



Universidade Federal do ABC

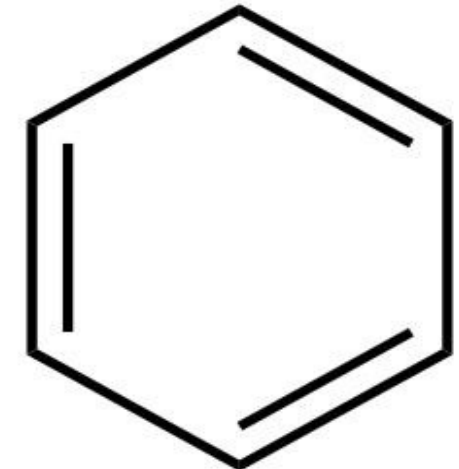
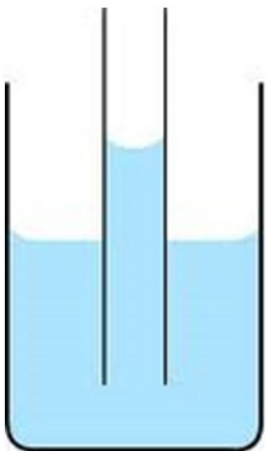
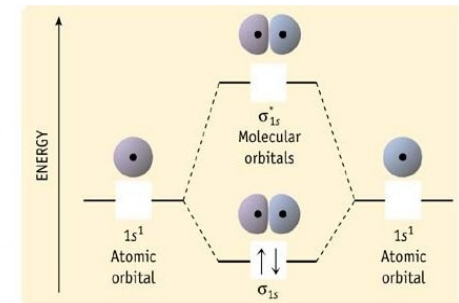
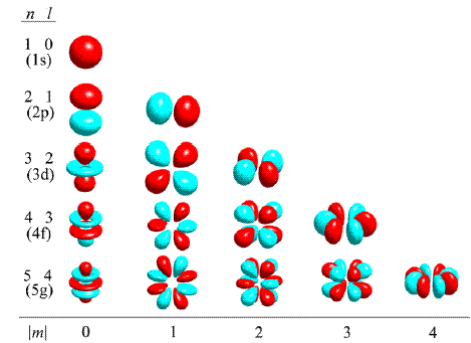
Interações Atômicas e Moleculares

10. Sólidos: Propriedades Elétricas

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/IAM.html>



Propriedades Elétricas dos Sólidos

Tomando como critério a condutividade de corrente elétrica, os sólidos podem ser classificados nos seguintes tipos:

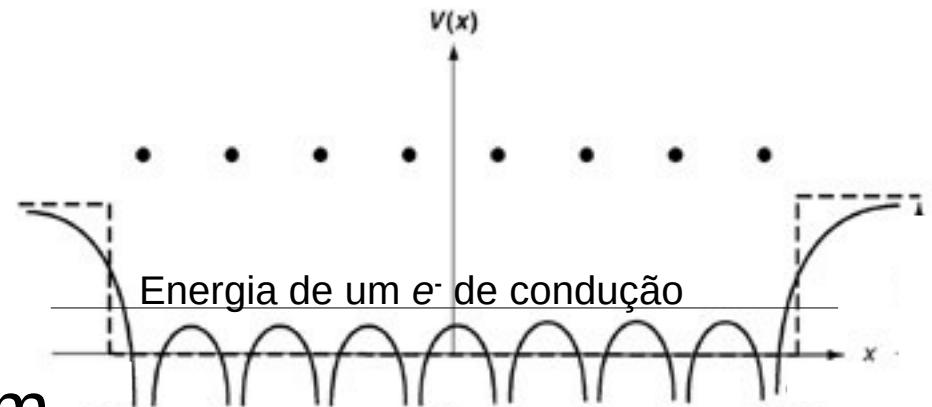
- Um **condutor** (metálico) é um material, cuja **condutividade diminui** (ou a resistividade aumenta), quando a **temperatura aumenta**.
- Num **semicondutor** a **condutividade aumenta**, quando a **temperatura aumenta**.
- Um **semicondutor** com **condutividade muito baixa** se chama **isolante**.
- Um **supercondutor** é um material com **resistividade zero**. Acontece apenas em **temperaturas** bem a **baixo** de 0 °C. O mesmo material é **condutor**, **semicondutor** ou **isolante** em temperaturas mais altas.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Como entender a condução elétrica?

Elétrons quase **livres** num **potencial periódico** devido aos **cátions** com paredes de potencial “impassáveis”.

Os **elétrons** de **valência** formam **orbitais delocalizados** pelo **material inteiro**.



Modelo simples: cadeia 1D de átomos (\Rightarrow método de Hückel)

6ª aula: $E_i = \alpha + 2\beta \cos 2i\pi/N$, $i = 1, \dots, N$,

onde α é a energia dos orbitais atômicos de valência do material, e β , a integral de ressonância para átomos vizinhos.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

