

Microtecnologias no Silício

4º ano – MEBIOM

3º ano – MEFIS

José Higinio Gomes Correia

outubro de 2021

Programa da disciplina 1

1. Microtecnologias no silício

A microelectrónica e a micromaquinagem no silício como tecnologias emergentes, a importância dos materiais semicondutores com destaque para o silício.

2. Física dos semicondutores

A teoria das bandas nos semicondutores, semicondutores do grupo IV, semicondutores do grupo III-V, electrões e lacunas, impurezas dadoras e receptoras, semicondutores intrínsecos e extrínsecos, dopagem de semicondutores, condutividade e mobilidade eléctrica nos semicondutores, energia de Fermi, electrões quentes, efeito de Gunn, efeito de Hall e semicondutores de gap directo e indirecto.

3. O silício e as suas propriedades físicas

A importância do silício na indústria dos semicondutores, a sua estrutura cristalina, as suas propriedades ópticas, mecânicas e térmicas. A dopagem do silício para obtenção de regiões do tipo p e do tipo n

4. Os materiais utilizados nas microtecnologias no silício

Os materiais usados nos processos tecnológicos da microelectrónica e micromaquinagem. Compostos como: o dióxido de silício, nitrato de silício, metais como o alumínio e o uso do polisilício são apresentados bem como o polímero foto-sensível (*photoresist*) para uso na aplicação das máscaras de fabrico. O uso de wafers de silício previamente dopados e a sua orientação cristalina.

Programa da disciplina 2

5. A micromaquinagem

A tecnologia da micromaquinagem no silício para criar estruturas a 3 dimensões (micro-sensores e microactuadores). Os processos de fabrico: micromaquinagem volúmica (*bulk-micromachining*), micromaquinagem superficial (*surface-micromachining*) e o processo LIGA. Sistemas de deposição e corrosão de filmes finos.

ELEMENTOS DE ESTUDO; BIBLIOGRAFIA

1-Introdução às microtecnologias, J.H. Correia, J.P. Carmo, Editora LIDEL

2-*Slides J.H. Correia, outubro 2021.*

3-*J. Singh, Semiconductor devices an introduction, McGraw-Hill Book Company, 1994.*

4- *S. Sze, Semiconductor Sensors, J. Wiley & Sons, 1994.*

Microtecnologias no Silício

- tecnologias para produção de estruturas 3D e dispositivos com dimensões na ordem dos micrómetros
- duas microtecnologias no silício de sucesso
 - microelectrónica e micromaquinagem
 - Microelectrónica, fabrica circuitos electrónicos em chips de silício, actualmente é uma indústria consolidada destacando-se as tecnologias CMOS, Bipolar, BiCMOS.
 - Micromaquinagem compreende as técnicas usadas para fabricar estruturas com partes que se movem em microdispositivos, permitindo criar micro-sensores e microactuadores.

Microelectrónica+Micromaquinagem

- Objectivos

- integrar microelectrónica com estruturas 3D micromaquinadas (sejam sensores e/ou actuadores)

