


Livro Texto: Ciência e Engenharia de
Materiais. Uma Introdução
Callister, 5^a. edição



Propriedades Elétricas

Cap. 19



Condutividade Elétrica

- A **condutividade elétrica** (σ) dos materiais é uma propriedade importante que permite classificar os materiais de engenharia como:
- Condutores - $\rho \approx 1,6 \cdot 10^{-8}$ a $1,4 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$
- Semicondutores - $\rho \approx 10^{-4}$ a $10^6 \Omega \cdot m$
- Isolantes - $\rho \approx 10^7$ a $10^{18} \Omega \cdot m$

Onde $\rho = 1/\sigma$ é a resistividade elétrica.

Lei de Ohm

V - *voltagem entre terminais separados por distância l*

$$V = RI$$

R - *resistência elétrica*
 I - *corrente elétrica que atravessa uma seção transversal de área A*

$$J = \sigma E$$

onde

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

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$E = V/l$ – *campo elétrico*

ρ - *resistividade elétrica*

$J = I/A$ – *densidade de corrente*

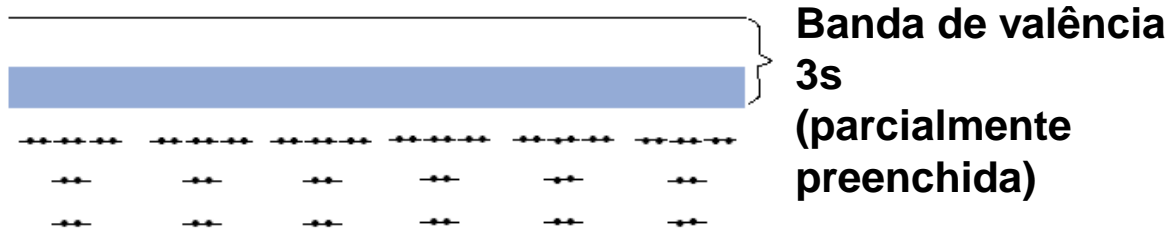
σ - *condutividade elétrica*

Bandas em Sólidos

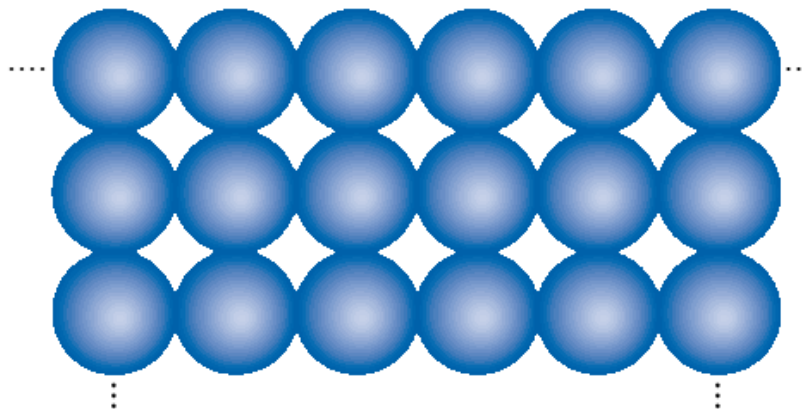
Origem

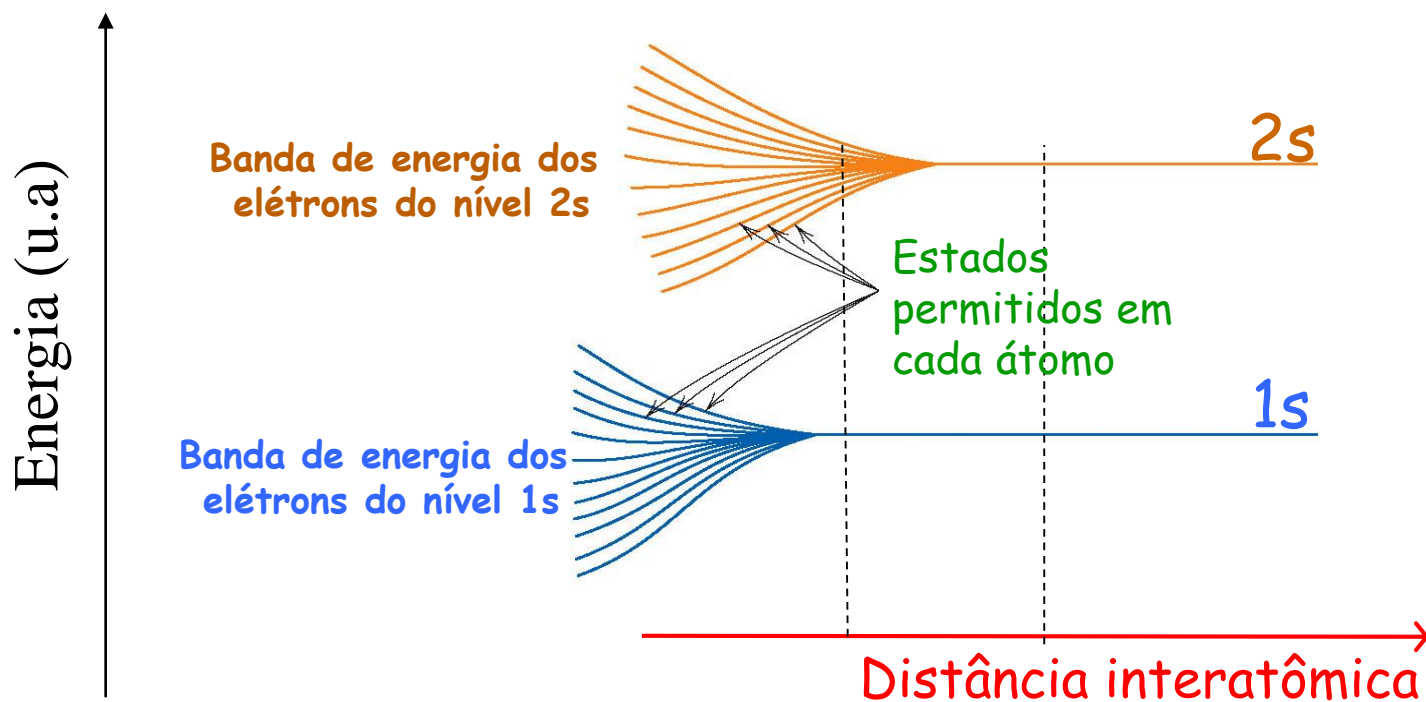
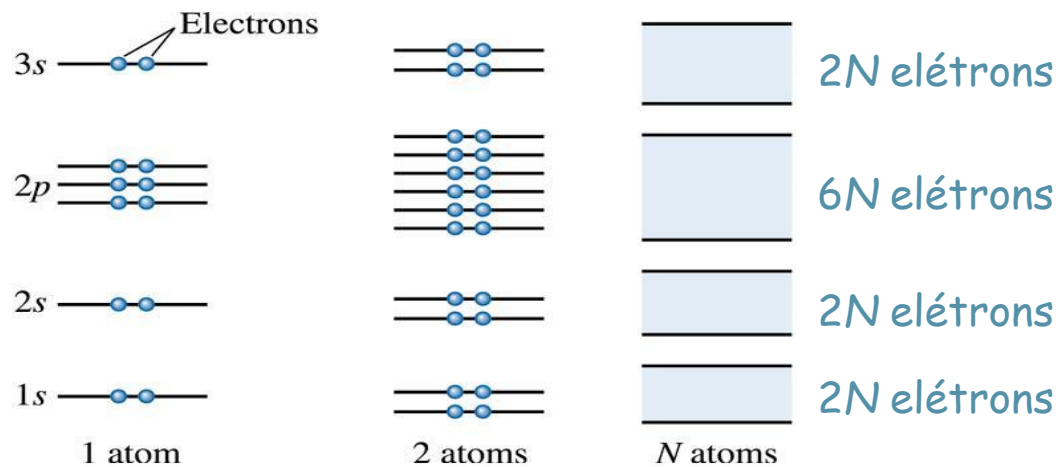
Átomo de sódio isolado

