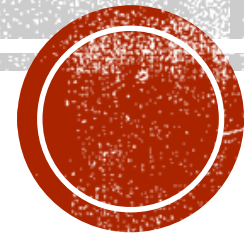


# SEMICONDUTORES

João Paulo Neto Torres





- Atualmente, os dispositivos eletrônicos estão na base da revolução tecnológica.
- **Materiais Semicondutores:** possuem  $\sigma$  (S/m)  $<$  materias condutores e  $>$  que os materiais isolantes.

- Resistência:

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S}$$

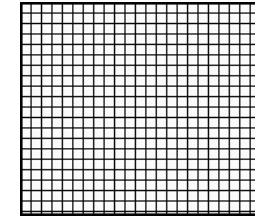
Resistividade ( $\rho$ ) ( $\Omega \cdot m$ )

Material	$\sigma$ (S/m)
Isolante	$10^{-16} - 10^{-8}$
Semicondutores	$10^{-8} - 10^6$
Condutores	$10^6 - 10^8$

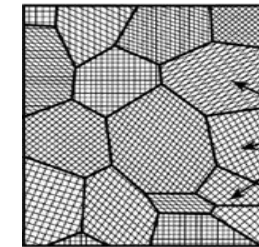


■ A estrutura do semicondutor pode-se caracterizar em:

■ Cristalina : disposição ordenada e regular dos átomos no espaço

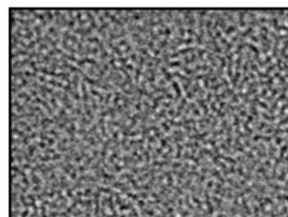


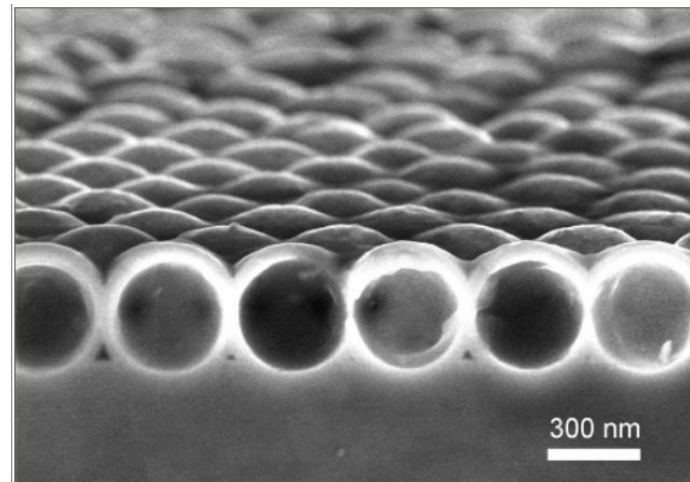
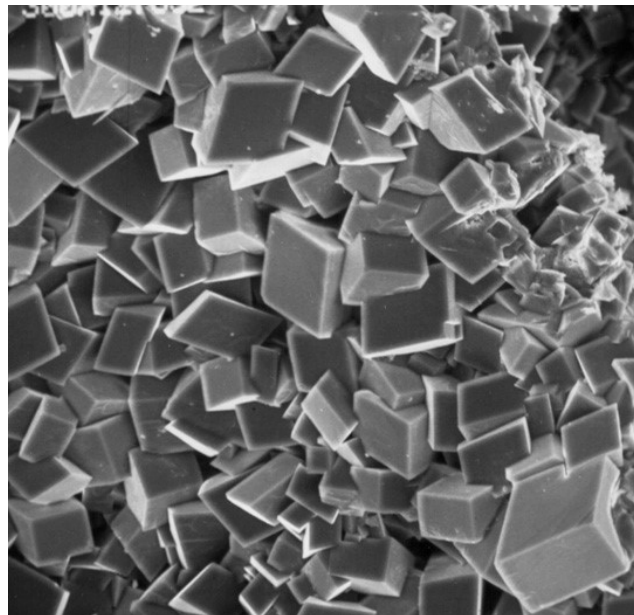
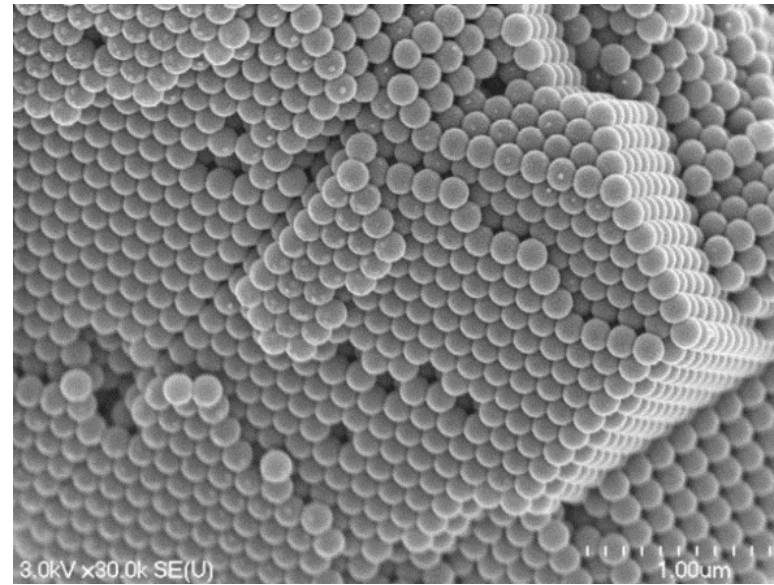
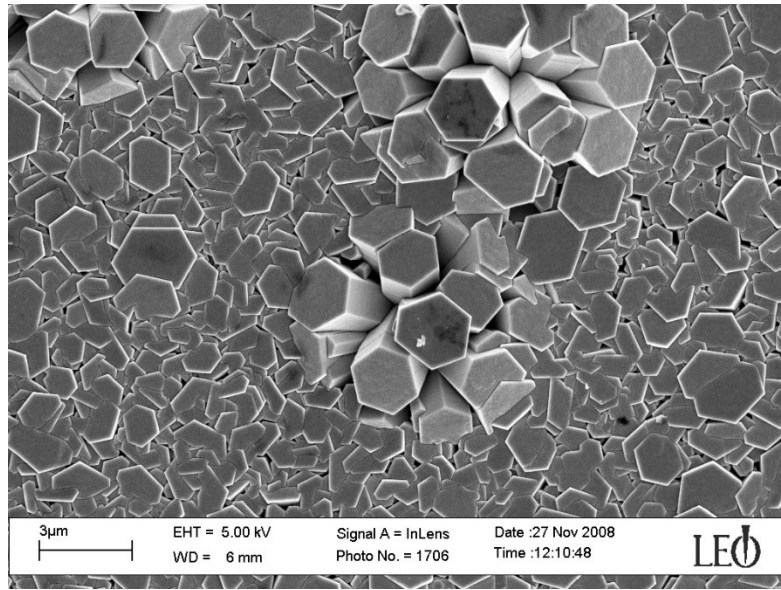
■ Policristalina : agregado de cristais com várias orientações e tamanhos



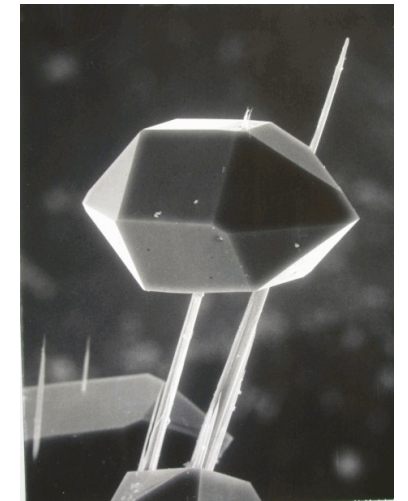
Estrutura  
cristalina

■ Amorfo: ordem do semicondutor mantida a curta distância, ou seja, entre os átomos vizinhos mais próximos.

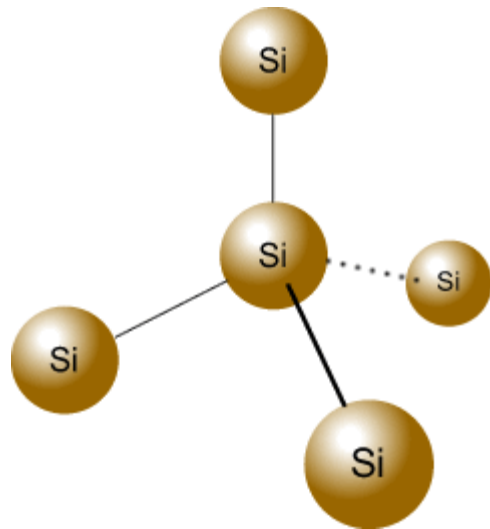




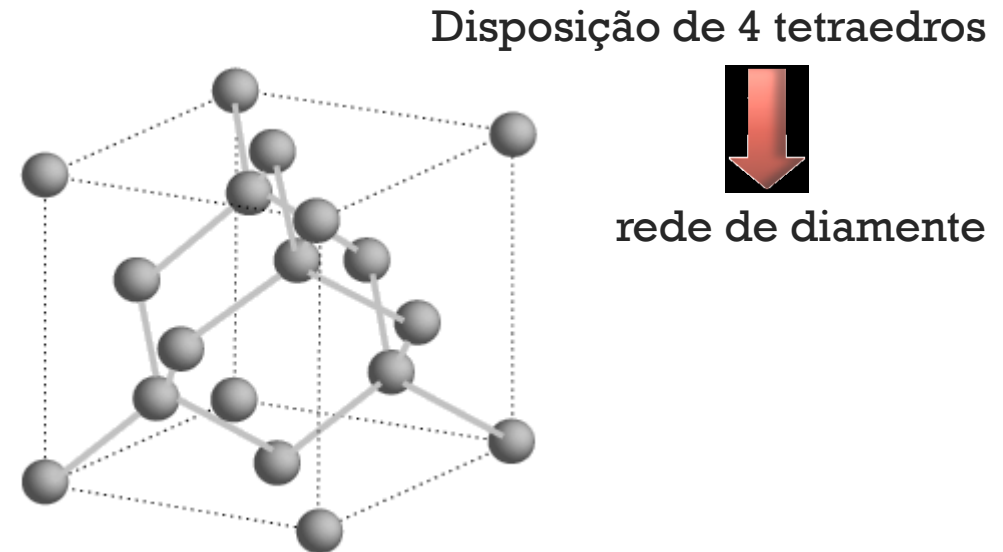
A scanning electron microscope (SEM) image of a single layer of nanocrystalline-silicon shells. The hollow shell structure improves light absorption while reducing the cost and weight of the device.  
Image: Yan Yao



- Semicondutores Simples : são constituídos por átomos de um único elemento da tabela periódica. Os mais importantes são o Si e o Ge (Grupo IV da tabela periódica).
- Os elementos do Grupo IV possuem 4 elétrons de valência com orbitais  $p$  parcialmente preenchidas.
  - Uma ligação estável exige a inclusão de mais 4 elétrons de valência de modo a preencher a orbital  $p$ .



