

# **Introdução às Microtecnologias no Silício**

4º ano do Mestrado Integrado em  
Eng. Electrónica Industrial e Computadores

**José Higinio Gomes Correia**

Outubro de 2006

# 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 microelectrónica

A tecnologia Bipolar e o modelo de layout físico da junção pn e do transistor bipolar. A tecnologia CMOS para um processo de fabrico em CMOS de 2  $\mu\text{m}$ , n-well, 2 camadas de metal e uma camada de polisilício. As regras de desenho de layout físico. As características da tecnologia CMOS. As vantagens e desvantagens da tecnologia CMOS em relação à tecnologia Bipolar. A tecnologia BiCMOS.

## 6. 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.

## ELEMENTOS DE ESTUDO; BIBLIOGRAFIA

- 1-*J. Singh, Semiconductor devices an introduction, McGraw-Hill Book Company, 1994.*
  - 2- *S. Sze, Semiconductor Sensors, J. Wiley & Sons, 1994.*
  - 3-*J.P.Uyemura, Physical Design of CMOS Integrated Circuits using L-EDIT, PWS Publishing Company, 1996.*
- 2-Apontamentos e cópia das transparências da aulas teóricas.
- 3-Apontamentos e folhas de exercícios das aulas teórico-práticas e Manual de tecnologia CMOS

# 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

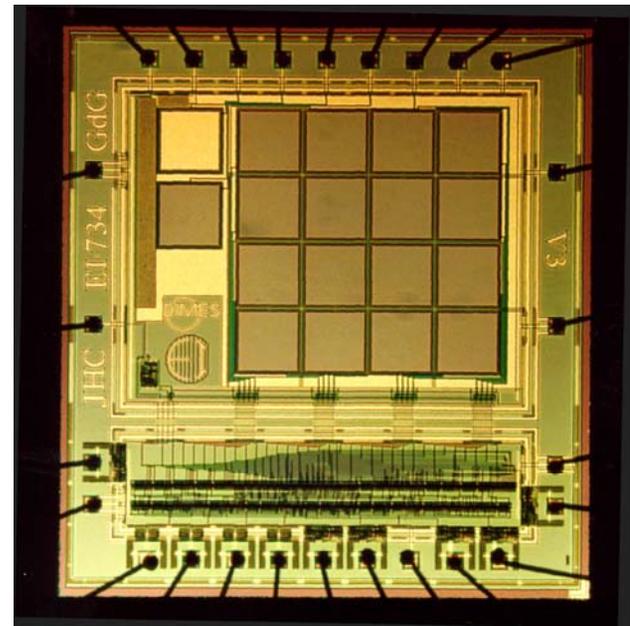
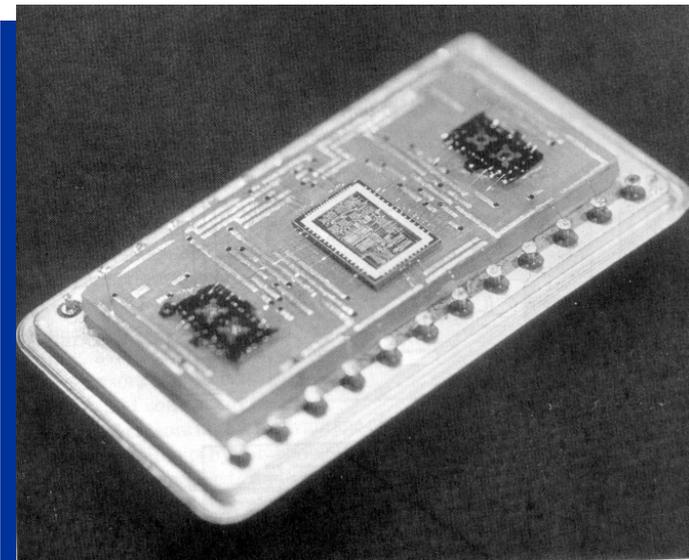
- baixo custo

- fiabilidade

- dimensões físicas reduzidas

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

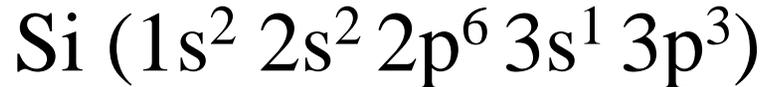
Multi-Chip-Module (MCM) sistema para análise de gases e micro-sistema óptico integrado baseado em 16 etalons Fabry-Perot, conversor luz-frequência e bus interface para o exterior



