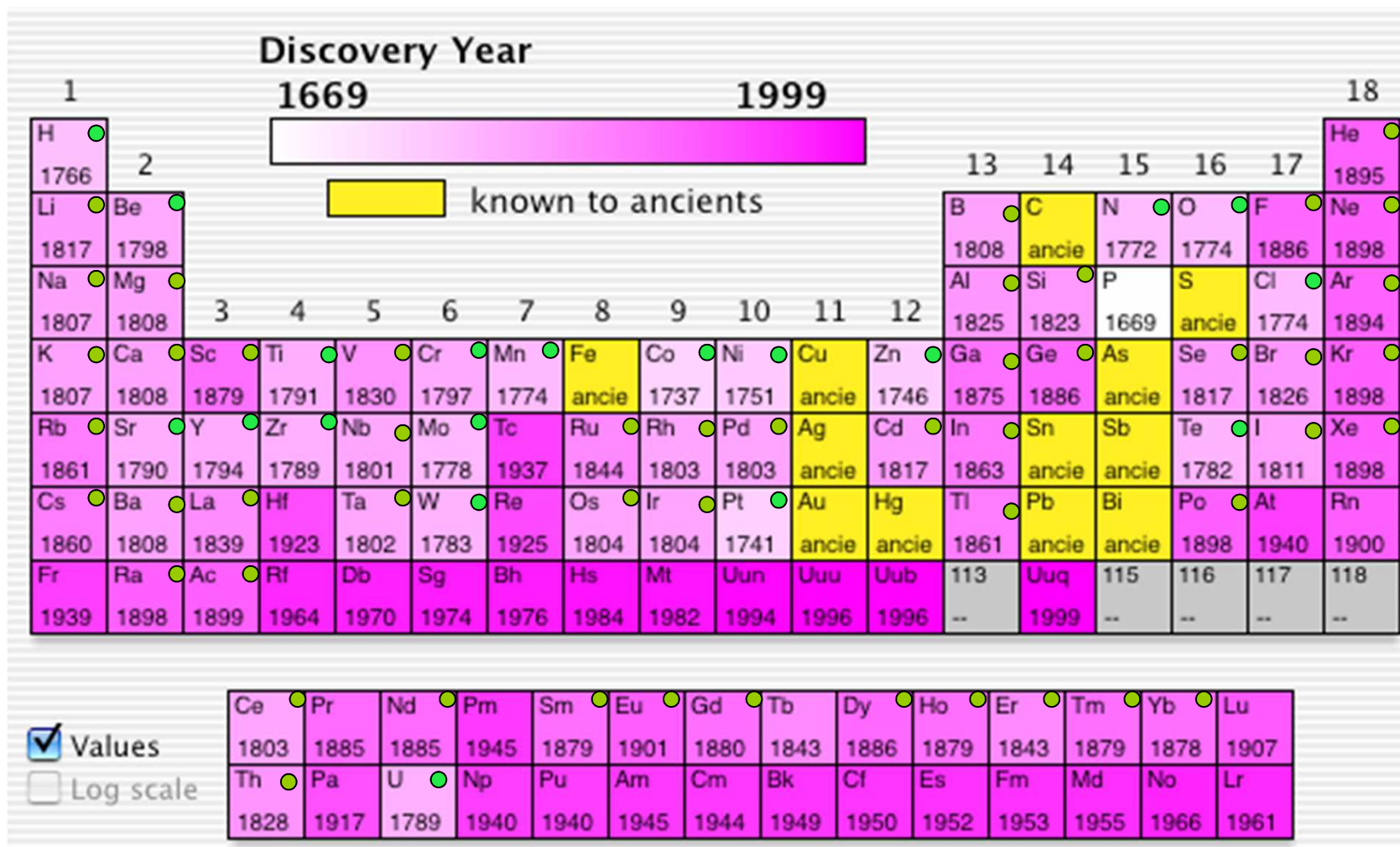


# **Semicondutores e aplicações: dispositivos eletrónicos e optoelectrónicos**

# Elementos



- 49 de 92 elementos naturais foram descobertos no século XIX!

# CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

Prof. MARCELO POLACHINI

© Quimicatual (2000) - todos os direitos reservados

[www.quimicatual.com.br](http://www.quimicatual.com.br)

IA 1	CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS																VIIIA 18							
1	Hidrogênio 1,00794 (7) <b>H</b>																	Hélio 4,002602 (2) <b>He</b>						
2	Li 6,941 (2) <b>Li</b>	Be 9,012182 (3) <b>Be</b>																	Boro 10,811 (7) <b>B</b>	Carbono 12,0107 (8) <b>C</b>	Nitrogênio 14,0067 (2) <b>N</b>	Oxigênio 15,9994 (3) <b>O</b>	Fluor 18,9984032(5) <b>F</b>	Neônio 20,1797 (6) <b>Ne</b>
3	Na 22,989770 (2) <b>Na</b>	Magnésio 24,3050 (6) <b>Mg</b>																	Alumínio 26,981538 (2) <b>Al</b>	Silício 28,0855 (3) <b>Si</b>	Fósforo 30,973761 (2) <b>P</b>	Enxofre 32,065 (5) <b>S</b>	Cloro 35,453 (2) <b>Cl</b>	Árgônio 38,963 (1) <b>Ar</b>
4	K 39,0983 (1) <b>K</b>	Ca 40,078 (4) <b>Ca</b>	Escândio 44,955910 (8) <b>Sc</b>	Titânio 47,867 (1) <b>Ti</b>	Vanádio 50,9415 (1) <b>V</b>	Cromo 51,9961 (6) <b>Cr</b>	Manganês 54,938049 (9) <b>Mn</b>	Ferro 55,845 (2) <b>Fe</b>	Cobalto 58,933200 (9) <b>Co</b>	Níquel 58,6934 (2) <b>Ni</b>	Cobre 63,546 (3) <b>Cu</b>	Zinco 65,39 (2) <b>Zn</b>	Gálio 69,723 (1) <b>Ga</b>	Germânio 72,64 (1) <b>Ge</b>	Arsênio 74,92160 (2) <b>As</b>	Selênio 78,96 (3) <b>Se</b>	Bromo 79,904 (1) <b>Br</b>	Criptônio 83,80 (1) <b>Kr</b>						
5	Rb 85,4678 (3) <b>Rb</b>	Sr 87,62 (1) <b>Sr</b>	Ítrio 88,90585 (2) <b>Y</b>	Zircônio 91,224 (2) <b>Zr</b>	Níobio 92,90638 (2) <b>Nb</b>	Molibdênio 95,94 (1) <b>Mo</b>	Tecnécio [98] <b>Tc</b>	Rutênio 101,07 (2) <b>Ru</b>	Ródio 102,90550 (2) <b>Rh</b>	Paládio 106,42 (1) <b>Pd</b>	Prata 107,8682 (2) <b>Ag</b>	Cádmio 112,411 (8) <b>Cd</b>	Índio 114,818 (3) <b>In</b>	Estanho 118,710 (7) <b>Sn</b>	Antimônio 121,760 (1) <b>Sb</b>	Telúrio 127,60 (3) <b>Te</b>	Iodo 126,90447 (3) <b>I</b>	Xenônio 131,293 (6) <b>Xe</b>						
6	Cs 132,90545 (2) <b>Cs</b>	Bário 137,327 (7) <b>Ba</b>	Lantânio 138,90549 (2) <b>La</b>	Háfnio 178,49 (2) <b>Hf</b>	Tântalo 180,9479 (1) <b>Ta</b>	Tungstênio 183,84 (1) <b>W</b>	Rênio 186,207 (1) <b>Re</b>	Osmio 190,23 (3) <b>Os</b>	Írídio 192,227 (3) <b>Ir</b>	Platina 195,078 (2) <b>Pt</b>	Ouro 196,96655 (2) <b>Au</b>	Mercurio 200,59 (2) <b>Hg</b>	Tálio 204,3833 (2) <b>Tl</b>	Chumbo 207,2 (1) <b>Pb</b>	Bismuto 208,98038 (2) <b>Bi</b>	Polônio [209] <b>Po</b>	Astato [210] <b>At</b>	Radônio [222] <b>Rn</b>						
7	Fr [223] <b>Fr</b>	Rádio [226] <b>Ra</b>	Actínio [227] <b>Ac</b>	Rutherfordio [261] <b>Rf</b>	Dubnio [262] <b>Db</b>	Seabórgio [263] <b>Sg</b>	Bóhrio [264] <b>Bh</b>	Hássio [265] <b>Hs</b>	Mitnério [266] <b>Mt</b>	Ununílio [269] <b>Uun</b>	Ununúnio [272] <b>Uuu</b>	Ununbício [277] <b>Uub</b>		Ununquádio [285] <b>Uuq</b>										

**Magnésio**  
24,305

Nome do Elemento  
Massa Atômica (relativa ao isótopo <sup>12</sup>C = 12,000... u)

Simbolo  
Estado Físico a 25°C e 1 atm

Sólido  
Líquido  
Gasoso  
Sólido

Número Atômico (Z)

Lantânio 138,9055 (2) <b>La</b>	Cério 140,116 (1) <b>Ce</b>	Praseodímio 140,90785 (2) <b>Pr</b>	Neodímio 144,24 (3) <b>Nd</b>	Promécio [145] <b>Pm</b>	Samário 150,36 (3) <b>Sm</b>	Europio 151,964 (1) <b>Eu</b>	Gadolínio 157,25 (3) <b>Gd</b>	Térbio 158,92534 (2) <b>Tb</b>	Disprósio 162,50 (3) <b>Dy</b>	Hólmio 164,93032 (2) <b>Ho</b>	Érbio 167,259 (3) <b>Er</b>	Túlio 168,93421 (2) <b>Tm</b>	Íterbio 173,04 (3) <b>Yb</b>	Lutécio 174,967 (1) <b>Lu</b>
Actínio [227] <b>Ac</b>	Tório 232,0381 (1) <b>Th</b>	Protactínio 231,03688 (2) <b>Pa</b>	Urânio 238,02891 (3) <b>U</b>	Netúnio [237] <b>Np</b>	Plutónio [244] <b>Pu</b>	Americio [243] <b>Am</b>	Cúrio [247] <b>Cm</b>	Berquélio [247] <b>Bk</b>	Califórnio [251] <b>Cf</b>	Einsténio [252] <b>Es</b>	Férmio [257] <b>Fm</b>	Mendelévio [258] <b>Md</b>	Nobélio [259] <b>No</b>	Laurêncio [262] <b>Lr</b>

  Hidrogênio
   Metais
   Semimetais
   Ametais
   Gases Nobres
   Lantanóides
   Actinóides

\* De acordo com a última deliberação da Comissão de Massas Atômicas e Abundâncias Isotópicas da IUPAC, durante a 40ª Reunião Geral da IUPAC em Berlim, Alemanha (Agosto de 1999)

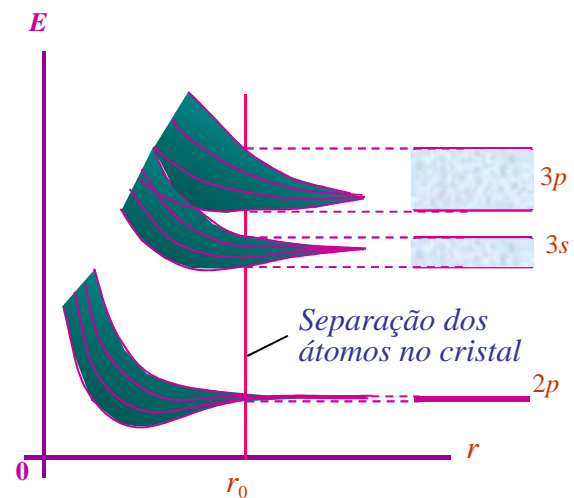
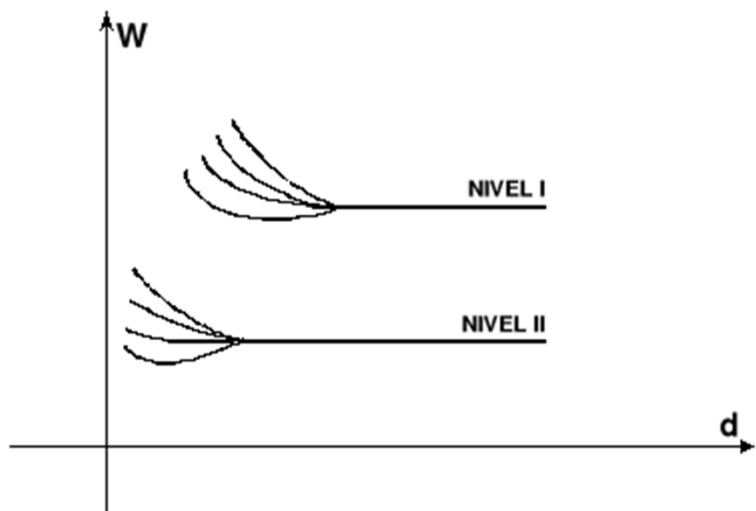
# Semicondutores e dispositivos

## Temas a abordar

- Semicondutores intrínsecos
- Semicondutores extrínsecos
- Condutividade em semicondutores
- Propriedades ópticas (revisão)
- Processos de emissão e absorção de radiação (revisão)
- Semicondutores directos e indirectos
- Homojunções e heterojunções semicondutoras
- Junções p-n
- Característica corrente-tensão ( $I-V$ ) de uma Junção  $p-n$
- Díodo rectificador, díodo zenner, díodo túnel, díodo de Schottky e contactos óhmicos
- Células fotovoltaicas
- LEDs e lasers de díodo
- Transístores bipolares, de efeito de campo, MOSFETs e circuitos integrados

# Bandas de energia

# Bandas de energia



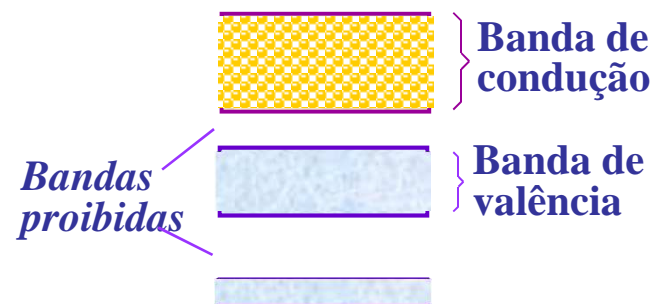
**Isolador**



**Condutor**



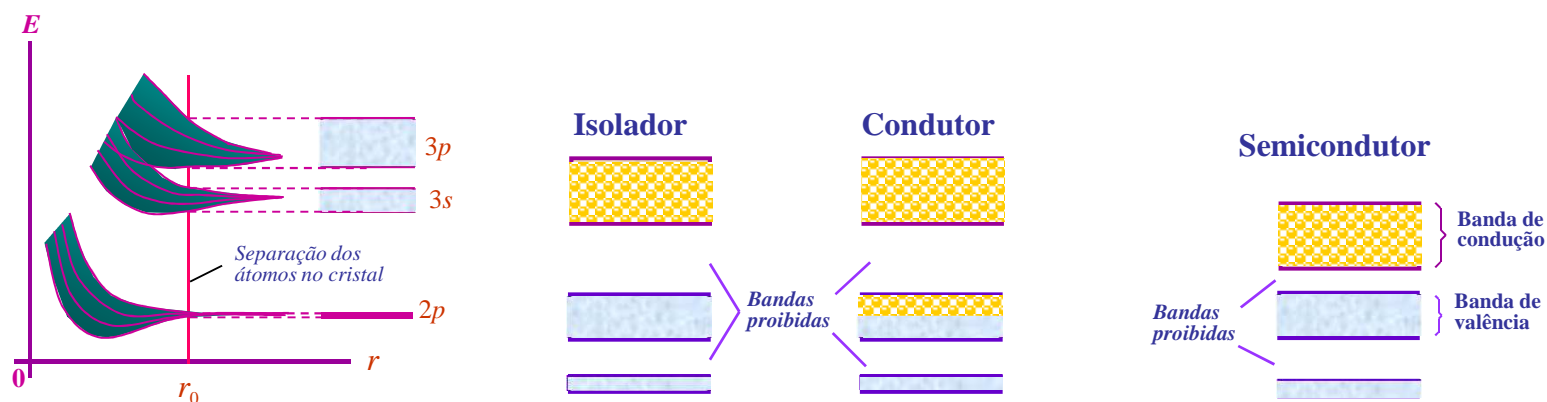
**Semicondutor**



# Bandas de energia

Num sistema constituído por vários átomos idênticos e suficientemente afastados, de forma que a interacção mútua é desprezável, todos os átomos possuem níveis de energia (discretos) semelhantes. À medida que a separação entre átomos diminui, as funções de onda, especialmente as associadas aos electrões mais afastados do núcleo (electrões de valência), começam a sobrepor-se (devido à interacção electromagnética) e os níveis de energia correspondentes alteram-se. Os estados de valência (estados dos electrões de valência), que anteriormente formavam um conjunto de níveis de energia discretos, formam agora bandas de energia contendo níveis muito pouco espaçados.