Estrutura de tetraedro



**Legenda**

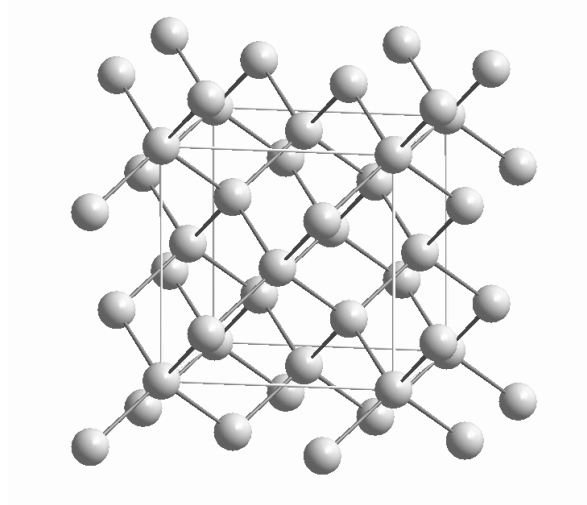
Nome: Silício  
N.º atómico: 14  
Símbolo: Si  
Constante de rede, a (Å): 5,43  
Peso atómico: 28,09  
Configuração electrónica: [Ne]3s<sup>2</sup>3p<sup>2</sup>  
Rede cristalina: DIA

↓

		Gases Raros					
		IIIA                      IVA                      VA                      VIA                      VIIA					
		↓	↓	↓	↓		
		IB	IIB				
Cobre <b>29</b> <b>Cu</b> 3,61    63,54 CFC [Ar]3d <sup>10</sup> 4p <sup>1</sup>	Zinco <b>30</b> <b>Zn</b> 2,66    65,37 4,95    HEX [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	Gálio <b>31</b> <b>Ga</b> 69,72 ORT [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	Germânio <b>32</b> <b>Ge</b> 5,66    72,6 DIA [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	Arsénico <b>33</b> <b>As</b> 4,13    74,92 TRI [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	Selénio <b>34</b> <b>Se</b> 78,96 MCL [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	Bromo <b>35</b> <b>Br</b> 79,91 ORT [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	Kripton <b>36</b> <b>Kr</b> 5,72    83,8 CFC [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>
Prata <b>47</b> <b>Ag</b> 4,09    107,87 CFC [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	Cádmio <b>48</b> <b>Cd</b> 2,98    112,4 5,62    HEX [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	Índio <b>49</b> <b>In</b> 114,8 TET [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	Estanho <b>50</b> <b>Sn</b> 118,7 TET [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	Antimónio <b>51</b> <b>Sb</b> 4,51    121,75 TRI [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	Telúrio <b>52</b> <b>Te</b> 4,46    127,6 5,93    HEX [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	Iodo <b>53</b> <b>I</b> 126,9 ORT [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	Xenon <b>54</b> <b>Xe</b> 6,20    3,77 CFC [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>
Ouro <b>79</b> <b>Au</b> 4,06    196,97 CFC [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	Mercúrio <b>80</b> <b>Hg</b> 2,99    200,6 TRI [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	Tálio <b>81</b> <b>Tl</b> 3,46    204,4 5,52    HEX [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>	Chumbo <b>82</b> <b>Pb</b> 4,95    207,2 CFC [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	Bismuto <b>83</b> <b>Bi</b> 4,75    208,98 TRI [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	Polónio <b>84</b> <b>Po</b> 3,36    209 CUB [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	Astato <b>85</b> <b>At</b> [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	Radon <b>86</b> <b>Rn</b> (222) CFC [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>

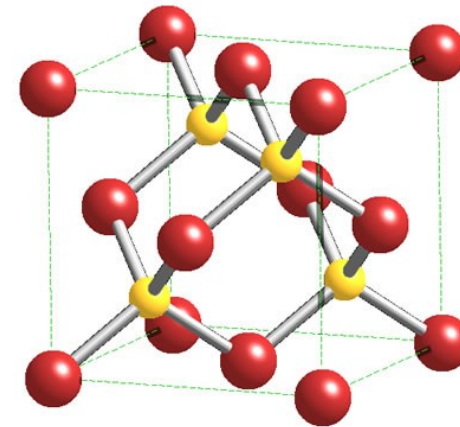


- Repetição espacial da rede de diamante dá origem à rede cristalina



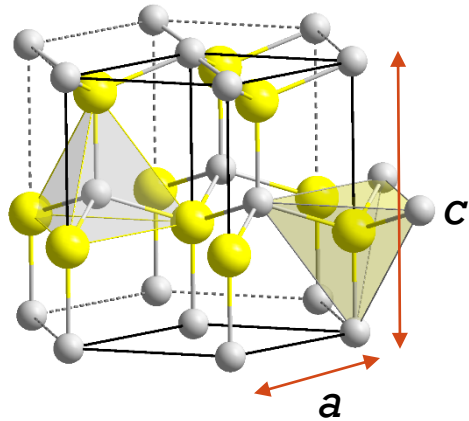
- Os Semicondutores Compostos são designados por binários, ternários ou quaternários.

- A maior parte cristaliza na rede Zinco-blenda
  - A ligação não é covalente pura.



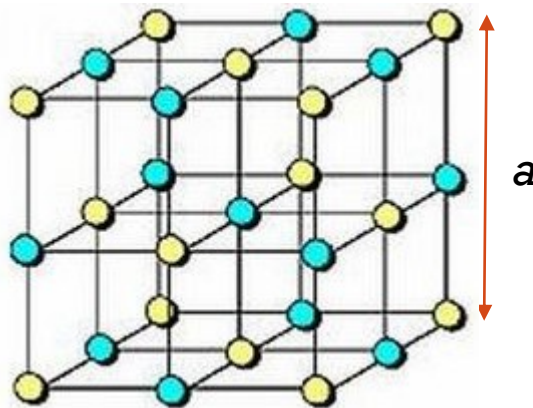
- Há alguns semicondutores que cristalizam noutro tipo de redes cristalinas:

- A rede da Wurtzite



- Duas redes hexagonais compactas deslocadas, uma relativa à outra ao longo da altura. Neste caso a constante de rede envolve dois parâmetros; a aresta da base  $a$  e a altura do prisma  $c$ .

- Sal Rochas



- Rede cúbica simples em que os átomos são alternadamente do mesmo tipo, pode ser vista como uma rede cúbica de faces centradas. A constante de rede é a aresta do cubo  $a$ .





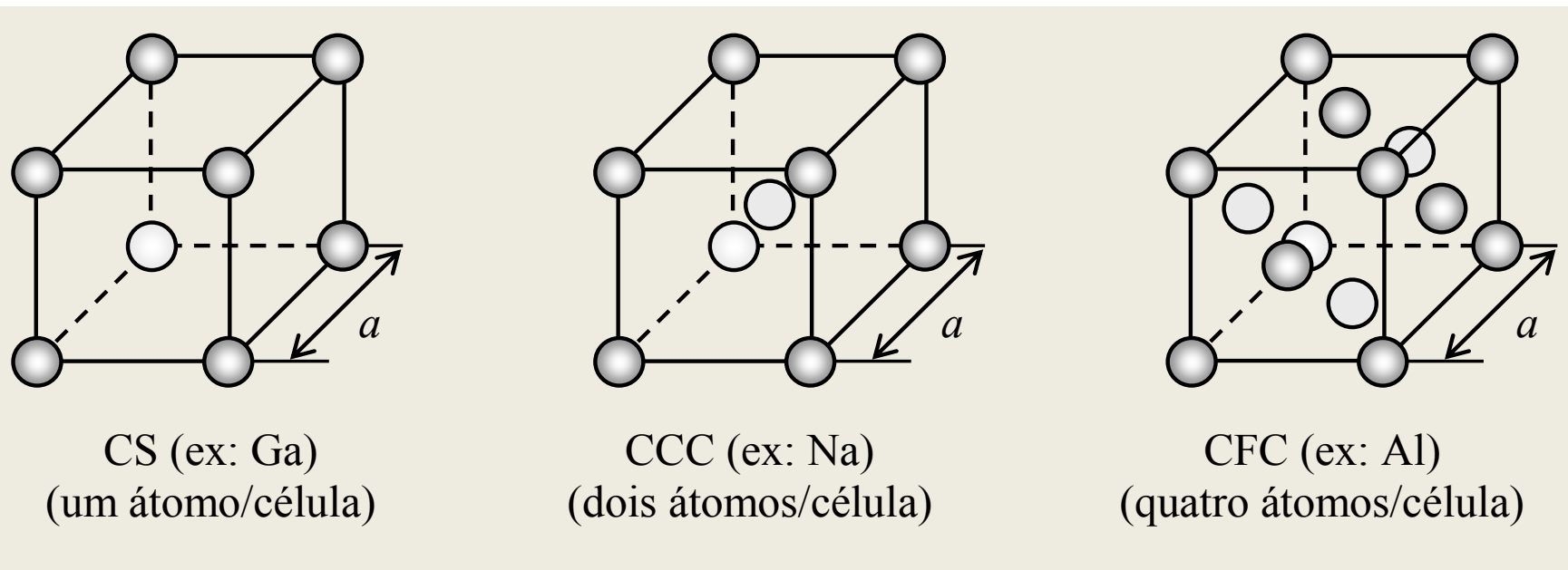
Alguns semicondutores compostos binários e os ternários correspondentes.

Binários	Ternários
AlAs GaAs	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
GaP GaAs	$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$
GaP InP	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$
InAs InP	$\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$
GaSb InSb	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$
GaAs InAs	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$



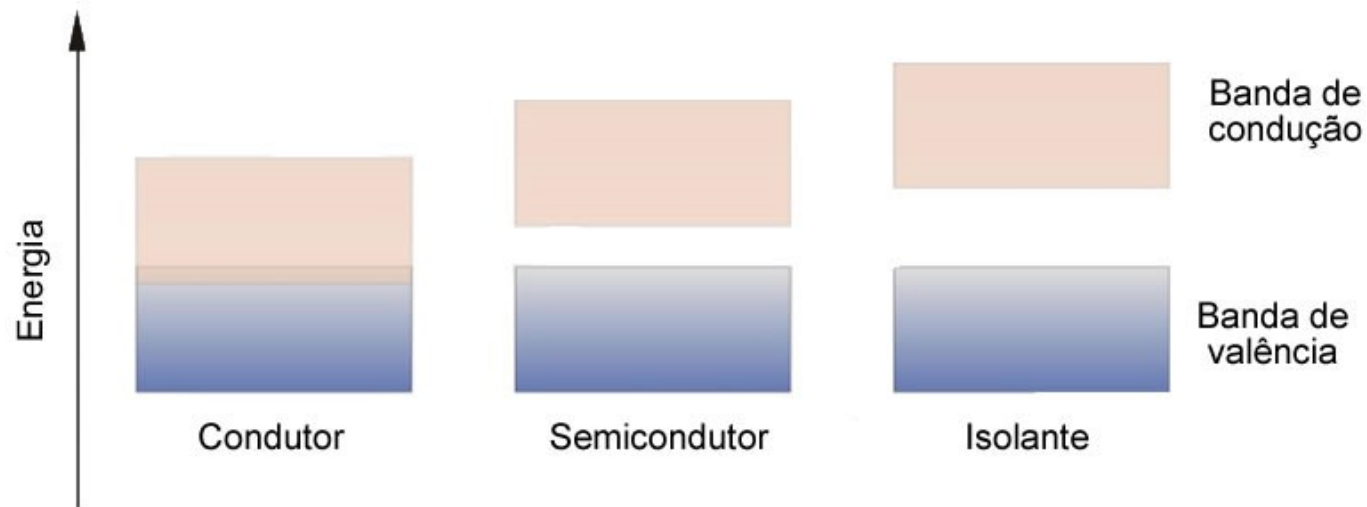
As células elementares podem ser agrupadas em sete sistemas de simetria: **Cúbico**, **hexagonal**, **tetragonal**, **Trigonal**, **ortorrômbico**, **monoclínico** e **triclínico**.

Em particular, no sistema cúbico, podem-se ainda distinguir a rede cúbica simples (CS), a rede cúbica de corpo centrado (CCC) e a rede cúbica de faces centradas (CFC).



## Bandas de energia nos semicondutores

- Modelo de bandas para os metais, semicondutores e isolantes.



- A altura da banda proibida distingue os semicondutores dos isolantes.
  - $W_G > 4,5$  eV são isolantes.
  - A 0K a banda de valência está completamente preenchida por elétrons e a banda de condução completamente vazia.
  - No semicondutor a energia do elétron relaciona-se com o momento através da relação:  $W = \frac{p^2}{2m_0}$ .



