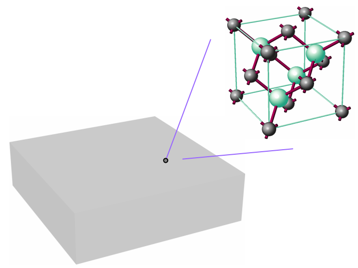
Unidade 3
Estado Sólido



Propriedades Elétricas

(cap. 42 – Fundamentos de Física – Halliday, Resnick, Walker, vol. 4 – 6ª. Ed.)

- Metais
- Semicondutores

Classificar os sólidos, do ponto de vista elétrico, de acordo com três propriedades básicas:

Concentração (densidade) de portadores de carga n definida como o número de portadores de carga por unidade de volume (unidades: m^{-3})

Coeficiente de temperatura da resistividade α definido pela relação:

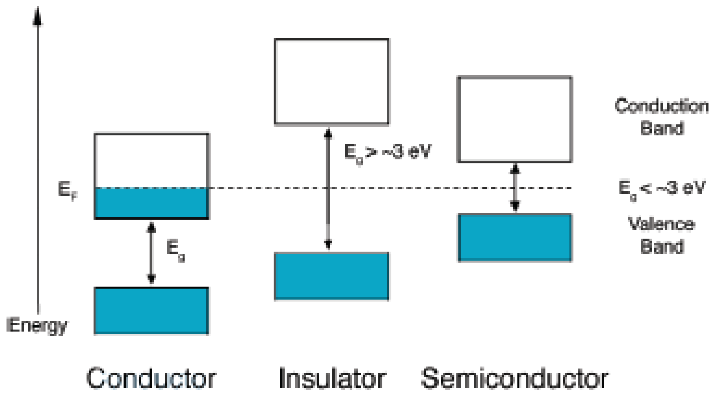
$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT} = \alpha \qquad \text{(unidades: } K^{-1}\text{)}$$

	Cobre	Silício
Densidade de Portadores de Carga (m^{-3})	9×10^{28}	1×10^{16}
Coeficiente de Temperatura da Resistividade (K^{-1})	$+ 4 \times 10^{-3}$	$- 70 \times 10^{-3}$

Resistividade ρ à temperatura ambiente [unidades: ohm-metro (Ω.m)]

Substância	Resistividade (Ω x m)
Cobre	1.7×10^{-8}
Ouro	2.3×10^{-8}
Alumínio	2.8×10^{-8}
Grafite	6×10^{-5}
Germânio (puro)	4.7×10^{-1}
Silício (puro)	2.1×10^{3}
Vidro	10^{10}
Mica	10^{15}
Diamante	10^{16}

Níveis de energia para um sólido cristalino: teoria de bandas

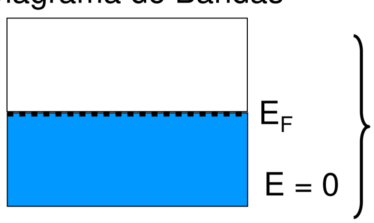


Estados de energia preenchidos

Estados de energia vazios

METAIS

Diagrama de Bandas



Banda Parcialmente Preenchida

- E_F = nível de Fermi = energia de Fermi ⟶ definido para T = 0 K
- elétrons que ocupam banda parcialmente preenchida ⟶ elétrons de valência
- Cobre:

E_F = 7,0 eV , v_F = 0,0052 c = 1,6 x 10^6 m/s (vel. dos elétrons no nível de Fermi)

para T= 0 K

O que acontece se aumentarmos a temperatura??

Condução para T > 0

Elétrons próximos ao nível de Fermi irão para níveis vagos acima do nível de Fermi $\longrightarrow$ continuarão aprisionados nesta banda

Distribuição de elétrons não difere muito da distribuição no zero absoluto

PORQUE ?

Energia Térmica = kT $\longrightarrow$ energia cedida ao elétron através do aumento de temperatura

(k = constante de Boltzman = 8,62 x 10^{-5} eV/K)

T=1000 K (727 ^{o}C) $\longrightarrow$ kT = 0,086 eV

Pouca alteração na energia do elétron

Condução elétrica num metal: Resistividade ρ

Expressão baseada no modelo de elétrons livres (gás de elétrons) – elétrons de condução

- Aplica-se um campo elétrico E $\Rightarrow$ força F aplicada em cada elétron *F = -eE*
- Tempo Δt $\Rightarrow$ aumento de Δv na velocidade dos elétrons de condução no sentido –E
  $\Rightarrow$ variação na energia dos elétrons
  $\Rightarrow$ ocupam outros níveis vagos
- Velocidade dos elétrons não cresce sem limites
  $\Rightarrow$ colisões com vibrações térmicas da rede limita a velocidade
  $\Rightarrow$ chega a um valor constante $\Rightarrow$ corrente constante
  $\Rightarrow$ tempo para que isto ocorra: tempo de relaxação τ

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

m = massa do elétron; e = carga do elétron;

n = concentração de portadores de cargas

(nº de elétrons de condução por volume.