# 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 –  $n_i = p_i$**

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

# Energia de Fermi semicondutores intrínsecos

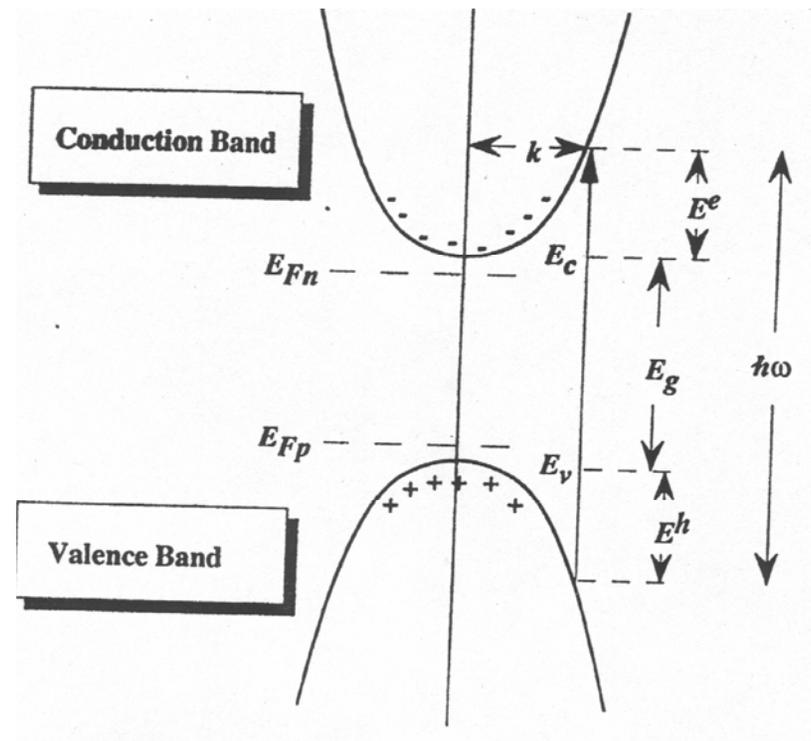
Aumentando a temperatura, um número cada vez maior de electrões é excitado da Banda de Valência (BV) para a Banda de Condução (BC).

$n$  cresce exponencialmente com  $T$ .

## • Energia de Fermi

$$E_{Fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} K_B T \ln \left( \frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$$

Para  $K_B T \ll E_g$ ,  $E_{Fi} = 0.5 E_g$



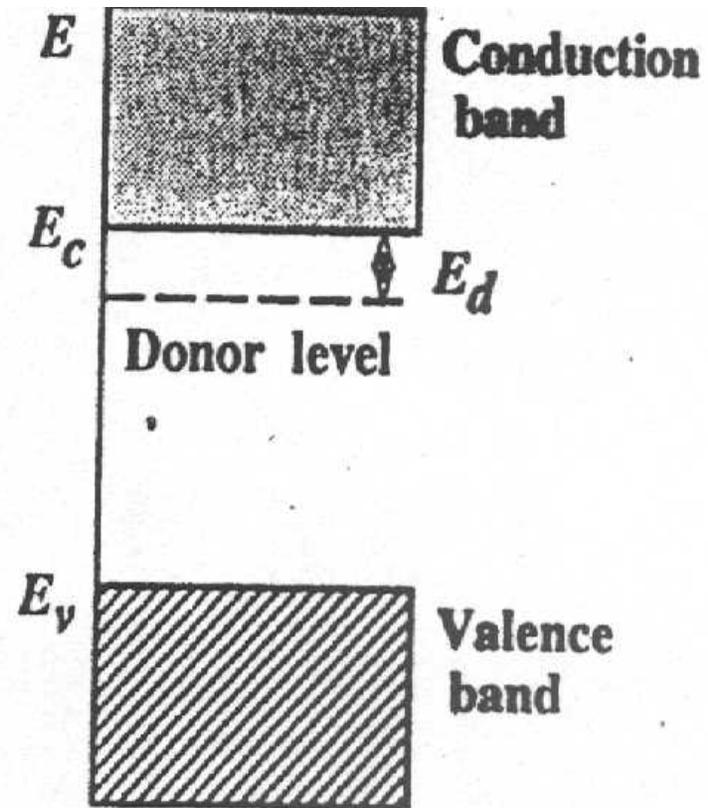
# Impurezas

## • 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:

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

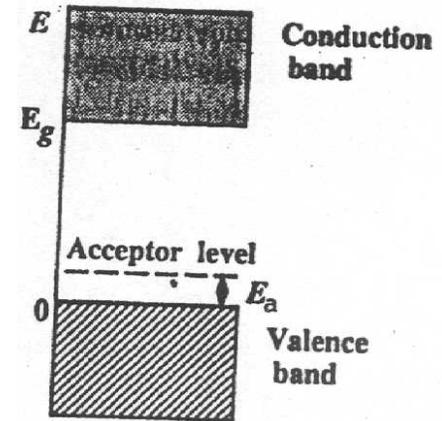


# Impurezas

## • 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  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  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

