

kroton
paixão por educar

GRADUAÇÃO PRESENCIAL
1º semestre- 2016

Materiais Eletroeletrônicos
Eng^a Elétrica– 4º/ 5ºsemestres

Prof^o. Ms.Cristiano Malheiro

cmalheiro@anhanguera.com
cmalheiro@aedu.com

<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1



Aula 6

Bibliografia Básica



1. CALLISTER, Jr; W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2006. (19 exemplares)

Pesquisa Biblioteca:

<http://187.86.214.60/pergamum/biblioteca/index.php?id=ANHAN>

2. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais - 2 / 2006 - (E-book)
CALLISTER JR., William D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. 2. Rio de Janeiro LTC 2006 1 recurso online ISBN 978-85-216-1930-7.



2. MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P.B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. 5ª ed. São Paulo: Thomson, 2003, v. 1. (Acervo pessoal- professor)

2

kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores



Prof. Ms. Cristiano Malheiro
(cmalheiro@aedu.com)

Bibliografia: Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS- João Antonio Martino

3



Aula 6

Física dos Semicondutores

. Bandas de Energia

- Para que átomos isolados sejam mantidos juntos formando um sólido, várias interações ocorrem entre átomos vizinhos (balanceamento entre forças de atração e repulsão)
- As forças de atração e repulsão entre átomos encontrarão um balanço para cada espaçamento interatômico do cristal. Neste processo, importantes modificações ocorrem na configuração do nível de energia do elétron, as quais resultam em uma variedade das propriedades dos sólidos.
- Elétrons estão restritos a estabelecer níveis discretos de energia nos átomos. Grandes “gaps” existem na escala de energia em que estados de energia não são disponíveis. De um modo similar, elétrons em sólidos são restritos a certas energias e não são permitidos em outras energias.

4



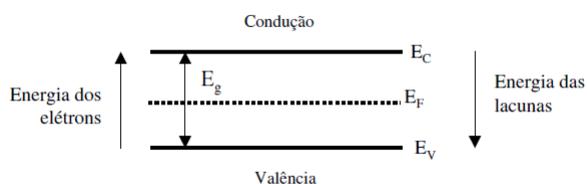


Aula 6

Física dos Semicondutores

- A diferença básica entre o caso de um elétron em um sólido e um elétron num átomo é que no sólido o elétron possui uma faixa ou banda de energia disponível.

Representação Simplificada:



5

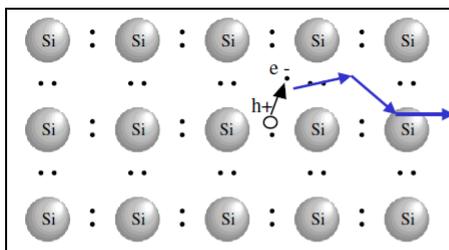
kroton
paixão por educar



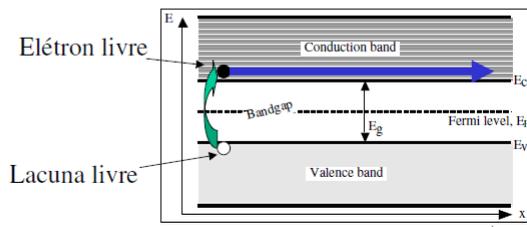
Aula 6

Física dos Semicondutores

☞ O elétron pode ser extraído do átomo (Geração):



Elétron livre: uma lacuna é criada neste processo.



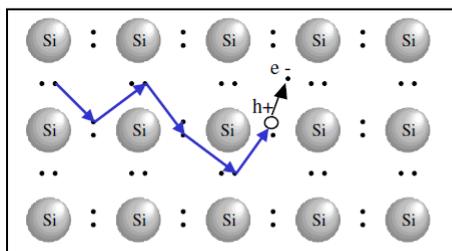
kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores

☞ A lacuna também pode se movimentar:



A lacuna é “preenchida” com um elétron. A lacuna é “preenchida” com um elétron, que cria uma “nova” lacuna, a qual pode ser “preenchida” com um elétron, que cria uma nova lacuna.....

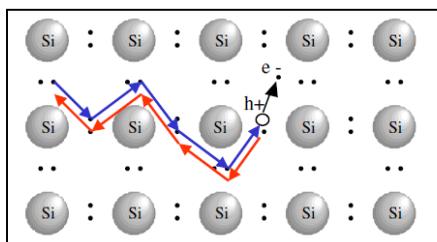
7

kroton
paixão por educar

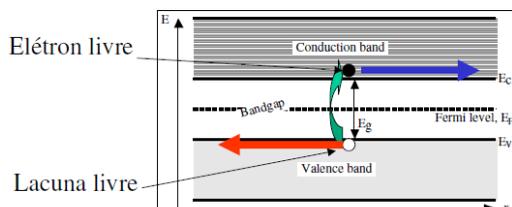


Aula 6

Física dos Semicondutores



O movimento dos elétrons na banda de valência carregados **negativamente** podem ser observados como o movimento das lacunas **carregadas positivamente** na direção oposta.