$$E_i = \alpha + 2\beta \cos 2i\pi/N,$$

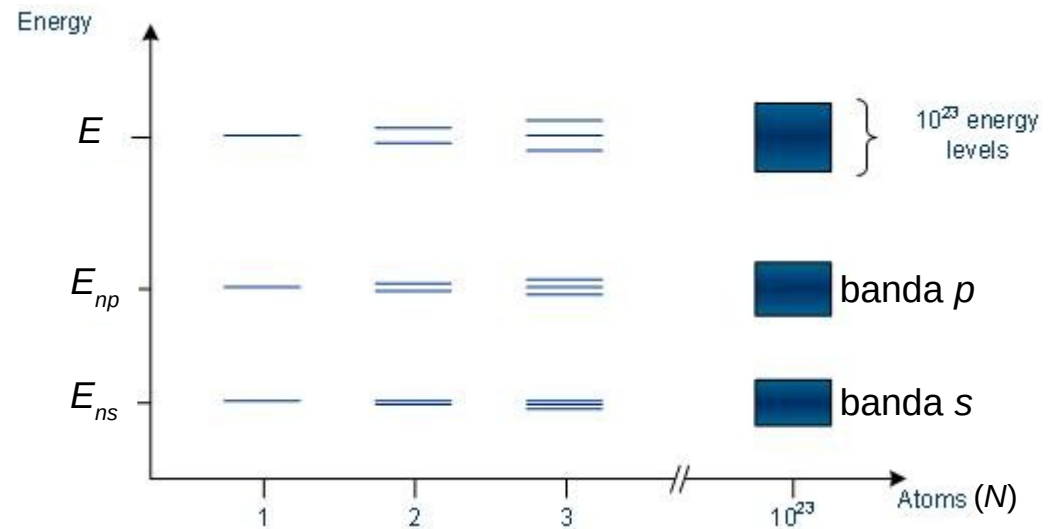
$$i = 1, \dots, N$$

=> N soluções
entre $\alpha + 2\beta$ e $\alpha - 2\beta$.

No caso de um corpo (fio)
macroscópico, N é tão
grande que temos
espaçamento "infinitamente fino" (zero).

=> **bandas de energia**

Bandas compostas de orbitais s são chamadas bandas s ,
aquelas compostas de orbitais p , bandas p , etc.

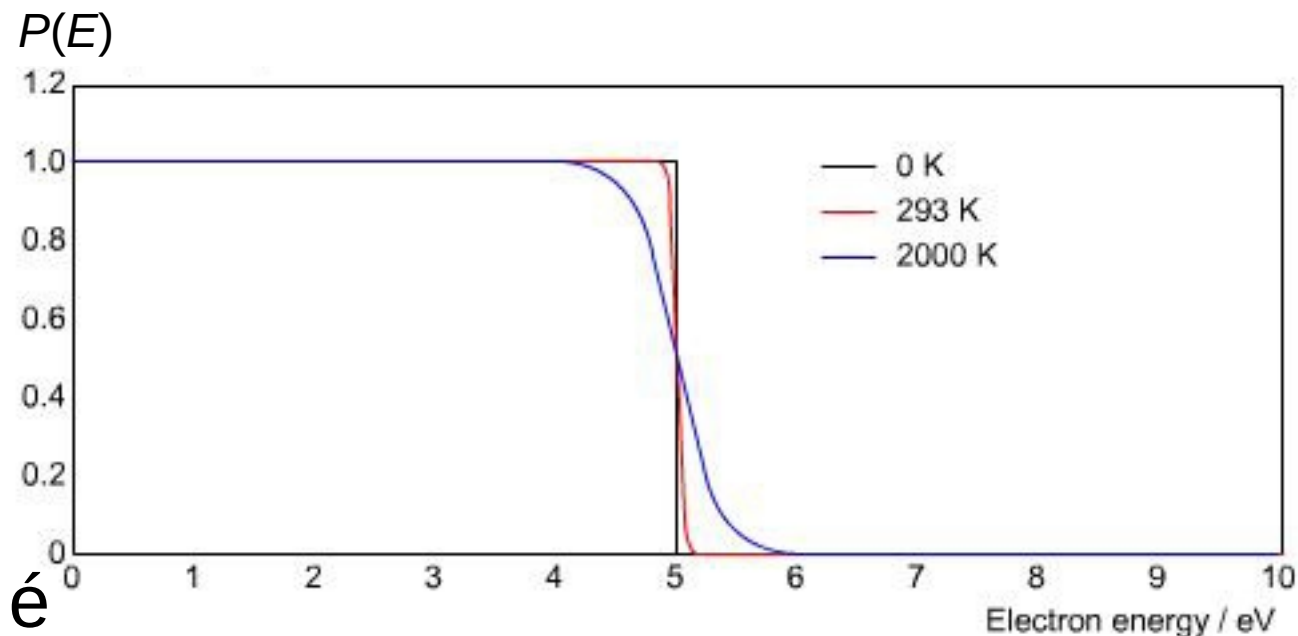


Propriedades Elétricas dos Sólidos

Distribuição de Fermi-Dirac

Quais níveis nestas bandas são ocupados por elétrons?

A distribuição de energias de uma população de e^- (ou outros férmions) é



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

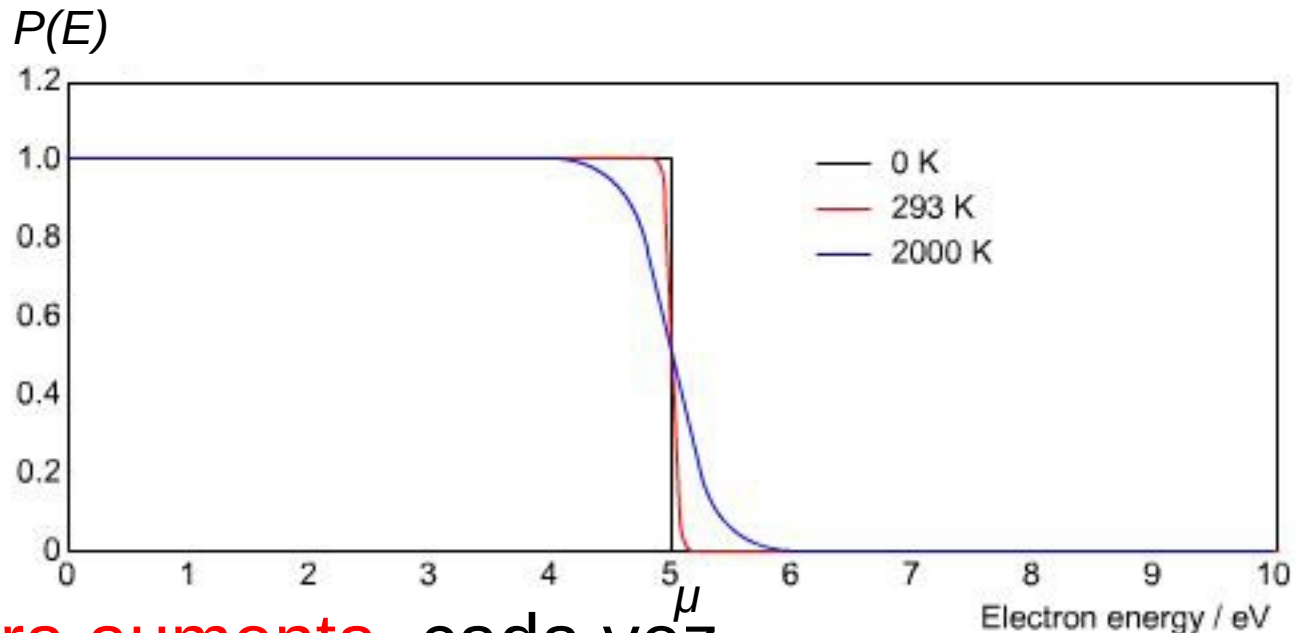
chamada **distribuição de Fermi-Dirac**, onde μ (ou E_F) é chamado potencial químico, ou, às vezes, **nível de Fermi**, energia para aquela $P(E)$ é de 50 % e pode ser interpretado como o **limite** entre níveis **desocupados** e **ocupados**.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Distribuição de Fermi-Dirac