- Condutividade eléctrica num semiconductor

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau_e}{m_e^*}$$

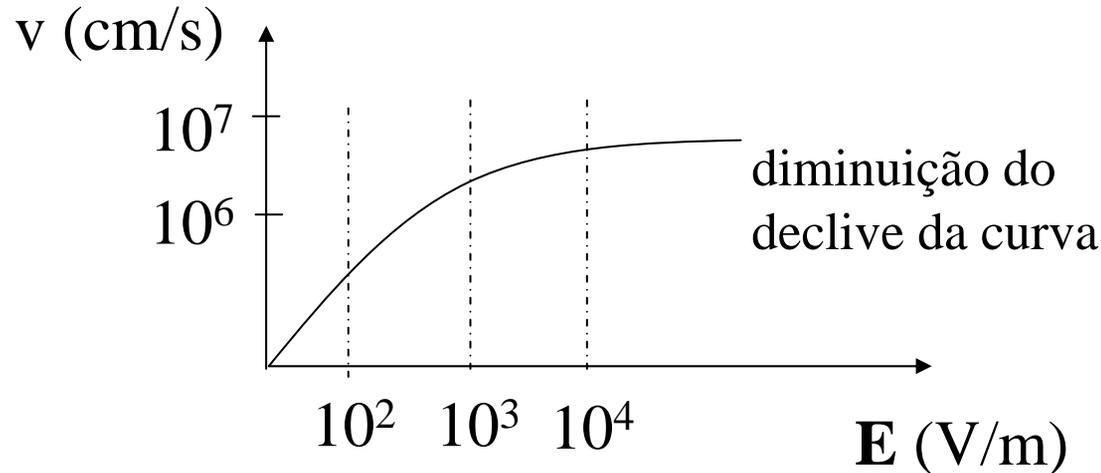
$\tau_e$  diminui em geral à medida que aumenta  $T$  (pois aumenta com o número de colisões)

- Mobilidade num semiconductor

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

# Electrões Quentes

Comportamento de um semicondutor 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

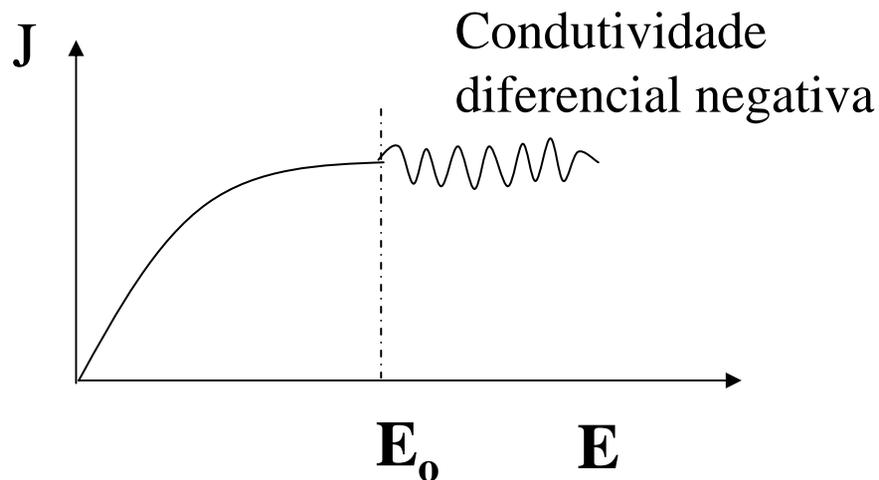
$E < E_0$ : variação linear (Lei de Ohm).