- Para as bandas de condução e de valência, há duas representações básicas possíveis para a relação  $W(p)$  e que se designa por:

1. **semicondutores de banda direta:** o topo da banda de valência e o mínimo absoluto da banda de condução estão associados ao mesmo valor do momento (GaAs).

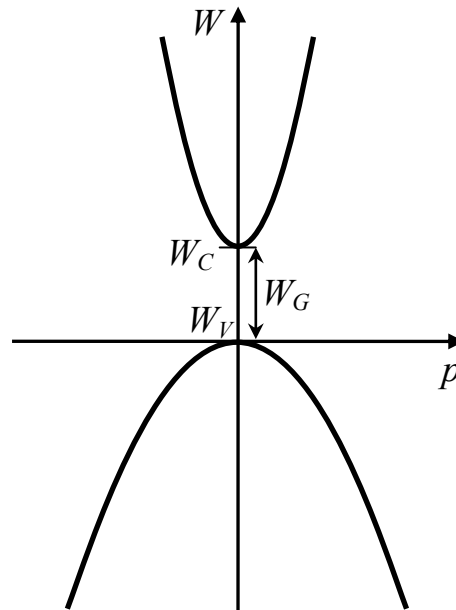
2. **semicondutores de banda indireta:** o mínimo absoluto da banda de condução e o máximo absoluto da banda de valência estão associados a valores diferentes do momento, como, por exemplo, o Si.

$$W = \frac{p^2}{2m_V^*} + W_V$$

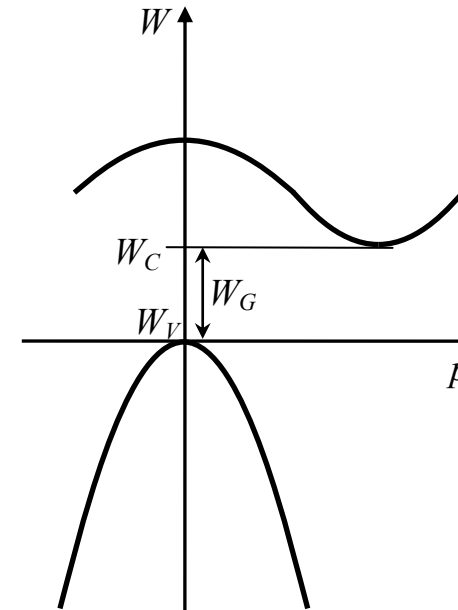
$$W = \frac{p^2}{2m_n^*} + W_C$$



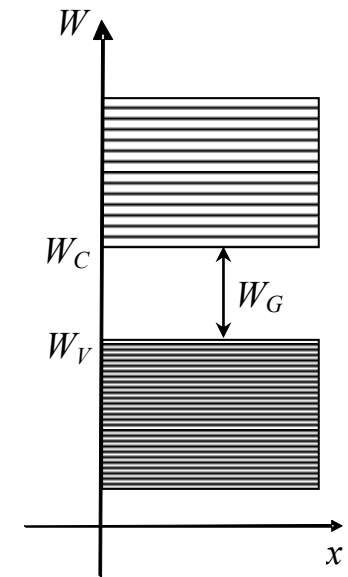
$$m_n^* = 1 / \left( \frac{d^2W}{dp^2} \right)$$



(a)



(b)



(c)



- A relação entre  $W_G$  e o comprimento de onda  $\lambda$  parte da definição da energia associada a um fóton dada por:

$$W_{\text{fot\~{o}}} = hf$$

em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  a frequência da radiação. No vácuo

$$f = c / \lambda$$

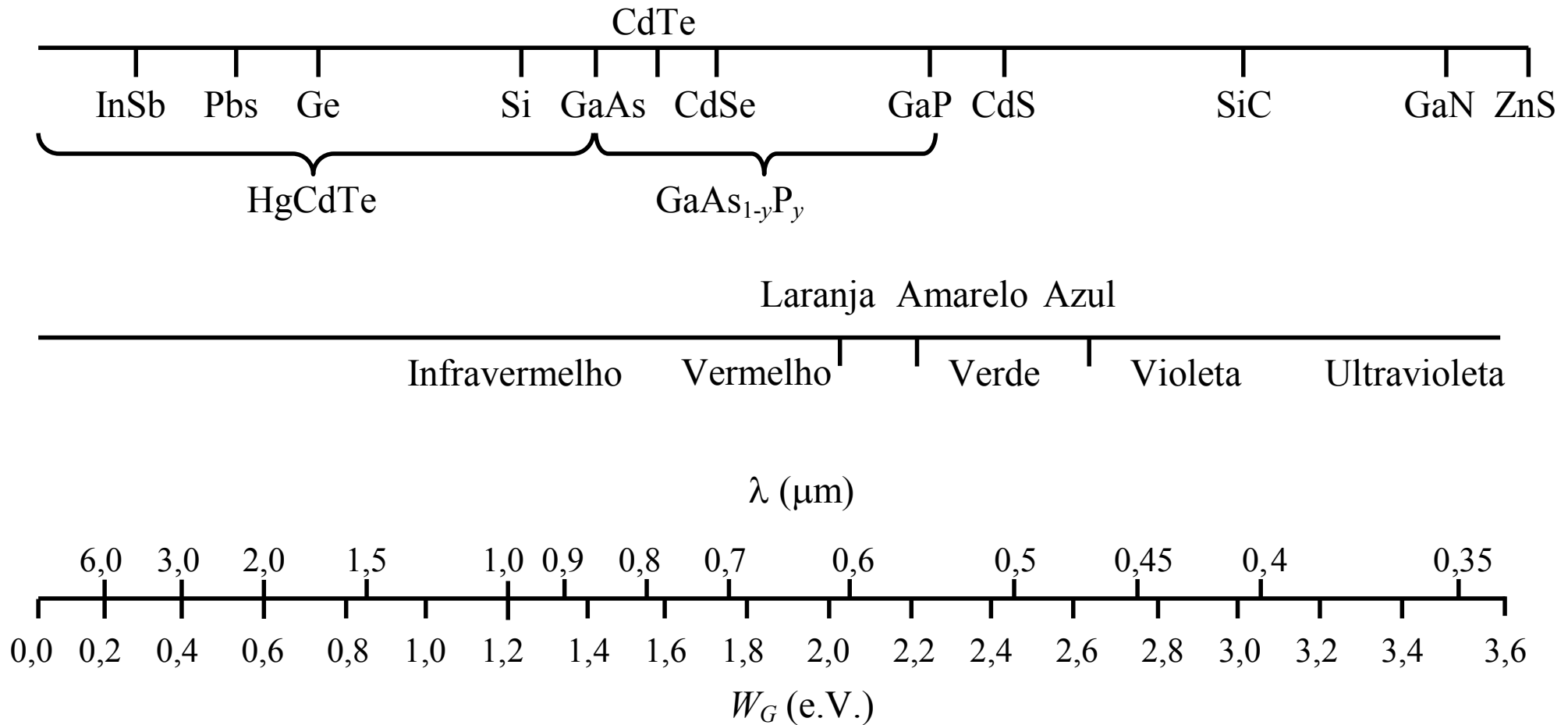
Identificando a energia do fóton com  $W_G$ , a relação entre  $W_G$  e  $\lambda$  será, então:

$$W_G = \frac{hc}{\lambda}$$



$$W_G (eV) = \frac{1,243}{\lambda(\mu m)}$$



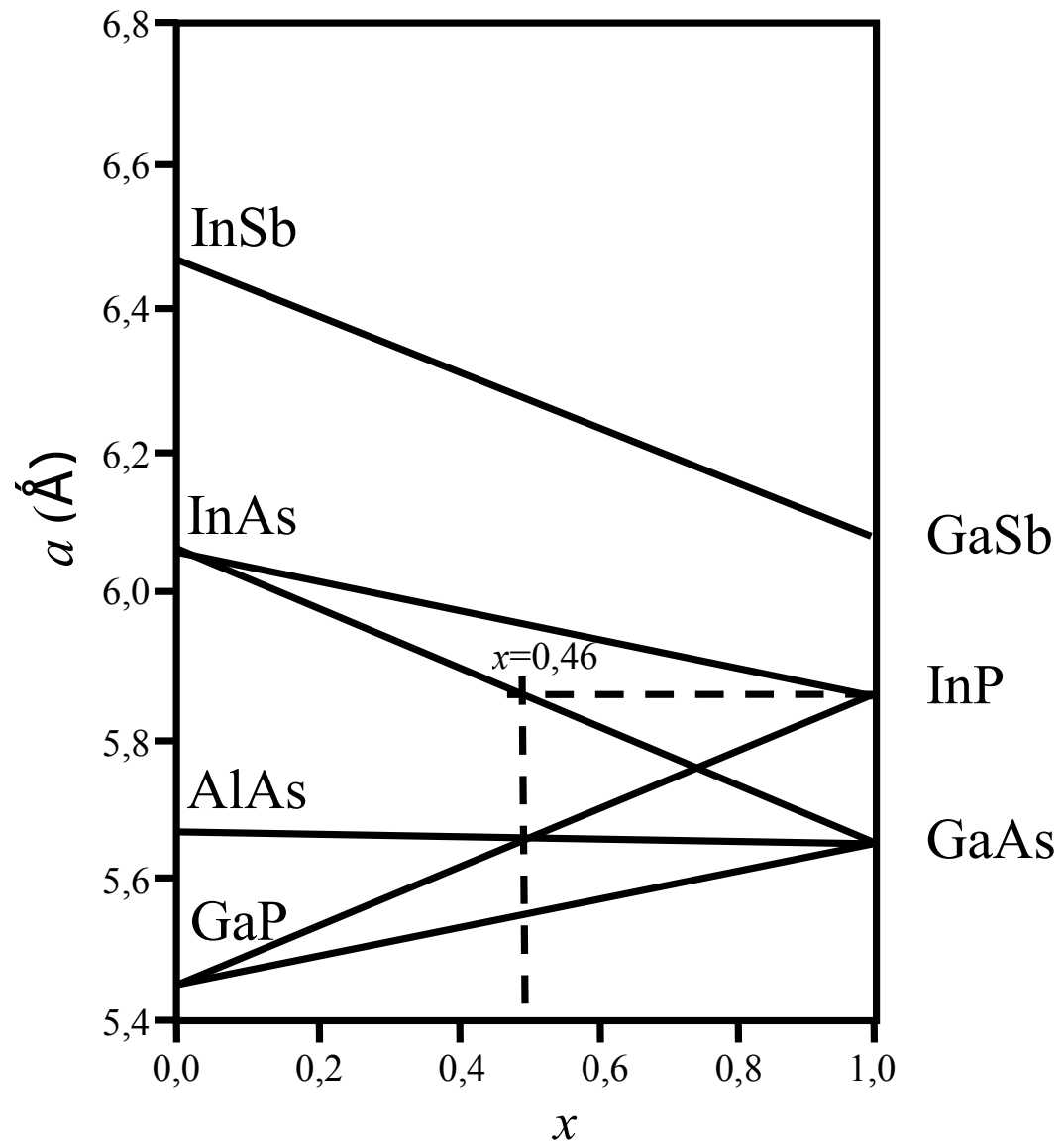
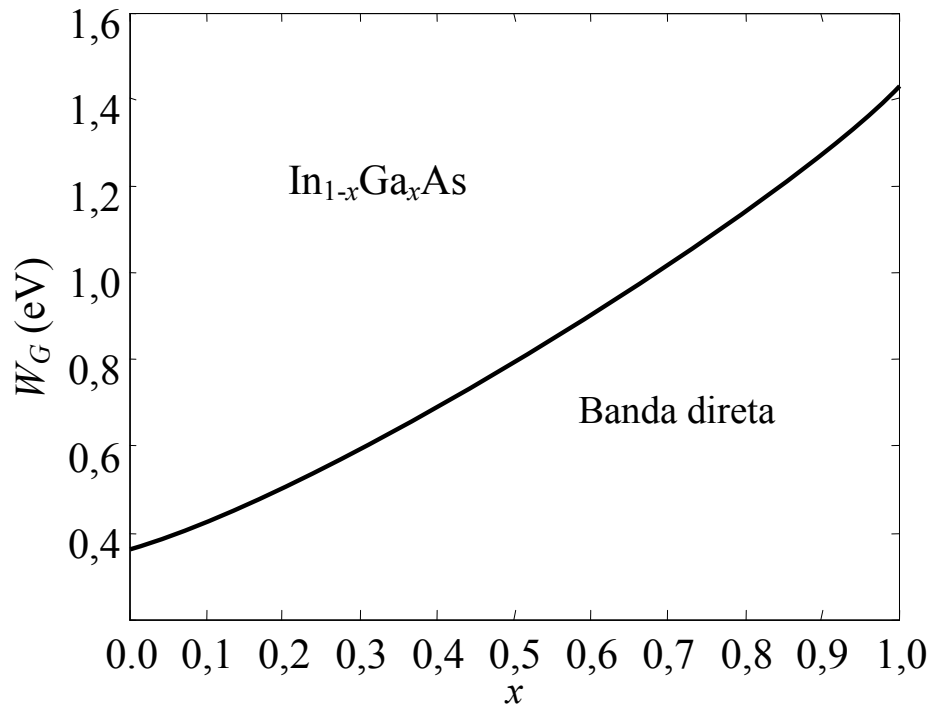
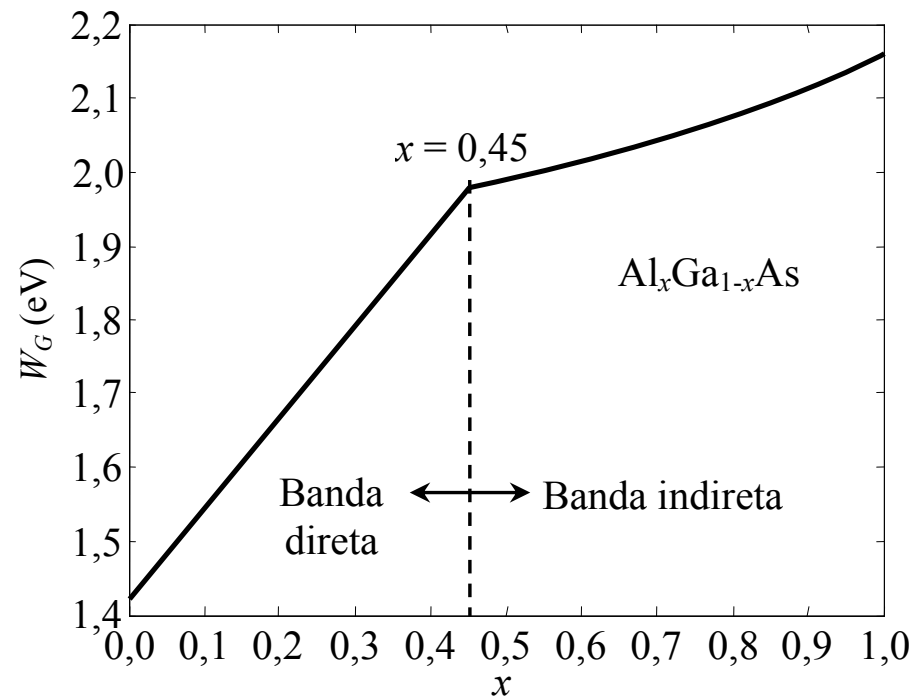