- $3s$
- $2p$
- $2s$
- $1s$

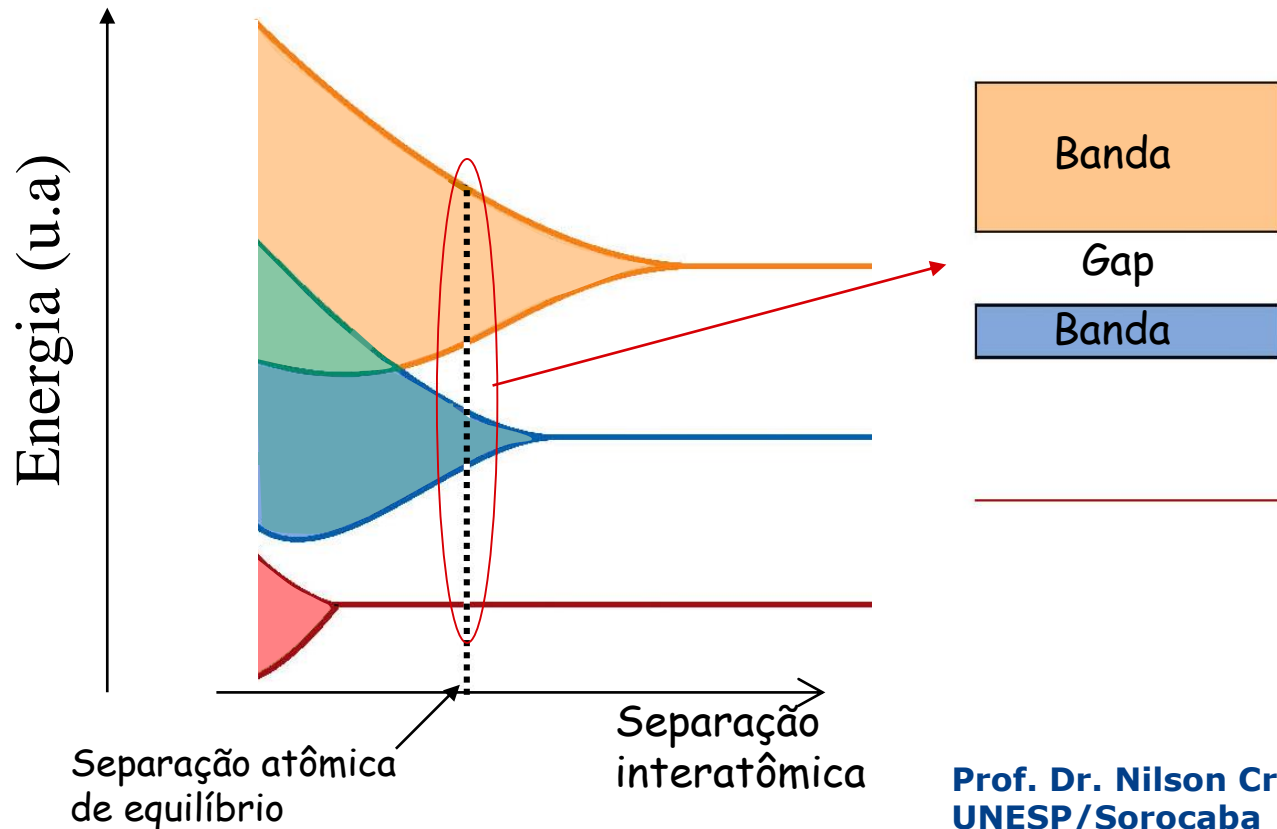


Sódio sólido





Nas condições de equilíbrio, pode não ocorrer a formação de bandas para subcamadas próximas ao núcleo.