- vantagens destes chips em silício

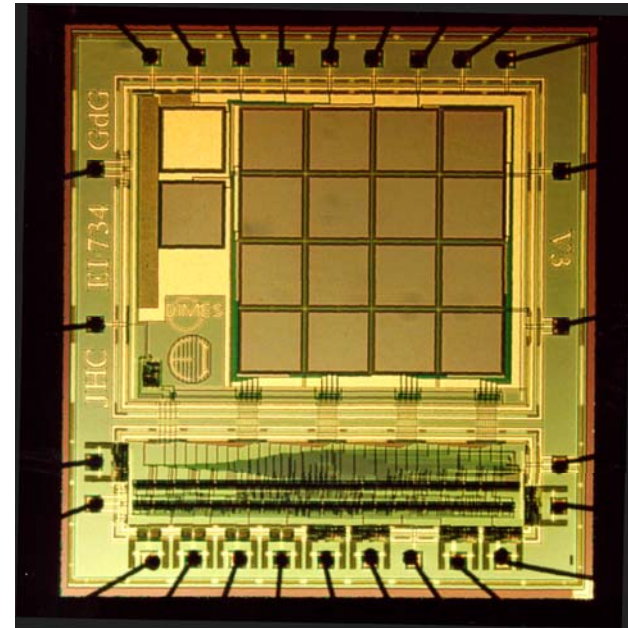
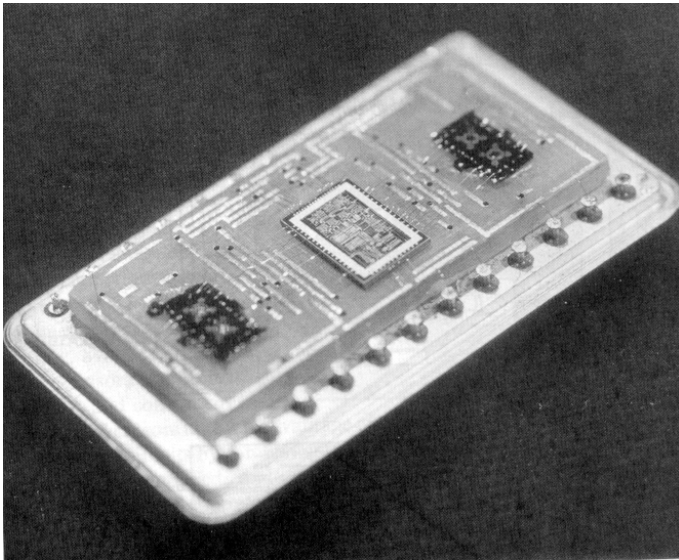
- baixo custo

- fiabilidade

- dimensões físicas reduzidas

A maior desvantagem é a complexidade do micro-sistema em termos de fabrico para certas aplicações

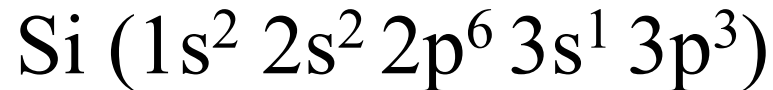
Multi-Chip-Module (MCM) sistema para análise de gases e micro-sistema óptico integrado baseado em 16 etalons Fabry-Perot, conversor luz-frequência e bus interface para o exterior



Semicondutores

- Semicondutores do grupo IV (Si, Ge, C)

Ligação covalente – 2 electrões ($\downarrow\uparrow$) partilhados por 2 átomos



Cada átomo de Si (ligado a 4 átomos de Si) contribui com um electrão para a ligação dupla

- Semicondutores do grupo III-V (GaP, GaAs)

Contém um elemento do grupo III e outro do grupo V

Semicondutores

As propriedades eléctricas dos semicondutores podem ser alteradas pela presença de impurezas

Semicondutores extrínsecos - as impurezas fornecem a maior parte dos transportadores - n diferente de p

Semicondutores intrínsecos – $n_i = p_i$

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{K_B T}{2\pi \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} \exp\left(\frac{-E_g}{2 K_B T} \right)$$

