aplicada do lado *n*
 - Reforça a diferença de potencial já existente
→ cria (mais) resistência ao movimento das cargas difusivas
→ não há corrente



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



← Polarização inversa | Polarização direta →

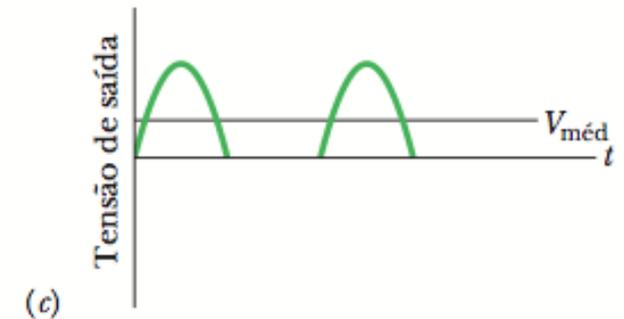
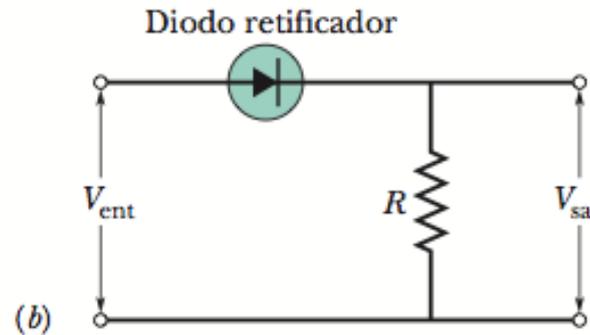
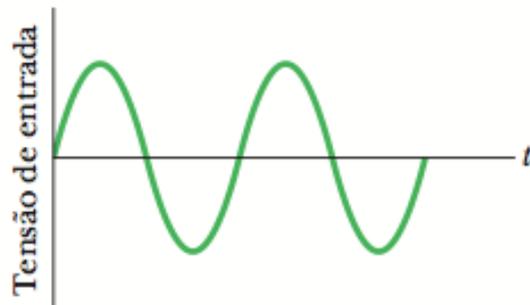




Diodes Retificador

Aplicação simples em eletrônica: “retificação”

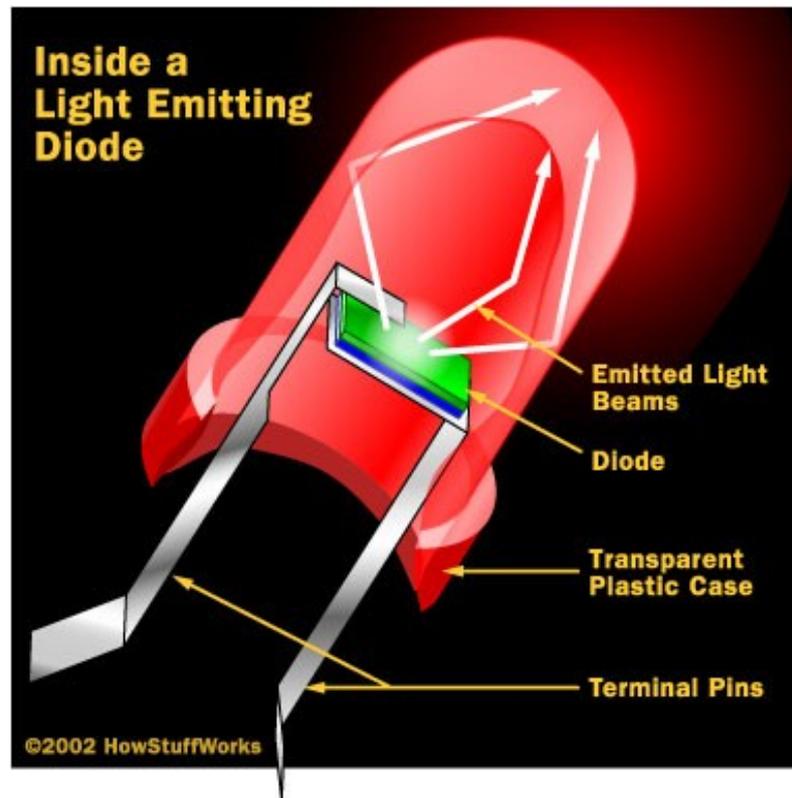
- Tensão de entrada senoidal
 - Valor médio temporal = 0
 - Diodo só permite a passagem de corrente quando a tensão for no sentido de polarização direta.



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



LED – Diodo Emissor de Luz

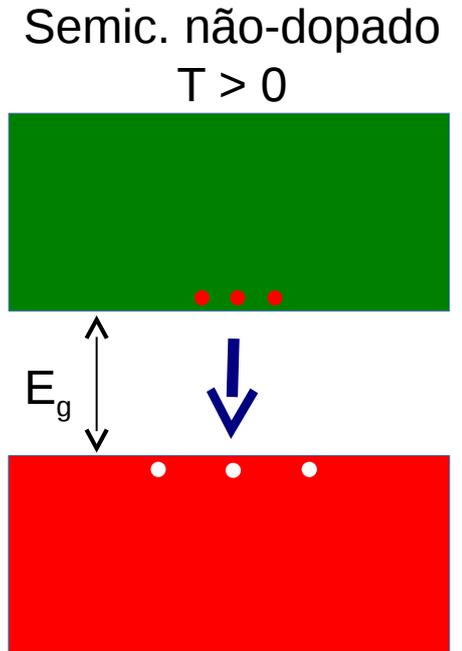




LED – Diodo Emissor de Luz

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).



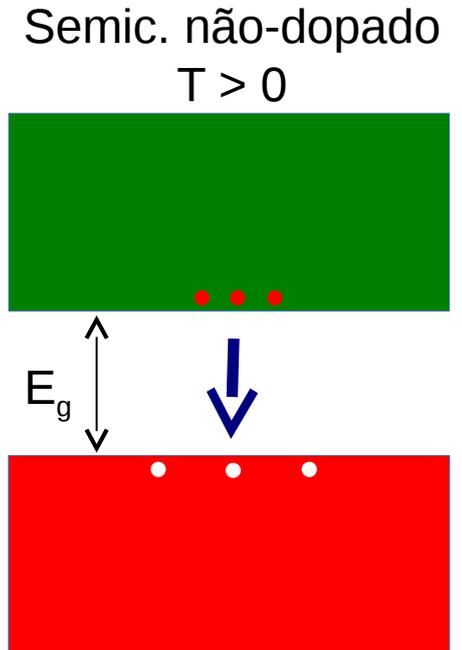
Problema: muito poucos pares elétron-buraco → muito poucos fótons emitidos!