Bandas em Sólidos

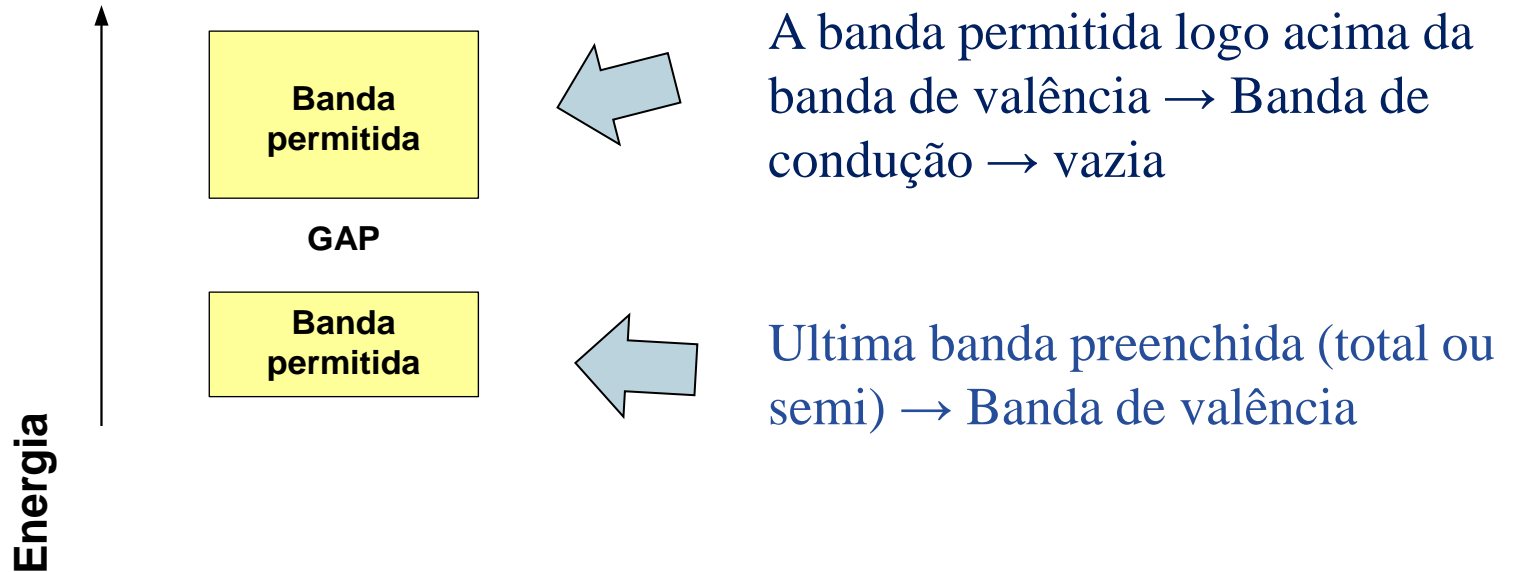
Esquema

- Átomos isolados têm níveis de energia discretos.
- Aproxima-se os átomos → superposição dos níveis de energia de cada um.
- Existirão faixas de energia possíveis aos elétrons - **BANDAS PERMITIDAS**
- Também existirão faixas de energia que não são possíveis de ocupação por elétrons – **GAP = Bandas Proibidas**

Energia

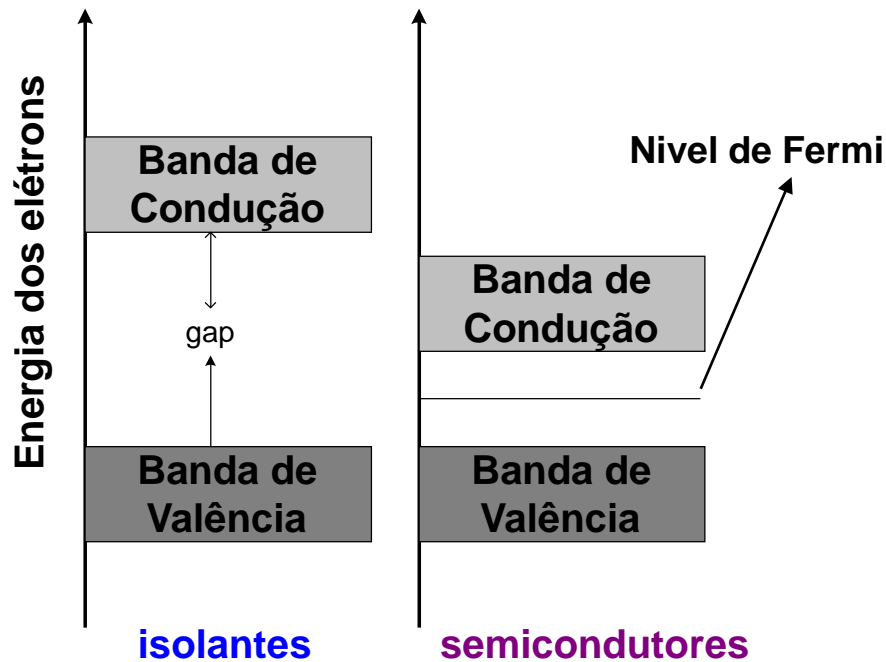


Bandas em Sólidos – 0 K



Estrutura de banda >>> Cálculo!!!!