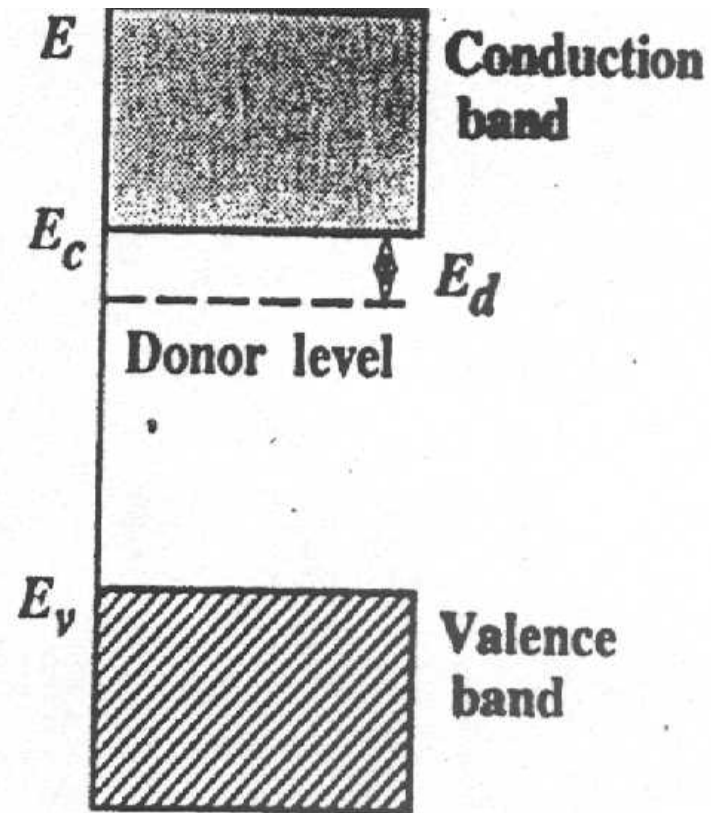
Impurezas

- Impurezas dadoras

O dador é uma impureza localizada num nível de energia próximo da BC do semiconductor.

Se houver impurezas dadoras (N_d) e aceitadoras (N_a) a região intrínseca define-se como aquela em em que:

$$n_i \gg (N_d - N_a)$$



Impurezas

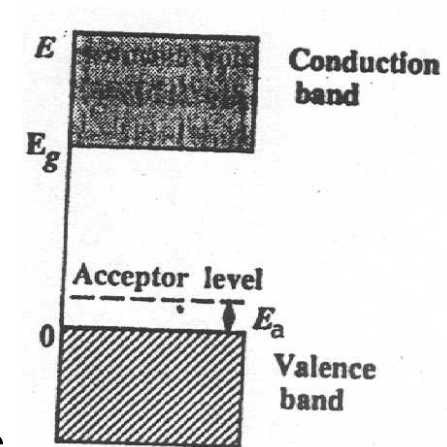
- Impurezas aceitadoras

Um electrão é excitado da BV do Si para o nível da impureza; deixando uma lacuna no topo da BV.

A concentração de impurezas

10^{15} cm^{-3} é suficiente para alterar significativamente a concentração intrínseca, n_i à temperatura ambiente.

Se a contribuição das impurezas prevalece, diz-se que o semiconductor está na região extrínseca.



Semicondutores intrínsecos e extrínsecos

Como n cresce exponencialmente com T podemos afirmar que “a altas temperaturas todos os semicondutores são intrínsecos”

Dopagem de semicondutores

Fósforo – grupo V, dopagem do tipo n

Boro – grupo III, dopagem do tipo p

Se $N_d \gg N_a$, prevalecem as impurezas dadoras e $n = N_d$ ou:

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* K_B T}{2\pi \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2} \right)^{3/2} \exp \left(\frac{E_{Fi} - E_g}{K_B T} \right)$$

Semicondutores extrínsecos

Variando o tipo de dopagem, com T constante de modo a que aumente a concentração de electrões (n) tem de diminuir a de lacunas (p) e vice-versa.

Se $N_a \gg N_d$ a dopagem predominante é de aceitadores e $p=N_a$ ou

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* K_B T}{2\pi \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_{Fi}}{K_B T} \right)$$

Condutividade e Mobilidade

- Lei de Ohm

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

Para eletrões $\mathbf{J}_e = ne\mathbf{v}_e$ vem: $\sigma \mathbf{E} = ne\mathbf{v}_e$