Num sólido, o numero de átomos por unidade de volume,  $N$ , é da ordem do número de Avogadro, o que permite tratar as bandas de energia como distribuições contínuas de níveis de energia. Este efeito só é significativo para os estados possíveis dos electrões de valência. Os estados associados aos electrões mais interiores são pouco afectados e os seus níveis de energia permanecem discretos.

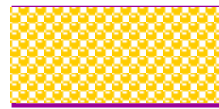


# Dielétricos, semicondutores e condutores

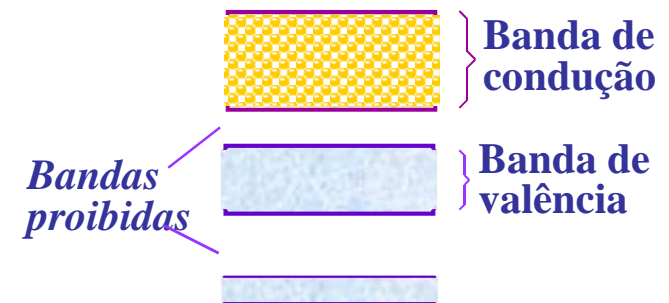
Isolador



Condutor



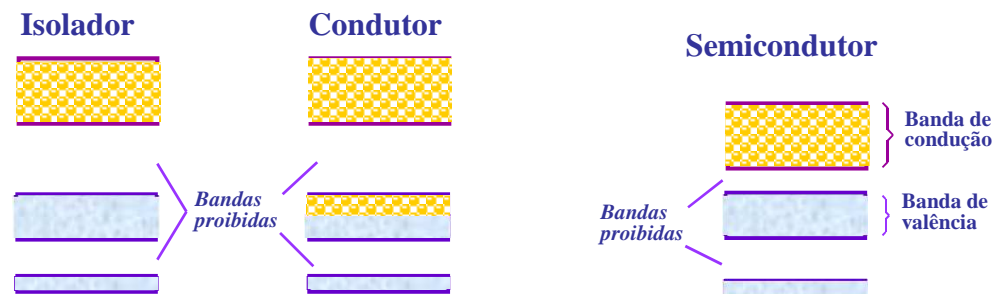
Semicondutor





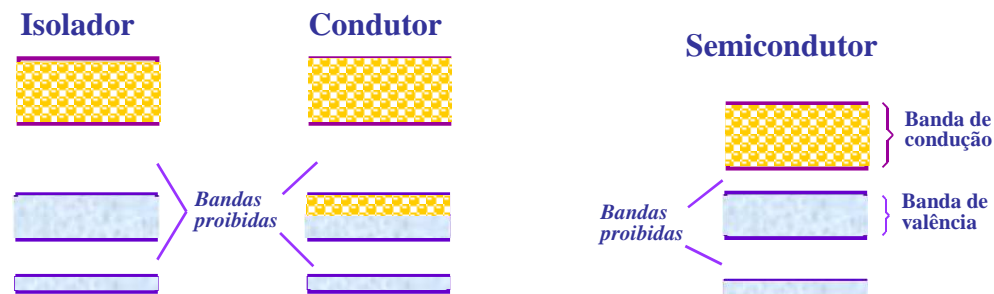
# Dieléctricos, semicondutores e condutores

A natureza da estrutura de bandas de energia determina se um material é bom ou mau condutor de corrente eléctrica. Nos **isoladores** e **semicondutores**, a zero absoluto, os electrões de valência preenchem por completo a última banda ocupada, que se designa por **banda de valência (BV)**. A banda imediatamente superior chama-se **banda de condução** e está completamente vazia a 0 K. Uma vez que na BV não há estados desocupados, não pode ocorrer deslocamento efectivo de carga eléctrica, mesmo sob a acção de um campo eléctrico aplicado, i.e., a 0 K é nula a corrente associada aos electrões na BV. Um electrão de valência para contribuir para o fluxo de carga eléctrica (corrente) tem de abandonar a BV e transitar para a BC. Isto só é possível se absorver uma quantidade de energia da ordem de 1 eV (valor relativamente grande - e raramente disponível – quando comparado com a energia térmica que a 293 K é ~25 meV). Nos **condutores**, a banda de maior energia não está totalmente preenchida e os electrões nesta banda, que se designa **banda de condução (BC)** podem transitar entre diferentes níveis de energia (o que requer quantidades ínfimas de energia), contribuindo para um fluxo de carga não nulo, sob a acção de um campo eléctrico externo.



# Dieléctricos, semicondutores e condutores

A natureza da estrutura de bandas de energia determina se um material é bom ou mau condutor de corrente eléctrica. Nos **isoladores** e **semicondutores**, a zero absoluto, os electrões de valência preenchem por completo a última banda ocupada, que se designa por **banda de valência (BV)**. A banda imediatamente superior chama-se **banda de condução** e está completamente vazia a 0 K. Uma vez que na BV não há estados desocupados, não pode ocorrer deslocamento efectivo de carga eléctrica, mesmo sob a acção de um campo eléctrico aplicado, i.e., a 0 K é nula a corrente associada aos electrões na BV. Um electrão de valência para contribuir para o fluxo de carga eléctrica (corrente) tem de abandonar a BV e transitar para a BC. Isto só é possível se absorver uma quantidade de energia da ordem de 1 eV (valor relativamente grande - e raramente disponível – quando comparado com a energia térmica que a 293 K é  $\sim 25$  meV). Nos **condutores**, a banda de maior energia não está totalmente preenchida e os electrões nesta banda, que se designa **banda de condução (BC)** podem transitar entre diferentes níveis de energia (o que requer quantidades ínfimas de energia), contribuindo para um fluxo de carga não nulo, sob a acção de um campo eléctrico externo.

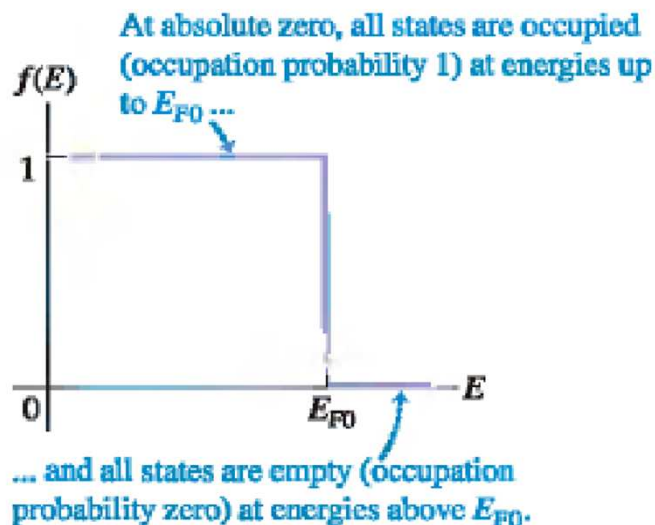


# Estatística de Fermi-Dirac

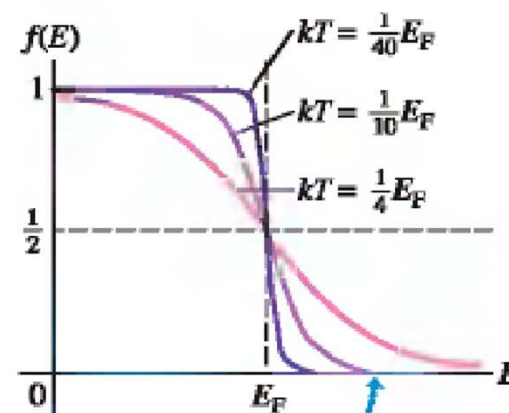
A **estatística de Fermi-Dirac** é uma estatística quântica que rege as partículas de spin semi-inteiro, os fermiões. Leva o nome de dois eminentes físicos: Enrico Fermi e Paul Adrien Maurice Dirac. Qualquer sistema a uma temperatura absoluta de zero graus kelvin encontra-se no estado fundamental. Se o sistema for de férmions, isto é, partículas com spin semi-inteiro, todos os estados abaixo do potencial (energia) de Fermi  $E_f$  estarão ocupados. Estatisticamente, todos os estados com energia  $E$  inferior à energia de Fermi estarão ocupados, probabilidade  $f(E)=1$ , e todos com energia superior estarão desocupados, probabilidade  $f(E)=0$ . Uma dada temperatura  $T$ , a probabilidade de um estado de energia  $E$  estar ocupado segue a distribuição de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{k_B T}\right] + 1},$$

**42.24** The probability distribution for occupation of free-electron energy states at absolute zero.



**42.25** Graphs of the Fermi-Dirac distribution function for various values of  $kT$ , assuming that the Fermi energy  $E_F$  is independent of the temperature  $T$ .



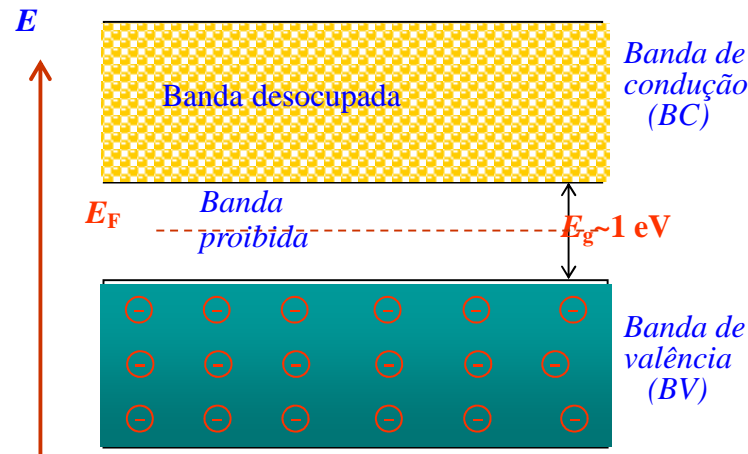
As  $T$  increases, more and more of the electrons are excited to states with energy  $E > E_F$ .

Conhecida a probabilidade  $f(E)$  de um estado com energia  $E$  estar ocupado, pode-se determinar a energia desse estado:

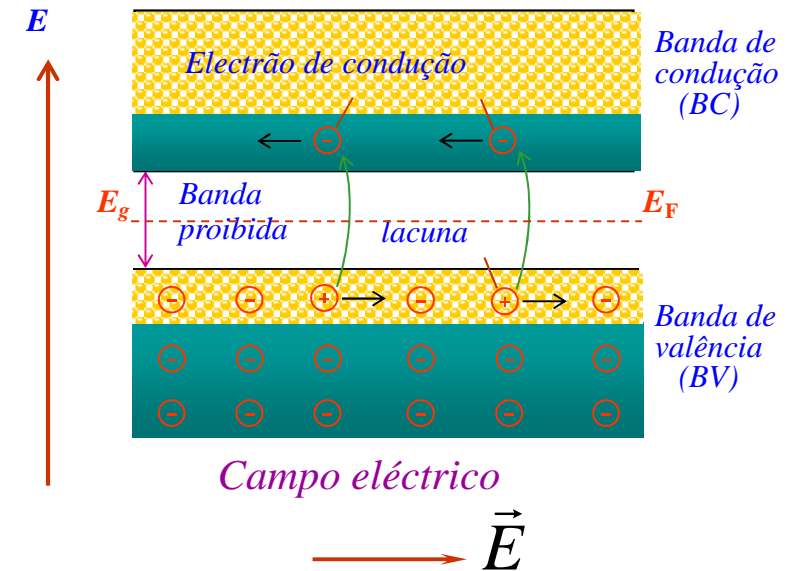
$$E = E_F + k_B T \ln \left[ \frac{1}{f(E)} - 1 \right].$$

# Semicondutores intrínsecos

Semicondutor intrínseco a 0 K



Semicondutor intrínseco ( $T > 0$  K)



À temperatura  $T > 0$  K, a probabilidade de um electrão ocupar um nível de energia  $E$ , é dada pela distribuição de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E-E_F)}{k_B T}\right] + 1},$$

onde o índice  $F$  identifica o nível de energia com probabilidade de ocupação igual a  $\frac{1}{2}$  (50%), que se designa por **nível de Fermi**.

Num SC intrínseco, o nível de Fermi situa-se sensivelmente a meio da banda proibida que separa a banda de valência da banda de condução.

# Semicondutores intrínsecos

Num semiconductor intrínseco em equilíbrio, o nº de electrões livres ( $n$ ) iguala o nº de vazios ( $p$ ); à temperatura  $T$ , tem-se:

$$n_i = p_i \propto \exp(-E_g/2k_B T).$$

Para o silício e para o germânio (a 300 K),  $n_i = p_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  e  $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente.

Quer o electrão, quer o vazio, na ausência de um campo eléctrico, *deslocam-se* aleatoriamente entre os átomos do semiconductor (SC), e a corrente eléctrica efectiva é nula. Contudo, quando uma diferença de potencial eléctrico (tensão) é aplicada entre dois pontos do material SC, os electrões livres (na BC) movem-se, agora, ordenadamente, na direcção do polo positivo, dando origem a uma corrente eléctrica: corrente de electrões. Por seu lado, um estado desocupado na BV (que pode ser preenchido por electrões de valência de outros átomos, transferindo-se o vazio para outro átomo, sem significativa variação de energia), sob a acção de um campo eléctrico, comporta-se como um portador de carga positiva, deslocando-se na direcção do polo negativo da fonte de tensão: corrente de vazios/lacunas. A corrente total no sc é, pois, a soma destas duas componentes.

As funções de onda associadas aos estados nas bandas de condução e de valência são caracterizadas pelos valores próprios de energia e pelos respectivos vectores de onda,  $k_n$  e  $k_p$  (as quantidades de movimento dos portadores de carga são  $p_n = \hbar k_n$  e  $p_p = \hbar k_p$ , respectivamente).

A transição de electrões entre as bandas de condução e de valência, como qualquer outro processo físico, tem de satisfazer duas leis fundamentais:

- i) **conservação da energia e**
- ii) **conservação da quantidade de movimento.**

# Condutividade em semicondutores

A dopagem de um semicondutor não só aumenta a sua condutibilidade, como permite criar um material em que os portadores de carga são, maioritariamente, electrões ( $n$ ) ou lacunas ( $p$ ), de acordo com o tipo de impureza. A concentração de dopantes necessária para alterar de forma significativa a condutividade de um semicondutor, quando comparada com a concentração dos átomos nativos do semicondutor, é muito pequena. Por exemplo, a condutibilidade do germânio, a 30 °C, aumenta cerca de 12 vezes, se substituirmos 1 em cada  $10^8$  átomos de Ge por um átomo de As (elemento com cinco electrões de valência).

A concentração de portadores também pode ser alterada, fazendo incidir no material radiação electromagnética e/ou variando a temperatura do material. A radiação incidente altera a condutibilidade eléctrica do material, pois os fotões absorvidos geram pares electrão-lacuna.

O processo inverso, **recombinação radiativa**, em que electrão e lacuna se aniquilam dando origem a um fotão, diminui o nº de portadores de carga livres. Contudo, nem todas as recombinações electrão-lacuna são radiativas, i.e., dão origem à emissão de luz, e designam-se **recombinações não-radiativas**. As recombinações não-radiativas traduzem-se numa variação da temperatura do cristal devidos à geração/aniquilação de modos de vibração da rede cristalina (**fonões**). O **fonão** corresponde ao *quantum* de energia térmica da rede cristalina.

Estas alterações da condutibilidade podem ser monitorizadas através de eléctrodos ligados à amostra, detectando a variação da resistência do material: em ambos os fenómenos de recombinação são empregues em detectores ópticos e/ou térmicos.