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

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

$J$  diminui quando  $E$  cresce

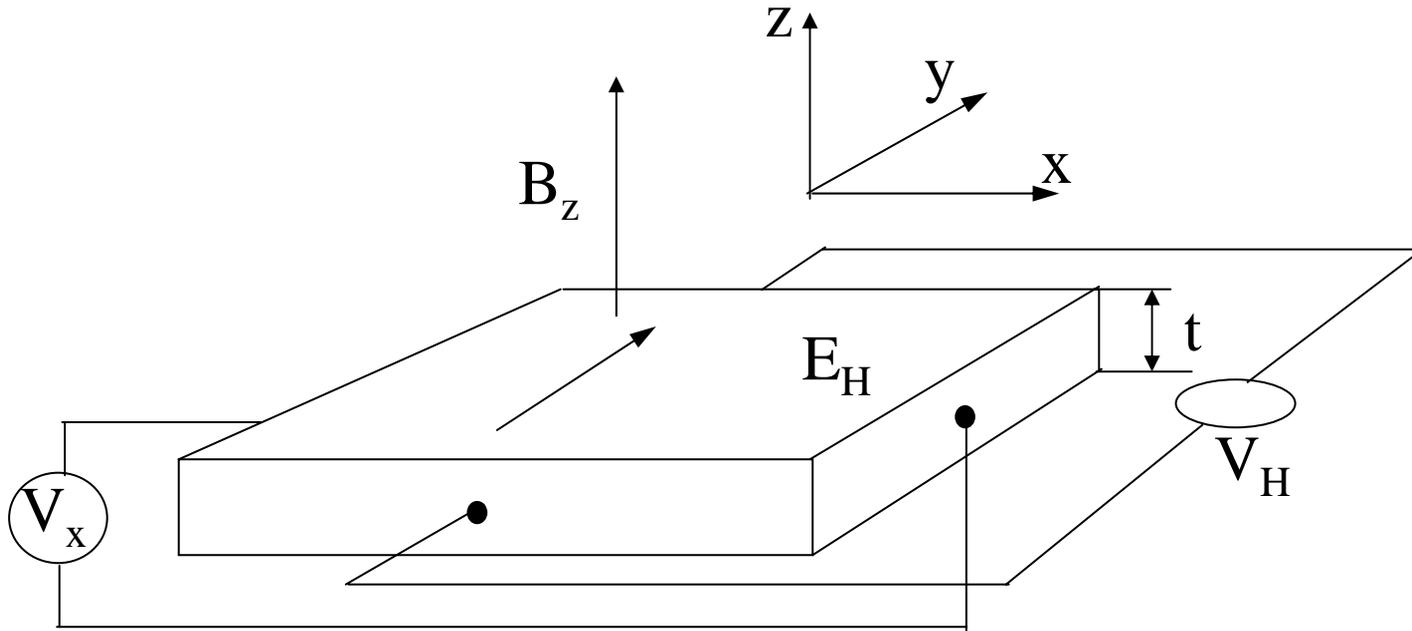
Este fenómeno é usado para gerar microondas.



# 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:

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

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

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

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

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

$$R_H = \frac{p\mu_h - n\mu_e^2}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2}$$

# 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.

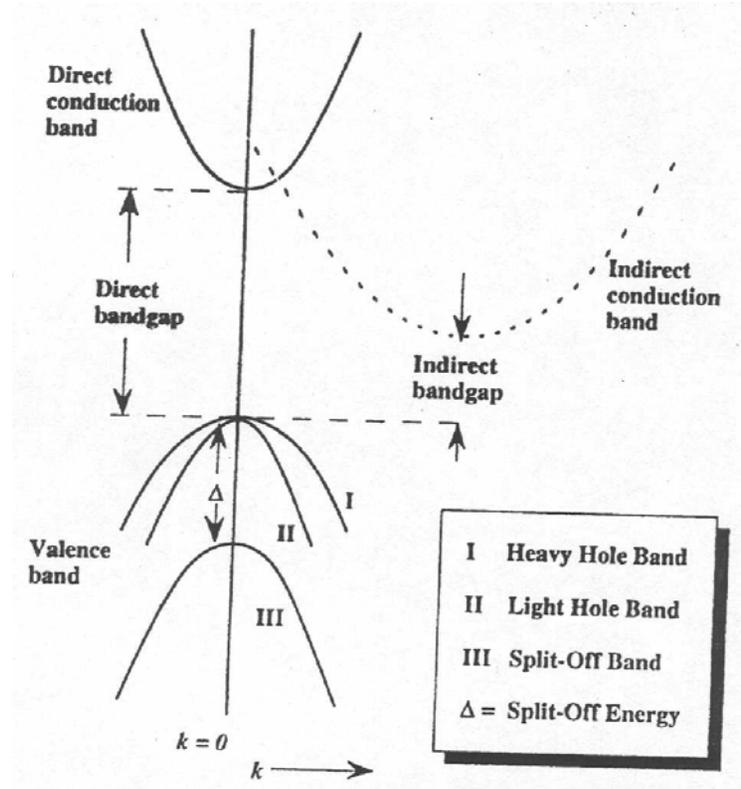
Os valores de  $R_H$  são medidos experimentalmente para:

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

2-obter informação sobre a mobilidade  $\mu_e$  ou  $\mu_h$

# 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,  $\nu$ , 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).