- Condutividade eléctrica num semicondutor

$$\sigma = ne\mu_e$$

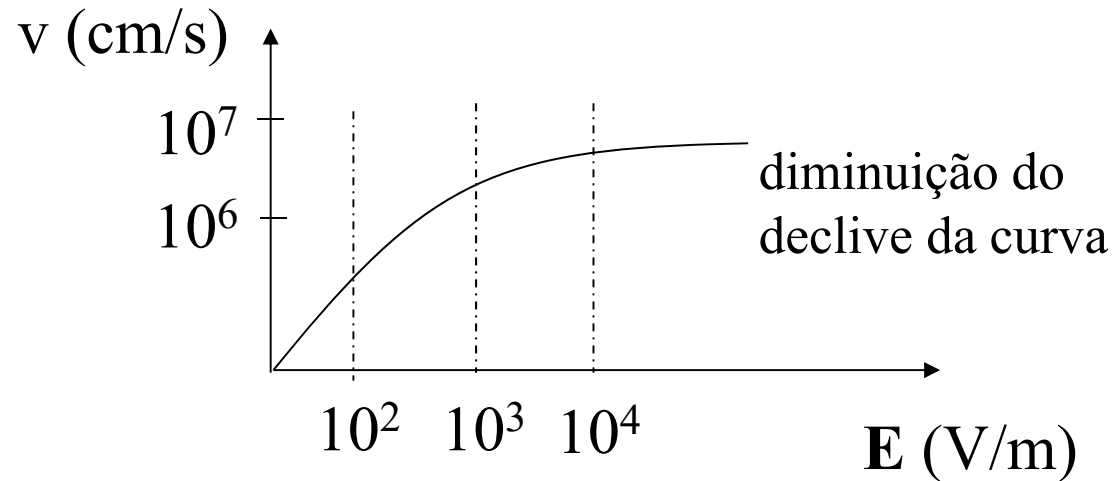
- Mobilidade num semicondutor

é a razão entre a velocidade dos eletrões, v_e , e a intensidade do campo eléctrico aplicado \mathbf{E} . É a medida da facilidade com que o eletrão se move na presença de um \mathbf{E} .

$$\mu_e = v_e / E$$

Electrões Quentes

Comportamento de um semiconductor na presença de um campo eléctrico:



$E < 10^3$: o comportamento segue a Lei de Ohm $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$.

$E > 10^3$: observam-se desvios em relação à lei de Ohm

$E > 10^4$: a corrente atinge um valor de saturação e para valores mais elevados atinge o *breakdown* eléctrico.

As equações clássicas são válidas apenas se as amplitudes dos campos aplicados \mathbf{E} e \mathbf{B} satisfazem certas condições.

Electrões quentes e efeito de Gunn

Na presença de um campo eléctrico forte, \mathbf{E} , cada electrão recebe energia ao ser acelerado pelo campo, entre 2 colisões, e cede energia à rede (sob a forma de calor). Admite-se que a temperatura dos electrões é maior que a da rede (daí o termo “electrões quentes”). Os electrões quentes podem estar a uma temperatura superior à da rede em 100 °K ou mais se \mathbf{E} for maior. Na presença de \mathbf{E} muito elevados, os electrões dissipam a energia recebida do campo, sob a forma de fonões ópticos cedidos à rede. Em situações normais cedem fonões acústicos de menor energia.

• Efeito de Gunn

Descoberto em 1963 ao medir as correntes devida a electrões quentes no AsGa

Valores típicos para o AsGa, $E_0=3\text{KV/cm}$ e uma espessura da amostra de 2.5 mm.

Efeito Gunn

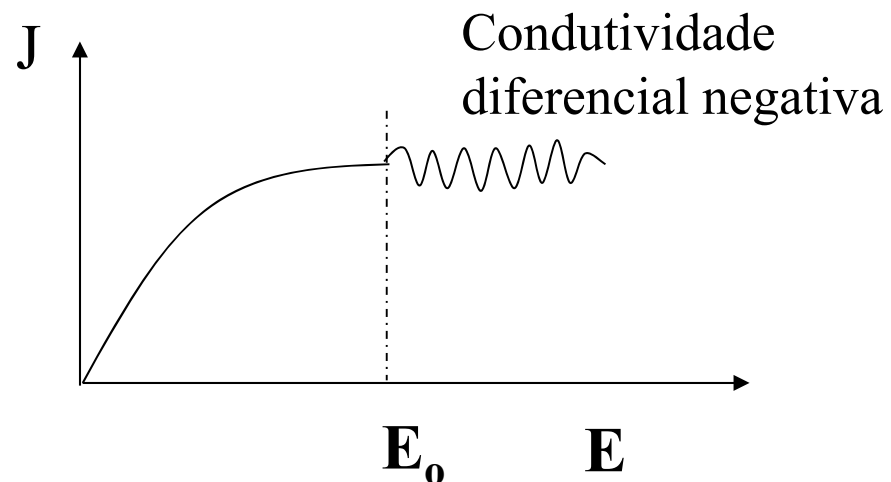
$E < E_0$: variação linear (Lei de Ohm).