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

Para $T \rightarrow 0$ K,
 $P(E)$ tende a uma
função retangular,
 $P(E) = 1$ p. $E < \mu$
 $P(E) = 0$ p. $E > \mu$



Quando a **temperatura aumenta**, cada vez **mais elétrons** são **excitados** para cima do nível de Fermi.

Para $E \gg \mu$, $P(E)$ tende à **distribuição de Boltzmann**,

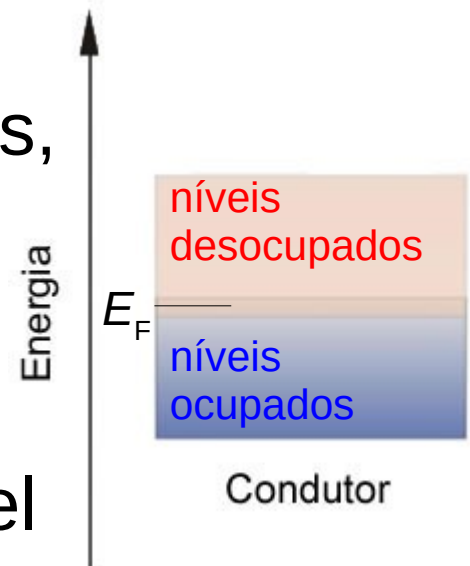
$$P(E) = e^{-(E-\mu)/kT}$$

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Em metais/**condutores**, a **banda de valência** é **parcialmente ocupada**, por ser composta por orbitais atômicos parcialmente ocupados, ou, por ser uma sobreposição de bandas.

=> Os **níveis desocupados** ficam **imediatamente** a cima dos **ocupados**, e é muito **fácil excitar** um **elétron** de um nível ocupado para um nível desocupado.

=> **elétrons** quase **livres** e **condutividade alta**



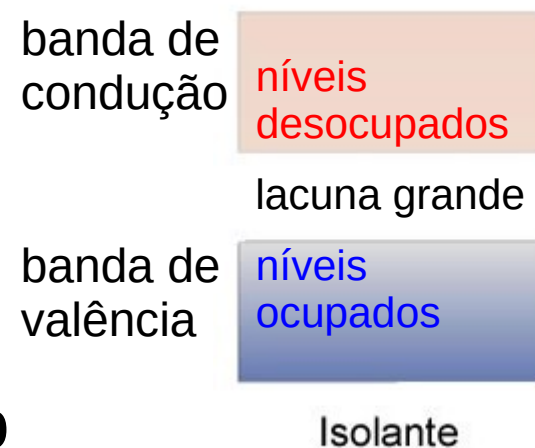
A **resistividade** se dá por **choques** com os **átomos** (cátions) da rede, que vibram mais e apresentam **seções de choque maiores** em **temperaturas altas**, o que explica o **aumento da resistividade** com a **temperatura**.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Em **semicondutores**, a **banda de valência** é **cheia** e a **próxima**, a **de condução**, **vazia**.