# Condutividade em semicondutores

A **densidade de corrente**  $J$  ( $=I/A$  [ $A/m^2$ ]) num semicondutor, em resultado da aplicação de um campo eléctrico, é dada por:  $J=J_n+J_p=e(n\mu_n + p\mu_p)E=\sigma E$ ,

onde  $\sigma=e(n\mu_n + p\mu_p)$  representa a condutividade eléctrica do semicondutor.

Num semicondutor intrínseco temos  $n_n=p_p=n_i$ ; num semicondutor extrínseco tipo  $n$  ( $p$ ), a concentração de electrões (vazios) na BC (BV) é superior à concentração de vazios (electrões) na BV (BC). Num semicondutor tipo  $n$ , os electrões são os **portadores majoritários** (os vazios são minoritários); num semicondutor tipo  $p$ , os vazios são os **portadores majoritários** (e os electrões são os portadoras minoritários).

A concentração de portadores também pode ser alterada, fazendo incidir no material radiação electromagnética e/ou variando a temperatura do material. A radiação incidente altera a condutibilidade eléctrica do material, pois os fótons absorvidos geram pares electrão-lacuna. O processo inverso, **recombinação radiativa**, em que electrão e lacuna se aniquilam dando origem a um fóton, tem como efeito a diminuição do nº de portadores de carga livres.

Contudo, nem todas as recombinações electrão-lacuna são radiativas, isto é, dão origem à emissão de luz: **recombinações não-radiativas**. As recombinações não-radiativas traduzem-se numa variação da temperatura do cristal devidos à geração/aniquilação de modos de vibração da rede cristalina (**fonões**). O **fonão** corresponde ao *quantum* de energia térmica da rede cristalina.

Estas alterações da condutibilidade podem ser monitorada através de eléctrodos ligados à amostra, detectando a variação da resistência do material: ambos os fenómenos de recombinação são empregues em detectores ópticos e/ou térmicos.

# Condutividade em semicondutores

## Mobilidade eléctrica

Em primeira aproximação, a velocidade de arrastamento  $\mathbf{v}$  dos portadores de carga num material é directamente proporcional ao campo eléctrico aplicado  $\mathbf{E}$ . A constante de proporcionalidade chama-se **mobilidade eléctrica do portador de carga**,  $\mu$ . Num semicondutor tem-se:

$\mathbf{v}_n = -\mu_n \mathbf{E}$ , para os electrões, e  $\mathbf{v}_p = -\mu_p \mathbf{E}$ , para os vazios.

Em geral, os valores das mobilidades  $\mu_n$  e  $\mu_p$  são muito diferentes.

A **densidade de corrente**  $\mathbf{J}$  ( $=I/A$  [A/m<sup>2</sup>]) num semicondutor, em resultado da aplicação de um campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , é dada por:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p = e(n\mu_n + p\mu_p)\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E},$$

onde  $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$  representa a condutividade eléctrica do semicondutor.

Num semicondutor **intrínseco** temos  $n_n = p_p = n_i$ ;

Num semicondutor **extrínseco** tipo  $n$  ( $p$ ), a concentração de electrões (vazios) na BC (BV) é superior à concentração de vazios (electrões) na BV (BC), sendo praticamente igual à concentração de impurezas.

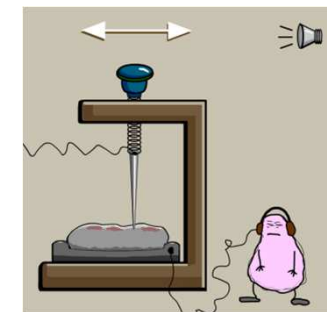
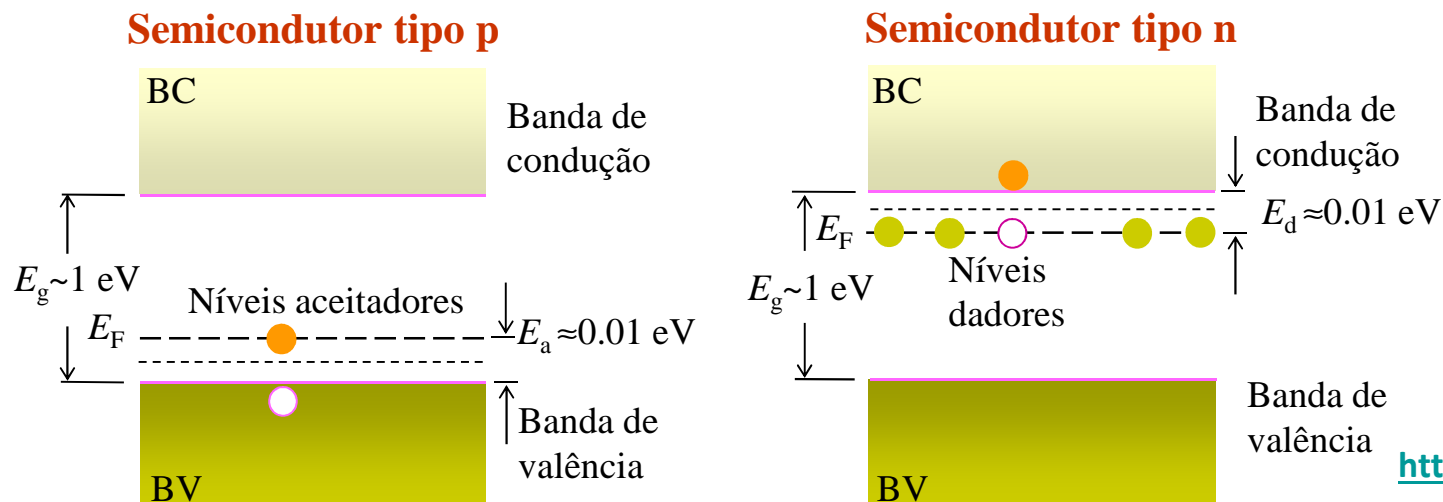
Num semicondutor tipo  $n$ , os electrões são os **portadores majoritários** (os vazios são minoritários); num semicondutor tipo  $p$ , os vazios são os **portadores majoritários** (e os electrões são os portadoras minoritários).



# Semicondutores extrínsecos

Em geral, os materiais semicondutores não são bons condutores de corrente eléctrica, devido ao nº reduzido de electrões livres na banda de condução e de vazios na banda de valência. Para terem interesse comercial os materiais SCs devem ser modificados de forma a aumentar o número de portadores livres (electrões na BC e vazios na BV), de modo a alterar a sua **condutibilidade**, e permitir a construção de diferentes dispositivos electrónicos e optoelectrónicos.

Tal efeito é conseguido substituindo alguns átomos do material SC original por elementos de valência inferior ou superior e de tamanho semelhante ao do constituinte base. Este processo é designado por **dopagem**, e o material SC torna-se **extrínseco** (*impuro*). Quando os átomos são substituídos por elementos de valência inferior ao do elemento base, o semiconductor obtido diz-se de **tipo p**; quando a impureza possui uma valência superior, o SC designa-se de **tipo n**.



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/crystalBillFinal.swf>

# Semicondutores de hiato direto e hiato indireto

# Propriedades ópticas dos semicondutores

Do ponto de vista electromagnético um material é completamente caracterizado pelas respectivas permitividade eléctrica,  $\epsilon$ , e permeabilidade magnética,  $\mu$ . (Ver equações de Maxwell.)

As propriedades ópticas de um material são definidas pelo **índice de refração**,  $n_r$ , e pelo **coeficiente de absorção**,  $\alpha$ .

O **índice de refração**,  $n_r$ , é definido como a razão entre a velocidade da radiação no vácuo,  $c$ , e a velocidade de fase da radiação no material,  $v_f$ :  $n_r = c/v_f$ ; (nos semicondutores com mais interesse em optoelectrónica  $n_r = 3-4$ ). É de referir que o índice de refração é, em geral, função do comprimento de onda da radiação: fenómeno da **dispersão**.

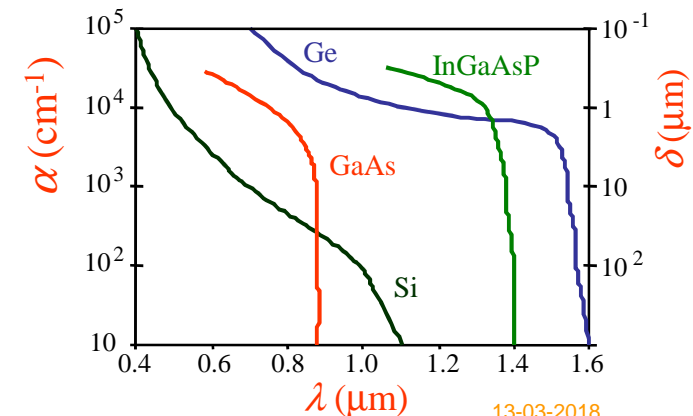
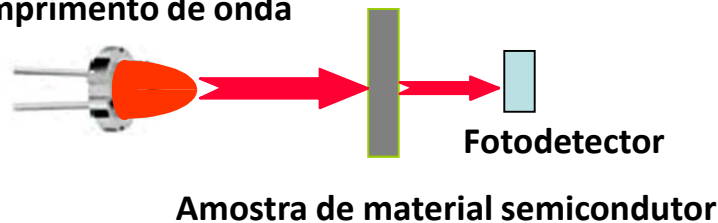
O **coeficiente de absorção**,  $\alpha$ , está relacionado com a taxa de variação espacial da intensidade da radiação no material,  $dI/dx = -\alpha I(x)$ , onde  $I(x)$  representa a intensidade da radiação na região de coordenada  $x$ , i.e.,  $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$  ( $I_0$  representa a intensidade de radiação incidente na superfície no material).

O gráfico abaixo mostra a dependência do coeficiente de absorção no comprimento de onda de radiação correspondente à porção óptica do espectro electromagnética (0.4  $\mu\text{m}$  – 1.6  $\mu\text{m}$ ) para alguns *cristais* semicondutores muito usados em electrónica e optoelectrónica.

Representa-se também o **coeficiente de penetração**,  $d$ , que corresponde ao inverso do coeficiente de absorção,  $d = 1/\alpha$ :  $d$  é numericamente igual à espessura de material necessária para absorver aproximadamente 63% da radiação incidente perpendicularmente na superfície do material:  $I(x=d) = I_0 e^{-1}$ .

## Medir o coeficiente de absorção, $\alpha(\lambda)$

Fonte de luz sintonizável em comprimento de onda



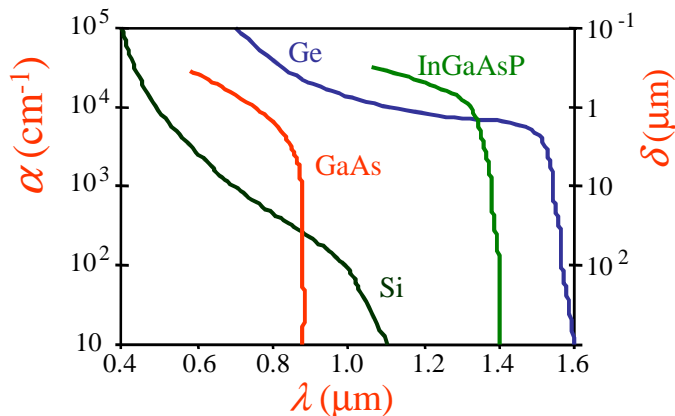
# Propriedades ópticas dos semicondutores

Em geral, o coeficiente de absorção  $\alpha$  de um material depende, fortemente, do comprimento de onda (c.d.o.,  $\lambda$ ) da radiação incidente.

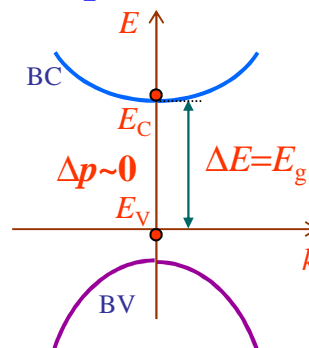
Os materiais SCs cujo coeficiente de absorção diminui bruscamente para comprimentos de onda superiores a  $\lambda_g = hc/E_g$  dizem-se **semicondutores de banda proibida directa** (exemplos: GaAs, InP, InGaAs, InGaAlAs, InGaAsP).

Nos semicondutores de **banda proibida directa** a transição de electrões da BV para a BC em resultado da absorção de radiação electromagnética só é permitida se a energia do fotão correspondente for  $\geq E_g$ : se  $E_g \geq E_{\text{fotão}}$  o fotão não é absorvido.

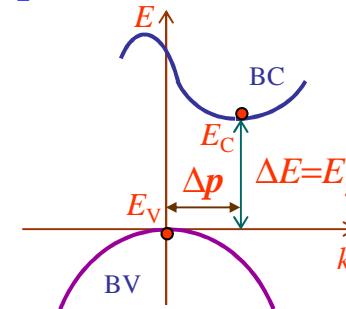
O silício, por exemplo, é um semicondutores de **banda proibida indirecta**: o coeficiente de absorção  $\alpha$  varia gradualmente com o comprimento de onda (ver figura abaixo). Tantos nos SCs de banda proibida directa e de banda proibida indirecta a absorção de radiação só ocorre se  $E_{\text{fotão}} \geq E_g$ .



**Semicondutor de banda proibida directa**

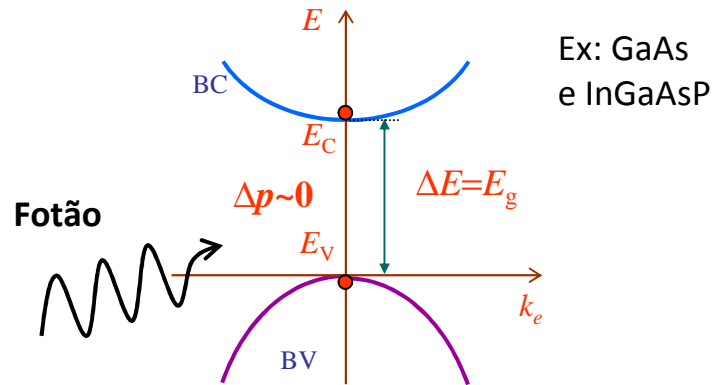


**Semicondutor de banda proibida indirecta**

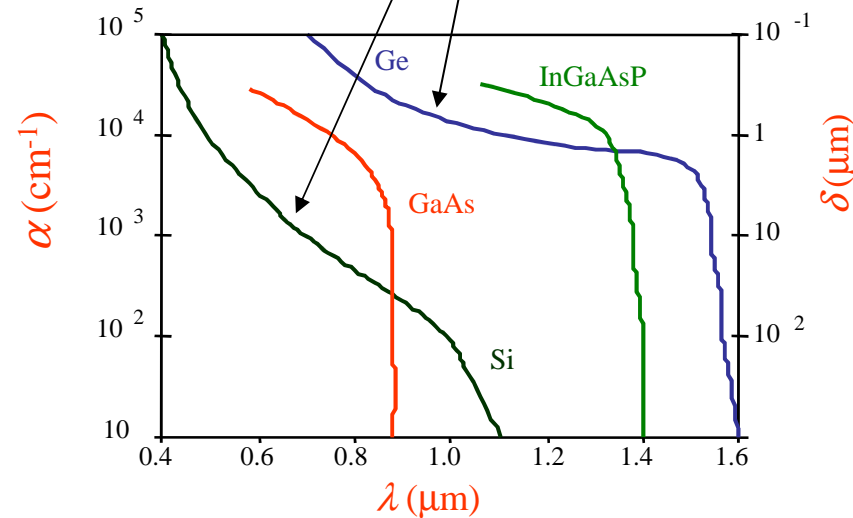
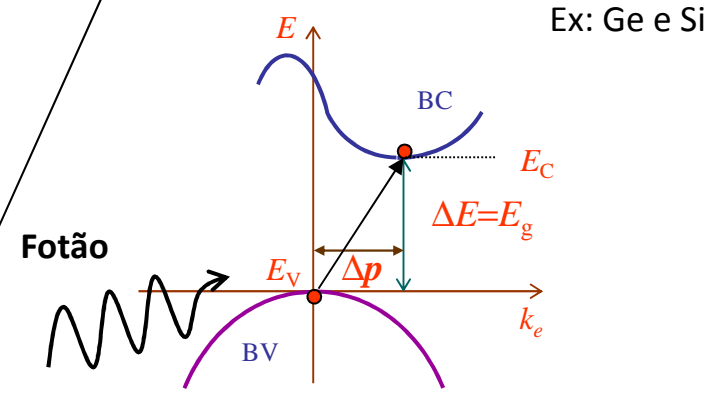


# Propriedades óticas dos semicondutores

## Semicondutor de banda proibida directa



## Semicondutor de banda proibida indirecta



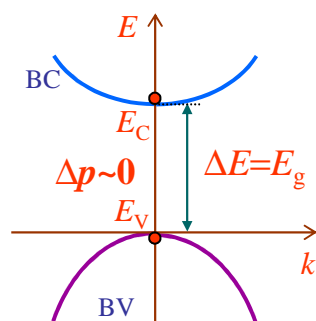
# Semicondutores directos e indirectos

As funções de onda associadas aos estados nas bandas de condução e de valência são caracterizadas pelos valores próprios de energia e pelos respectivos vectores de onda,  $k_n$  e  $k_p$  (as quantidades de movimento dos portadores de carga são  $p_n = \hbar k_n$  e  $p_p = \hbar k_p$ , respectivamente;  $n$ =electrões e  $p$ =lacunas). A transição de electrões entre as bandas de condução e de valência, como qualquer outro processo físico, tem de satisfazer duas leis fundamentais: *i) conservação da energia* e *ii) conservação da quantidade de movimento*.