LED – Diodo Emissor de Luz

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!

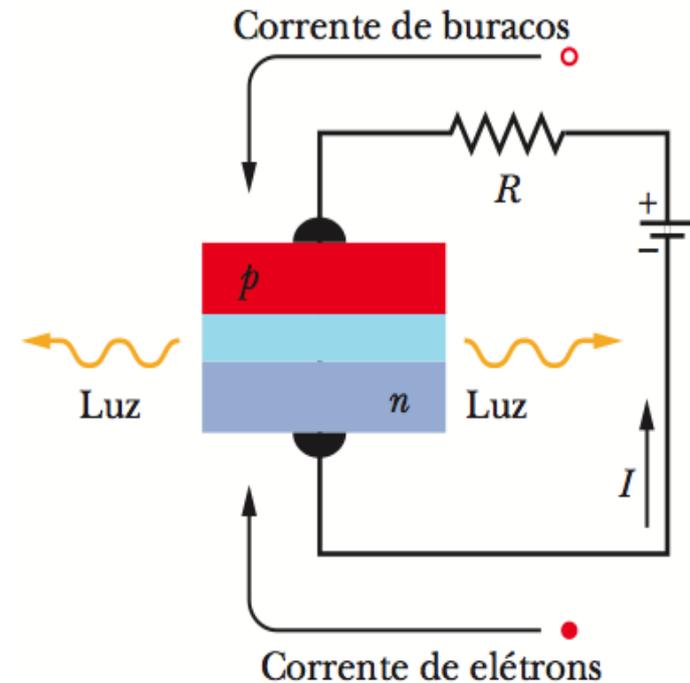
(Muitos elétrons mas poucos buracos, ou vice-versa...)



LED – Diodo Emissor de Luz

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).

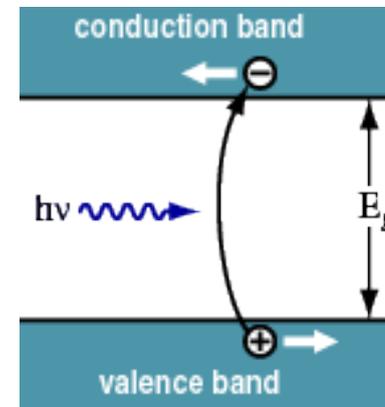




LED – Diodo Emissor de Luz

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.





LED – Diodo Emissor de Luz

LED + espelhos !

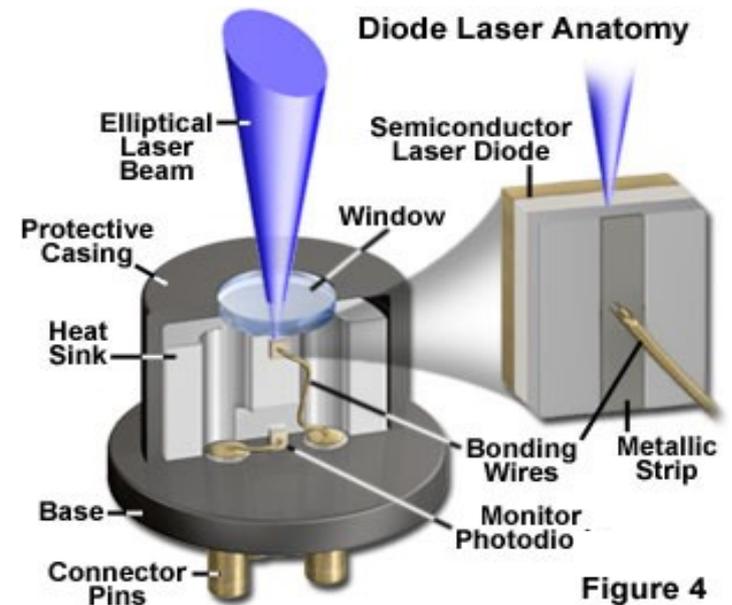
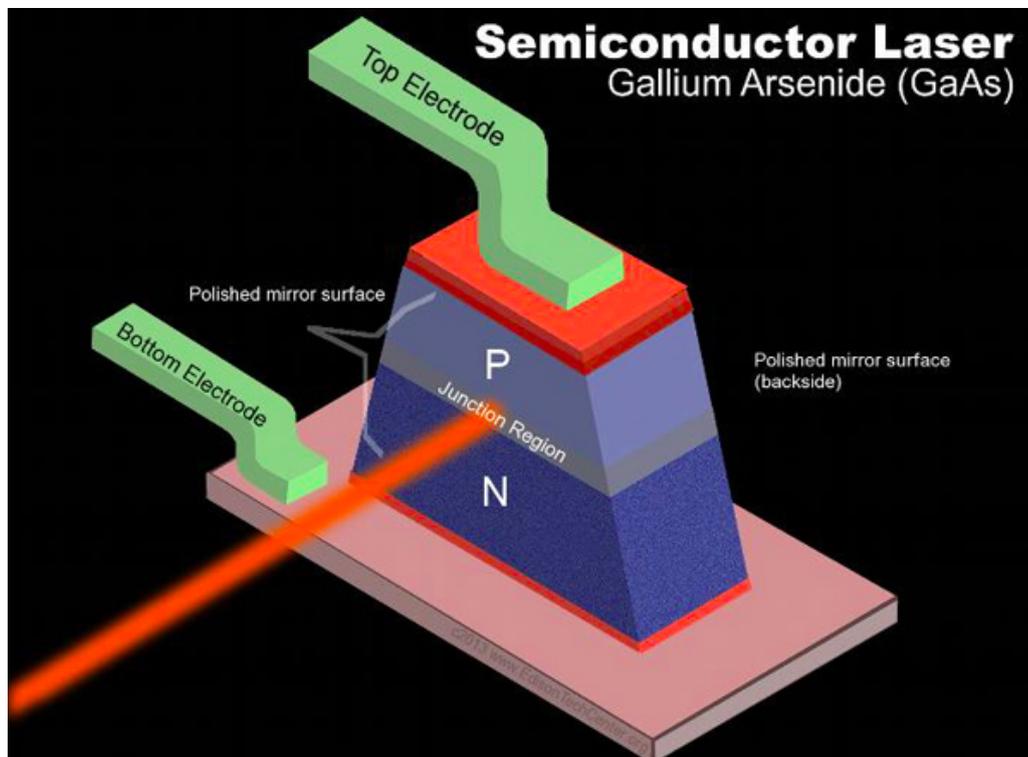
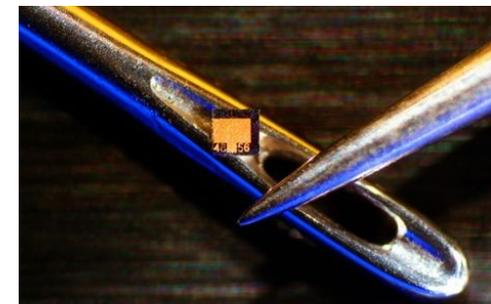
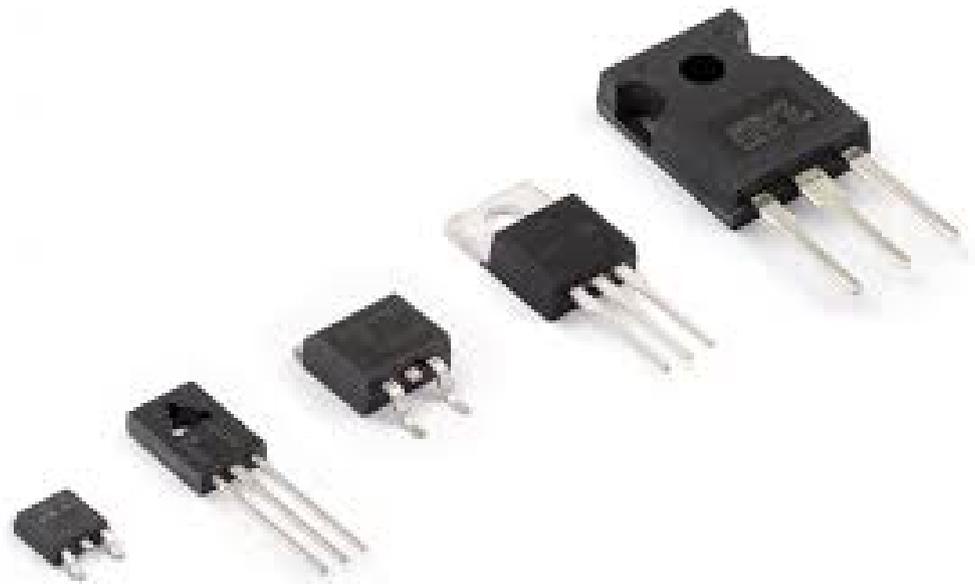