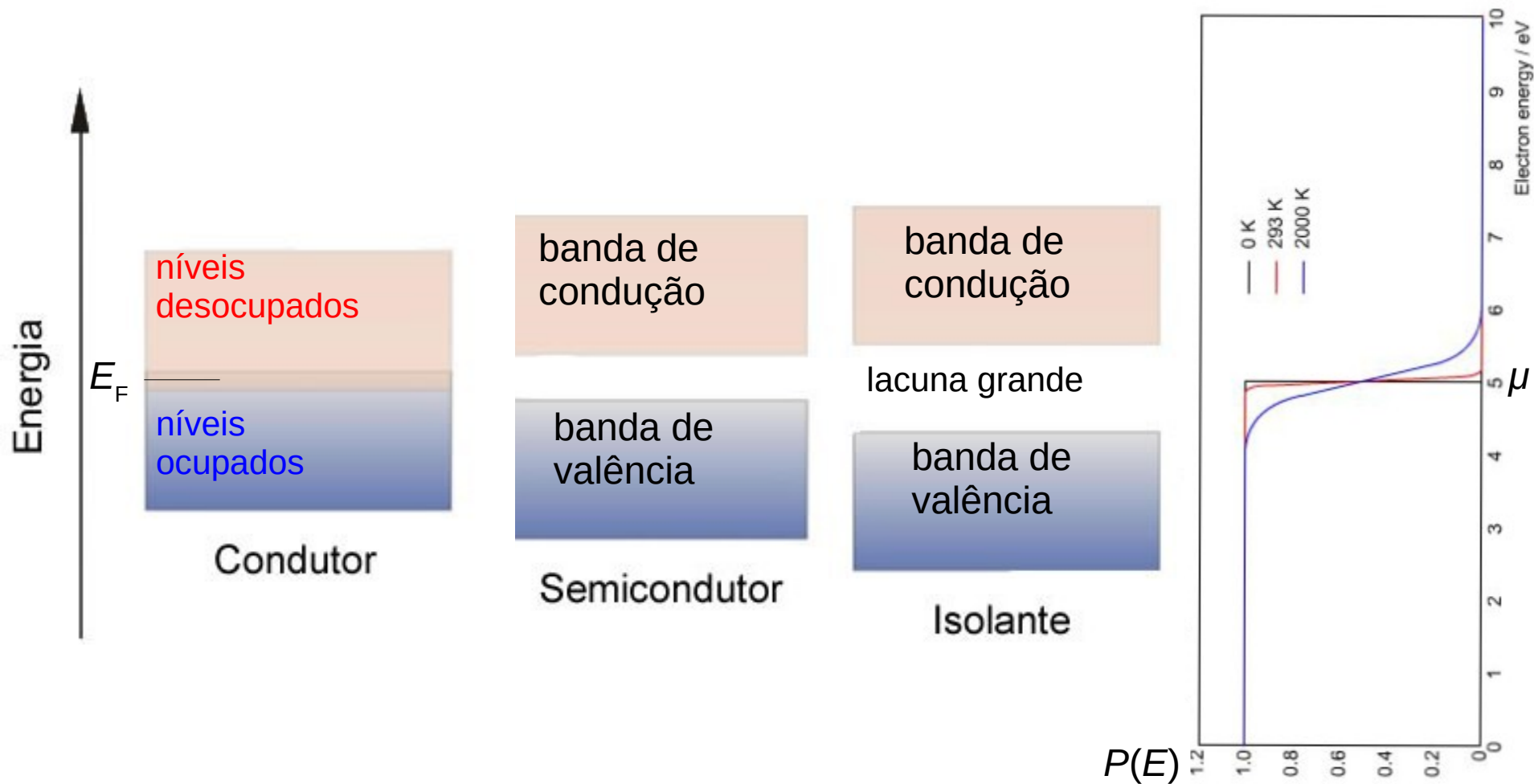
Mas se a **lacuna** (ingl. *gap*) entre as duas bandas **não** é muito **grande**, i. e. ≤ 2 eV, um número razoável de **elétrons** é **excitado** da b. d. v. pra b. d. c. em temperatura ambiente, e o material consegue **conduzir eletricidade** (embora menos bem que um condutor). Quanto **maior** é a **temperatura**, tanto **mais elétrons** são **excitados**, tanto **maior** é a **condutividade** => semicondutor
exemplos: silício, germânio

Se a **lacuna** é **grande**, **poucos elétrons** são **excitados** e temos um **isolante**.



Propriedades Elétricas dos Sólidos

Comparando as posições das bandas com o nível de Fermi



Propriedades Elétricas dos Sólidos

Valores típicos de **resistividades** são

- **condutores**: $10^{-8} \Omega \cdot m$
exemplos: cobre, alumínio, prata, ouro, magnésio, níquel, ferro, ...
- **semicondutores**: 10^{-4} a $10^5 \Omega \cdot m$
exemplos: silício, carbono, germânio, arsenieto de gálio (GaAs), ...
- **isolantes**: $10^{16} \Omega \cdot m$
exemplos: vidro, cerâmico, polímeros, ...



silício



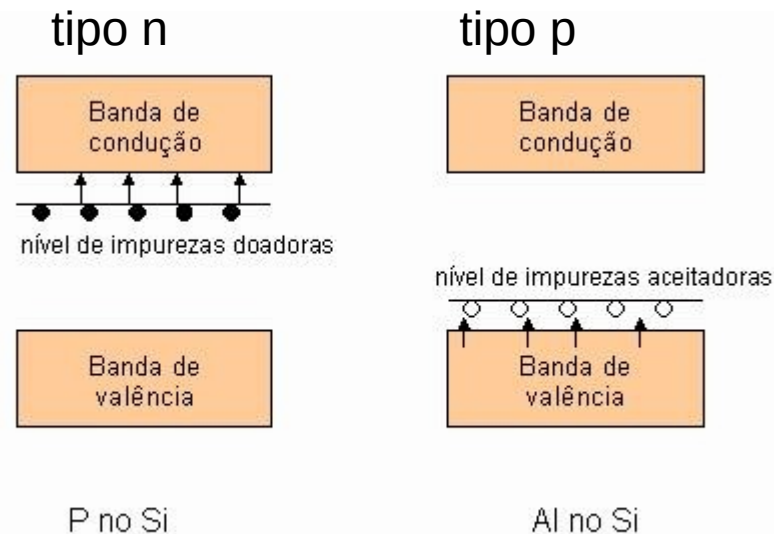
isolante de
cerâmico

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Semicondutores Dopados

Semicondutores (p. e. Si) com ~ 1 em cada 10^9 **átomos substituídos** por um **outro elemento** que tem

- **níveis** (parcialmente) **desocupados pouco a cima** da **banda de valência** (tipo p) ou
- **níveis** (parcialmente) **ocupados pouco a baixo** da **banda de condução** (tipo n).

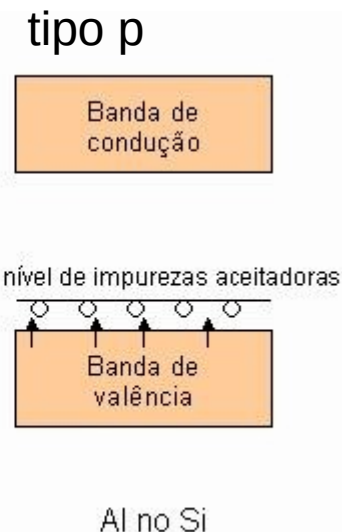


Propriedades Elétricas dos Sólidos

Semicondutores Dopados

Semicondução tipo p

Os **átomos dopantes** têm **níveis desocupados** **perto** das energias da **banda de valência** do semicondutor, às vezes chamados **banda de aceitação** ou **receptora**, que podem **fácilmente tirar elétrons** desta banda, assim deixando **buracos** nela, que se comportam como **cargas positivas** ($p = \text{positivo}$) **livres**, **aumentando a condutividade**.