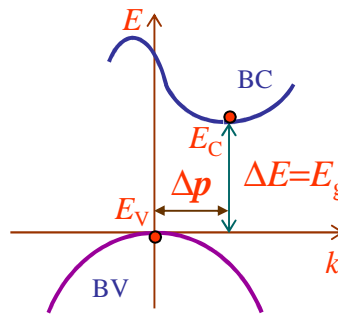
Nos semicondutores de **banda proibida directa**, o máximo de energia da banda de valência e o mínimo de energia da banda de condução ocorrem ao mesmo valor do vector de onda, i.e.,  $k_n = k_p$  (a quantidade de movimento dos portadores nos máximos/mínimos das respectivas bandas é a mesma).

Num semiconductor de banda proibida directa, as transições entre estados de energias próximos do máximo de energia da banda de valência ( $E_V$ ) e estados de energia próximos do mínimo de energia da banda de condução ( $E_C$ ) induzidas por absorção de um fóton verificam a conservação da quantidade de movimento, dado que a quantidade de movimento do fóton é muito menor dos que a de qualquer dos portadores de carga (electrões ou lacunas).

## Semiconductor directo



## Semiconductor indirecto



A transição de um electrão da BV para a BC num SCI requer, para além de uma quantidade de energia ( $\geq E_g$ ), uma alteração da quantidade de movimento do electrão de  $\Delta p = \hbar(k_n - k_p)$ .

# Semicondutores directos e indirectos

Nos SCs directos, a recombinação não-radiativa é significativamente inferior à componente radiativa, permitindo obter fontes ópticas de elevada eficiência; os emissores ópticos mais eficientes são baseados em ligas semicondutoras de banda proibida directa (GaAs, InP, InGaAs, InGaAlAs, InGaAsP, ...).

No caso de semicondutores de banda proibida indirecta, o máximo da banda de valência e o mínimo da banda de condução ocorrem a diferentes valores do vector de onda dos portadores nas respectivas bandas, i.e.,  $k_n \neq k_p$  (a quantidade de movimento dos portadores nos máximos/mínimos das respectivas bandas é diferente), pelo que a conservação de quantidade de movimento exige a intervenção de uma terceira partícula (fonão) nos processos de geração e recombinação de portadores (a quantidade de movimento associada ao fóton,  $p=hk$ , é muito menor quando comparada com a variação de momento linear necessária).

Os semicondutores de banda indirecta são os semicondutores muito utilizados em dispositivos electrónicos. Em optoelectrónica, os semicondutores indirectos são usados, essencialmente, como detectores (fotodetectores): o Si é usado para detecção de radiação de c.d.o. até 1.1 mm, e o germânio para radiação de c.d.o. superior a 1.3  $\mu\text{m}$ .

As ligas SCs de banda proibida directa são muito usadas em fotodetectores, maioritariamente na região espectral 1.3 – 1.6 mm (região onde as fibras ópticas apresentam baixas perdas e dispersão). Fotodetectores rápidos operando a comprimentos de onda iguais ou superiores a 1.3  $\mu\text{m}$ , empregam InGaAs (ou outros materiais III-V) e não silício ou germânio.

# Dopagem de semicondutores



# Semicondutores intrínsecos

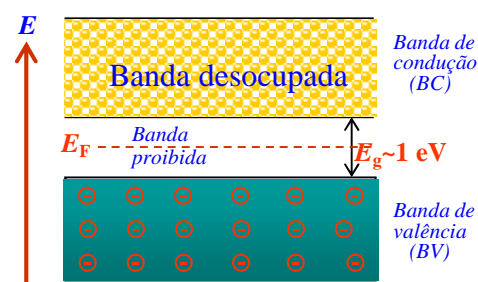
À temperatura do zero absoluto, os materiais semicondutores puros comportam-se como isoladores perfeitos (todos os electrões de valência tomam parte na ligação covalente) e, portanto, não há electrões livres para contribuírem para a corrente eléctrica. Contudo, à medida que a temperatura aumenta, parte dos electrões de valência adquirem energia suficiente para escaparem aos respectivos átomos e tornam-se electrões livres, deixando um “buraco” na correspondente ligação covalente. A vaga deixada na banda de valência (BV) designa-se por **vazio** ou **lacuna**. Por cada electrão ( $n$ ) transferido da BV para a banda de condução (BC), cria-se na primeira (BV) um vazio ( $p$ ); num semiconductor puro, por cada electrão livre na BC existe um vazio na BV, i.e., sempre que um electrão deixa a banda de valência gera-se um **par electrão-vazio**. Entretanto, um electrão livre na BC pode perder a sua energia e regressar à BV: este processo designa-se por **recombinação**.

A probabilidade de um electrão ocupar um nível de energia  $E$ , é dada pela distribuição de Fermi-Dirac:

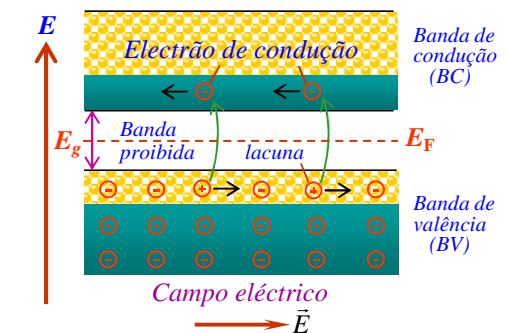
$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E-E_F)}{k_B T}\right] + 1},$$

onde  $F$  identifica o nível de energia com probabilidade de ocupação igual a  $\frac{1}{2}$  (50%), que se designa por **nível de Fermi**. Num SC intrínseco, o nível de Fermi situa-se sensivelmente a meio da banda proibida que separa a banda de valência da banda de condução.

Semiconductor intrínseco a 0 K

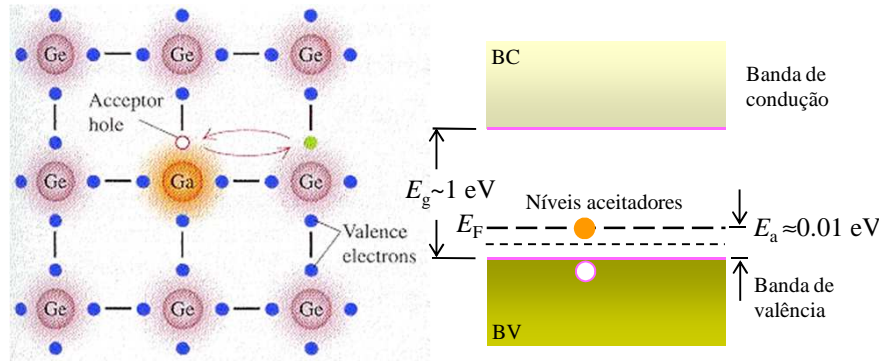


Semiconductor intrínseco ( $T > 0$  K)

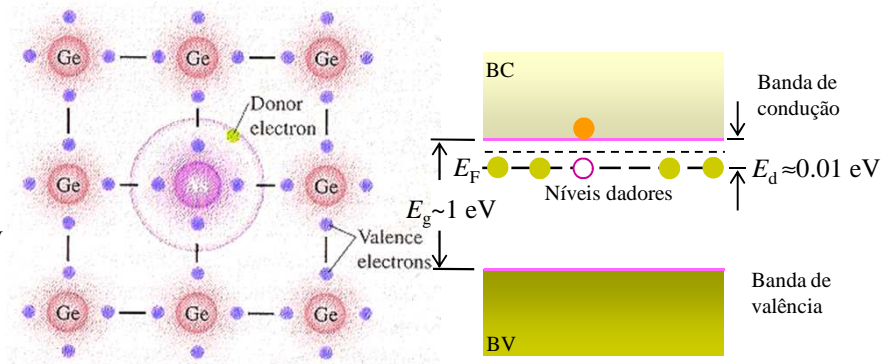


# Impurezas aceitadoras e impurezas dadoras

## Semicondutores tipo-p



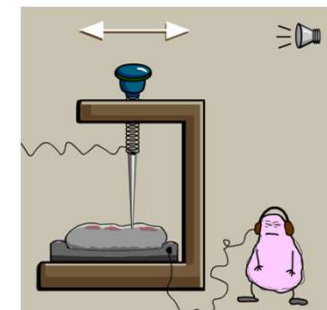
## Semicondutores tipo-n



À temperatura ambiente, a presença no SC de impurezas de valência inferior, **impurezas aceitadoras/receptoras** (em geral, elementos do 3º grupo da tabela periódica), aumenta o nº de vazios na BV, tornando a componente da corrente devida às lacunas maior; elementos de valência superior, **impurezas dadoras** (geralmente, elementos do 5º grupo da tabela periódica), dão origem a semicondutores em que o nº de electrões livres na BC é substancialmente maior que o nº de lacunas na BV, fazendo, neste caso, com que a componente da corrente devida aos electrões livres seja superior à componente devida às lacunas.

Deste modo, a condutibilidade de um sc intrínseco é significativamente alterada pela substituição de uma pequena fracção de átomos base por elementos do 3º ou do 5º grupos da tabela periódica, tornando os sc muito mais interessantes do ponto de vista tecnológico.

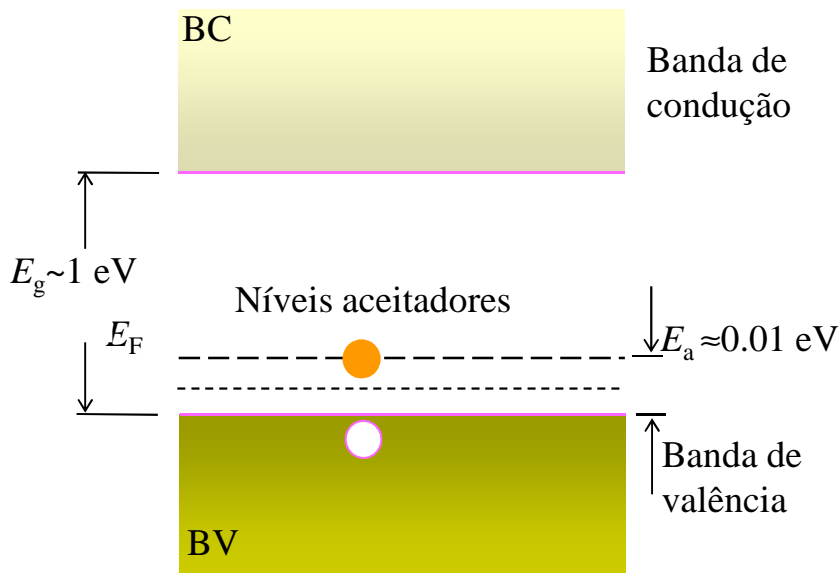
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem\\_eletr%C3%B4nica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem_eletr%C3%B4nica)



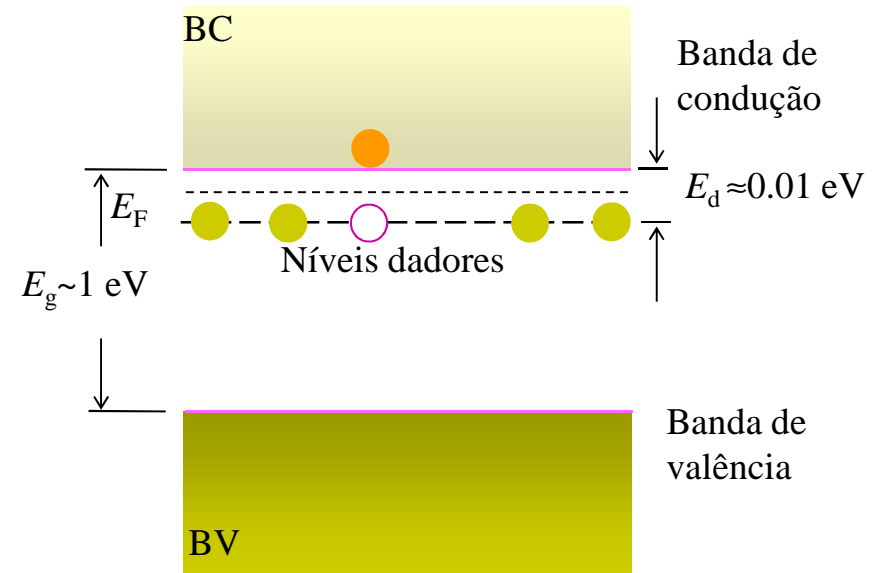
# Semicondutores extrínsecos

Este processo é designado por **dopagem**, e o material SC torna-se **extrínseco** (*impuro*). Quando os átomos são substituídos por elementos de valência inferior ao do elemento base, o semicondutor obtido diz-se de **tipo p**; quando a impureza possui uma valência superior, o SC designa-se de **tipo n**.