Figure 4





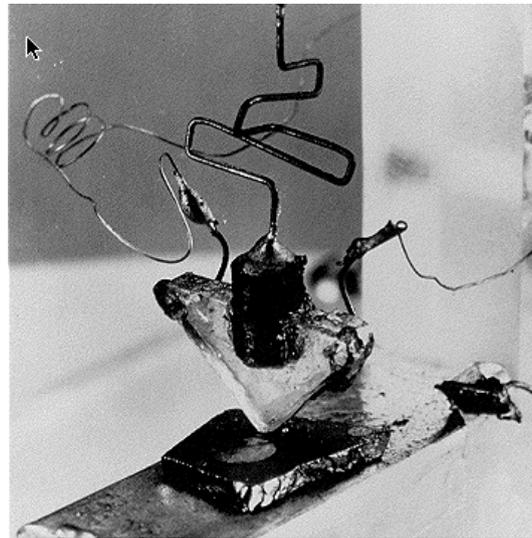
Transistores





Transistores

Bem diferentes dos primeiros modelos...

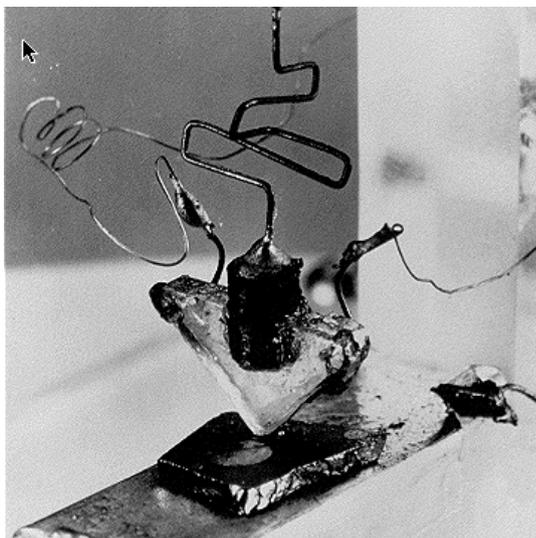


1º transistor (Bell Labs, EUA, 1947)

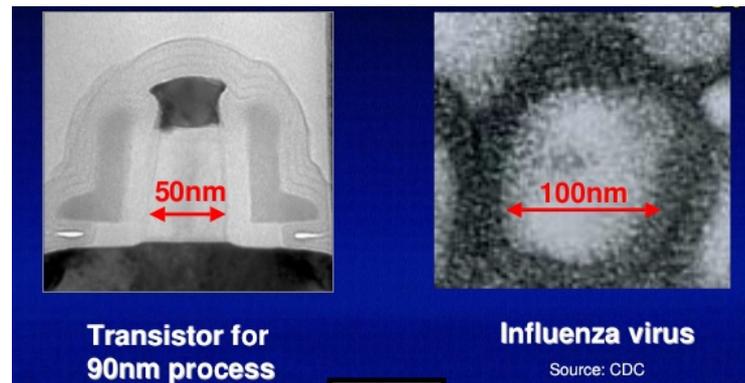


Transistores

Bem diferentes dos primeiros modelos...



1º transistor (Bell Labs, EUA, 1947)