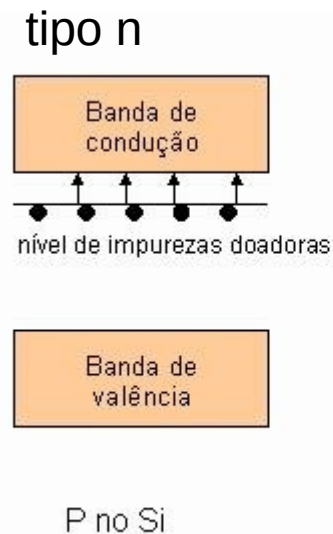


Propriedades Elétricas dos Sólidos

Semicondutores Dopados

Semicondução tipo n

Os **átomos dopantes** têm **níveis ocupados** **perto** das energias da **banda de condução** do semicondutor, às vezes chamados **banda doadora**, e podem **fácilmente doar elétrons** para esta banda, que assim se tornam **cargas negativas** (n = negativo) **livres, aumentando a condutividade**.



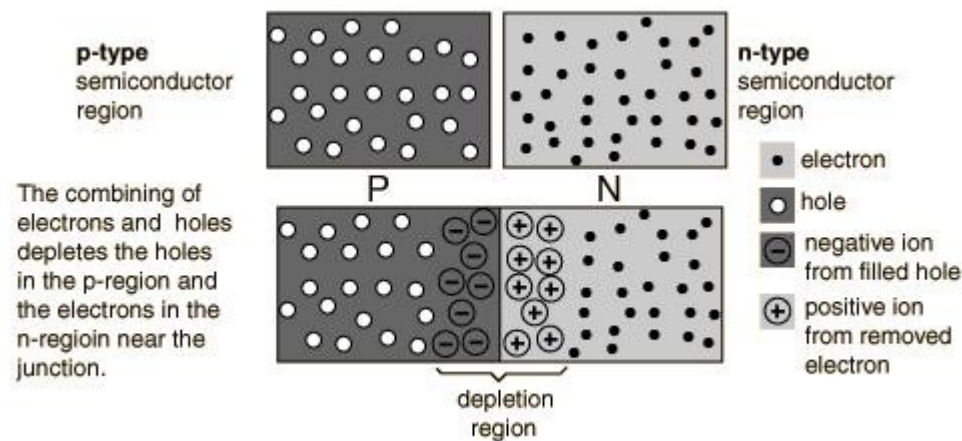
Propriedades Elétricas dos Sólidos

Junção p-n

- **Junção** entre um **semicondutor dopado tipo p**, e um tipo n.

- No semicondutor **tipo n** existem **elétrons livres** e no **tipo p**, **buracos livres**.

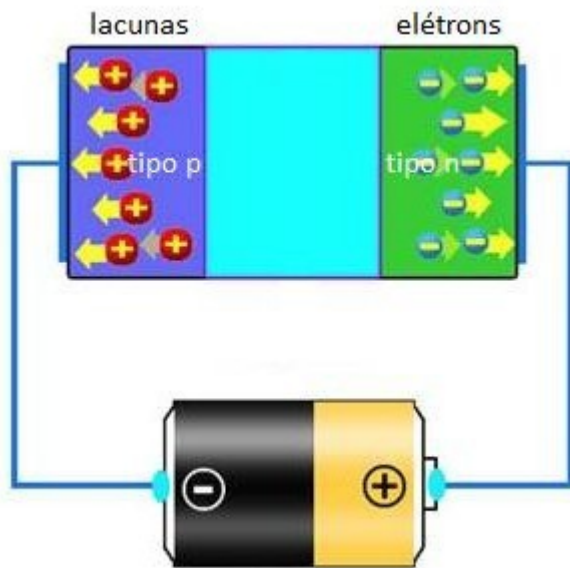
- Perto da junção, os **elétrons** do semicondutor tipo **n** “caem” nos **buracos** do semicondutor tipo **p**, resultando numa **região sem cargas negativas** ou **positivas livres**, chamada **zona de esgotamento** ou **região de depleção**, que **impede correntes elétricas** através da junção.



Propriedades Elétricas dos Sólidos

Junção p-n

Aplicando um potencial elétrico



A ligando o potencial **positivo** do lado do semiconductor dopado tipo **n**, e o potencial **negativo** do lado do tipo **p**, chamado **polarização inversa**:

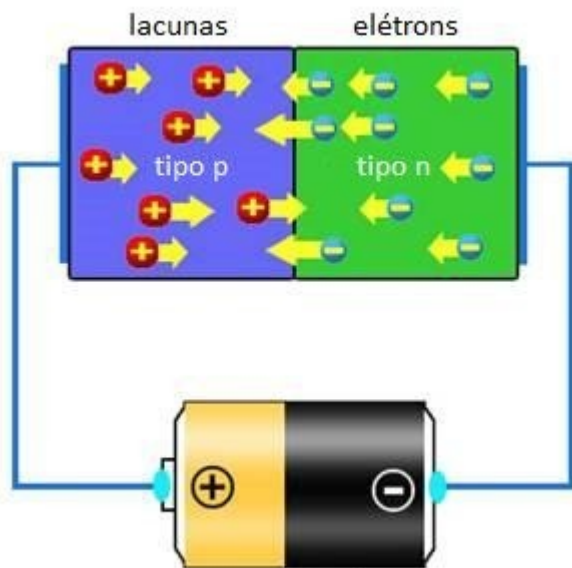
- Os **elétrons livres** no s.c. tipo **n** são **atraídos** para **longe** da **junção**, e os **buracos livres** também, **aumentando** a **zona de esgotamento**.