## Semicondutor tipo p

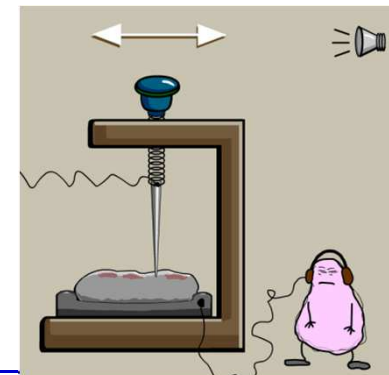


## Semicondutor tipo n



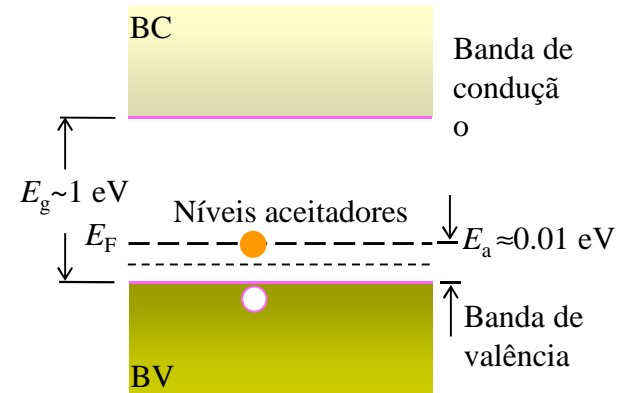
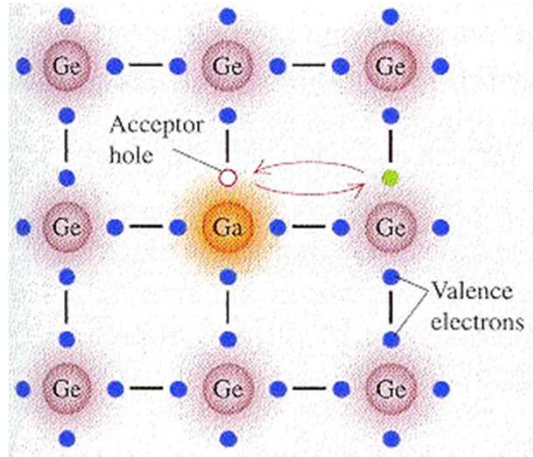
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem\\_eletr%C3%B4nica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem_eletr%C3%B4nica)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/crystalBillFinal.swf>

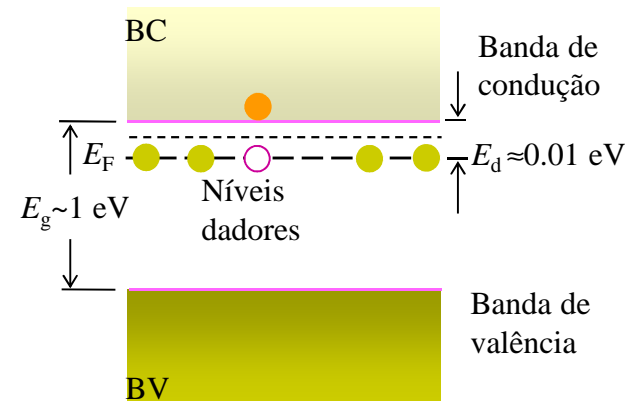
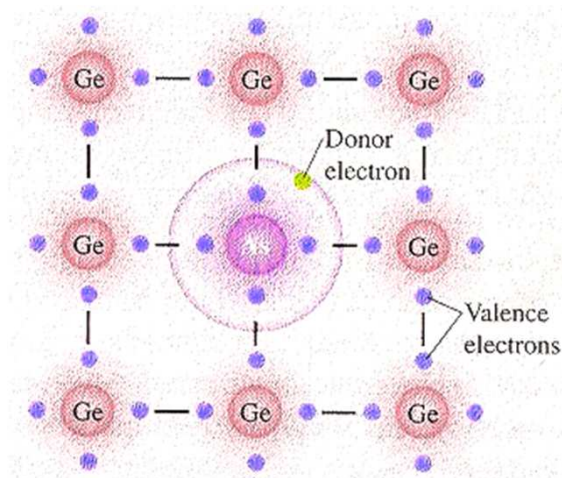


# Impurezas aceitadoras e impurezas dadoras

## Semicondutores tipo-p



## Semicondutores tipo-n



# Homojunções semicondutoras

# Fabricação de uma homojunção $p^+-n$

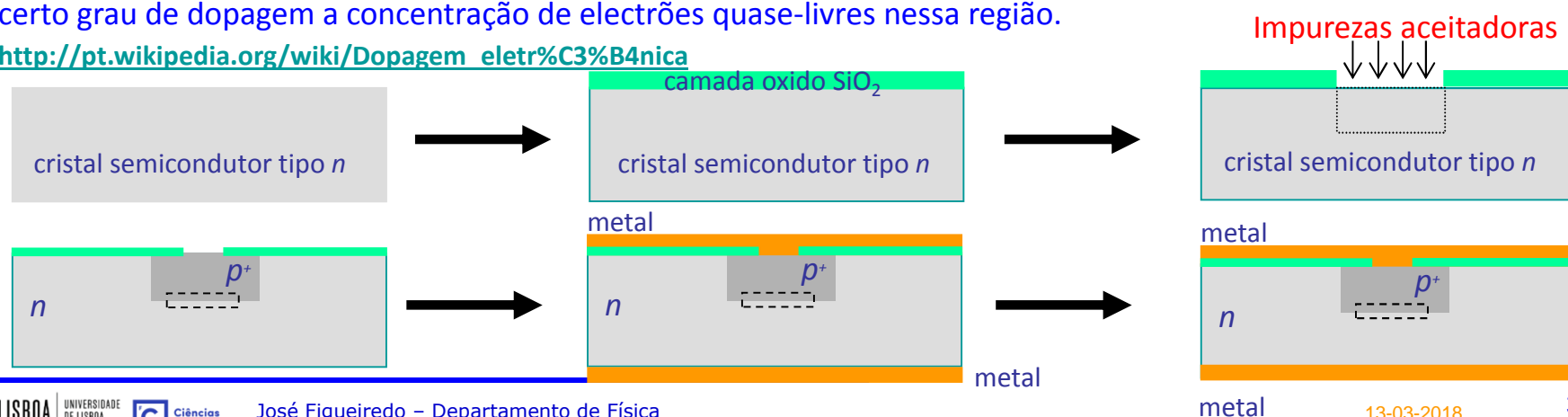
A dopagem selectiva de cristais semicondutores é a base de toda a microelectrónica/electrónica-integrada. Quase todos os componentes electrónicos e optoelectrónicos incorporam uma ou mais junções p-n. Uma junção p-n corresponde à zona fronteira entre regiões adjacentes do tipo **p** e do tipo **n** num cristal semiconductor.

Uma **homojunção** corresponde à região de confluência de duas porções de um mesmo cristal semiconductor com propriedades eléctricas distintas. O exemplo clássico é a junção p-n. **Notar que o cristal semiconductor, a menos das impurezas, é o mesmo.** Quando a confluência é entre dois cristais semicondutores diferentes, por exemplo o Ge e o Si, diz-se que se trata de uma **heterojunção**.

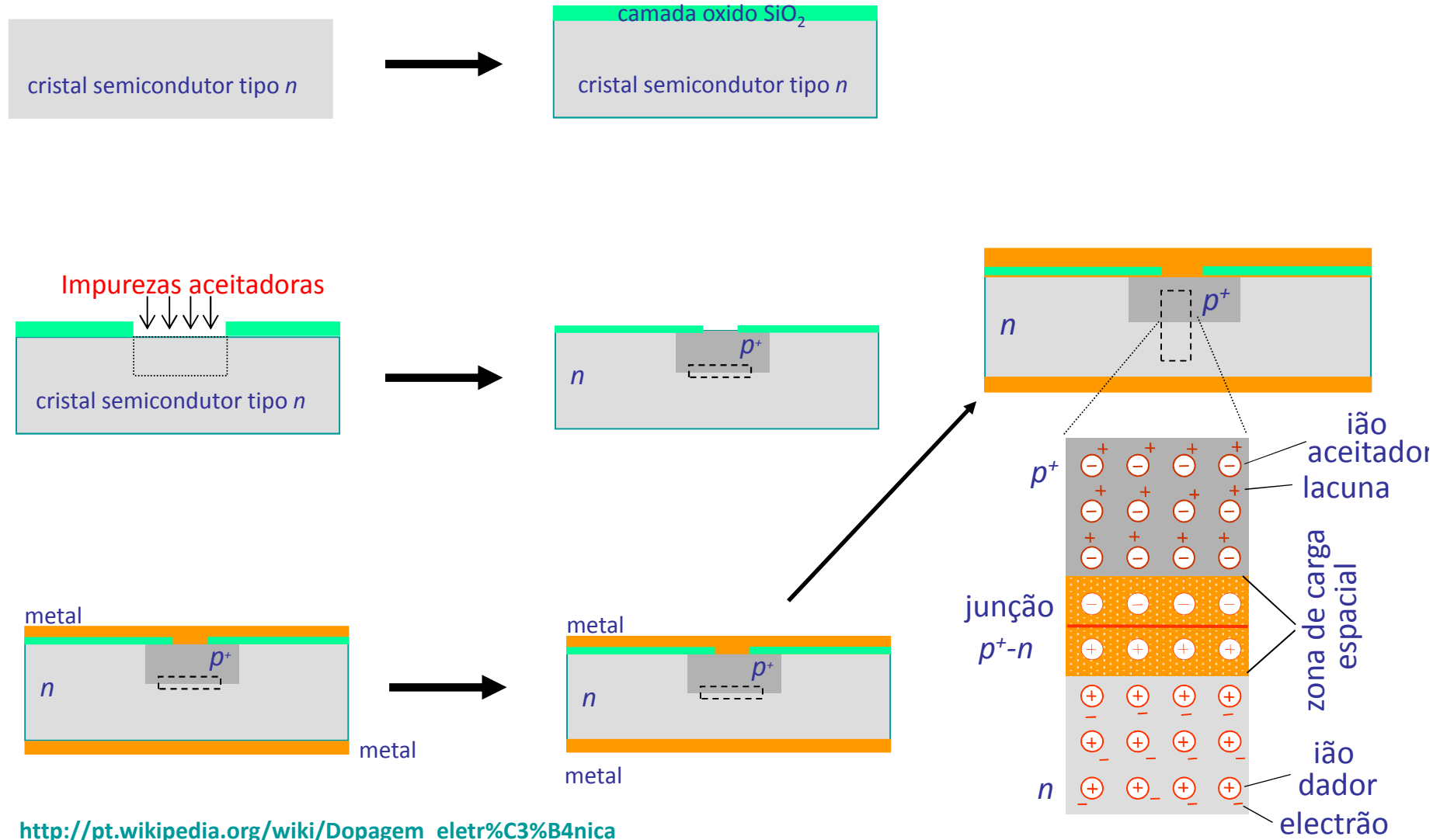
Uma homojunção **p-n** é obtida dopando, de forma selectiva, o cristal semiconductor (normalmente referido como substrato), criando, neste substrato, regiões com características de condução eléctrica muito diferentes.

Partindo de um substrato do tipo n (material onde existe uma concentração elevada de electrões quase-livres) cuja superfície foi oxidada (camada de sílica,  $\text{SiO}_2$ ), no qual é seleccionada, através de um processo fotolitográfico, uma região a ser dopada com impurezas aceitadoras, seguido da remoção de sílica na zona seleccionada. Num possível processo de dopagem, bombardeia-se a zona a dopar com átomos de uma impureza aceitadora (elemento que origina uma concentração elevada de lacunas quase-livres na banda de valência). À medida que prossegue a dopagem com impurezas do tipo **p**, a concentração de lacunas aumenta na região localizada no material **n**, superando a partir de um certo grau de dopagem a concentração de electrões quase-livres nessa região.

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem eletrônica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem_eletr%C3%B4nica)



# Fabricação de uma homojunção $p^+-n$



# Fabricação de uma homojunção $p^+-n$ (2)

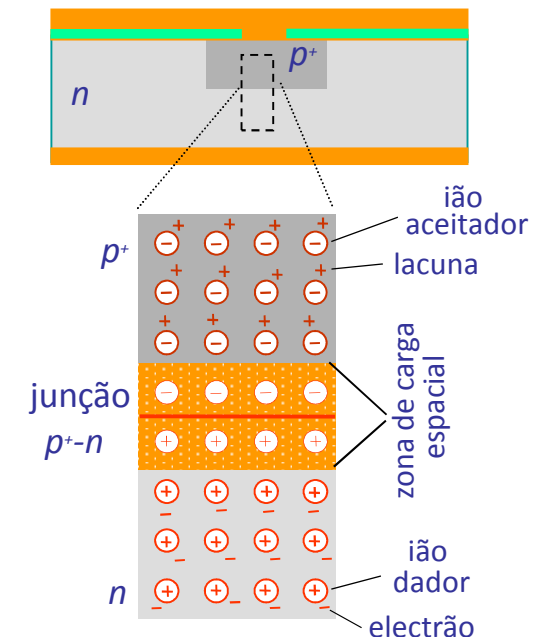
No processo de dopagem com bombardeamento, ocorre forte **difusão** e **recombinação** dos portadores livres na zona da junção, formando-se uma região de depleção (região espacial sem cargas livres). A figura abaixo representa, de forma esquemática, a junção  $p^+-n$  (o sinal + indica que a concentração de átomos aceitadores no lado p é superior à concentração de átomos doadores no lado n). Na figura, são identificados, apenas, os íons dopantes (aceitadores ou p; doadores ou n) e os resultantes portadores quase-livres (lacunas; electrões).

Os átomos das impurezas (fixos na rede cristalina) do lado p e do lado n na vizinhança de junção perdem, respectivamente, lacunas (que se difundem para o lado n) e electrões (que se difundem para o lado p), originando uma região localizada de densidade de carga não nula: região espacial de carga ou zona de depleção. Desta distribuição de carga resulta um campo eléctrico, portanto, uma barreira de potencial  $V_{D0}$ .

O campo eléctrico criado provoca o deslocamento de electrões (minoritários) do lado p para o lado n e de vazios (minoritários) do lado n para o lado p.

Em equilíbrio, as correntes devidas à difusão dos portadores livres majoritários são anuladas pelas correntes de arrastamento dos portadores minoritários induzidas pelo campo eléctrico.

O nível de Fermi é constante ao longo da junção em equilíbrio, sendo a nula corrente efectiva através da junção. Se tal não acontecesse, os electrões de um lado da junção teriam uma energia média superior aos electrões do outro lado, havendo transferência de electrões até se igualarem os níveis de Fermi.



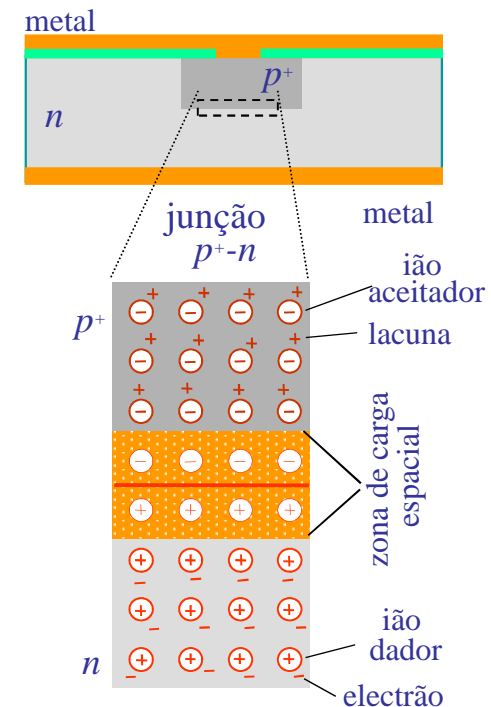
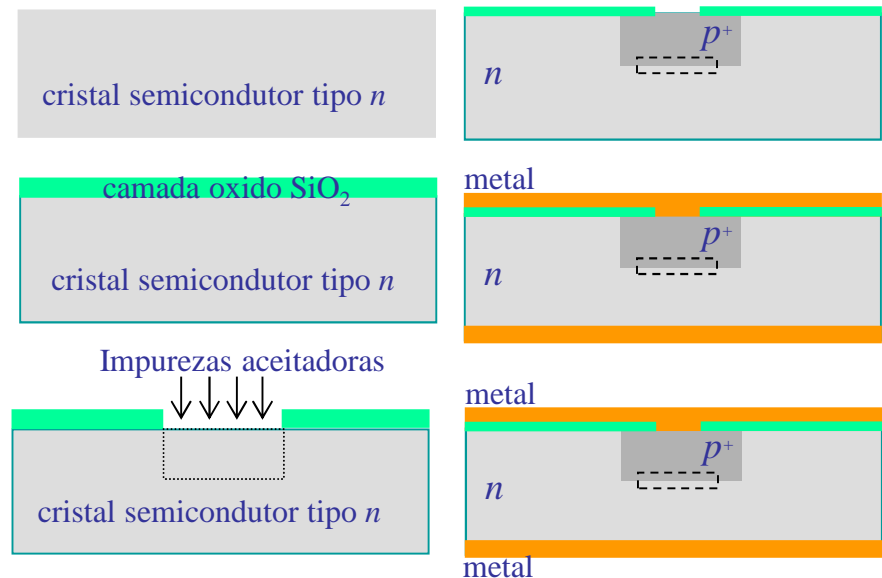


# Fabricação de um homojunção $p-n$

Uma **homojunção** corresponde à região de confluência de duas porções de um mesmo cristal semiconductor com propriedades eléctricas distintas. O exemplo clássico é a zona fronteira entre regiões do tipo  $p$  e do tipo  $n$  num mesmo cristal semiconductor, designada por **junção  $p-n$** . **Notar que o cristal semiconductor, a menos das impurezas, é o mesmo.** Quando a junção é entre dois cristais semicondutores diferentes, por exemplo o Ge e o Si, diz-se que se trata de uma **heterojunção**.