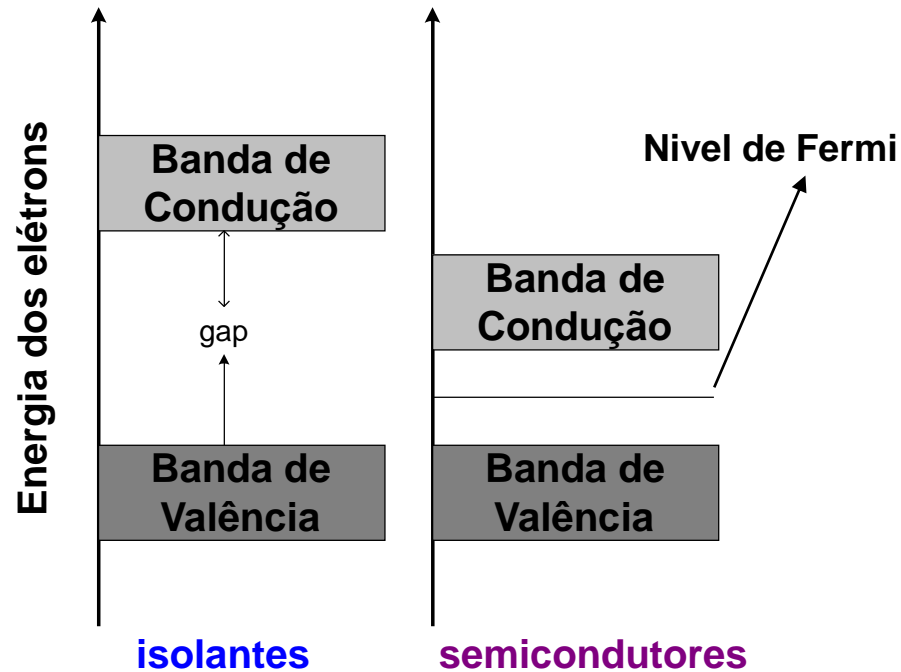
Estrutura de Bandas em Isolantes e Semicondutores



❖ **Isolantes** - gap muito grande; em temperaturas “normais” nenhum elétron consegue passar da banda de valência para de condução.

❖ **Semicondutores** – o gap não é tão grande; uma fração de elétrons pode passar para a banda de condução por ativação térmica.