- As propriedades dos semicondutores compostos ternários e quaternários dependem das propriedades dos binários associados e os seus valores podem-se relacionar com a composição  $x$ , de forma linear ou não.
- As grandezas que possuem uma variação linear com a composição são a constante de rede ( $a$ ), o coeficiente de dilatação ( $\alpha$ ) e a permitividade elétrica ( $\epsilon$ ).

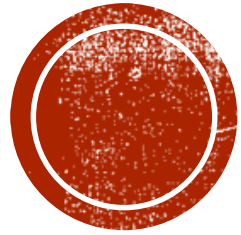
$$a_{A_x B_{1-x} C} = x a_{AC} + (1 - x) a_{BC}$$

- Apresentam uma variação não-linear com a composição a altura da banda proibida ( $W_G$ ), a mobilidade ( $\mu$ ) e a condutividade térmica ( $\chi$ ).









# **SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS E EXTRÍNSECOS EM EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO**



- **Semicondutores intrínsecos**: possuem na sua composição apenas átomos de um mesmo elemento.
- **Semicondutores Extrínsecos**: são aqueles em que alguns dos átomos de base são substituídos por outros, designados de impurezas de substituição (concentrações da ordem de 1 para 1 milhão).



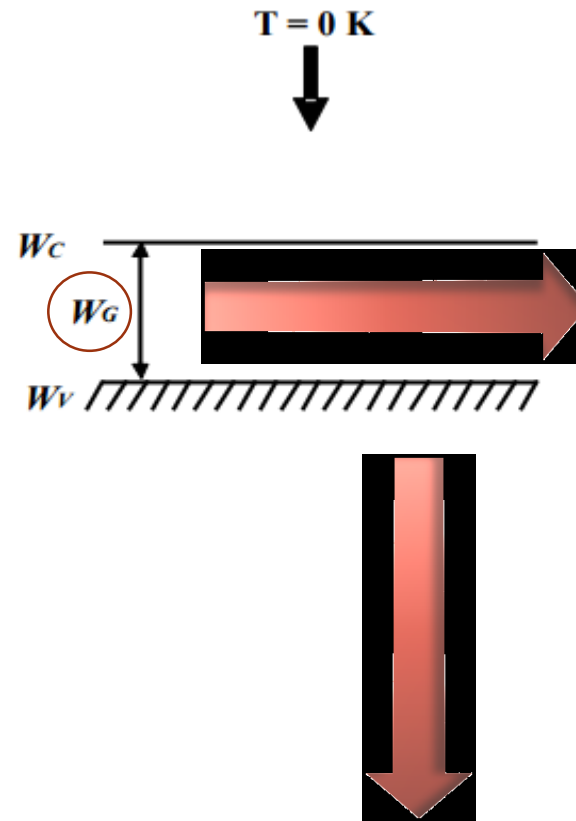
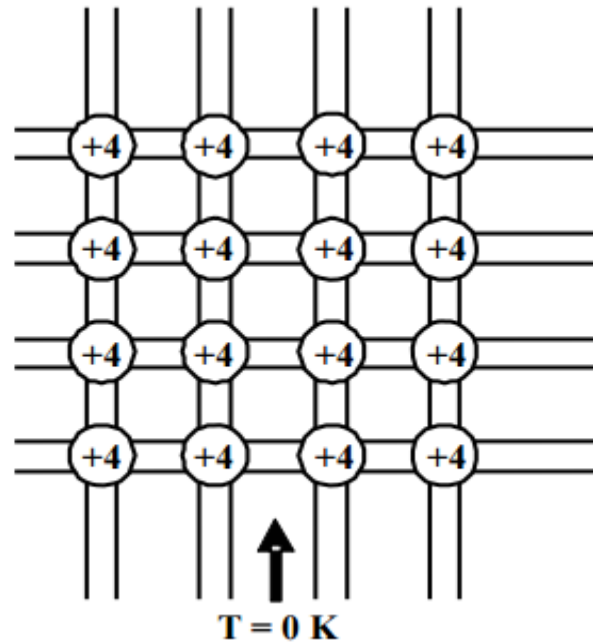
leva à alteração das propriedades elétricas.

Para o Si, as impurezas dadoras mais utilizadas são o P, As e Sb e a impureza aceitadora o B.



## Modelo das ligações covalentes e das bandas de energia

- As propriedades óticas podem ser analisadas de forma simplificada, recorrendo ao **modelo das ligações covalentes** e/ou ao **modelo das bandas de energia**.