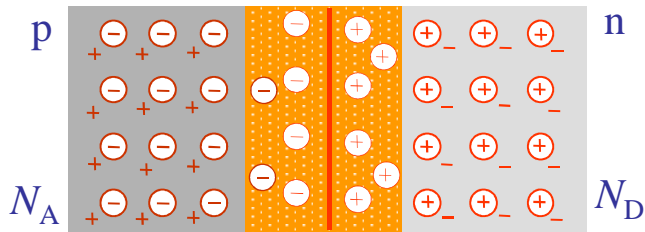
Uma junção  $p-n$  é obtida dopando, de forma selectiva, o cristal semiconductor (normalmente referido como substrato), criando, neste substrato, regiões com características de condução eléctrica muito diferentes. Pode-se afirmar que a dopagem selectiva é a base de toda a microelectrónica/electrónica-integrada. Quase todos os componentes electrónicos e optoelectrónicos incorporam uma ou mais junções  $p-n$ .

## Fabricação de um homojunção $p^+-n$

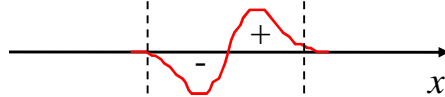


# Bandas de energia numa Junção *p-n*

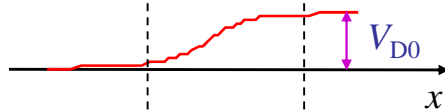
Junção *p-n* em equilíbrio ( $V_{pn}=0$  V)



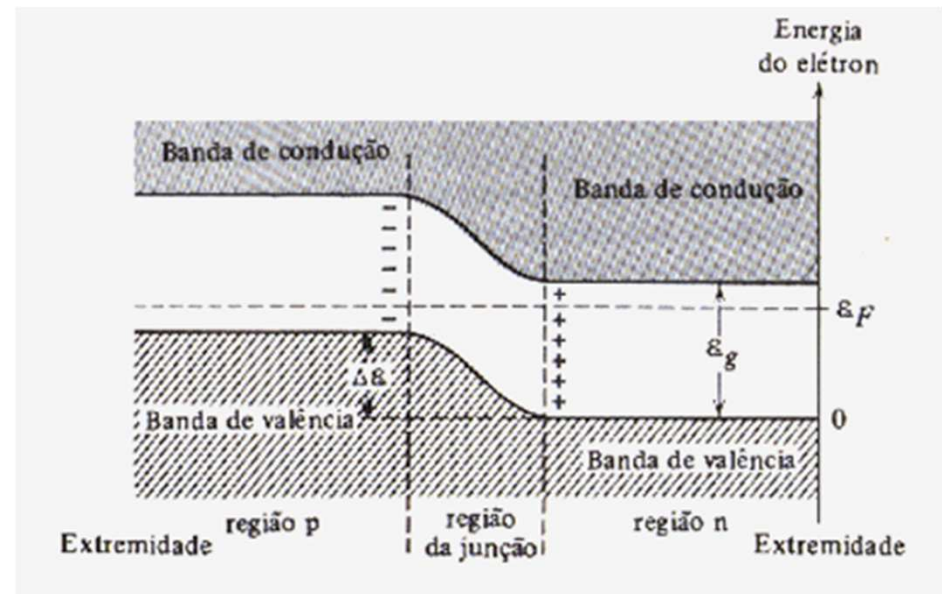
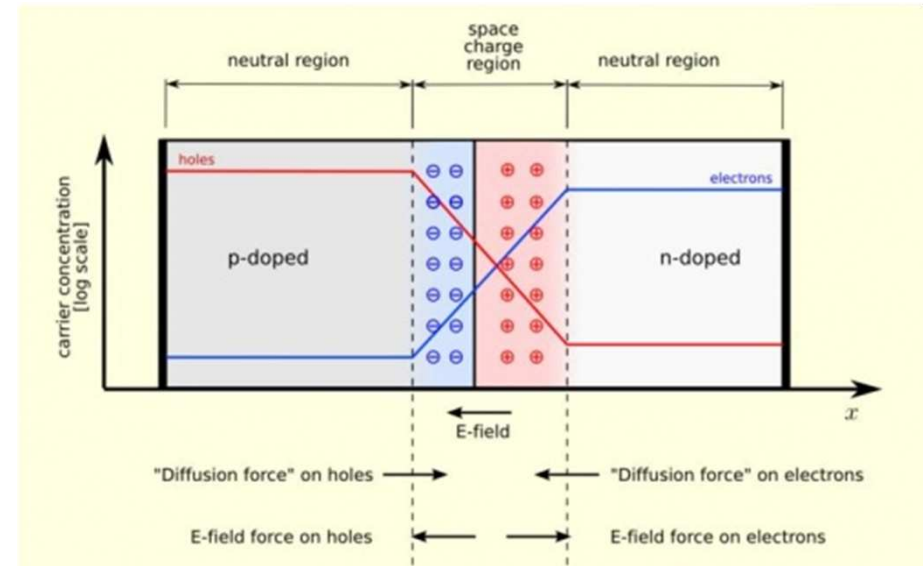
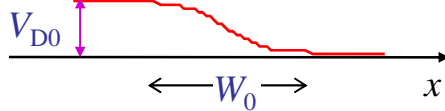
Densidade de carga  $\rho$



Barreira de potencial (para as lacunas)



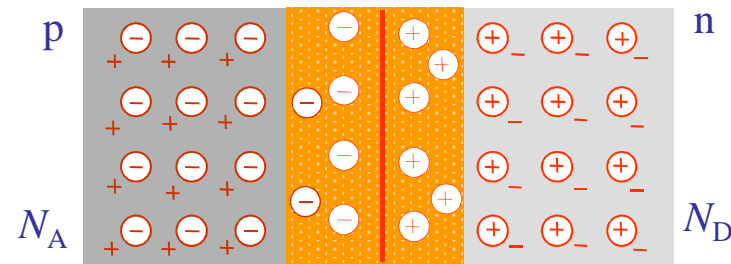
Barreira de potencial (para os electrões)



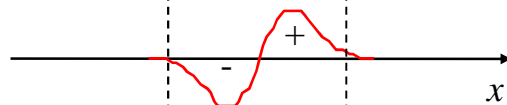
# Junções $p$ - $n$ não polarizada

Uma **junção  $p$ - $n$**  é obtida dopando, de forma selectiva, um cristal semiconductor **único** tipo  $p$  ( $n$ ), normalmente referido como substrato, com impurezas de substituição do tipo  $n$  - átomos dadores - (tipo  $p$  - átomos aceitadores), criando regiões com características de condução eléctrica muito diferentes.

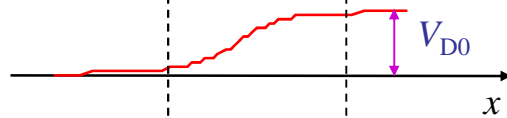
## Junção $p$ - $n$ em equilíbrio ( $V_{pn}=0$ V)



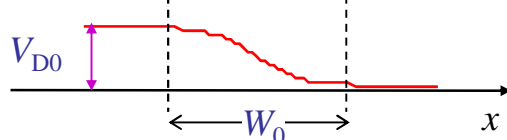
Densidade de carga  $\rho$



Barreira de potencial (para as lacunas)



Barreira de potencial (para os electrões)



A ddp criada pela difusão de lacunas e de electrões das regiões  $p$  e  $n$ , respectivamente, actua como uma barreira de potencial para os portadores majoritários (vazios no lado  $p$  e electrões no lado  $n$ ). A probabilidade destes atravessarem a barreira é proporcional ao factor de Boltzmann ( $\exp[-eV_{D0}/k_B T]$ ), i.e., a intensidade de corrente  $I_D$  devida à difusão dos portadores majoritários é proporcional a  $\exp[-eV_{D0}/k_B T]$ . Contudo, a mesma ddp actua como uma queda de potencial para os portadores minoritários, promovendo a sua passagem através da barreira (vazios do lado  $n$  para o lado  $p$  e electrões da região  $p$  para a região  $n$ ), dando origem à corrente de arrastamento,  $I_A$ . Em equilíbrio,  $I_D + I_A = 0$ .

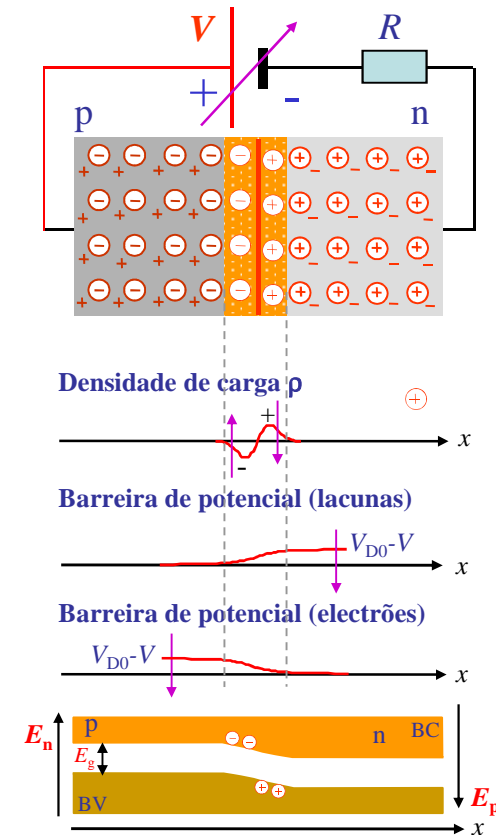
$$V_{D0} = \frac{k_B T}{e} \ln \left[ \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right] \quad W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{D0}}{e} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

# Junções p-n polarizada directamente

Se a junção p-n for **polarizada directamente**, i.e., se se aplicar uma diferença de potencial entre as regiões p e n, em que o lado p corresponde à região de maior potencial, há injeção, através da junção, de lacunas do lado p para o lado n e de electrões do lado n para o lado p. A concentração  $p_n$  de lacunas no lado n sobe relativamente ao valor de equilíbrio térmico  $p_{n0}$ . De forma análoga, a concentração  $n_p$  de electrões no lado p sobe relativamente ao valor de equilíbrio térmico  $n_{p0}$ . Como consequência, a densidade espacial de carga diminui, reduzindo a ddp (e do campo eléctrico) entre os lados p e n da junção, o que corresponde a um decréscimo da barreira de potencial. Como resultado desta transferência de portadores através da junção (vazios do lado p para o lado n, e electrões da região n para a região p), a intensidade de corrente devida à difusão torna-se dominante ( $I_D \gg I_A$ ).

( $E_n$  representa a energia dos electrões e  $E_p$  indica a energia dos vazios. Notar que não existem vazios na BC.)

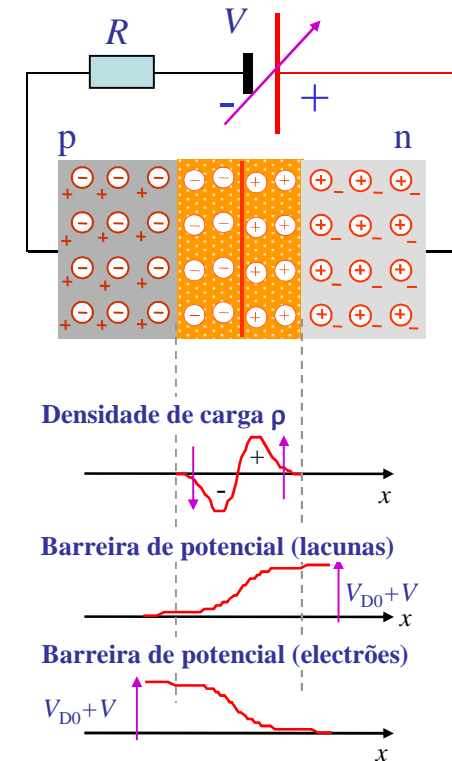
A corrente de arrastamento (devida ao campo eléctrico) mantém-se praticamente inalterável. A corrente de difusão é proporcional a  $\exp[-e(V_{D0}-V)/k_B T]$ , onde  $e$  representa a carga do electrão, e  $V$  a tensão aplicada. Para junções em silício,  $V_{D0} \sim 0.7$  V; para o germânio,  $V_{D0} \sim 0.3$  V. Quando a tensão aplicada  $V$  contrabalançar a barreira de potencial  $V_{D0}$ , a corrente total através da junção é limitada pelos outros elementos do circuito. Na prática, quando  $V=V_{D0}$ , considera-se que a corrente na junção é independente da tensão aplicada, sendo limitada pelos outros elementos do circuito em que esta se insere (no caso da figura, a resistência  $R$ ), e que a ddp entre os terminais da junção mantém-se  $\cong V_{D0}$ .



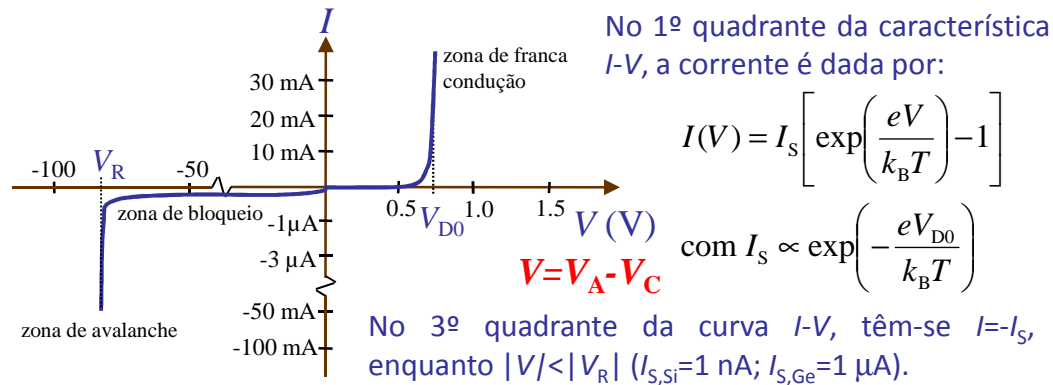
# Junções p-n polarizada inversamente

Se a junção p-n for **polarizada inversamente**, i.e., se se aplicar uma ddp entre as regiões p e n, em que o lado p corresponde à região de menor potencial, os electrões livres do lado n são atraídos para o polo positivo da fonte, deixando lacunas no seu lugar, o que levará à expansão da região espacial de carga positiva no lado n. Ao mesmo tempo, os vazios do lado p são atraídos para o polo negativo da fonte, originando o aumento da região espacial de carga negativa no lado p. A concentração de lacunas no lado n,  $p_n$ , desce, relativamente ao valor de equilíbrio térmico  $p_{n0}$  e, de forma análoga, a concentração de electrões no lado p,  $n_p$ , diminui relativamente ao valor de equilíbrio térmico  $n_{p0}$ . O que também faz com que o volume da região espacial de carga cresça, originando o aumento da barreira de potencial entre os lados p e n da junção (e do campo eléctrico), o que diminui o número de portadores livres na vizinhança da junção e a corrente devida à difusão dos portadores livres através da junção, rompendo-se o equilíbrio entre a corrente de difusão e a corrente de arrastamento:  $I_D < I_A$ .

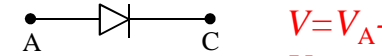
A corrente na junção é, quase exclusivamente, devida à corrente de arrastamento, que é proporcional à concentração dos portadores minoritários e, portanto, não varia com a tensão aplicada. (O número de portadores minoritários é, praticamente, independente da tensão aplicada.) O valor da corrente através da junção polarizada inversamente designa-se por **corrente inversa** ou **corrente de fuga** ( $I_S$ ). Em junções de silício,  $I_S \sim nA$ ; para o germânio,  $I_S \sim mA$ . Há, contudo, um valor de tensão, **tensão de ruptura da junção**, a partir do qual a intensidade da corrente inversa é limitada, apenas, pelos outros elementos do circuito em que a junção se insere, sendo, praticamente, independente da tensão inversa aplicada. A ruptura pode ocorrer devido ao **processo de avalanche** ou ao **efeito de Zener**.



# Característica corrente-tensão ( $I$ - $V$ ) de uma Junção $p$ - $n$



O dispositivo mais simples baseado numa junção  $p$ - $n$  é o **díodo semicondutor rectificador**, cujo símbolo é:



onde **A** representa o terminal ânodo (**lado  $p$  da junção**) e **C** indica o cátodo (**região  $n$  da junção**).

A seta indica o sentido da corrente directa. Em condução um díodo apresenta uma queda de tensão entre os seus terminais, que no caso de díodos de silício é  $V_D \sim 0.7 \text{ V}$ .