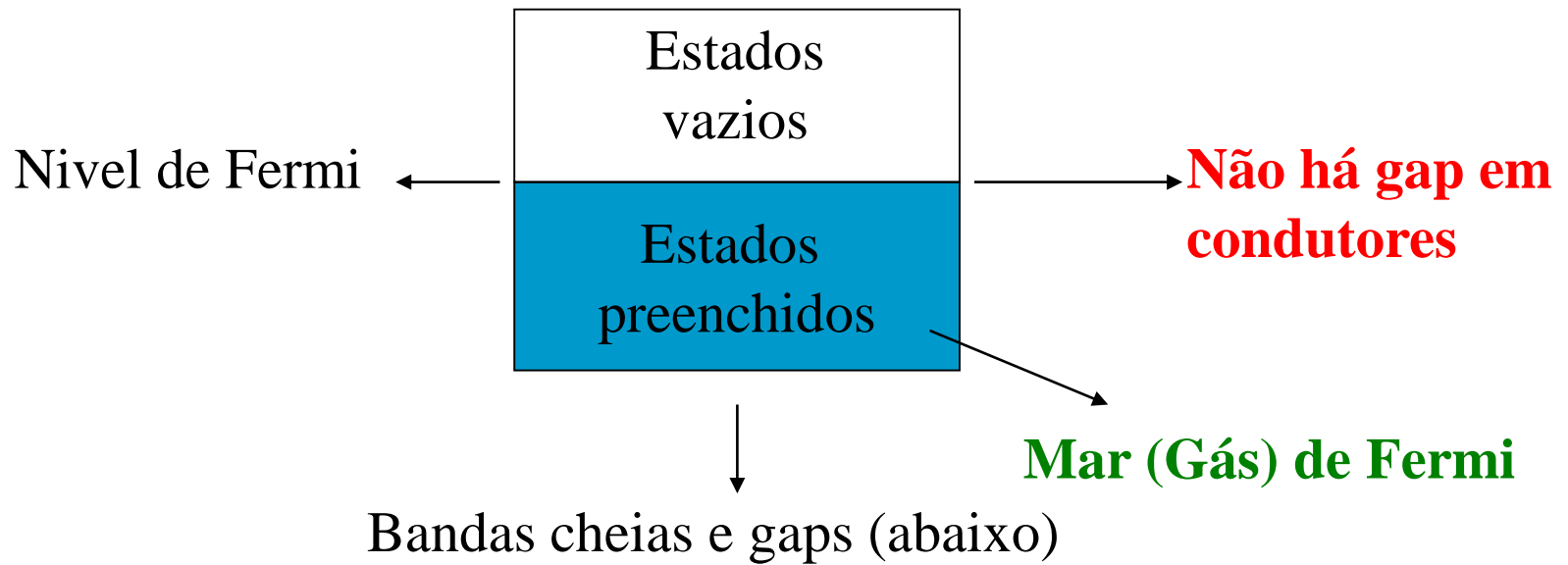
Isolantes e Semicondutores – 0 K



Nível de Fermi (E_F) é o valor máximo de energia de ocupação de estados eletrônicos na temperatura zero absoluto (0 K)

Em 0 K:
banda de valência cheia
banda de condução vazia

Bandas em Condutores



Corresponde à superposição das bandas ou banda de valência semi-preenchida.

Distribuição de Fermi Dirac

Comportamento térmico
dos elétrons

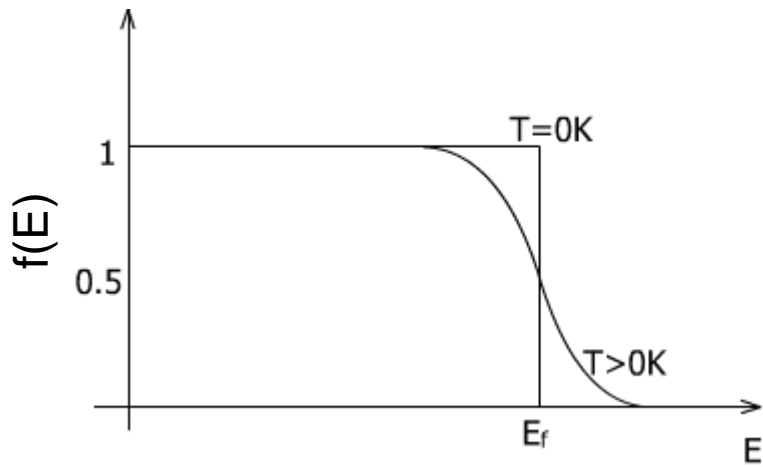


Teoria de Banda → movimentação de elétrons só é possível em bandas parcialmente preenchidas ou vazias