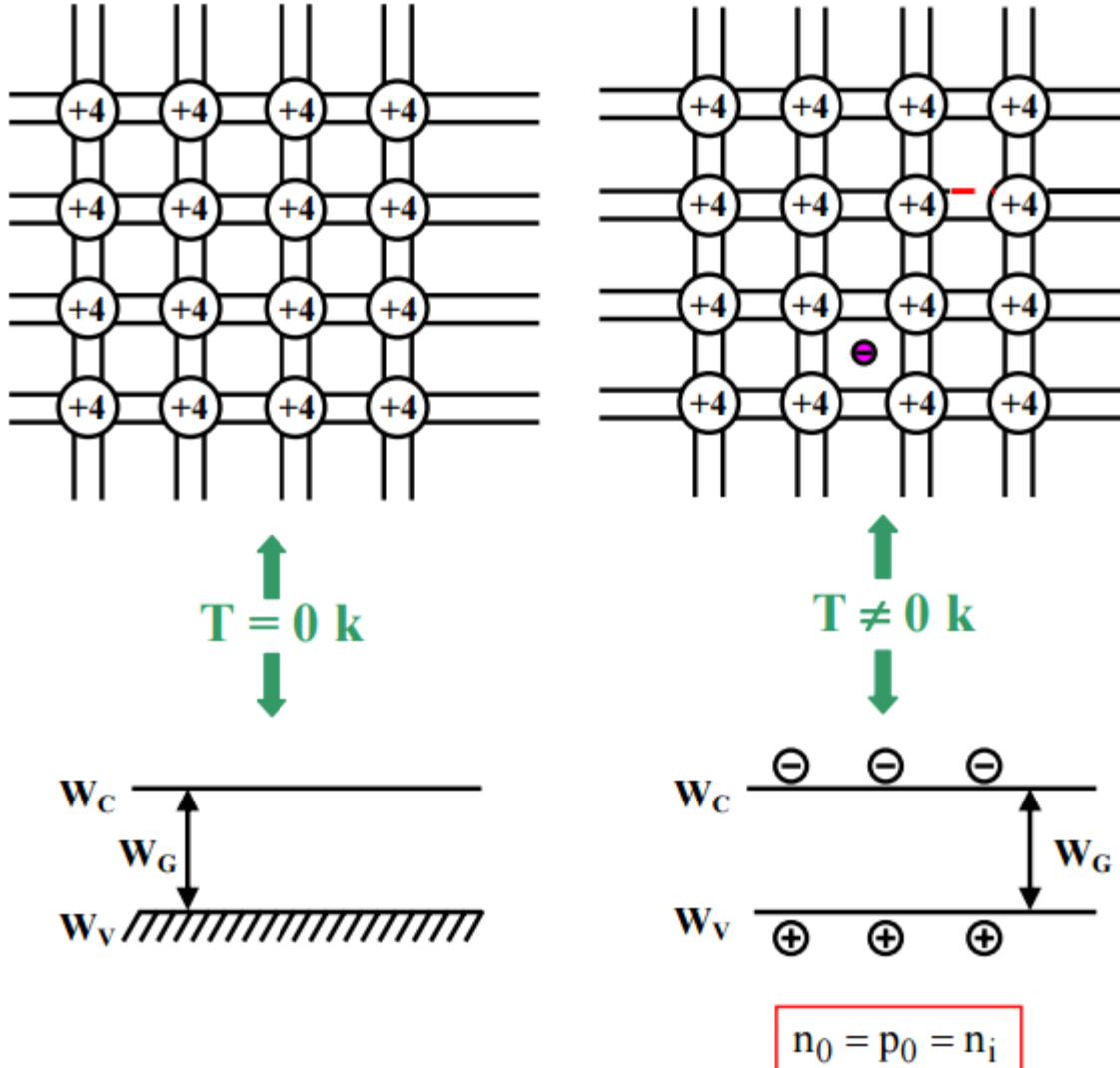


- Parâmetro característico de cada material semiconductor

- Banda de valência a 0K está totalmente preenchida



## Semicondutores Intrínsecos



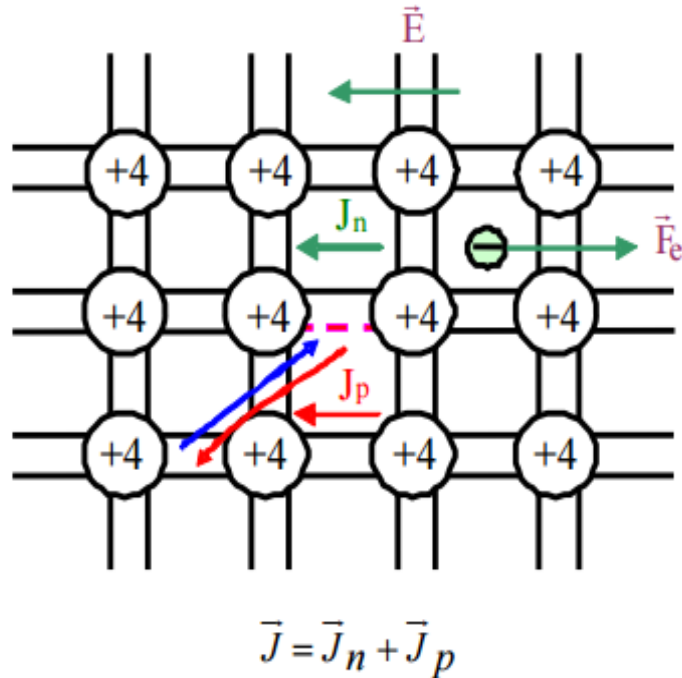
- T=0K
  - Banda de valência totalmente preenchida e banda de condução vazia.
- T≠0K
  - Alguns elétrons da banda de valência adquirem energia suficiente para passarem para a banda de condução deixando na banda de valência um número igual de ligações incompletas.



- **Ritmo de Geração Térmica:**  $G_{ter}[\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$ , como sendo o número de elétrons na unidade de volume e na unidade de tempo que, devido à temperatura transitam da banda de valência para a banda de condução.
- **Ritmo de Recombinação**  $R[\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$ , que envolve a passagem de elétrons da banda de condução para a banda de valência.
  - Em equilíbrio termodinâmico tem de se verificar a condição:  $G_{ter} = R$ .



## Ação do campo eléctrico



- Ao aplicar um campo  $E$  para  $T \neq 0K$  resulta:
  - Numa densidade de corrente, uma vez que os elétrons da banda de condução e da banda de valência já podem alterar o seu estado de movimento.
  - Que o movimento dos elétrons de valência para uma ligação incompleta pode ser interpretado como equivalente ao movimento de uma carga positiva deslocando-se no sentido oposto (Buraco).
- A densidade de buracos  $p$  é igual à densidade de ligações incompletas e, no caso do semicondutor intrínseco, é igual à densidade de elétrons  $n$  a banda de condução.



- Em equilíbrio termodinâmico  $n_0 = p_0 = n_i$



- **Densidade intrínseca**

Valores de  $n_i$  para vários semicondutores a 300 K.

Semicondutor	$n_i$ (m <sup>-3</sup> )	$W_G$ (eV)
Si	$1,02 \times 10^{16}$	1,124
Ge	$2,33 \times 10^{19}$	0,664
GaAs	$2,1 \times 10^{12}$	1,424
InAs	$1,3 \times 10^{21}$	0,354
InP	$1,2 \times 10^{14}$	1,344

- $n_i$  também varia com  $T$  e com  $W_G$

$$n_i \propto T^{3/2} e^{-W_G/2kT}$$

$T$  temperatura absoluta (em graus Kelvin).

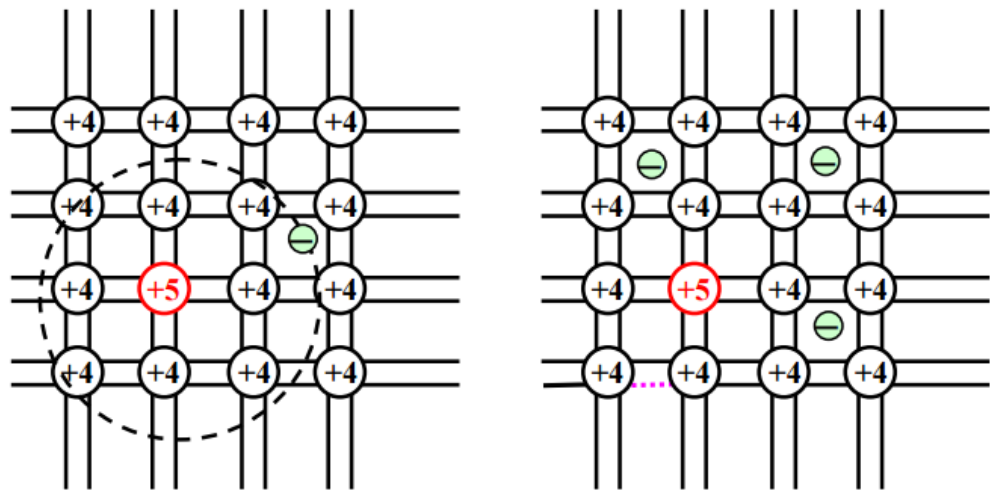
$W_G$  a altura da banda proibida.

$k$  a constante de Boltzmann ( $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ )

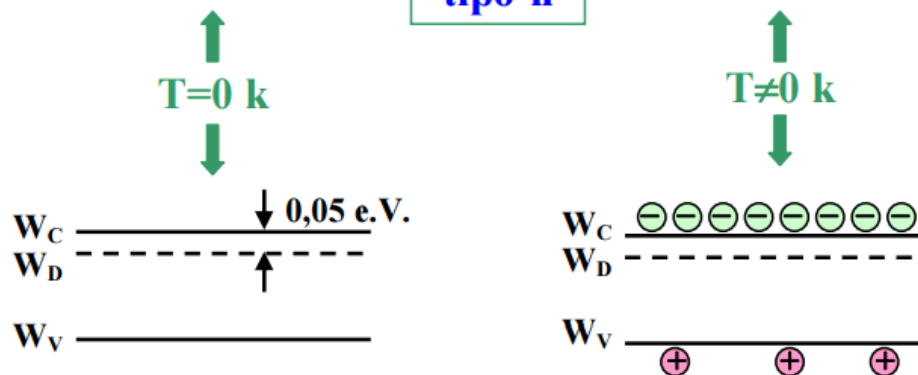
$kT$  energia característica da temperatura  $T$   
( $KT(300\text{K}) = 0,026\text{eV}$ ).



## Semicondutores Extrínsecos

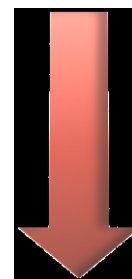


tipo-n



EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO →  $n_0 p_0 = n_i^2$

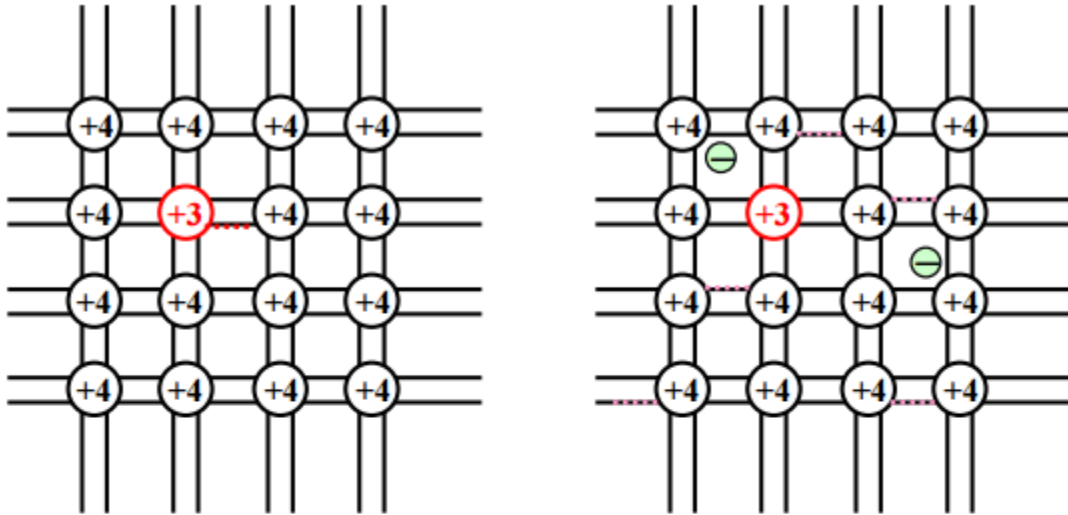
- Hipótese: adicionar impurezas dadoras ao Si.
- A  $T=0K$  a impureza dadora possui um eletrão que não se encontra ligado aos átomos vizinhos. Este eletrão não ligado possui uma energia superior à dos eletrões ligados com valores próximos de  $W_c$  ( $W_D$ ).



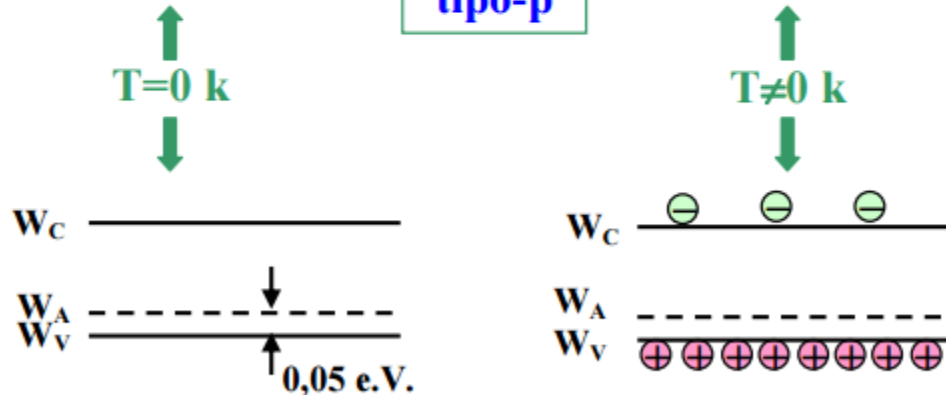
Semicondutor extrínseco do tipo  $n$ .







tipo-p



EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO →  $n_0 p_0 = n_i^2$

- Hipótese: adicionar impurezas aceitadoras ao Si.
    - A  $T=0K$ , a impureza possui apenas três elétrons para partilhar com os quatro átomos de Si vizinhos, ficando uma ligação incompleta.
    - A energia associada a esta ligação incompleta é superior a  $W_v$  mas relativamente próxima ( $W_A$ ).
- ↓
- Semicondutor extrínseco do tipo *p*.