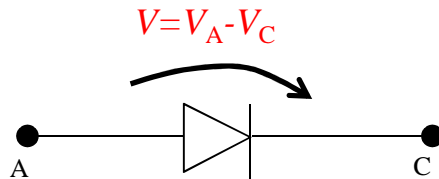
Para cada junção, há um valor de tensão inversa a partir do qual a intensidade da corrente inversa aumenta rapidamente, tornando-se, praticamente, independente da tensão aplicada: **tensão de ruptura da junção**. A ruptura pode ocorrer devido ao **processo de avalanche** ou ao **efeito de Zener**.

**Efeito de avalanche:** à medida que a tensão inversa cresce, embora o número de portadores minoritários não varie de forma significativa sob a acção do campo eléctrico crescente, a energia dos portadores aumenta e pode tornar-se suficiente para produzir na zona de depleção novos pares electrão-vazio os quais vão aumentar o valor da corrente. O processo de multiplicação de portadores é semelhante ao efeito de uma avalanche. Atingido o valor da tensão que desencadeia o efeito de avalanche, a tensão mantém-se praticamente constante, mesmo que a corrente varie significativamente.

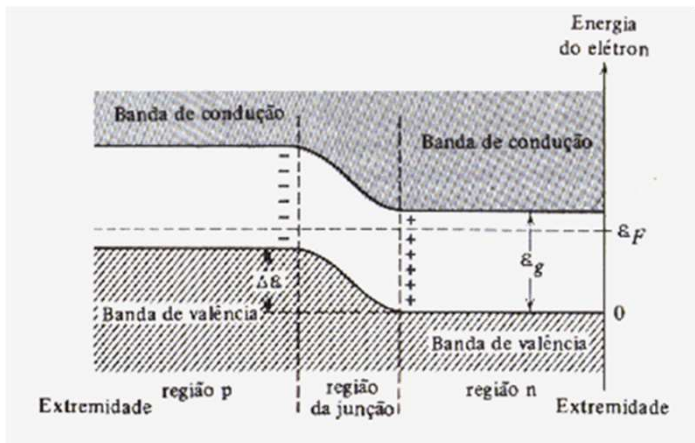
**Efeito de Zener:** há junções  $p$ - $n$  em que o campo eléctrico na região de depleção é suficientemente intenso para provocar a transição de electrões da banda de valência para a banda de condução. (O efeito é uma demonstração prática do efeito quântico – efeito de túnel.) O efeito de Zener é dominante nos díodos cuja tensão de ruptura é inferior a seis volts, e o efeito de avalanche naqueles em que a ruptura se verifica acima de seis volts.

# Característica corrente-tensão ( $I-V$ ) de uma Junção $p-n$

O dispositivo mais simples baseado numa junção  $p-n$  é o **díodo semiconductor rectificador**, cujo símbolo é:



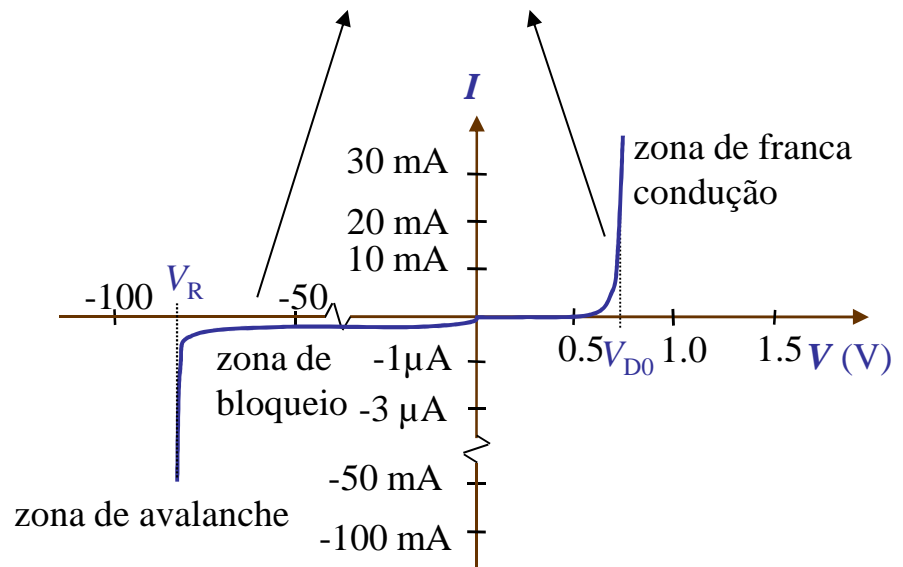
onde **A** representa o terminal ânodo (lado  $p$  da junção) e **C** indica o cátodo (região  $n$  da junção).



Característica corrente-tensão ( $I-V$ )

$$I(V) = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$\text{com } I_s \propto \exp\left(-\frac{eV_{D0}}{k_B T}\right)$$

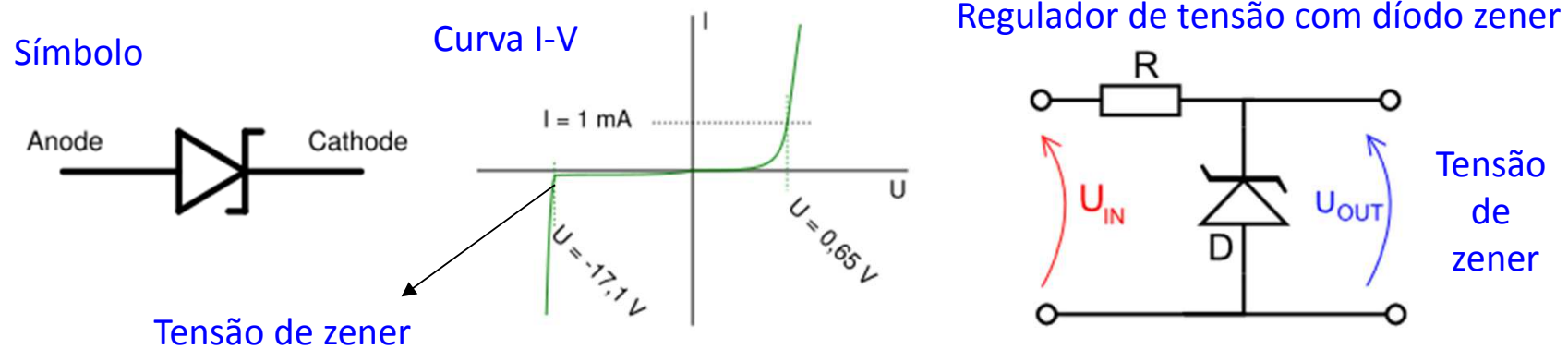


$V$  positivo diminui a altura da barreira para os electrões e para as lacunas: passagem de corrente de A para C.  $V$  negativo aumenta a altura da barreira para os electrões e para as lacunas: praticamente não passa corrente através do dispositivo de C para A.

# Díodos Zener e de túnel

## Díodo Zener

Os díodos **especialmente** fabricados para operar na região de ruptura, independentemente do efeito usado, são designados de **díodos zener**. Nos díodos zener baseados no efeito de avalanche, a zona de transição é mais gradual do que nos díodos empregando o efeito de Zener.

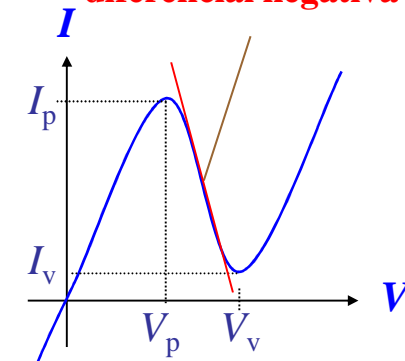


## Díodo Túnel

Numa junção  $p-n$  com concentração de aceitadores e dadores muito elevada ( $N_A, N_D \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), a espessura da zona de depleção é da ordem de  $\sim 5 \text{ nm}$ . Neste caso, entra em jogo o **efeito de túnel**. Os electrões têm, agora, elevada probabilidade de transitar directamente da **banda de condução do lado  $n$**  para a **banda de valência do lado  $p$** . Nos díodos túnel a corrente directa começa por crescer com a tensão, até atingir **um máximo local**, decrescendo em seguida até atingir **um mínimo local**, a partir do qual aumenta exponencialmente e de forma idêntica à da junção  $p-n$  moderadamente dopada; **a corrente inversa aumenta linearmente com a tensão**.



**Região de resistência diferencial negativa**





# Outras aplicações do efeito de túnel

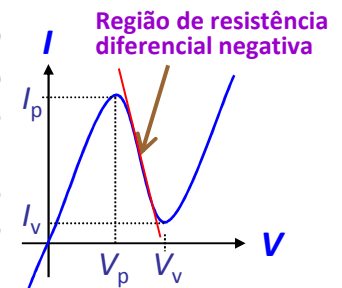
Como referido anteriormente, para cada junção p-n, há um valor de tensão inversa a partir do qual a intensidade da corrente inversa aumenta rapidamente, tornando-se, praticamente, independente da tensão aplicada: **tensão de ruptura da junção**. A ruptura pode ocorrer devido ao **processo de avalanche** ou ao **efeito de Zener**.

**Efeito de avalanche:** à medida que a tensão inversa cresce, embora o número de portadores minoritários não varie de forma significativa sob a acção do campo eléctrico crescente, a energia dos portadores aumenta e pode tornar-se suficiente para produzir na zona de deplecção novos pares electrão-vazio os quais vão aumentar o valor da corrente. O processo de multiplicação de portadores é semelhante ao efeito de uma avalanche. Atingido o valor da tensão que desencadeia o efeito de avalanche, a tensão mantém-se praticamente constante, mesmo que a corrente varie significativamente.

**Efeito de Zener:** há junções p-n em que o campo eléctrico na região de deplecção é suficientemente intenso para provocar a transição de electrões da banda de valência para a banda de condução. (O efeito é uma demonstração prática do efeito quântico *de túnel*.) O efeito de Zener é dominante nos díodos cuja tensão de ruptura é inferior a seis volts, e o efeito de avalanche naqueles em que a ruptura se verifica acima de seis volts. Os díodos **especialmente** fabricados para operar na região de ruptura, independentemente do efeito usado, são designados de **díodos de zener**. Nos díodos de zener baseados no efeito de avalanche, a zona de transição é mais gradual do que nos díodos empregando o efeito de Zener.

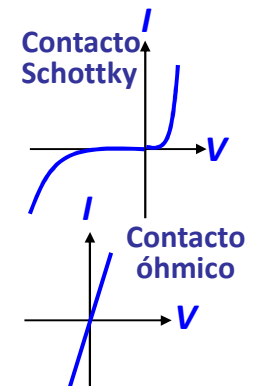
## Díodo de efeito de túnel

Numa junção p-n, ver página da homojunções semicondutoras, com concentração de aceitadores e dadores muito elevada ( $N_A, N_D \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), a espessura da zona de deplecção é da ordem de  $\sim 10 \text{ nm}$ . Neste caso, outro mecanismo de condução entra em jogo: o **efeito de túnel**. Os electrões têm, agora, elevada probabilidade de transitar directamente da **banda de condução do lado n** para a **banda de valência do lado p**. Nos díodos túnel a corrente directa começa por crescer com a tensão, até atingir **um máximo local**, decrescendo em seguida até atingir **um mínimo local**, a partir do qual aumenta exponencialmente e de forma idêntica à da junção p-n moderadamente dopada; **a corrente inversa aumenta linearmente com a tensão**.



## Junções metal-semicondutor: barreiras de Schottky e contactos óhmicos

Em geral, o contacto entre um metal e um semicondutor não é óhmico, exibindo um comportamento semelhante ao de uma junção p-n (ver figura ao lado). Neste caso o contacto designa-se por contacto ou barreira de **Schottky** e o dispositivo baseado neste efeito designa-se por **díodo de schottky**. A queda de tensão, em condução, nestes díodos é cerca de metade da de uma junção p-n. Estes dispositivos são muito mais rápidos do que o díodo rectificador porque no processo de condução só intervêm os portadores majoritários (não há lugar à recombinação dos portadores minoritários). Para a junção p-n ter aplicação prática, é necessário fazer a sua ligação com um circuito exterior, i.e., obter duas junções metal-semicondutor (uma no lado n e outra no lado p). Estas junções não devem alterar ou mascarar as propriedades do dispositivo SC em apreço. Por outras palavras, o contacto (junção) metal-semicondutor deve ter uma característica **corrente-tensão linear**, i.e., o contacto deve ser **óhmico**. Claro que o metal a usar depende do material SC de que é feito o dispositivo.



# Barreiras de Schottky e contactos óhmicos

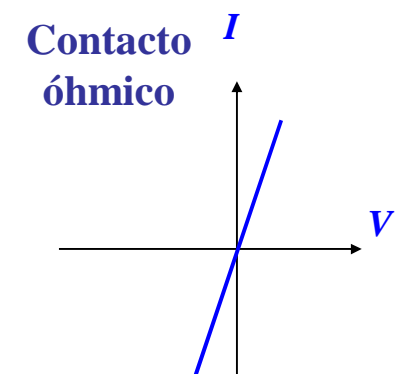
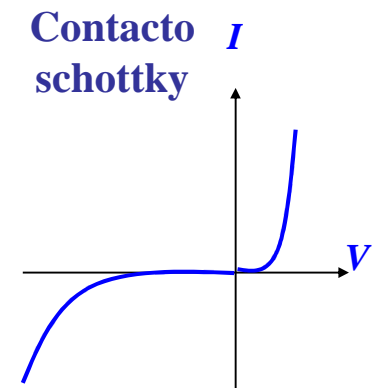
Quando a junção é entre dois cristais semicondutores diferentes, por exemplo o Ge e o Si, ou entre um semicondutor e um metal, diz-se que se trata de uma **heterojunção**. Também nas heterojunções o nível de Fermi é constante ao longo da junção em equilíbrio, sendo a nula corrente efectiva através da junção. Se tal não acontecesse, os electrões de um lado da junção teriam uma energia média superior aos electrões do outro lado, havendo transferência de electrões até se igualarem os níveis de Fermi.