$E > E_0$: flutuações de J , oscilações coerentes no tempo.

ν (frequência das oscilações) $\sim 5\text{GHz}$

J diminui quando E cresce

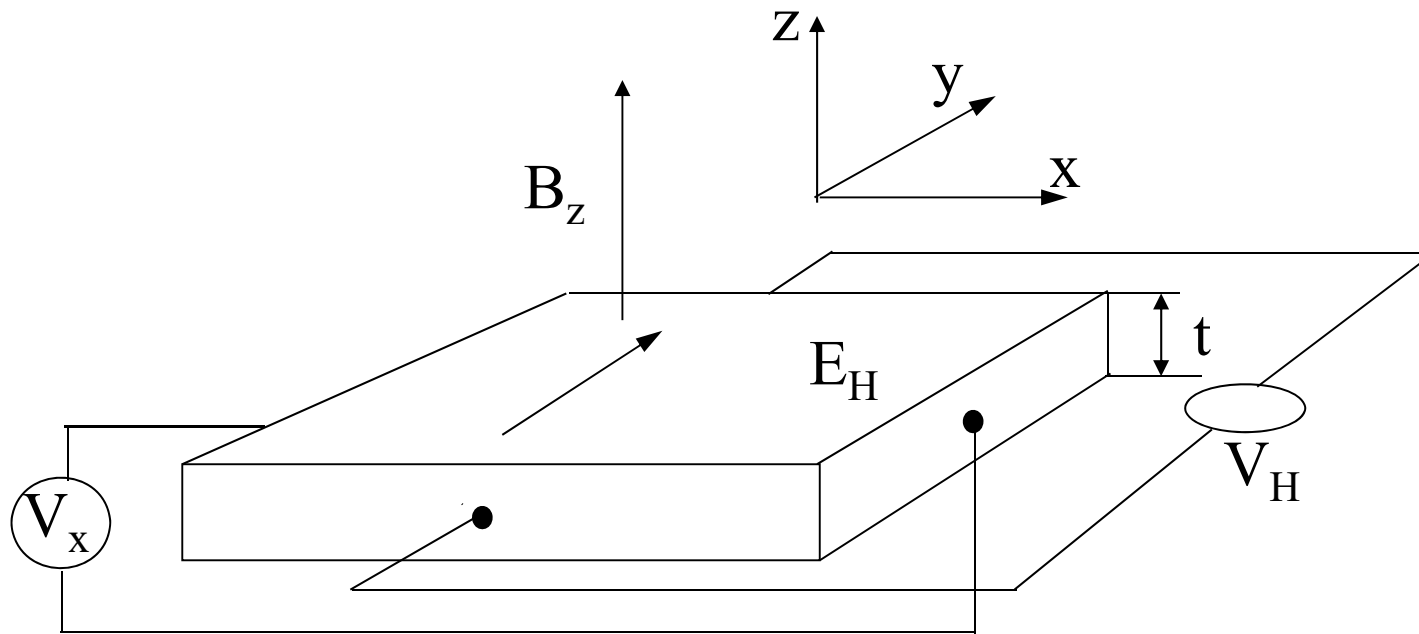
Este fenómeno é usado para gerar microondas.