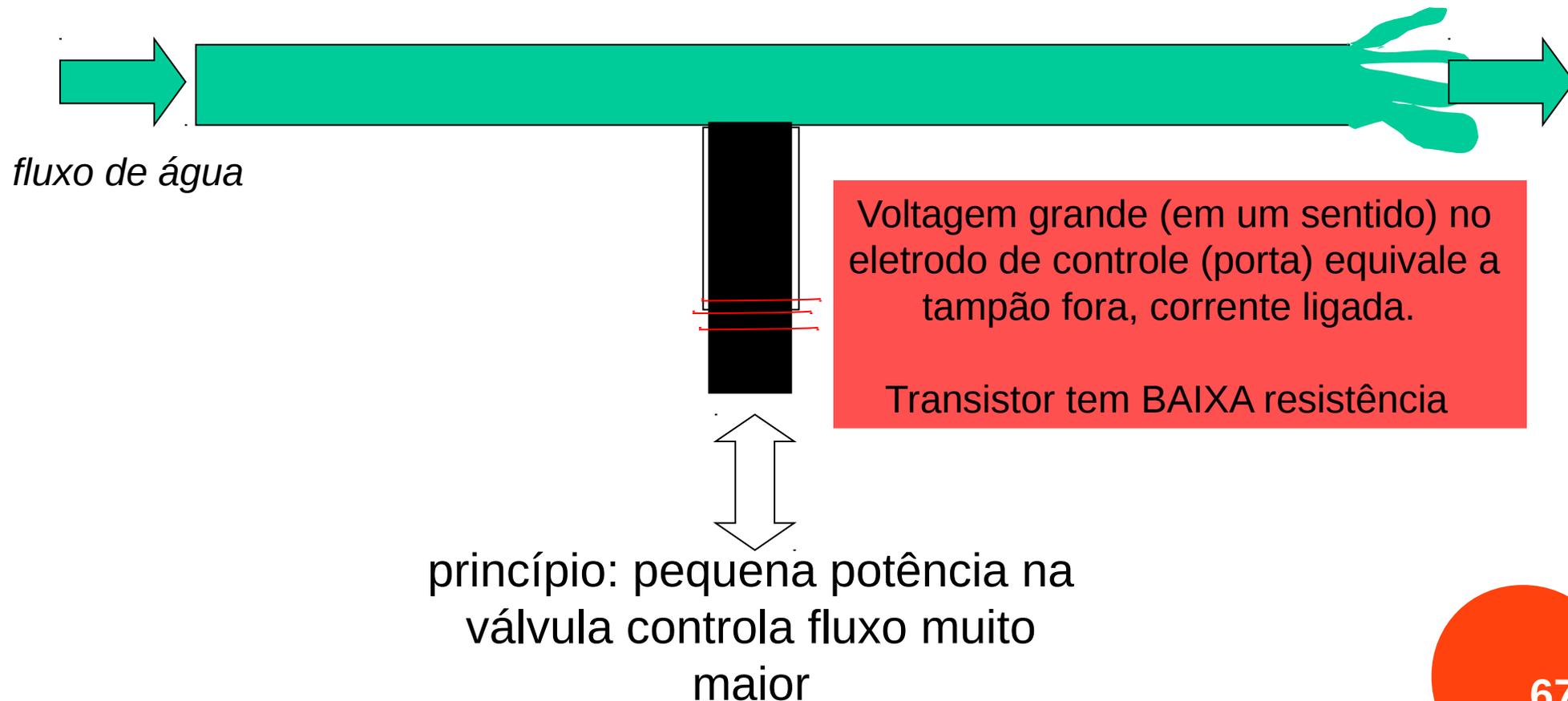
nanotransistor da Intel em 2003 (!)