=> Corrente **não** poderá fluir através da junção **mesmo**.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Junção p-n

Aplicando um potencial elétrico



Com ligando o potencial **positivo** do lado do semicondutor dopado tipo **p**, e o potencial **negativo** do lado do tipo **n**, chamado **polarização direta**:

- Os **elétrons livres** no s.c. tipo **n** são **atraídos** rumo **junção**, e os **buracos livres** também, **diminuindo** a **zona de esgotamento**. Se o potencial aplicado for **alto** o suficiente ($\geq 0.5 \text{ V} = V_0$), a **zona de esgotamento some**.

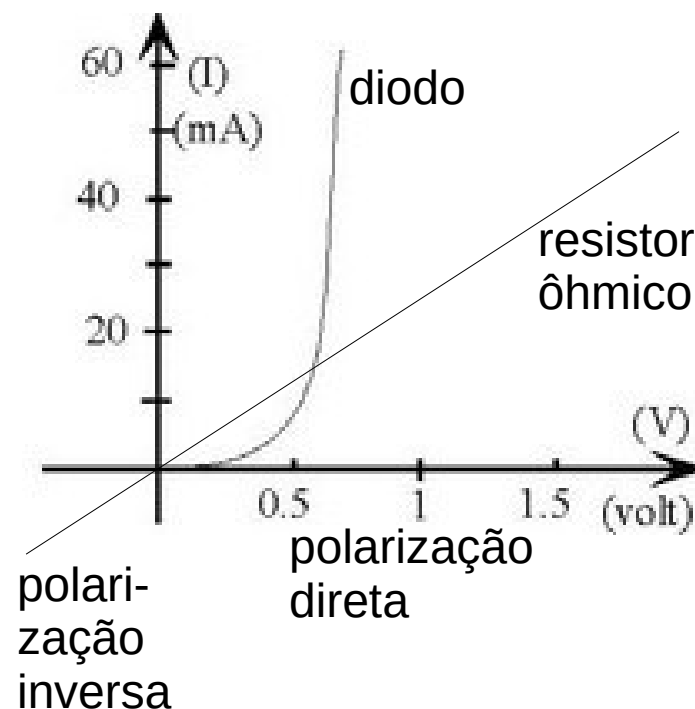
=> **Corrente** poderá fluir **através** da **junção** no sentido **do s.c. tipo p para o tipo n**.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Junção p-n

=> A junção age como um tipo de “**válvula**” para **corrente elétrica**, deixando **passar** corrente no sentido s.c. tipo **p** → s.c. tipo **n**, mas **não** no **sentido oposto**.

Um elemento destes dentro de um circuito elétrico se chama **diodo** (⎓) e é muito importante, p. e. em **computadores** (=> transistor).



Propriedades Elétricas dos Sólidos

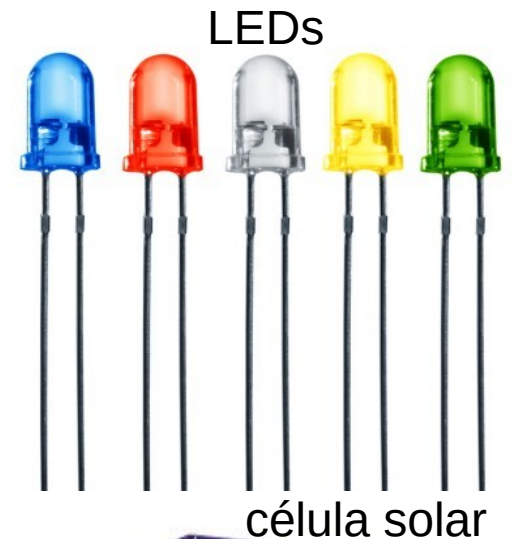
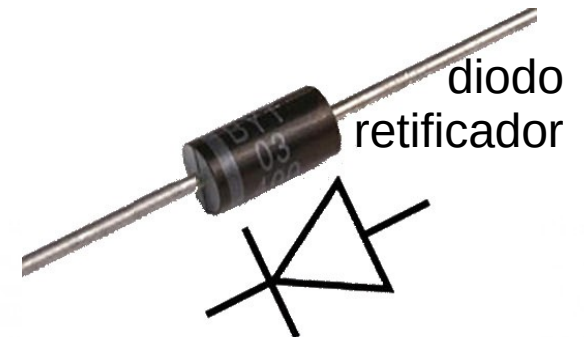
Diodos

Um diodo que é usado para este fim, deixar **corrente** passar apenas em **um sentido**, é chamado **diodo retificador**.

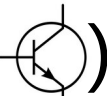
A “queda” dos elétrons nos buracos na junção **libera** muita **energia**, p. e. em forma térmica
=> **computadores** precisam de bons sistemas de **resfriamento**.

A energia também pode ser liberada como **fótons** (p. e. em s.c. dopados tipo GaAs)
=> usado como **luzes** em *displays* eletrônicos
=> **LEDs** (*light emitting diodes*)

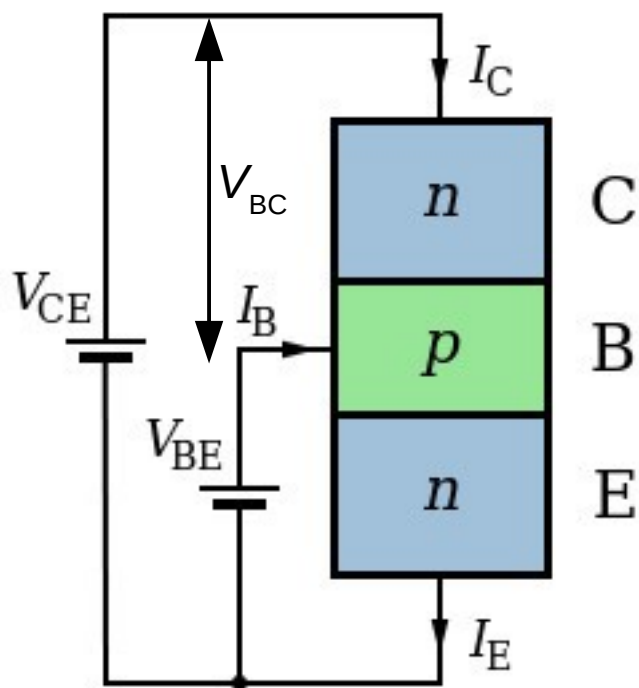
Uma **célula solar** é basicamente um LED inverso, **absorvendo fótons** e **produzindo energia elétrica**.