8

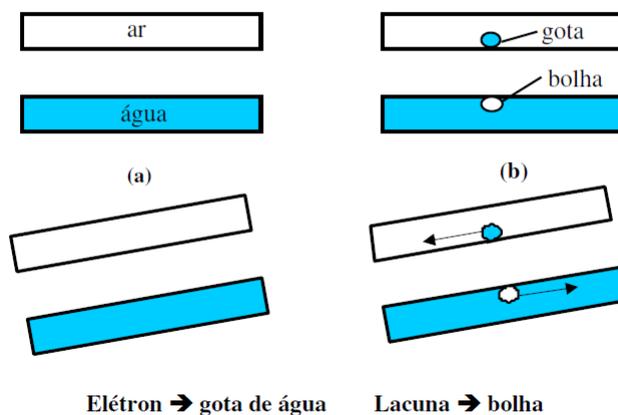
kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores

- Analogia com a hidráulica:
 - tubo preenchido com água (banda de valência)
 - tubo vazio (banda de condução)



9

kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores

8. Metais, Semicondutores e Isolantes

- Todo sólido possui sua própria estrutura de bandas de energia. Esta variação na estrutura da banda é responsável pela grande variação das características elétricas observada nos diversos materiais.
- Materiais semicondutores a 0 K possui basicamente a mesma estrutura dos isolantes, isto é, a banda de valência está preenchida e separada da banda de condução vazia por um “gap” contendo níveis de energia não permitidos.
- A diferença está no tamanho da faixa proibida E_g , a qual é muito menor para os semicondutores quando comparados com os isolantes. Por exemplo:
 - E_g (Si) = 1.1eV
 - E_g (diamante) = 5eV
- Os relativos pequenos valores atribuídos às faixas proibidas dos elementos semicondutores permite a excitação de elétrons da banda inferior (valência) para a banda superior (condução) através de uma razoável quantidade de energia térmica ou óptica.

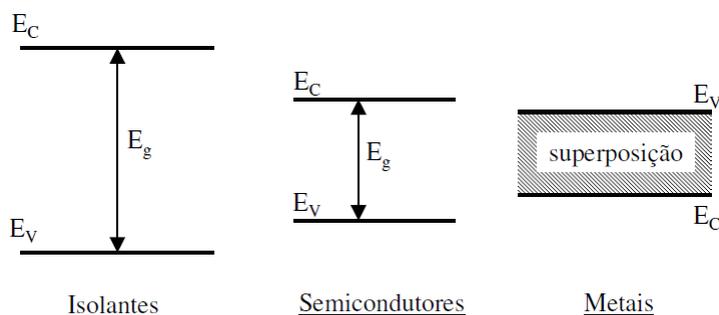
10

kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores



11



Aula 6

Física dos Semicondutores

Materiais Intrínsecos

- São cristais semicondutores perfeitos sem impurezas ou defeitos na rede cristalina
 - Em tais materiais não há portadores de carga a 0 K, uma vez que a banda de valência está ocupada por elétrons e a banda de condução encontra-se vazia
 - Em altas temperaturas os pares elétrons-lacunas são gerados pois os elétrons da banda de valência são excitados termicamente para a banda de condução. Estes pares elétron-lacunas são os únicos portadores de carga no material intrínseco.
 - Uma vez que os elétrons e lacunas são criados aos pares, a concentração de elétrons na banda de condução n (elétrons/cm³) é igual à concentração de lacunas na banda de valência p (lacunas/cm³). Cada um destes portadores intrínsecos é tipicamente referido como
- Logo: $n = p = n_i$

12



Aula 6

Física dos Semicondutores

Materiais Extrínsecos

- Além dos portadores intrínsecos gerados termicamente, é possível criar portadores nos semicondutores pela introdução de impurezas no cristal (dopagem)
- Quando um cristal é dopado tal que as concentrações dos portadores no equilíbrio n_o e p_o são diferentes da concentração intrínseca n_i , é dito que o material é extrínseco.

- * semicondutores dopados: a. tipo n (elétrons)
b. tipo p (lacunas)

13



Aula 6

Física dos Semicondutores

Nível de Fermi

- Elétrons em sólidos obedecem a estatística de Fermi-Dirac

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E - E_F}{k.T}\right)}}$$

onde: $f(E)$ é a *função de distribuição de Fermi-Dirac*, E_F sendo o nível de Fermi (o qual representa uma quantidade importante na análise do comportamento do semicondutor), k a constante de Boltzmann ($8,62 \times 10^{-5}$ eV/K = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K) e T a temperatura absoluta em Kelvin.