Transistores

Ideia Básica

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

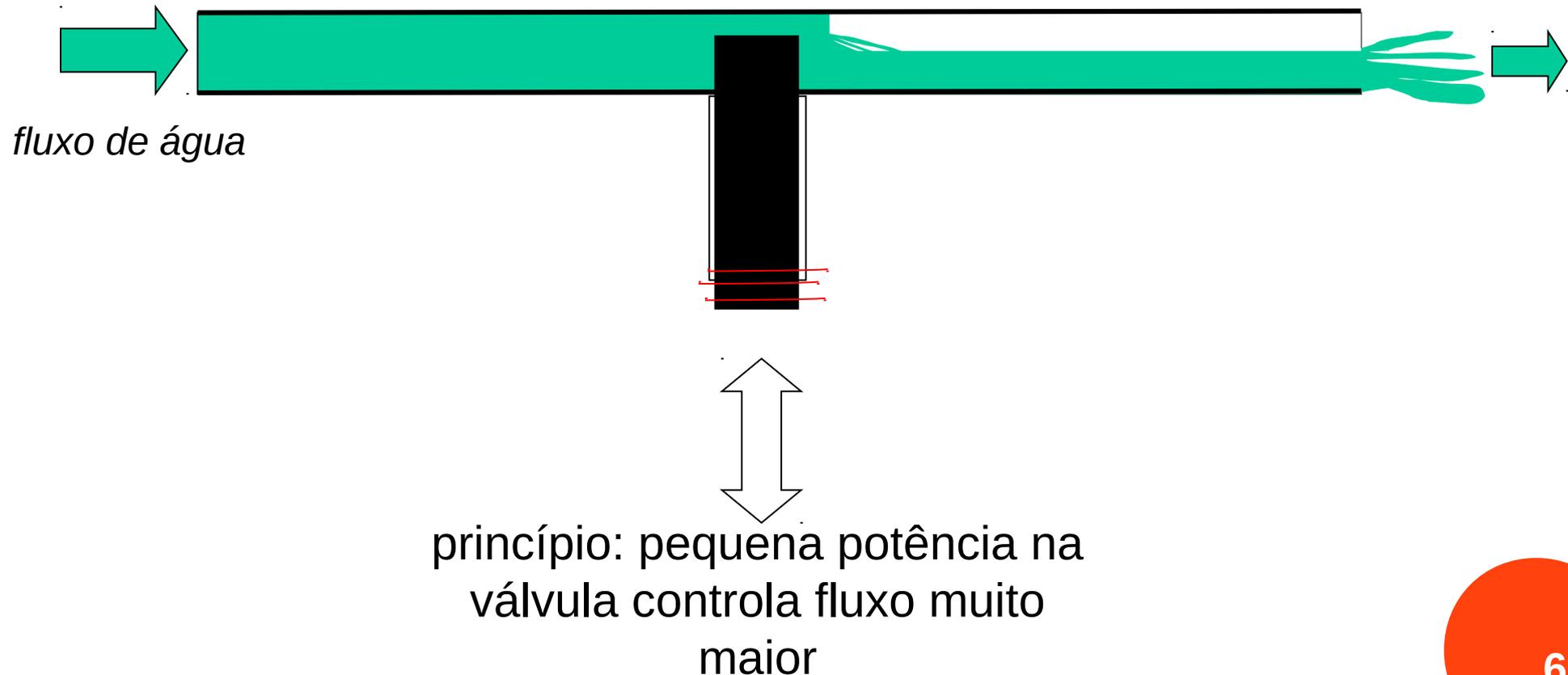




Transistores

Ideia Básica

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

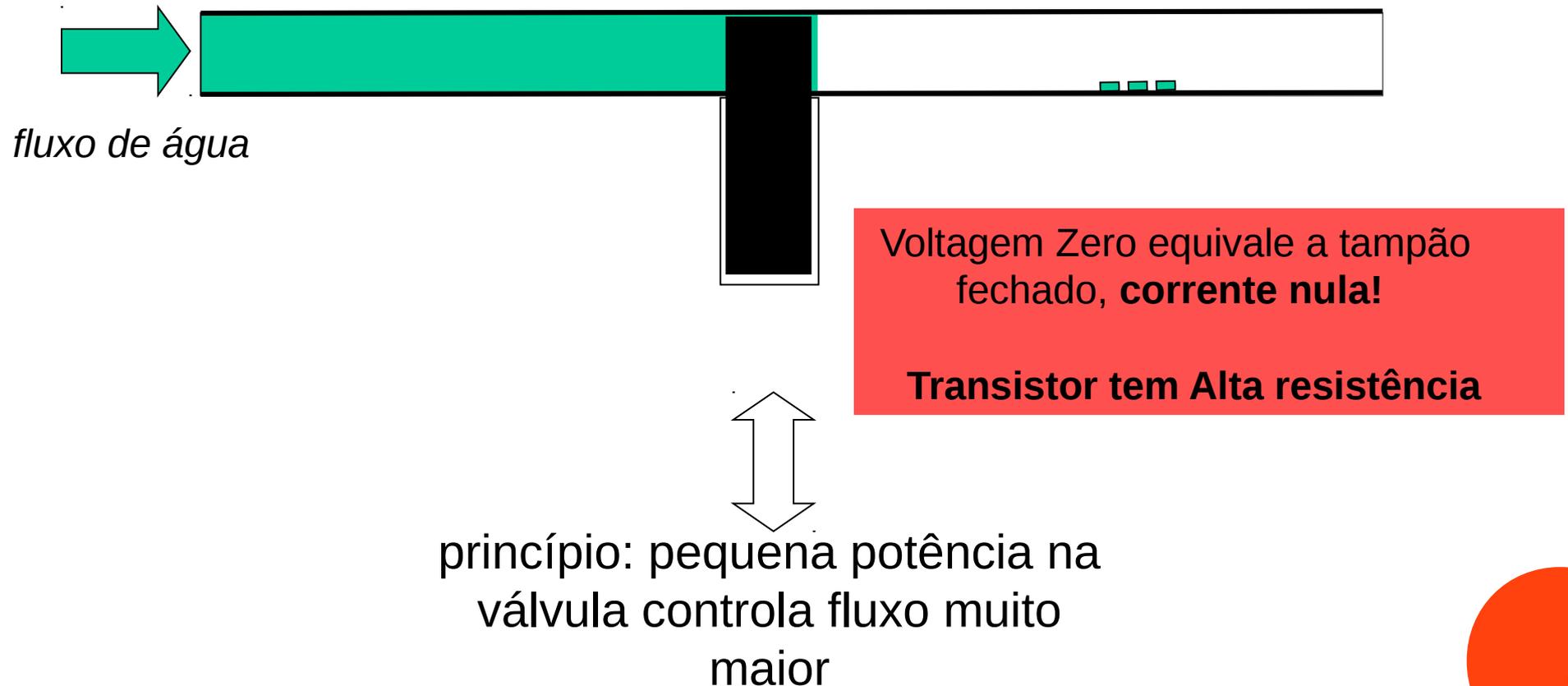




Transistores

Ideia Básica

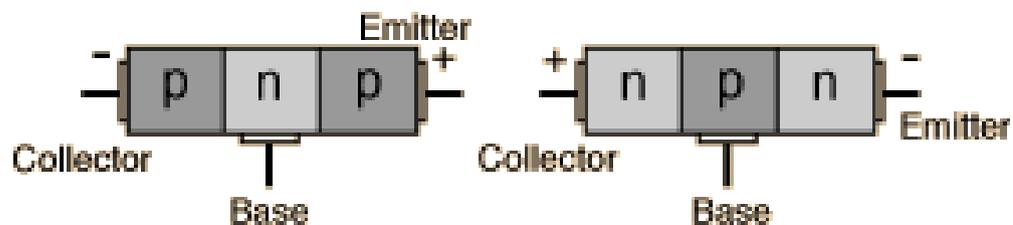
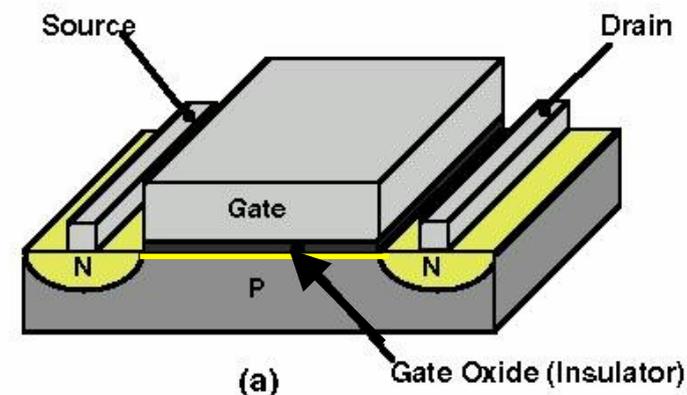
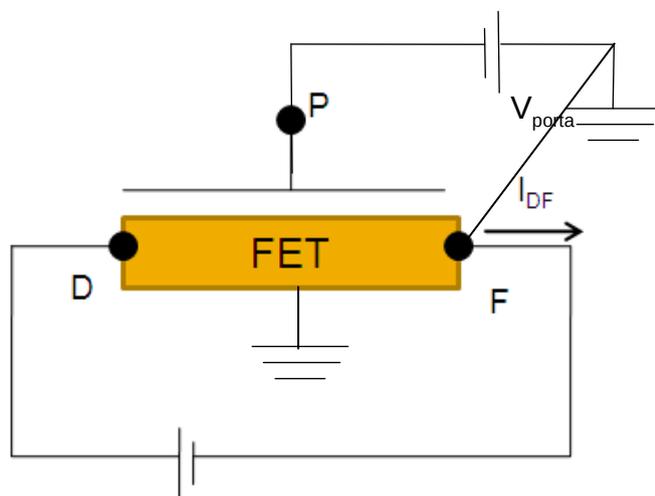
É como válvula num cano: controla a corrente *nos dois sentidos*.
No transistor, voltagem de controle = ajustar posição da válvula.