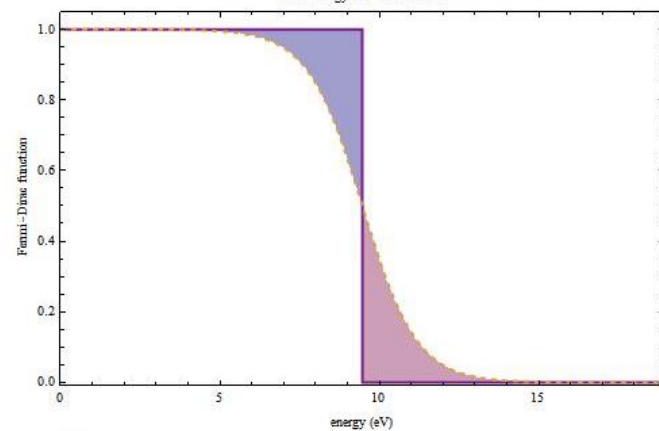
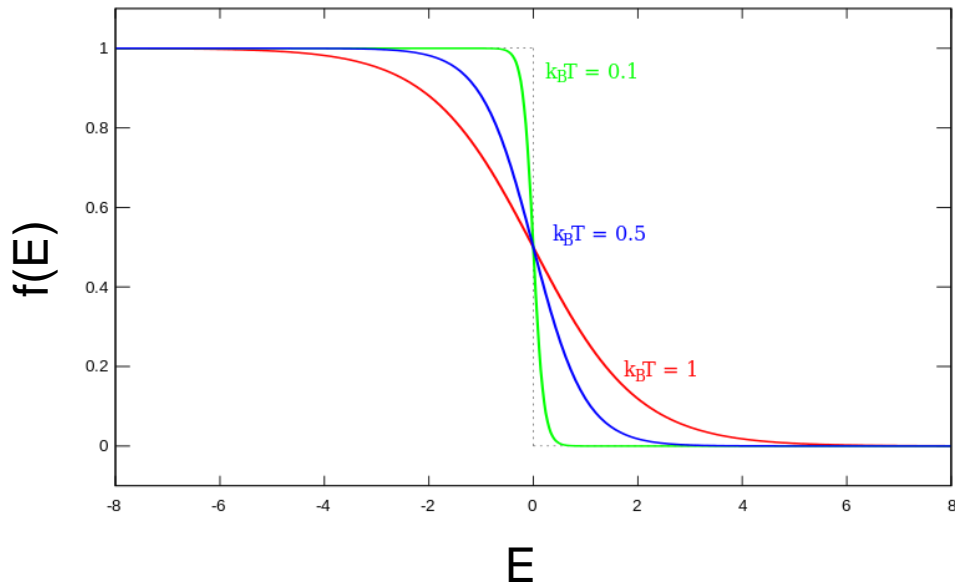
A função probabilidade de Fermi $f(E)$ descreve o comportamento térmico de elétrons nas bandas:

$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{E - E_F}{k_B T} + 1}$$

Movimentação
↓
Aumento de temperatura ou aplicação de campo elétrico.
↓
Aumento de energia



$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) + 1}$$





Condução Eletrônica e Iônica

- A corrente elétrica é consequência da movimentação de cargas elétricas na presença de campo elétrico;
- Movimento de elétrons (metais e semicondutores) e buracos (semicondutores) → **condução eletrônica**
- Movimento de íons (materiais iônicos – isolantes) → **condução iônica**



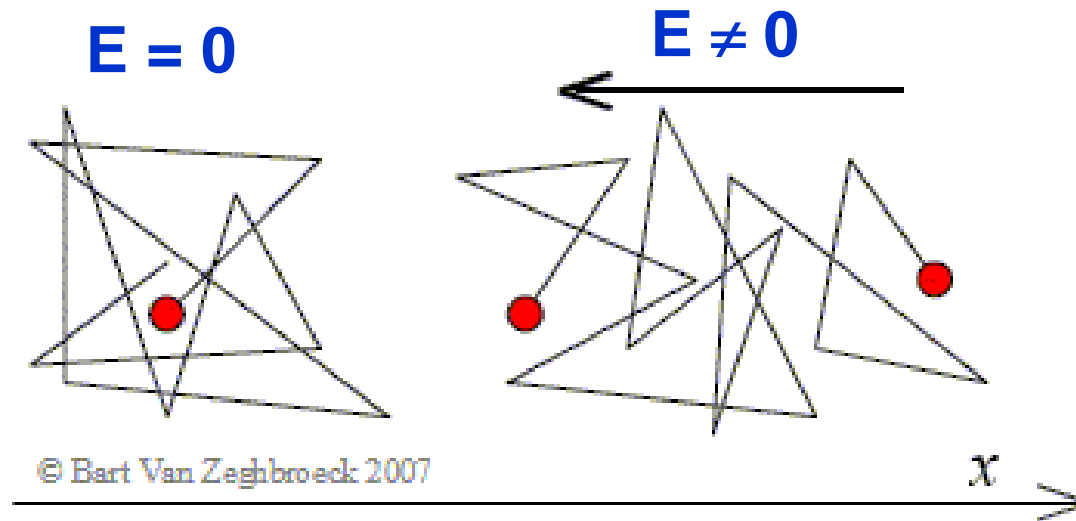
Condução e Energia de Fermi

- A condução somente ocorre quando há estados eletrônicos vazios disponíveis e próximos.
- Para semicondutores, a condução se dá:
 - Na banda de condução: por elétrons (acima de E_F)
 - Na banda de valência: por buracos (abaixo de E_F)
- Para condutores a condução se dá por elétrons com energia acima de E_F
- Para isolantes, a quantidade de elétrons na banda de condução é ~ 0 . Neste caso a condução é prioritariamente do tipo iônica