- $f(E)$ mostra a probabilidade que um estado de energia disponível E seja ocupado por um elétron na temperatura absoluta T .
- Caso $E = E_F$: $f(E_F) = 1/2!$ Representa a probabilidade de 50% de um estado de energia no nível de Fermi ser ocupado por um elétron.

14

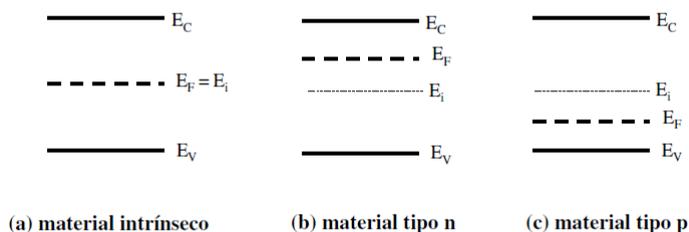




Aula 6

Física dos Semicondutores

- Representação simplificada dos diagramas de bandas de energia:



15



Aula 6

Física dos Semicondutores

Para Semicondutor Extrínseco

- Em temperaturas relativamente altas, é válida a seguinte aproximação:

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

$$n \cdot p = n_i^2$$

- Com estas equações podemos determinar as concentrações de elétrons e lacunas para cada tipo de semicondutor (n ou p)

16



Aula 6

Física dos Semicondutores

a. Para semicondutor tipo n

$$n_{no} = n_i + N_d \cong N_d$$

$$n_{no} \cdot p_{no} = n_i^2$$

$$p_{no} \cong \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$E_F - E_i = k.T. \ln\left(\frac{n_{no}}{n_i}\right) \cong k.T. \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

onde n_{no} e p_{no} : concentração de elétrons e lacunas, respectivamente, no equilíbrio térmico

17



Aula 6

Física dos Semicondutores

b. Para semicondutor tipo p

$$p_{po} = n_i + N_a \cong N_a$$

$$n_{po} \cdot p_{po} = n_i^2$$

$$n_{po} \cong \frac{n_i^2}{N_a}$$

$$E_i - E_F = k.T. \ln\left(\frac{p_{po}}{n_i}\right) \cong k.T. \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

onde p_{po} e n_{po} : concentração de lacunas e elétrons, respectivamente, no equilíbrio térmico

18





Aula 6

Física dos Semicondutores

Concentração de Portadores Dependente da Temperatura

$$n_i(T) = 2 \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (m_n^* \cdot m_p^*)^{\frac{3}{4}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}}$$

$$n_i(T) = \sqrt{B \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}}}$$

onde: B é uma constante que depende do material
(B = 5,4.10³¹ para o Si)

19

kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores

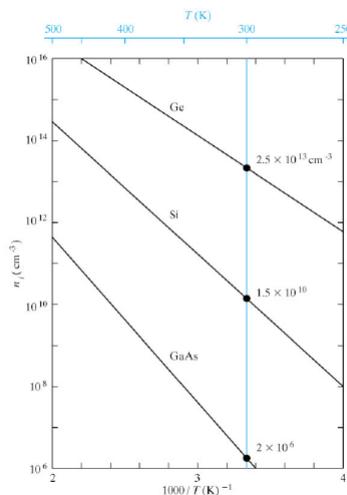


Figura - Concentração Intrínseca de portadores em função da temperatura.

kroton
paixão por educar



Aula 6

Física dos Semicondutores

Exercício 1: Calcule a densidade intrínseca de portadores n_i a 250K, 300K e 350K.

Dado que: $B = 5,4 \cdot 10^{31}$; $E_g = 1,12\text{eV}$; $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

21



Aula 6

Física dos Semicondutores

Exercício 2: Considere um silício tipo n no qual a concentração de dopantes $N_d = 10^{17}$ átomos/cm³. Encontre as concentrações de elétrons (n_{no}) e lacunas (p_{no}) para as seguintes temperaturas 250K, 300K e 350K.

22





Aula 6

Física dos Semicondutores

Exercício 3: Uma amostra de Silício é dopado com 10^{17} átomos/ cm^3 de Arsênio (impureza pentavalente (doadora)). Pede-se:

- Calcular as concentrações n_{no} e p_{no}
- Calcule a posição relativa de E_F em relação a E_i
- Desenhar o diagrama de banda resultante

23



Bibliografia desta aula:

1. MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P.B. **Caracterização Elétrica de MOS**. 5ª ed. São Paulo: Thomson, 2003, v. 1.

24