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

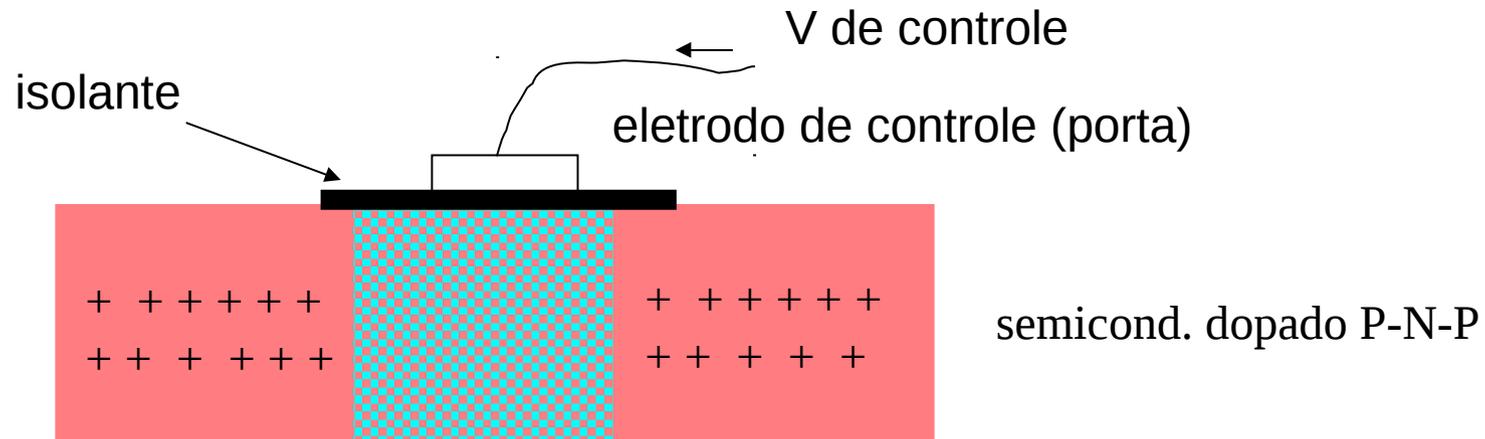
Porta: controla a corrente entre Fonte e Dreno



Transistor bipolar PNP ou NPN



Transistor FET – princípio básico



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

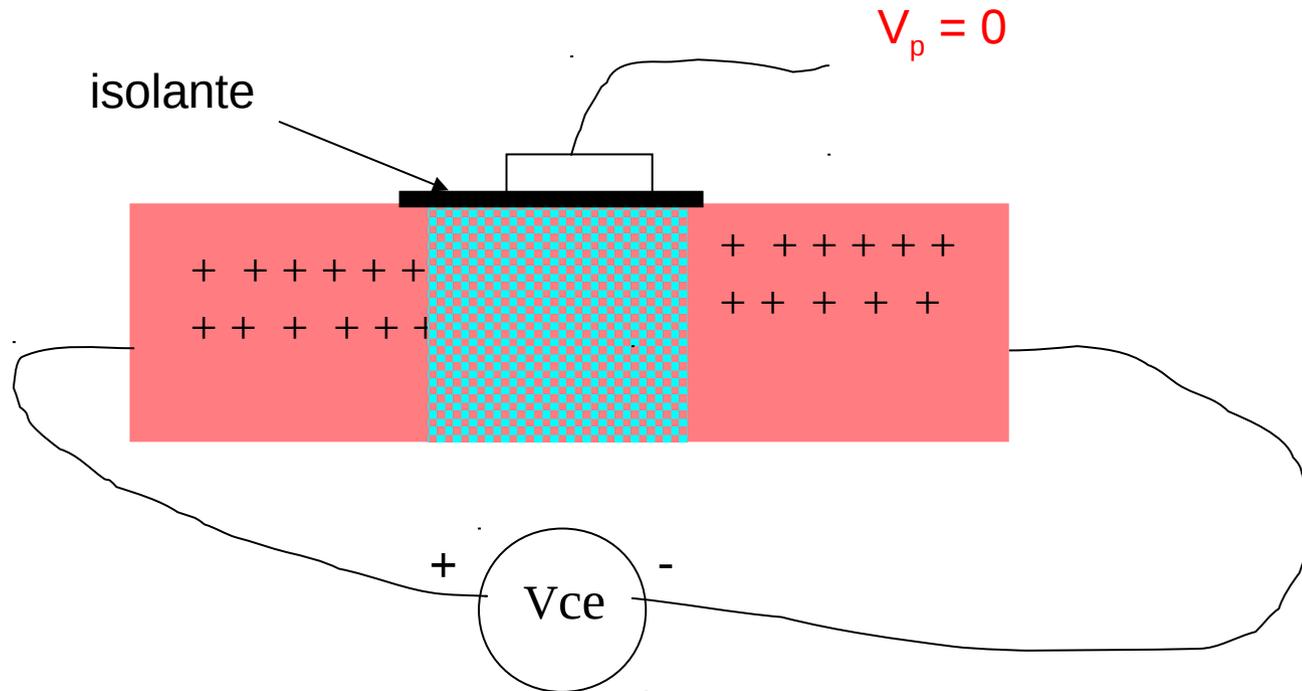
!! Devido à dupla junção, a ZD é bem grande