Propriedades Elétricas dos Sólidos

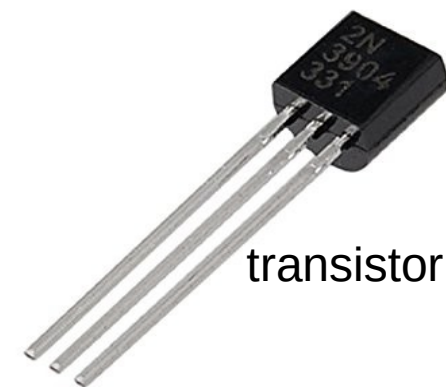
Transistores (símbolo )

exemplo: transistor n-p-n



Sequência s.c. tipo **n** - tipo **p** - tipo **n**, chamados **emissor**, **base** e **coletor**, a base não sendo muito maior que duas zonas de esgotamento.

Há **dois modos** de **operação** de um transistor, dependendo da função, que ele tem que fazer.

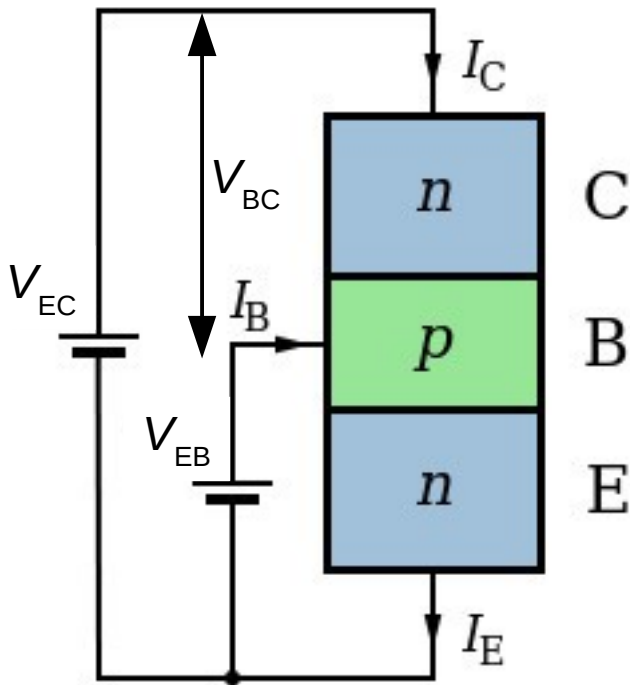


transistor

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Transistores

exemplo: transistor n-p-n



A V_{EB} perto do V_0 da junção EB,
 \Rightarrow a **zona de esgotamento** entre o **emissor** e a **base** é muito **pequena**.
 $\Rightarrow I_B$ pode **variar** muito,
assim como " R_{EB} " = V_{EB} / I_B .

Aplicando uma **tensão** $V_{EC} \gg V_{EB}$,
grande parte dos **elétrons** passando

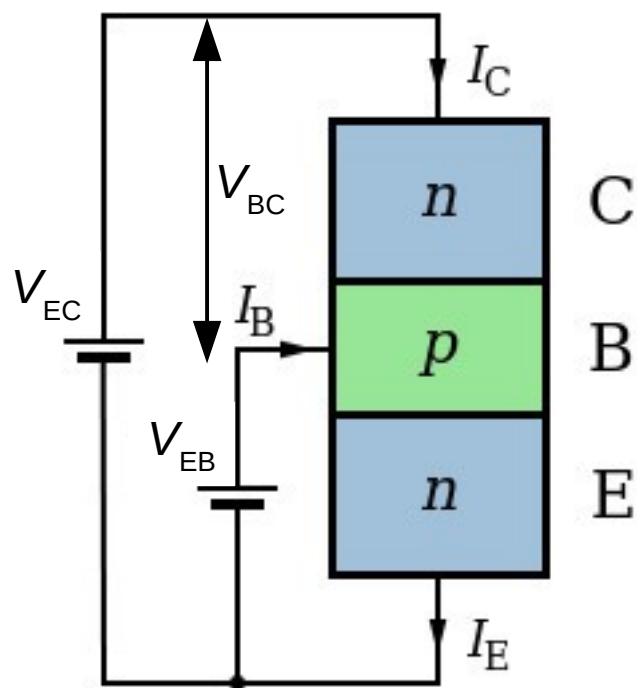
do **emissor** para a **base continua** para o **coletor**.

Eles conseguem passar a zona de esgotamento base-coletor, já que os buracos no s.c. tipo p perto do coletor já estão "tampados" por elétrons do coletor.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Transistores

exemplo: transistor n-p-n



A **resistência** que estes elétrons “sentem” é basicamente “ R_{EB} ”

$$\Rightarrow I_C = V_{EC} / R_{EB} = V_{EC} / V_{EB} \cdot I_B = \beta \cdot I_B,$$

onde $\beta = V_{EC} / V_{EB} \gg 1$ é chamado **ganho** do transistor.