- Os semicondutores com os dois tipos de impurezas denominam-se de compensados.
- Em equilíbrio termodinâmico um material semiconductor **exibe neutralidade elétrica** ou seja

$$\rho = 0 = -q(n_0 + N_a^-) + q(p_0 + N_d^+) \Leftrightarrow n_0 - p_0 = N_d^+ - N_a^-$$

**Condições:**

**Se**  $N_d^+ - N_a^- > 0 \Leftrightarrow n_0 > p_0$



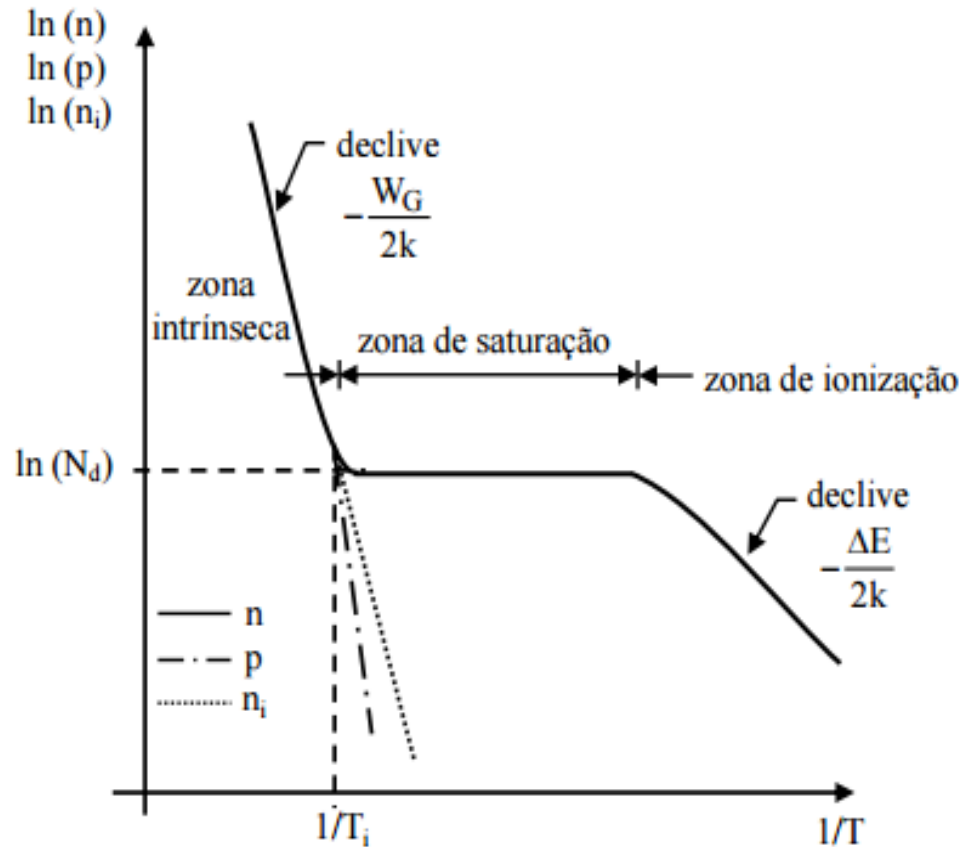
**semiconductor do tipo  $n$**

**Se**  $N_d^+ - N_a^- < 0 \Leftrightarrow n_0 < p_0$



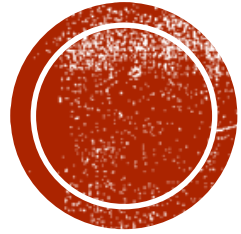
**semiconductor do tipo  $p$**






- **Existência de três zonas distintas:**
  - **Zona de Ionização:** aumento da temperatura aumenta a densidade de portadores (andamento exponencial com T).
  - **Zona de Saturação:** impurezas todas ionizadas, densidade de elétrons praticamente constante.
  - **Zona Intrínseca:** densidade de elétrons e buracos idênticas.





# GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO



- Em equilíbrio termodinâmico : 
- O processo de Geração e de Recombinação podem ser classificado como radiativo e não – radiativo
  - Processos Radiativos : envolvem a emissão ou absorção de fótons.
  - Processos Não Radiativos: envolvem interações com os átomos da rede cristalina, cujas as vibrações estão associadas a partículas denominadas por fonões ou trocas de energia e momento com outro elétron ou buraco.
- Os dois processos podem ocorrer banda a banda ou envolverem estados na banda proibida (transições de Shockley-Read-Hall(SRH)).
- Para a Recombinação banda a banda  $R(T,n,p) = r(T)np$



Coeficiente da captura

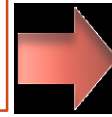


- **Efeito fotoelétrico Interno**

- Hipótese: semicondutor iluminado uniformemente com uma radiação monocromática de energia  $W \geq W_G$ .

- A Geração de pares de elétrons e buracos possui um termo adicional:

$$G = G_{ter} + G_{fe}$$



Geração de pares elétrons-buracos devido ao efeito fotoelétrico.



Geração de pares elétrons-buracos devido ao efeito térmico.

$$\begin{aligned} n_{il} &= n_0 + \Delta \\ p_{il} &= p_0 + \Delta \end{aligned}$$



Excesso de portadores resultantes da iluminação



- Para  $t = 0$ :

$$G = G_{ter} + G_{fe} \quad \text{e} \quad R = rn_i^2 = G_{ter} \Rightarrow G > R$$

Numa situação estacionária temos:

$$G_{ter} + G_{fe} = rn_{il}P_{il} \Leftrightarrow 1 + \frac{G_{fe}}{G_{ter}} = \frac{rn_{il}P_{il}}{G_{ter}} \Leftrightarrow n_{il}P_{il} = n_i^2 \left( 1 + \frac{G_{fe}}{G_{ter}} \right)$$

A taxa de geração por efeito fotoelétrico está associada a uma grandeza característica do material: **o coeficiente de absorção**  $\alpha[m^{-1}]$



Número de fótons que em média são absorvidos por unidade de comprimento.



- A quantidade  $1/\alpha$  é a distância que em média o fóton recorre até ser absorvido.



Depende da energia dos fótons e do material

- Sendo  $\phi(x)$  o fluxo de fótons com uma dada energia que incide na face da amostra de semiconductor, a sua taxa de variação com a distância é proporcional ao seu valor:

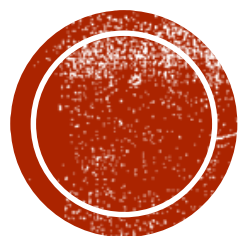
$$-\frac{d\phi(x)}{dx} = \alpha\phi(x) \Rightarrow \phi(x) = \phi_0 e^{-\alpha x}$$



$$G_{fe} = \alpha\phi_0 e^{-\alpha x}$$



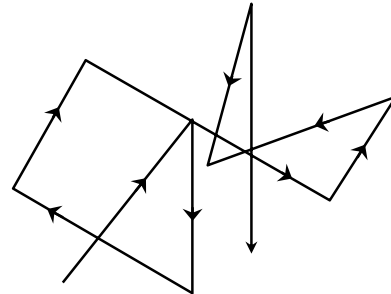




**CONDUÇÃO**



- Num cristal perfeito e sob o ponto de vista clássico, as partículas livres tem um movimento retilíneo e uniforme, limitado somente pelas paredes do cristal.
- Na realidade, o movimento é afetado pela existência de “**choques**” que obrigam a trajetória a desviar-se de forma aleatória.
- A temperatura é o fator que mais afeta os choques entre os elétrons.
- Com a temperatura, os átomos oscilam em torno das posições de equilíbrio, os elétrons existentes nesses átomos vão sofrer essas alterações movimentando-se segundo a figura:



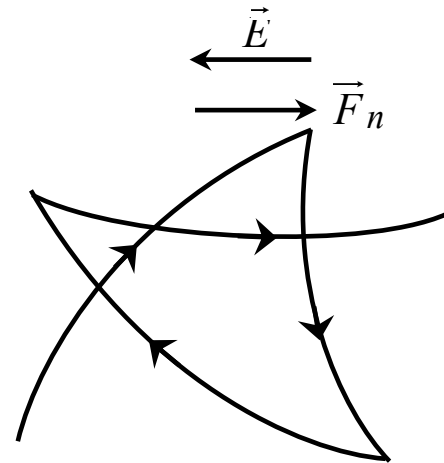
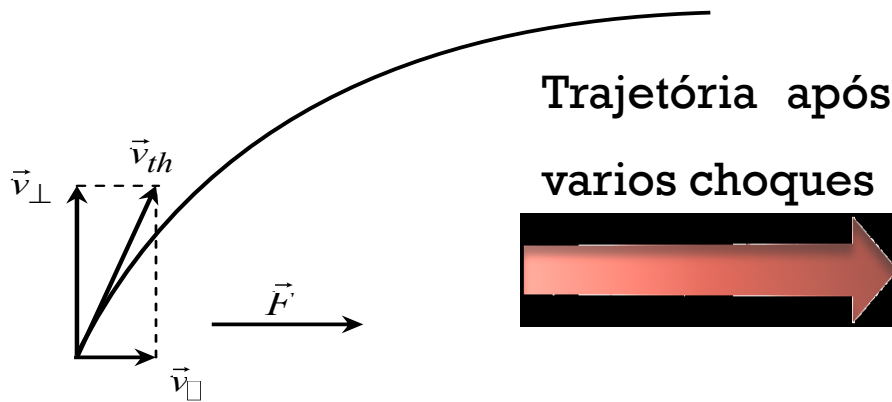
- Este movimento de agitação térmica **não dá origem a corrente elétrica resultando**  
 $\langle \vec{v}_{th} \rangle = 0$ .



- **Tempo Livre médio**( $\tau$ ): tempo que decorre entre dois “choques” consecutivos.
- **Espaço Livre médio**: distância percorrida até ocorrer um choque.
- Na presença de um campo elétrico  $\mathbf{E}$ , os portadores de carga no semiconductor ficam sujeitos a uma força elétrica dada por:

$$\vec{F}_n = -q\vec{E} \text{ e } \vec{F}_p = q\vec{E}$$

$\mathbf{E}=\text{const.}$   Movimento é uniformemente variado , resultando numa trajetória parabólica.



Se  $\mathbf{E}$  não for elevado:  $\vec{v} = \vec{v}_{th} + \vec{v}_F$

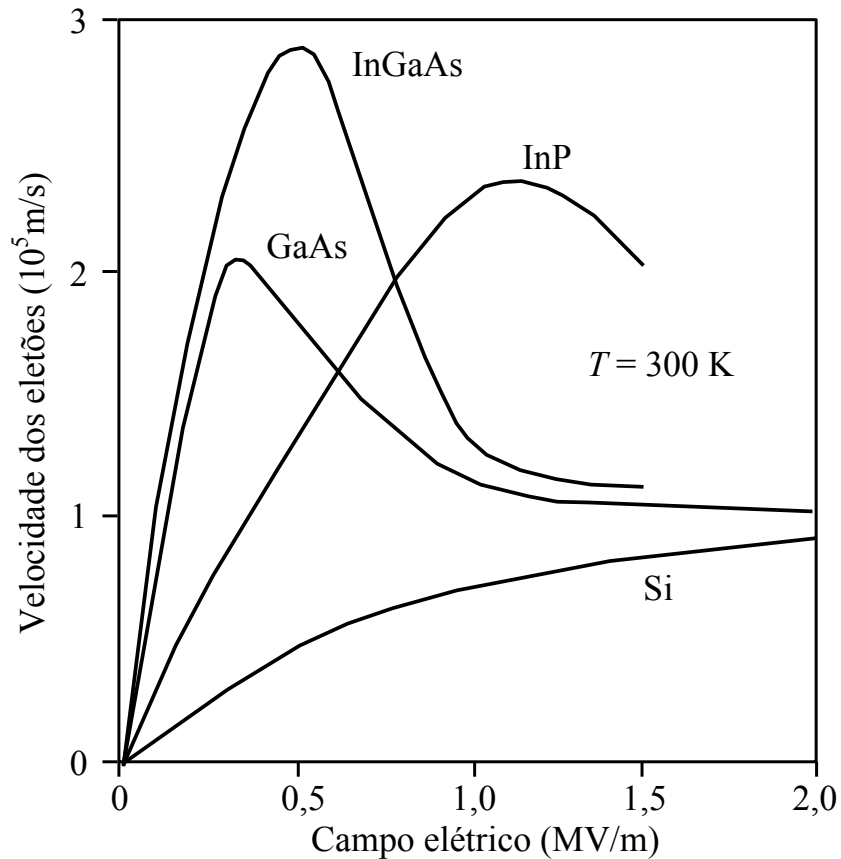
Em valores médios:  $\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_{th} \rangle + \langle \vec{v}_F \rangle = \langle \vec{v}_F \rangle$