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

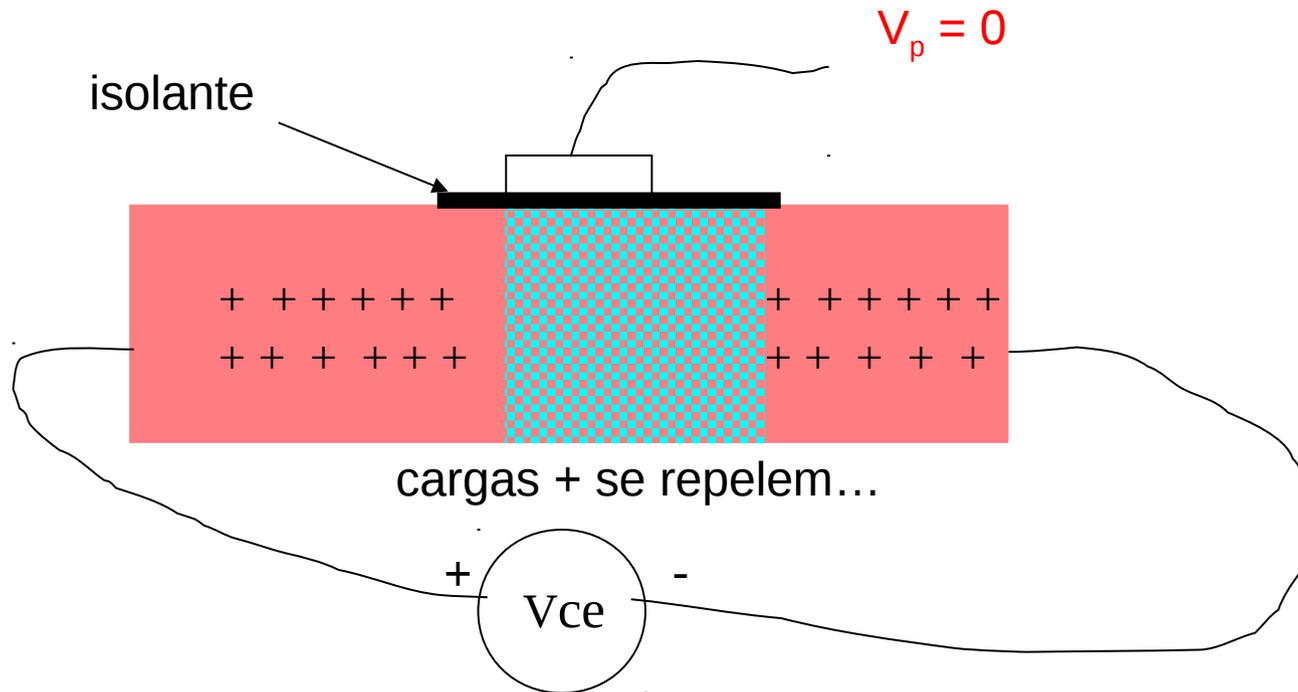


O que acontece se ligamos $V_{CE} > 0$?

- 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



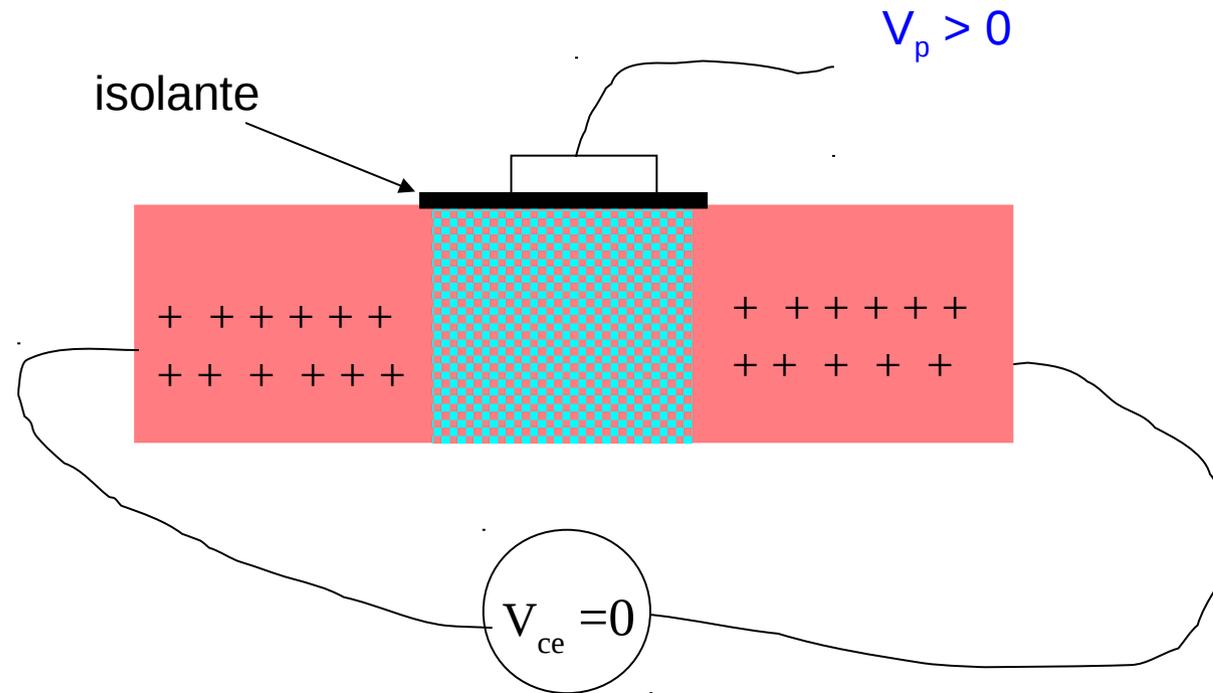
O que acontece se ligamos $V_{CE} > 0$?

- 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

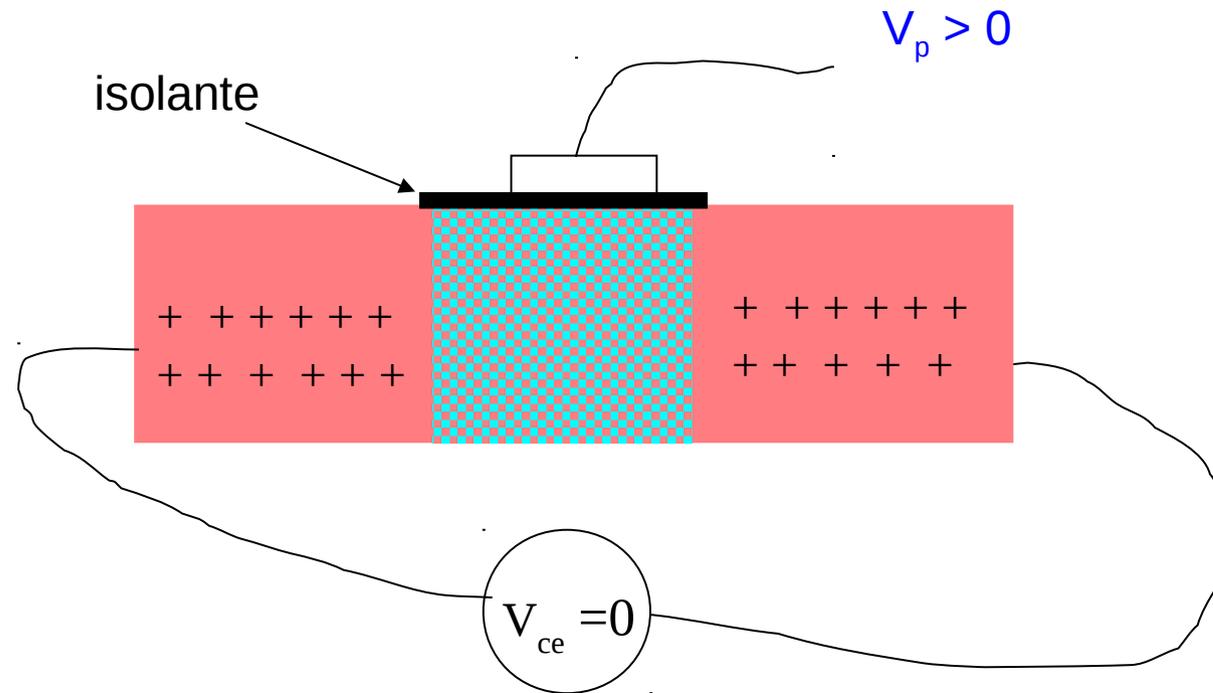


O que acontece se ligamos $V_p > 0$ (com $V_{CE} = 0$)?