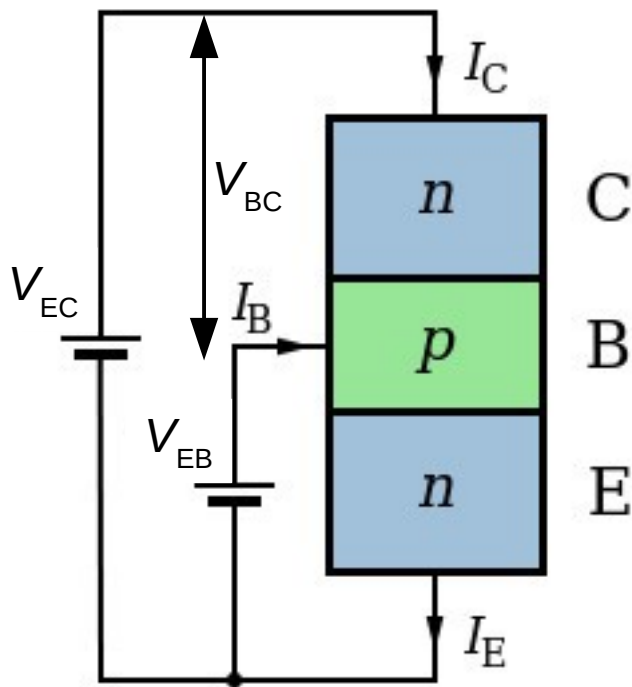
=> Neste modo, um transistor pode **amplificar** sinais.

Usado em **amplificadores**, etc.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Transistores

exemplo: transistor n-p-n



B V_{EB} é bem menor que V_0 (i. e. zero)

C $\Rightarrow I_E = I_B = I_C = 0$

ou bem maior que V_0

B $\Rightarrow "R_{EB} = 0"$

E $\Rightarrow I_C$ se torna muito grande, até alcançar um valor de **saturação**, dado pelo "aparelho" ligado na saída do coletor.

\Rightarrow **Variando** V_{EB} , o transistor pode ser usado como um **interruptor**.

Usado em **circuitos lógicos**, *chips*, **computadores**, etc.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Transistores

Existem também transistores tipo **p-n-p**, naqueles a base é tipo n, e o emissor e o coletor são tipo p.

Estes funcionam da mesma maneira que os n-p-n, invertendo os sinais dos potenciais e correntes envolvidos, trocando elétrons por buracos, etc.

Bom exercício: Reflita em detalhes como os transistores p-n-p funcionam.

Propriedades Elétricas dos Sólidos

Supercondutores

Supercondutores são materiais com **resistividade zero**.

Eles têm esta propriedade só **a baixo** de uma certa temperatura, a **temperatura crítica** T_c , normalmente da ordem de 20 K.

A temperatura crítica mais alta já alcançada é de 203 K (em 2015).

Acima desta **temperatura** o material **não necessariamente** é um bom **condutor**.

Muitos supercondutores “de alta temperatura” ($T_c > 30$ K) são materiais cerâmicos, ou seja, isolantes, em temperaturas ambientes.

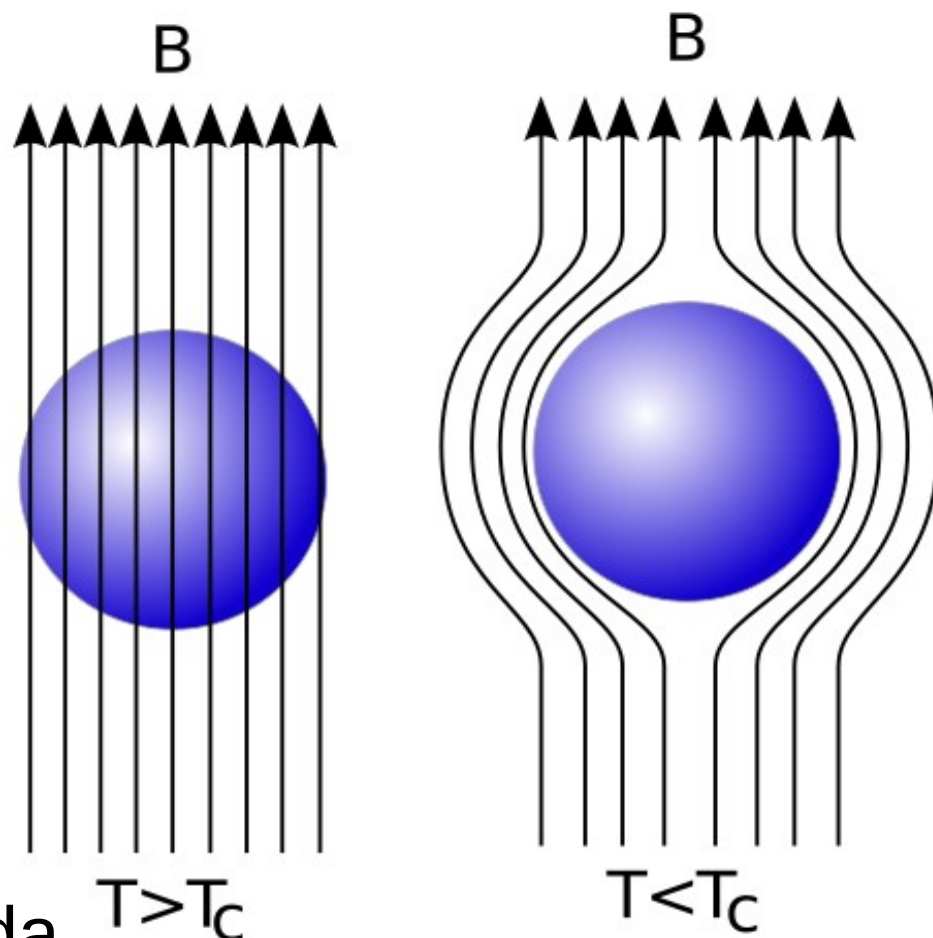
Propriedades Elétricas dos Sólidos

Supercondutores

Aplicando um **campo magnético**, o campo no **interior** do supercondutor é **zero**, o campo é “expulso” do supercondutor.

=> Efeito Meissner

Na verdade, o campo externo consegue entrar um pouco, até uma profundidade chamada parâmetro de penetração de London λ , na maioria dos supercondutores da ordem de 100 nm



Propriedades Elétricas dos Sólidos

Supercondutores

Aplicando um **campo magnético**, T_c **diminui**.

A cima de um certo valor do campo, o campo crítico B_c , a **supercondutividade não ocorre mais**.





Universidade Federal do ABC

Interações Atômicas e Moleculares

FIM PRA HOJE