Entre choques:  $\langle \vec{v}_F \rangle = \frac{\vec{F}}{m^*} \langle t \rangle = \frac{\vec{F}}{m^*} \tau$

Para os elétrões:  $\langle \vec{v}_F \rangle_n = -\frac{\tau_n}{m_n^*} \vec{E} = -(\mu_n) \vec{E}$

Mobilidade dos elétrões



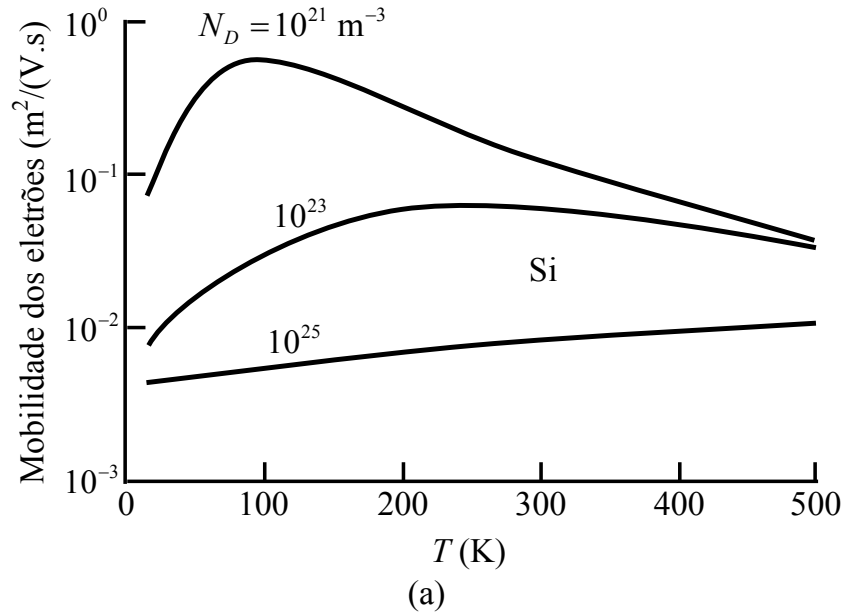



- As relações de proporcionalidade entre a velocidade média, e o campo elétrico, só são verificadas para campos elétricos baixos e:
  - quando não há alteração significativa da velocidade ou da energia dos portadores.
- A evolução da velocidade de deriva com o campo elétrico depende do material semiconductor e tende a saturar para campos elétricos elevados.

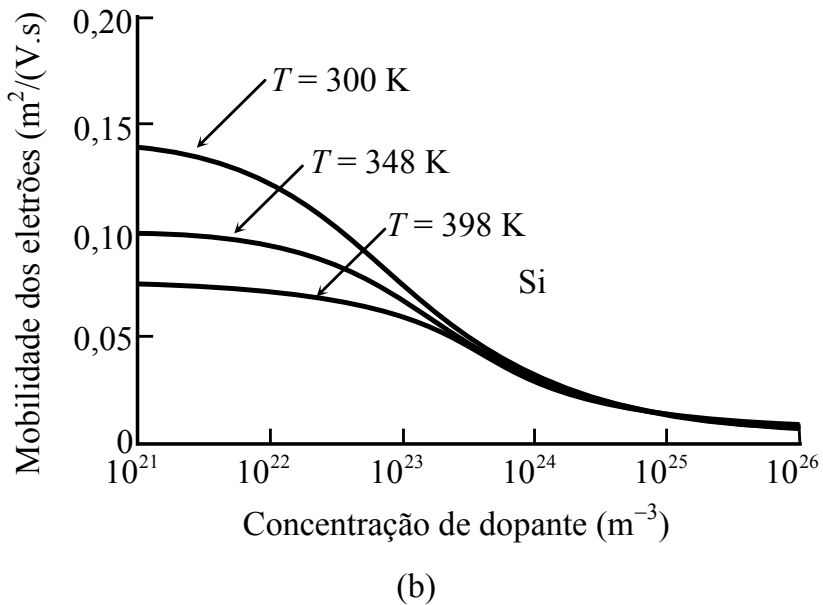
Valores típicos das mobilidades dos elétrons e buracos para vários semicondutores, a 300 K. É importante realçar que para um material a uma dada temperatura se verifica sempre  $\mu_p < \mu_n$

T = 300 K	Ge	Si	GaAs
$\mu_n$ ( $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	0,39	0,15	0,85
$\mu_p$ ( $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	0,19	0,045	0,04





- Um aumento da  $T$ , em geral, faz diminuir a mobilidade, porque aumenta a frequência de “choques” com os átomos da rede.
- Para um semiconductor com uma elevada  $N_D$  e na gama de  $T$  baixas, um aumento de  $T$  pode conduzir a um aumento da mobilidade  diminuição de choques associados às impurezas.



- Para uma dada  $T$ , o aumento da  $N_D$  conduz sempre a uma diminuição das mobilidades .



- A existência de  $\langle \vec{v}_F \rangle \neq 0$  segundo a direção do campo dá origem a uma corrente elétrica. Atendendo que a densidade de corrente é dada por,  $\vec{J} = \rho \langle \vec{v}_F \rangle$ .
- Para os dois portadores de carga vem que:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E}$$

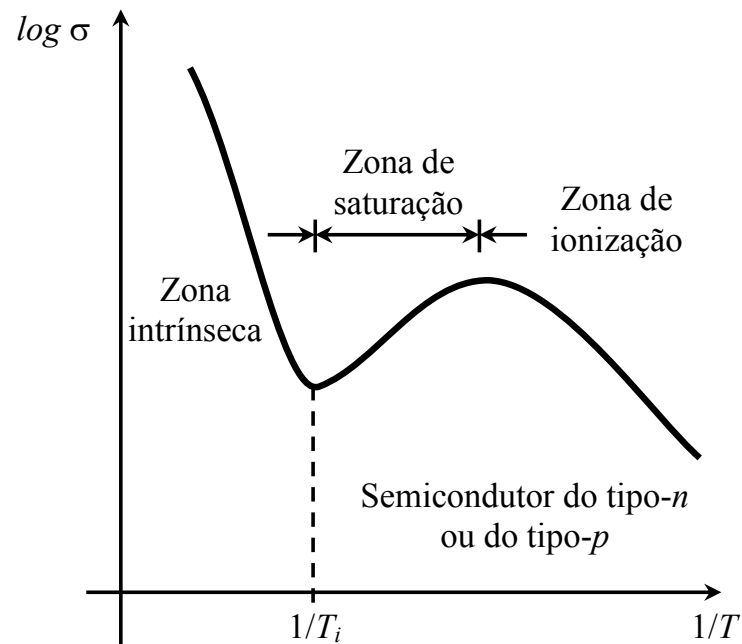
e

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E}$$

Conductividade  $\sigma$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= qn_i(\mu_n + \mu_p) \\ \sigma_n &= qn\mu_n \\ \sigma_p &= qp\mu_p \end{aligned} \right\}$$

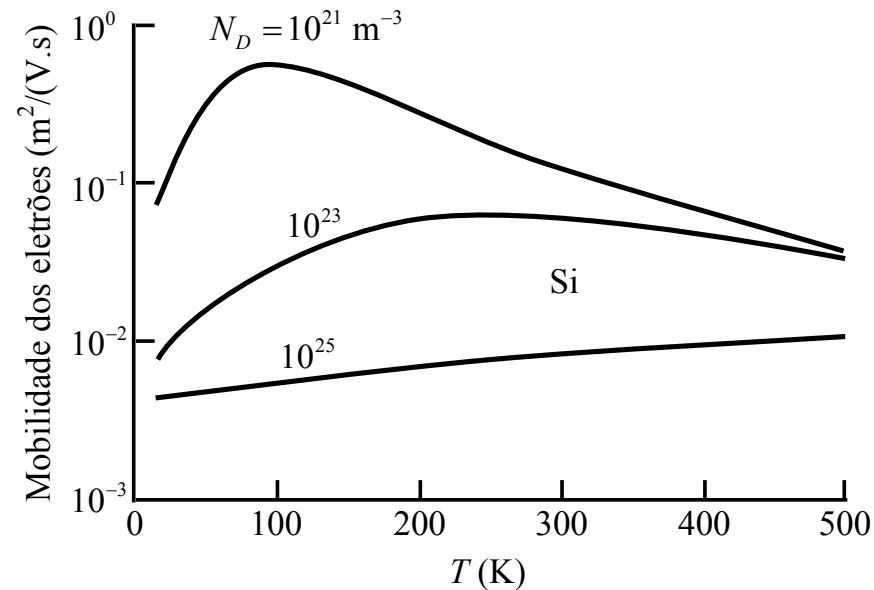
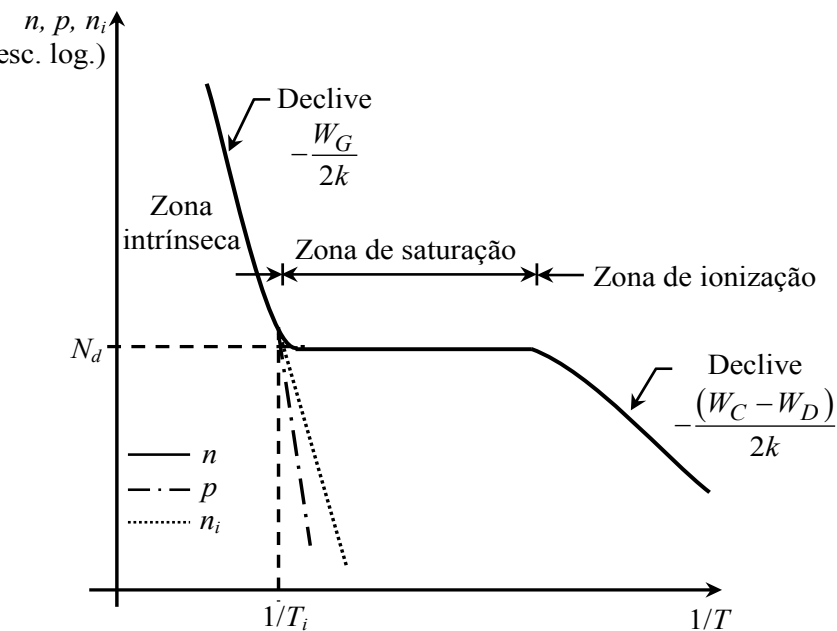




- É possível distinguir três zonas: **ionização, saturação e intrínseca.**

- **Zona de saturação:**

- diminuição da condutividade com o aumento da temperatura
- densidade de portadores aproximadamente constante neste intervalo de temperaturas, mas a mobilidade descer





- A sensibilidade à  $T$  das resistências de semicondutor pode, ser utilizada na implementação de **sensores de temperatura**.
- As resistências mais sensíveis à  $T$  são de semicondutor intrínseco e designam-se por **termístores de coeficiente de temperatura negativo** (NTC – *Negative Temperature Coefficient*).