- 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

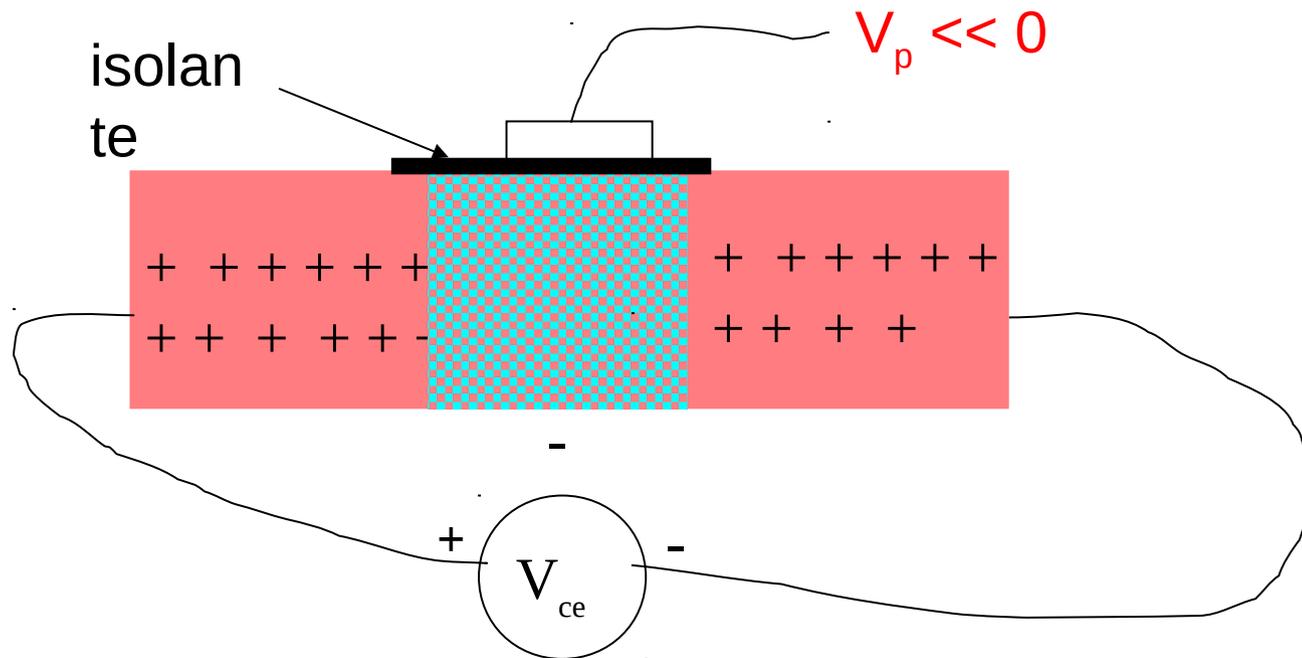


O que acontece se ligamos $V_p > 0$ (com $V_{CE} = 0$)?

- 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



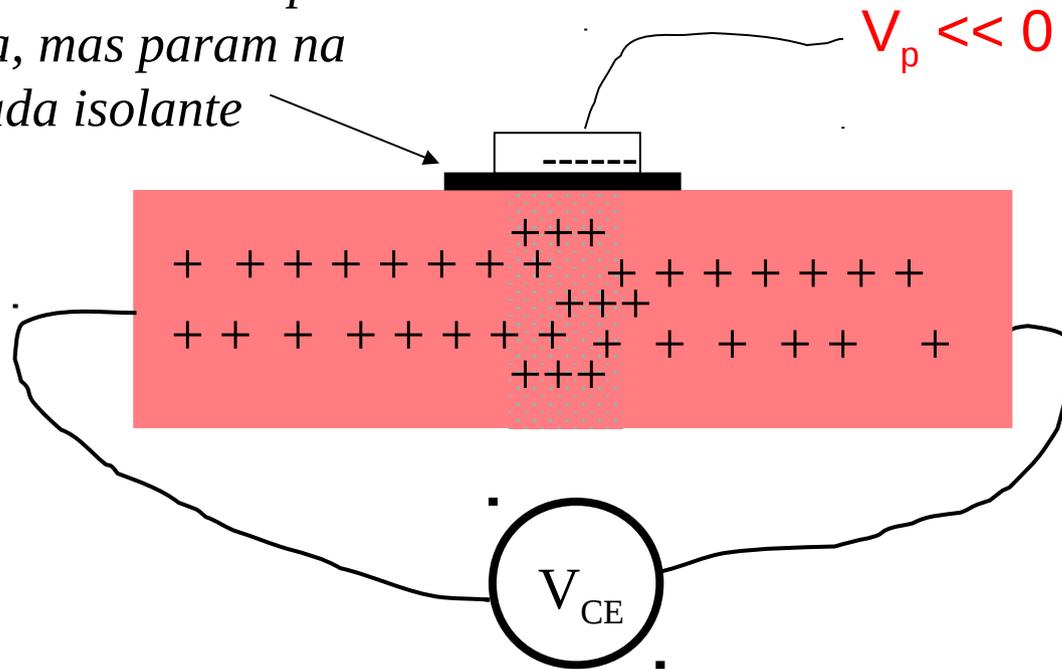
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- 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



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

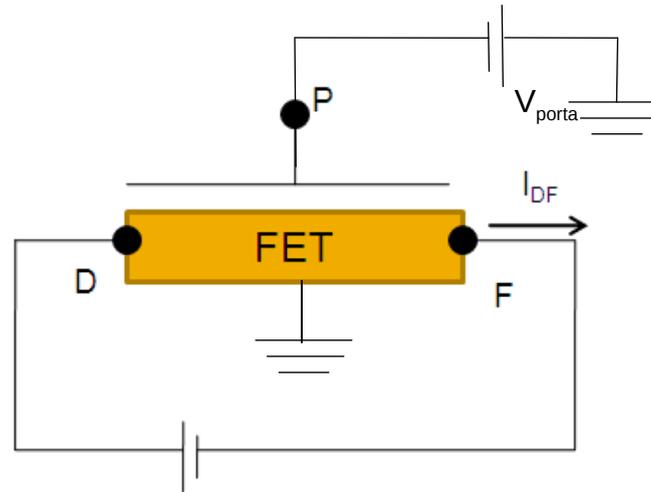
O que acontece se ligamos $V_p \ll 0$ e $V_{CE} \neq 0$?

- 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

Porta: controla a corrente entre Fonte e Dreno



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



The End...



The End...