METAIS: como varia a resistividade com o aumento da temperatura?

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

- Concentração de portadores de carga (n) não aumenta muito, por causa dos processos de colisão;
- Tempo de relaxação τ diminui bastante com o aumento no número de colisões, mais rápido se chega a uma corrente constante.

ρ AUMENTA com a temperatura

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT} = \alpha$$

α = coeficiente de temperatura da resistividade é POSITIVO!

Como se calcula o número de elétrons de condução (N_{ec}) num sólido?

$$N_{ec} = N_{átomos} \times N_{elétrons\ de\ valência/átomo}$$

$$n = \frac{N_{ec}}{volume\ da\ amostra}$$

$$n = \frac{N_{átomos} \times N_{elétrons\ de\ valência/átomo}}{volume\ da\ amostra}$$

Concentração de portadores de carga

$$N_{átomos} = \frac{M_{amostra}}{massa\ atômica} = \frac{massa\ específica \times volume}{massa\ atômica}$$

$$massa\ atômica = \frac{massa\ molar}{N_A}$$

$N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$

Estudo Quantitativo da Eletricidade num Metal

1) Contagem de Estados Quânticos:
   para 1 átomo: *2 (2l + 1)*
   para N átomos num sólido: ??
2) Contagem dos Estados em T = 0 K
3) Cálculo da Energia de Fermi
4) Contagem dos Estados em T > 0 K

1) Contagem de estados quânticos:

N átomos: método estatístico

Em vez de perguntarmos: "qual a energia do estado? "

Perguntamos: "quantos estados (por unidade de volume) tem energia entre E e E + dE? "

❖ Um cristal com 10^{23} átomos origina um número muito grande de níveis de energia. Muitos dos quais são degenerados (= Energia)

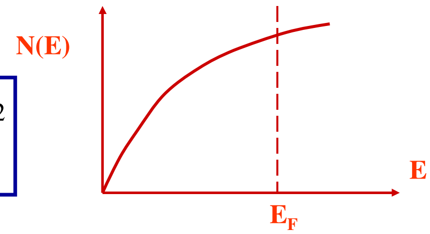
❖ A densidade de estados ***N*(E)** é a medida de estados disponíveis com a mesma energia, por unidade de volume

Densidades de Estados

$$\boxed{N(E) = \frac{8\pi}{h^3}\left(2m^3 E\right)^{1/2}}$$

Densidade de Estados

$$\boxed{N(E) = \frac{8\pi}{h^3}\left(2m^3E\right)^{1/2}}$$

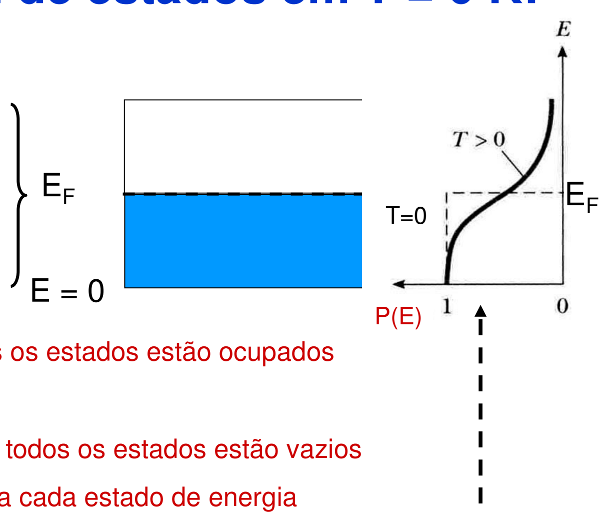


Não depende da forma, tamanho e material da amostra

É função apenas da energia!!