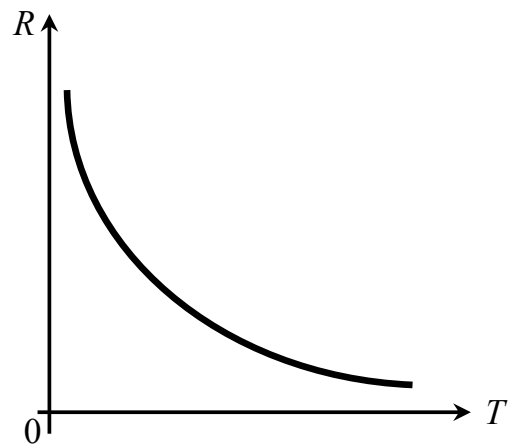
▪ Para um semicondutor intrínseco

$$\sigma = qn_i (\mu_n + \mu_p)$$

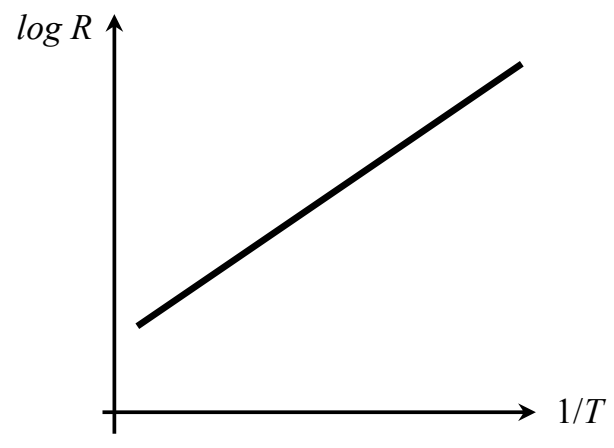
$$n_i \propto T^{3/2} e^{-W_G/2kT} \quad e \quad \mu \propto T^{-3/2}$$



$$R \propto e^{W_G/2kT}$$



(a)



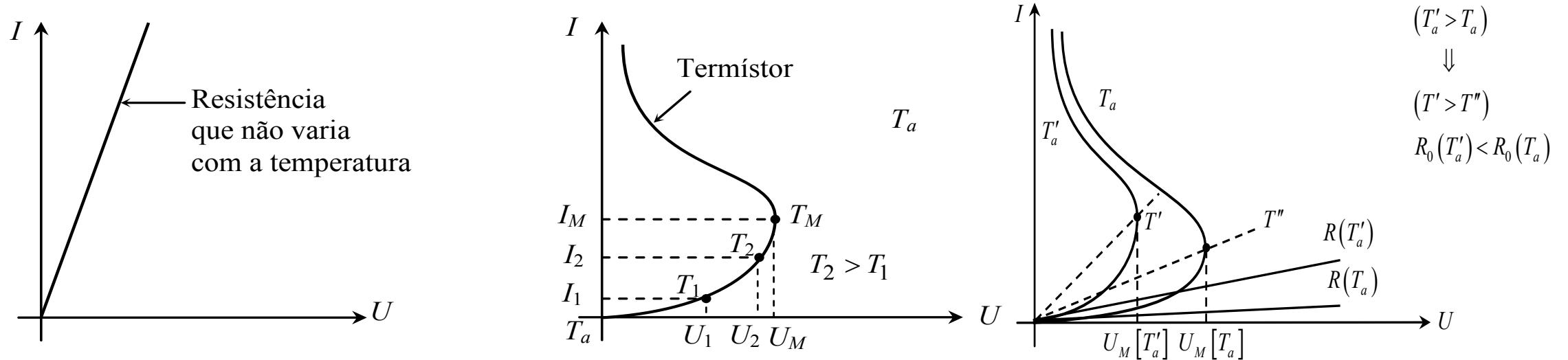
(b)





## Característica $I(U)$

As  $R$ , quando atravessadas por  $I$ , encontram-se a  $T$  superior à  $T$  ambiente, devido ao efeito de Joule. Se a  $T$  e/ou o coeficiente de temperatura da resistividade não forem muito elevados, a  $R$  terá um valor aproximadamente constante com ou sem corrente.



Numa  $R$  a uma temperatura fixa  $T > T$  ambiente ( $T_a$ ), a potência recebida tem de ser igual à potência transferida para o exterior (transferência por condução)

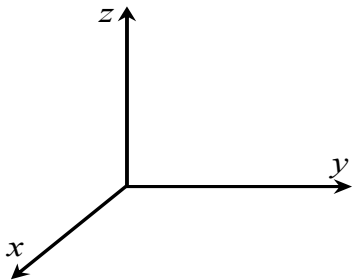
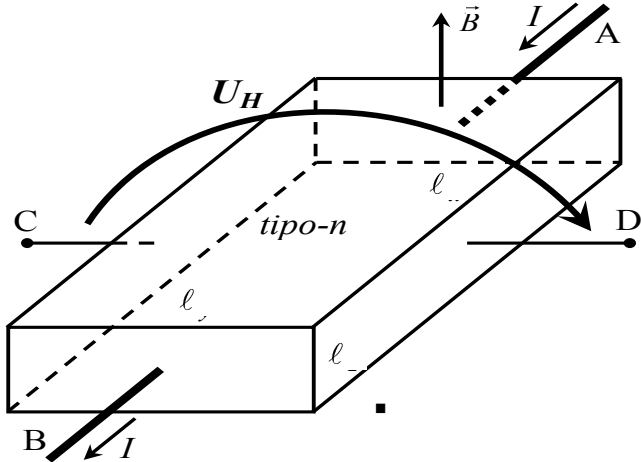
$$P = a(T - T_a)$$

Condutância térmica





- descoberto em 1879, por Edwin Herbert Hall.
- Quando um condutor é submetido a um  $\mathbf{B} \perp \mathbf{I}$ , uma  $U_H$  surge nas laterais do semiconductor.



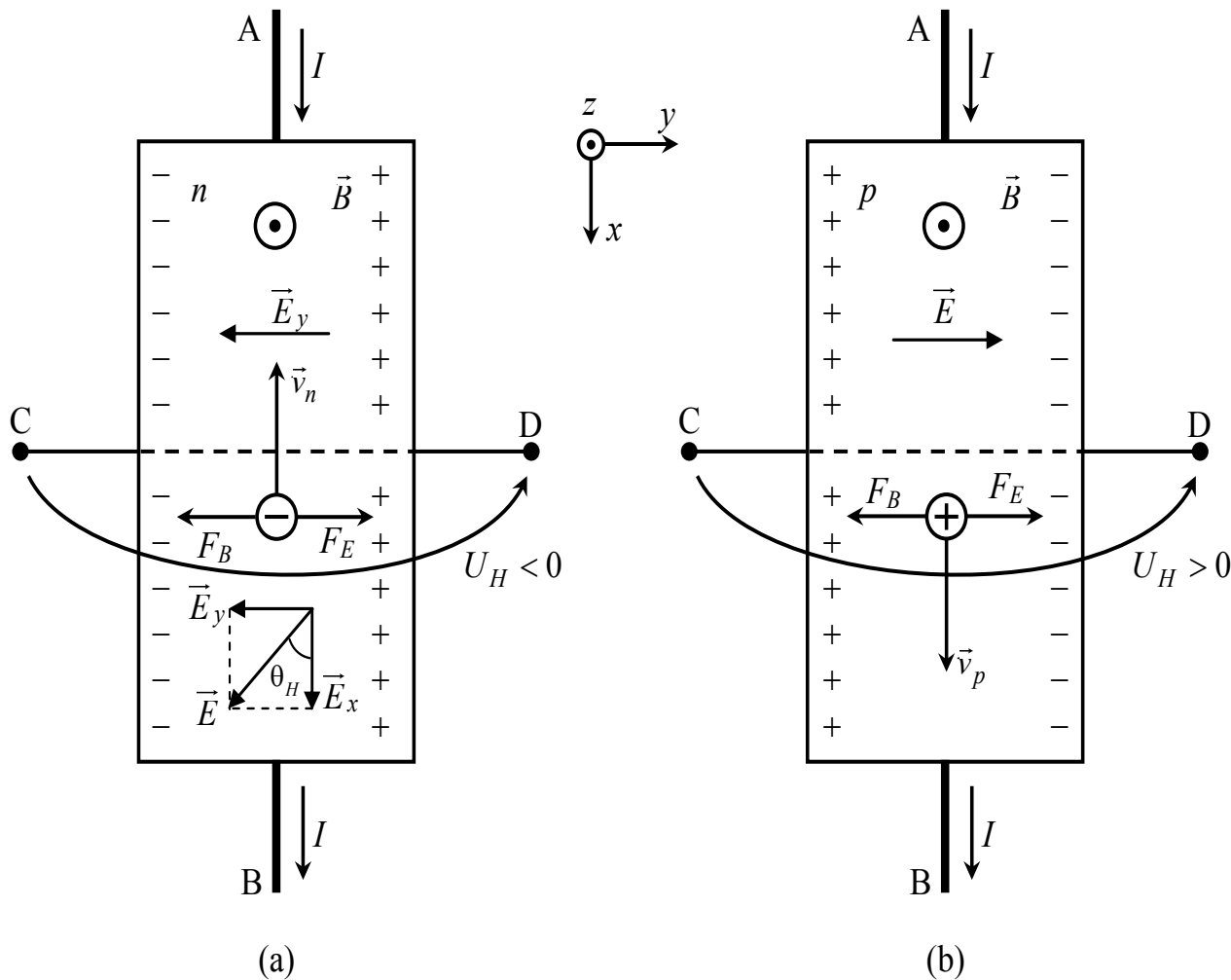
$$\vec{F}_B = -q [\langle \vec{v}_n \rangle, \mathcal{D} ] \quad \vec{F}_B = q [\langle \vec{v}_p \rangle, \mathcal{D} ]$$



Força de Lorentz

- O vetor força magnética tem o sentido e a direção definidos pelo produto externo e pelo sinal da carga e um módulo dado por:  $|\vec{F}_B| = q |\vec{v}| |\mathcal{D}| \text{sen}(\alpha)$





Considere-se, então, um semicondutor do tipo-*n* e despreze-se a contribuição para a corrente dos portadores minoritários.

Devido ao aparecimento de uma componente do campo segundo *y*, o campo total no semicondutor não será dirigido apenas segundo *x*. Ao ângulo formado entre o vetor campo elétrico e a sua componente segundo *x*, designa-se por ângulo de Hall,  $\theta_H$ , que será tanto maior quanto maior for o efeito de Hall.

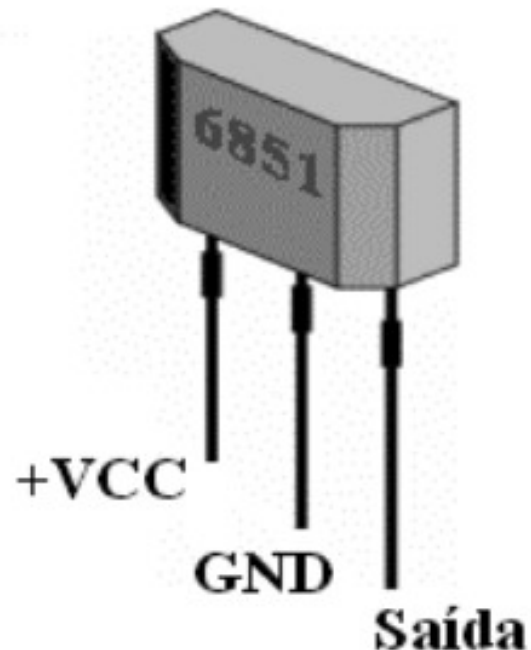
$$U_H = R_H \frac{IB}{\ell} \quad R_H = -\frac{1}{qn} \quad \text{ou} \quad R_H = \frac{1}{qp}$$



Caso há a mudança do sentido do campo magnético sobre o semicondutor, a polaridade da tensão Hall também muda.

O sensor Hall é um elemento sensível em campo magnético magnéticos contínuos ou alternados.

Na figura a seguir está mostrado o aspecto do sensor Hall (semicondutor).



O sensor de efeito Hall é utilizado na indústria automobilística, sistema de automação industrial, medidores de campo magnético, sistema aeroespacial e em inúmeras aplicações.

A maioria dos instrumentos de medidas magnética (Gaussímetro) utiliza sensores de efeito Hall.