Efeito de Hall nos semicondutores

E_x -campo aplicado que origina a corrente J_x

B_z -campo magnético aplicado



Efeito de Hall nos semicondutores

- Temos 2 campos eléctricos \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_H
- Constante de Hall, R_H

Considerando:

$$J_x = J_e + J_h = ne\mu_e E + pe\mu_h E$$

$$J_y = ne\mu_e E_{ex} + pe\mu_h E_{hx} + (ne\mu_e + pe\mu_h) E_H = 0$$

$$E_{ex} = \frac{J_e B_z}{ne}$$

$$R_H = \frac{E_H}{J_x B_z}$$

$$E_{hx} = -\frac{J_h B_z}{pe}$$

$$R_H = E_H / (J_x B_z) = (p\mu_h^2 - n\mu_e^2) / [e(n\mu_e + p\mu_h)^2]$$

Efeito de Hall nos semicondutores

- Se $n \gg p$ (semicondutor do tipo p)

$$R_H = 1/pe (>0)$$

- Se $p \gg n$ (semicondutor do tipo n)

$$R_H = -1/ne (<0)$$

Os valores de R_H dependem da concentração (n e p) e das mobilidades dos transportadores.

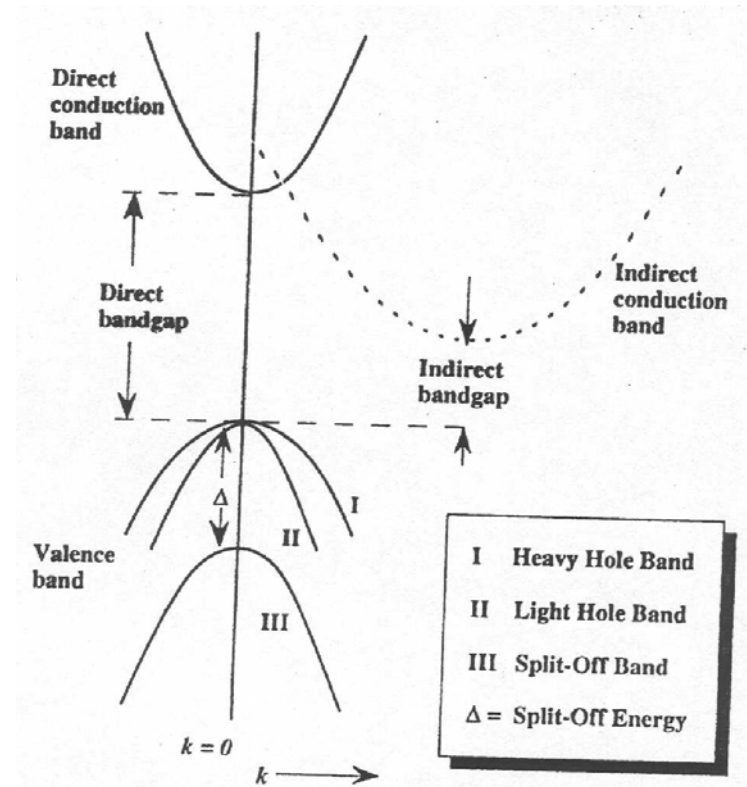
Os valores de R_H são medidos experimentalmente para:

1- obter informação sobre as concentrações n e p quando há só um tipo de transportadores.

2- obter informação sobre a mobilidade μ_e ou μ_h

Semicondutores de gap directo e indirecto

- A transição de electrões da BV para a BC dá-se por absorção de um ou mais fotões. A frequência, ν , do fotão tem de ser $\nu > \Delta E/h$, o processo decorre com conservação da energia e da quantidade de movimento.



Semicondutores de gap directo e indirecto

- **Semicondutor de gap directo**

As transições são verticais (sem variação de \mathbf{k}) entre a BV e a BC (ex: GaAs)

- **Semicondutor de gap indirecto**

O fundo da BC não se encontra directamente por baixo do topo da BV. A transição ocorre em 2 fases: o electrão absorve um fotão e um fonão; o fotão fornece a energia necessária e o fonão a quantidade de movimento para a mudança de direcção (ex: Si).