2) Contagem de estados em T = 0 K:

Banda Parcialmente Preenchida



- até nível de Fermi, todos os estados estão ocupados (mais baixa energia)
- acima do nível de Fermi, todos os estados estão vazios
- ESTATÍSTICA: peso para cada estado de energia

P(E) ⇒ função probabilidade
- = 1 certeza que o estado está ocupado
- = 0 certeza que o estado está vazio

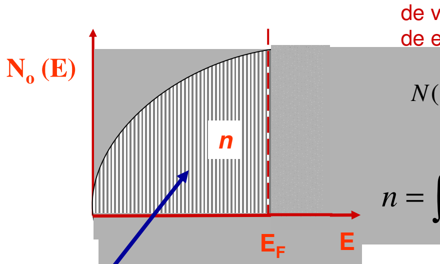
Densidade de Ocupação de Estados

Nº de estados ocupados por unidade de volume

$$\boxed{N_o(E) = N(E)\, P(E)}$$

N° de estados não ocupados por unidade de volume (densidade de estados)

Probabilidade de ocupação de um estado



$$N(E) = \frac{8\pi}{h^3}\left(2m^3E\right)^{1/2}$$

P(E) $\begin{cases} = 1 \\ = 0 \end{cases}$

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

n = N° de elétrons de condução por unidade de volume num metal

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

Em T = 0 K os elétrons de condução ocupam todos os estados de energia até o nível de Fermi

3) Cálculo da Energia de Fermi

$$n = \int_0^{E_F} N(E)dE = \int_0^{E_F} \frac{8\pi}{h^3}\left(2m^3E\right)^{1/2} dE = \frac{8\pi}{h^3}\left(2m^3\right)^{1/2}\left[\frac{E^{3/2}}{3/2}\right]_0^{E_F}$$

$$n = \frac{16\pi}{3h^3}\left(2m^3\right)^{1/2} E_F^{3/2}$$

isolando E_F, temos:

$$A = 3{,}65\times10^{-19}\ (m^2eV)$$

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

massa do elétron

Sabendo *n* (n° de elétrons de condução por volume) calcula-se E_F

4) Contagem de estados para T > 0 K

Como fica a função probabilidade P(E)?

Temos a distribuição de probabilidades de Fermi-Dirac que representa a probabilidade de ocupação de um estado com energia E.

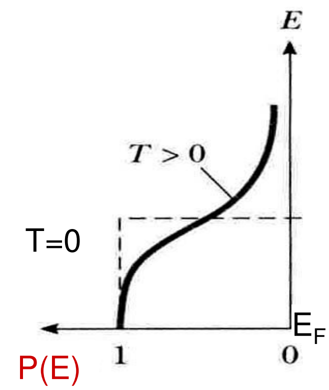
$$\boxed{P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1}}$$

Em T = 0 K temos:

- para $E < E_F \Rightarrow (E - E_F)/kT \Rightarrow -\infty$
  $\Rightarrow e^{-\infty} = 0 \Rightarrow P(E) = 1$
- para $E < E_F \Rightarrow (E - E_F)/kT \Rightarrow +\infty$
  $\Rightarrow e^{+\infty} = \infty \Rightarrow P(E) = 0$

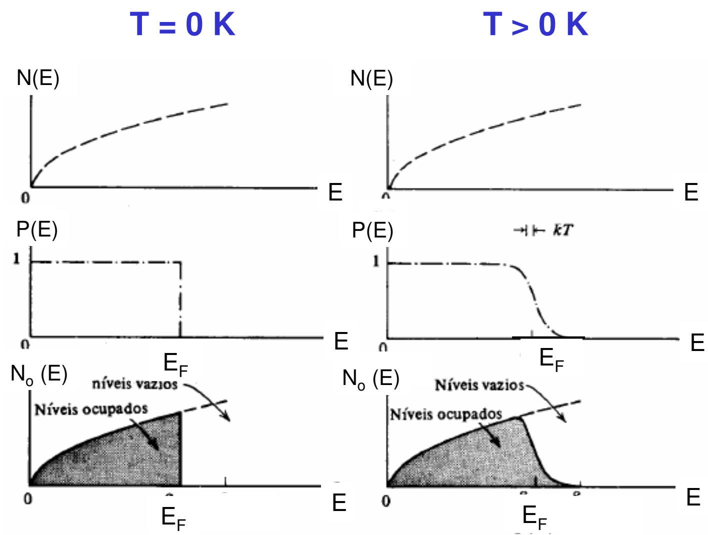
4) Contagem de estados para T > 0 K

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



$$\boxed{n = \int_0^E N_o(E)\,dE = \int_0^E N(E)\,P(E)\,dE}$$

Comparando ocupação de estados para:



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Nível de Fermi e ocupação de estados:

http://jas.eng.buffalo.edu/education/semicon/fermi/functionAndStates/functionAndStates.html

Ver Exemplos 42-2, 42-3, 42-4

Márcia Russman Gallas (FIS01184)