Velocidade de arraste - v_d

Mobilidade - μ

- Campo elétrico (\mathbf{E}) causa a aceleração de elétrons na direção oposta a \mathbf{E} e de buracos na direção de \mathbf{E} . A velocidade das cargas é a velocidade de arraste v_d (drift) :





Mobilidade

- μ é a **mobilidade**;
- na banda de condução – elétrons (carga negativa - μ_n);
- na banda de valência - buracos (carga positiva - μ_p);
- no condutor (somente carga negativa - μ_n)

$$v_d = \mu E$$

- v_d é a **velocidade de arraste das cargas**
- E é o **campo elétrico**

Transporte de cargas



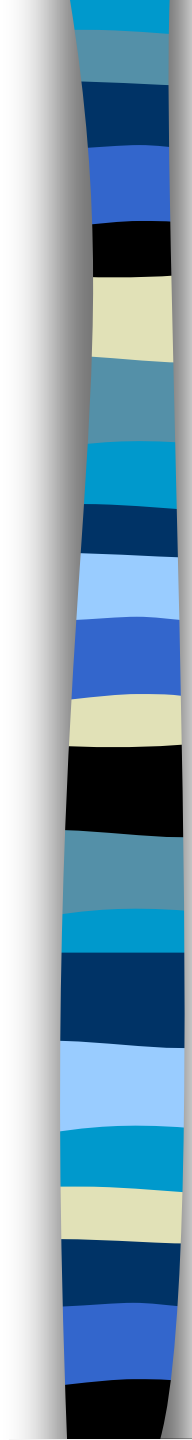
*Cálculo da
Condutividade Elétrica*

Definição de densidade de corrente - J

- É a corrente elétrica por unidade de área que atravessa um material. A superfície plana que delimita esta área é perpendicular à direção do fluxo da corrente: $J = I/A$
- Por definição:

$$J = n |q| v_d$$

- n é a densidade de portadores [m^{-3}].
- $|q|$ é o módulo da carga do portador [C]
- v_d é a velocidade de arraste [m/s]

- 
- **Semicondutores e Isolantes têm portadores de carga positivos e negativos**
 - **Elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência.**
 - **Metais possuem somente portadores negativos**

$$\mathbf{J} = n_n |\mathbf{e}| \mathbf{v}_d^n + n_p |\mathbf{e}| \mathbf{v}_d^p$$

Cálculo da Condutividade Elétrica

- A densidade de corrente \mathbf{J} é :

$$\mathbf{J} = n_n |e| \mathbf{v}_d^n + n_p |e| \mathbf{v}_d^p$$

Substituindo-se v_d :

$$J = n_n |e| \mu_n E + n_p |e| \mu_p E = (n_n |e| \mu_n + n_p |e| \mu_p) E$$

- Lei de Ohm: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$



$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n_n |e| \mu_n + n_p |e| \mu_p \quad \text{▪ semicondutores}$$

$$\sigma = \sigma_n = n_n |e| \mu_n \quad \text{▪ condutores}$$

$$\sigma = \sigma_{ions} = n_{ions} |Q_{ion}| \mu_{ion} \quad \text{▪ isolantes; Q carga}$$



Questão 1

- Como a estrutura eletrônica de um átomo difere daquela exibida por um material sólido?



Questão 2

- Em termos de estrutura de banda de energia eletrônica, discutir as razões para as diferenças que existem entre as condutividades elétricas dos metais, dos semicondutores e dos isolantes.



Questão 3

- (a) Calcular a condutividade elétrica de uma amostra de silício com diâmetro de 5,1 mm e comprimento de 51 mm, através da qual passa uma corrente de 0,1 A em uma direção axial. Uma voltagem de 12,5 V é medida entre duas sondas que estão separadas por uma distância de 38 mm.
- (b) Calcular a resistência ao longo de toda a extensão de 51 mm da amostra.



Questão 4

- Um fio de Al com 10 m de comprimento deve experimentar uma queda de voltagem de menos do que 1,0 V quando uma corrente de 5 A passa através dele. Considerando que a condutividade elétrica do Al em temperatura ambiente é $3,8 \times 10^7 \text{ } (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, calcular o diâmetro mínimo que este fio deve possuir.