## Contactos Schottky semiconductor-metal

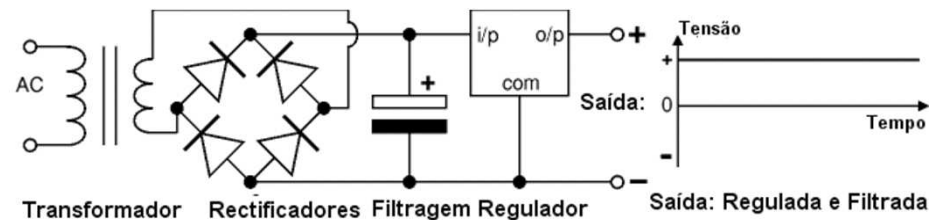
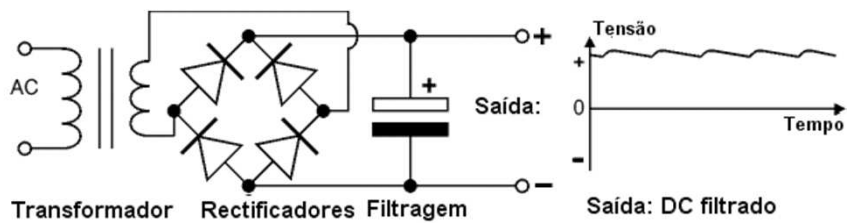
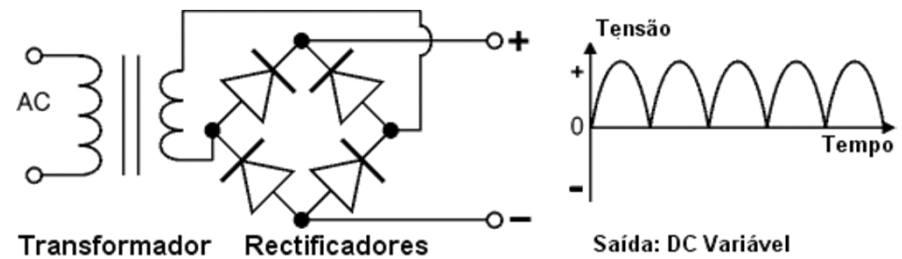
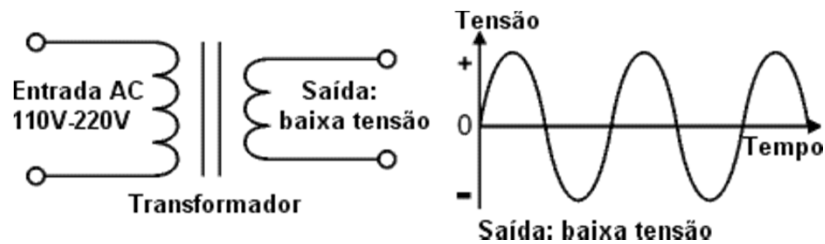
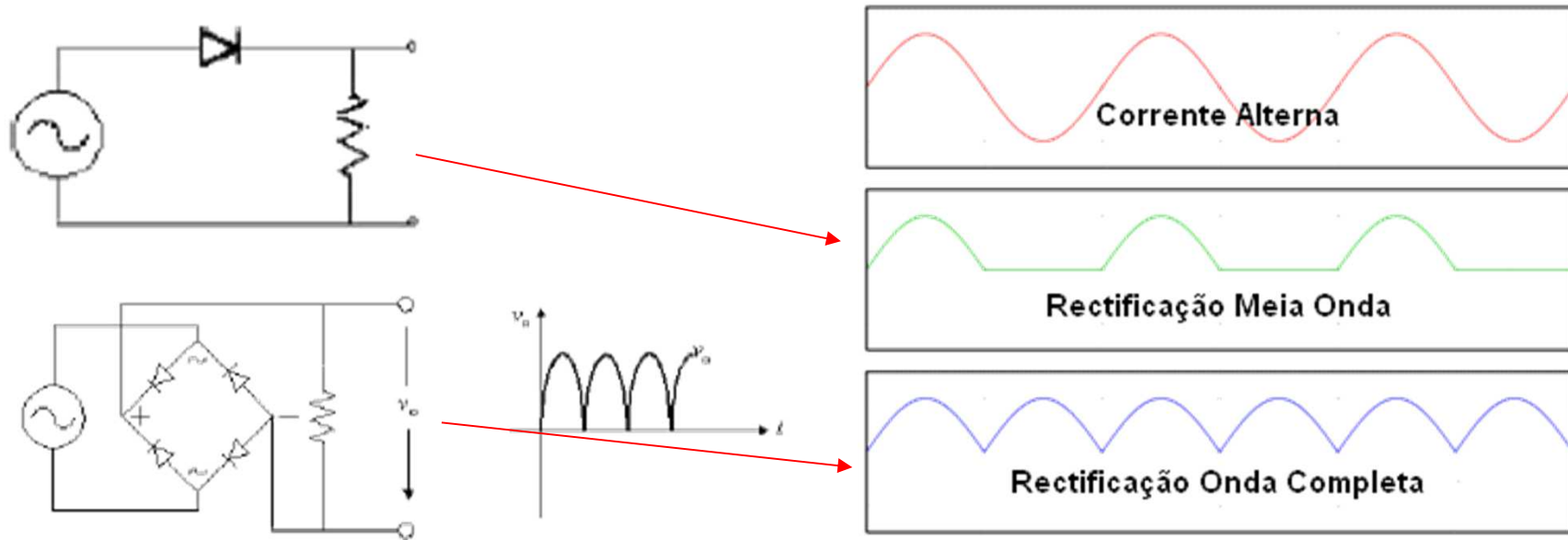
Em geral, o contacto entre um metal e um semicondutor é **não óhmico**, isto é, a característica corrente-tensão I-V não é linear. Normalmente, o contacto entre um metal e um semicondutor exhibe um comportamento semelhante ao de uma junção *p-n* (ver figura ao lado). O contacto semiconductor-metal com as características da figura designa-se por contacto ou barreira de Schottky e o dispositivo correspondente designa-se **díodo schottky**. A queda de tensão, quando em condução, nestes díodos é cerca de metade da queda de tensão (diferença de potencial) de uma junção *p-n*. Em geral, os díodos schottky são muito mais rápidos do que o díodo *p-n* porque no processo de condução só intervêm os portadores majoritários (não há lugar à recombinação dos portadores minoritários).

## Contactos óhmicos semiconductor-metal

Para uma junção *p-n*, e.g., ter aplicação prática, é necessário fazer a sua ligação com um circuito exterior, i.e., obter duas junções metal-semicondutor (uma no lado n e outra no lado p). Estas junções não devem alterar ou mascarar as propriedades do dispositivo SC em apreço, isto é, o contacto (junção) metal-semicondutor deve ter uma característica corrente-tensão linear, i.e., deve ser óhmica.



# Díodo de junção *pn* como elemento retificador



# Heterojunções semicondutoras

# Heterojunções mesoscópicas e nanoscópicas

Uma estrutura apresenta comportamento clássico como, por exemplo, características hómicas – a intensidade de corrente eléctrica depende linearmente da tensão aplicada -, se as suas dimensões são muito superior a um dos seguintes comprimentos característicos:

- i) comprimento de onda associado à função de onda representativa da partícula;
- ii) livre percurso médio da partícula;
- iii) comprimento de relaxação de fase (“phase-relaxation length”), que corresponde à distância que a partícula pode percorrer sem que a sua relação de fase inicial seja destruída.

Estas escalas de comprimento variam de material para material, sendo fortemente influenciados pela temperatura, campos eléctricos e magnéticos, etc.

Estruturas cujas dimensões são muito maiores que o átomo, mas não o suficientemente grande para apresentarem um comportamento hómico, por exemplo, designam-se **mesoscópicas**.

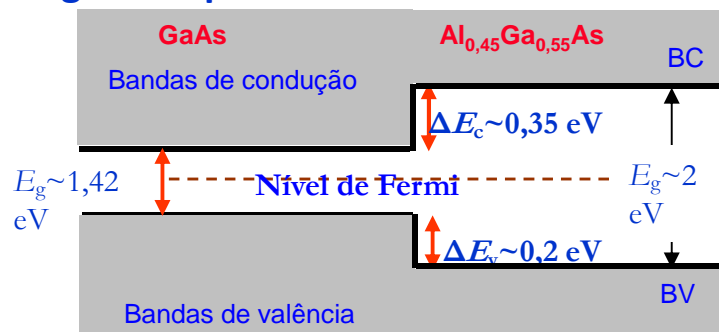
Uma heterojunção corresponde ao estabelecimento *da ligação cristalina* entre dois materiais diferentes. Ter presente que na interface entre os dois *materiais*, por exemplo dois semicondutores, a energia do nível do nível de Fermi através da estrutura *é constante*, isto é, *não depende da posição*. Este facto implica que o mínimo das bandas de condução e o máximo das bandas de valência possam sofrer descontinuidades ao longo da estrutura (ver figuras nas páginas seguintes).

# Heterojunções degrau e barreira de potencial

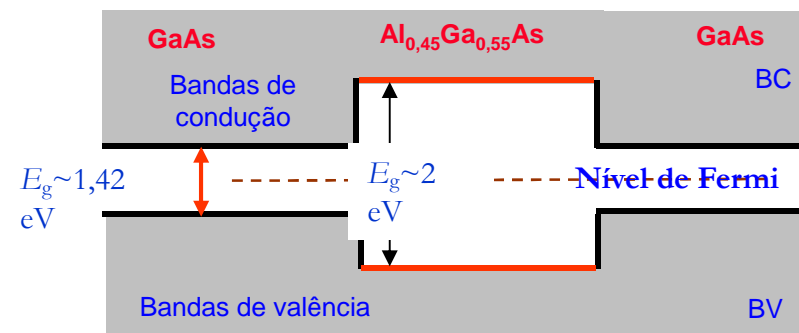
O hiato do arseniato de gálio (GaAs) é  $\sim 1,42$  eV; o hiato do  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  depende da composição de alumínio ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ): se  $x=0$ , temos GaAs; se  $x=1$  temos AlAs. Várias características do material são função da concentração de alumínio  $x$ : o hiato aumenta com  $x$ , o índice de refração diminui com  $x$ , a massa efetiva dos portadores de carga (eletrões na BC e lacunas na BV) também depende de  $x$  (adiante serão apresentadas as respetivas relações). De forma análoga as propriedades dos compostos InGaAs, InAlAs, InGaAsP/InP, InGaAlAs/InP, por exemplo, dependem da concentração de índio e de alumínio.

*Sanduichando* uma camada de  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$  entre duas camadas de GaAs, figura da direita abaixo, obtém-se barreiras de potencial para os eletrões e para as lacunas: o perfil do mínimo da banda condução desta estrutura apresenta uma barreira de potencial para os eletrões quase livres, e o perfil do máximo da banda de valência corresponde a uma barreira para as lacunas. A altura da barreira na banda de condução é determinada pelas descontinuidades da banda de condução entre o  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$  e o GaAs; a altura da barreira na banda de valência resulta das descontinuidades da banda de valência entre o  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$  e o GaAs.

### Degrau de potencial



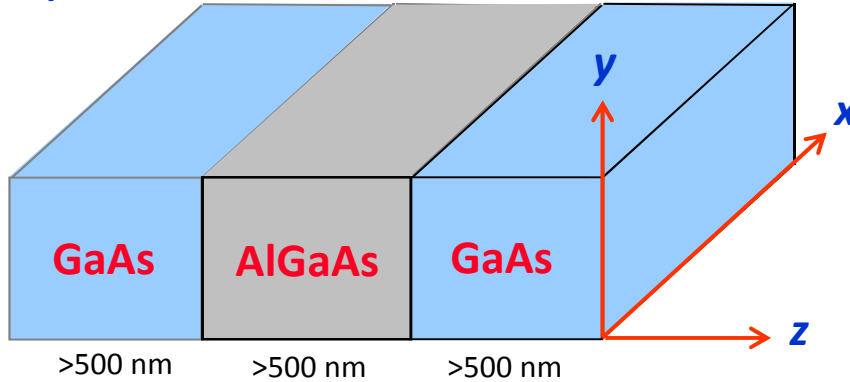
### Barreira de potencial



# Heterojunções do tipo “barreira” de potencial

$$\lambda_e = h/p$$

Semicondutores 3D



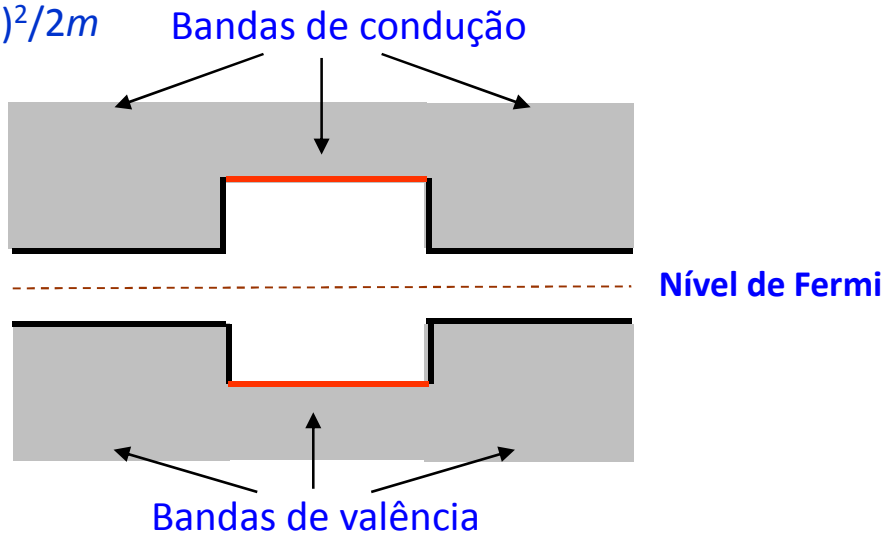
$$\lambda_e = h/p$$

$$\text{ou } k_e = p_e/\hbar$$

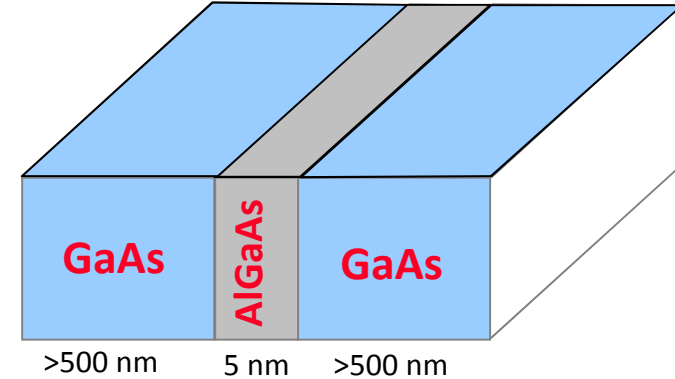
$$E = p^2/2m$$

$$E = (\hbar k_e)^2/2m$$

$$L \gg \lambda_e$$

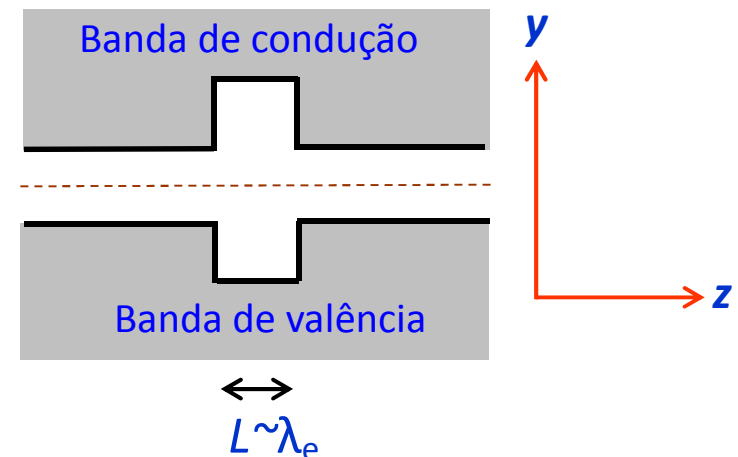


Camada *nanométrica* entre camadas *micrométricas*



$$L \sim \lambda_e$$

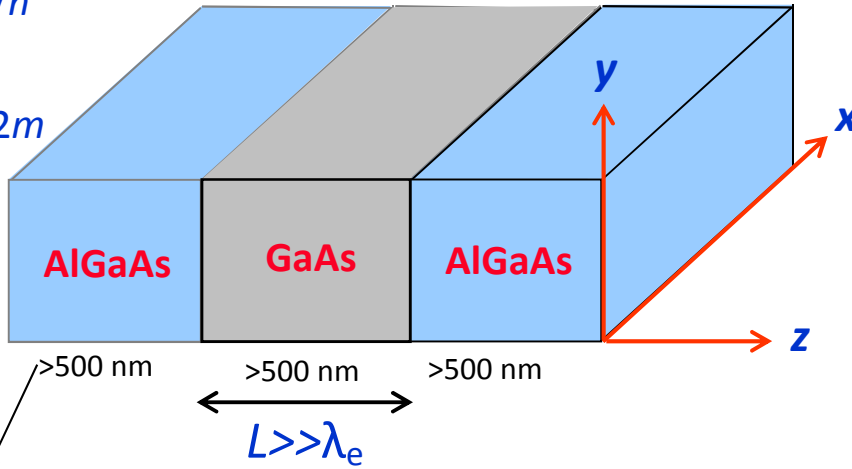
Barreira de potencial



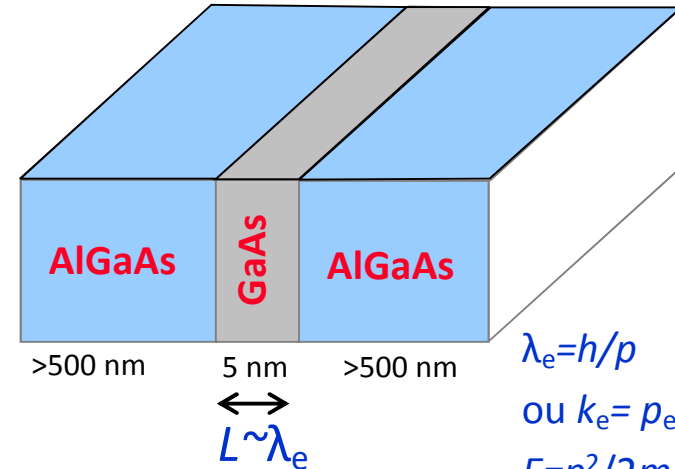
# Heterojunções do tipo “poço” de potencial

$\lambda_e = h/p$   
 ou  $k_e = p_e/\hbar$   
 $E = p^2/2m$   
 $E = (\hbar k_e)^2/2m$

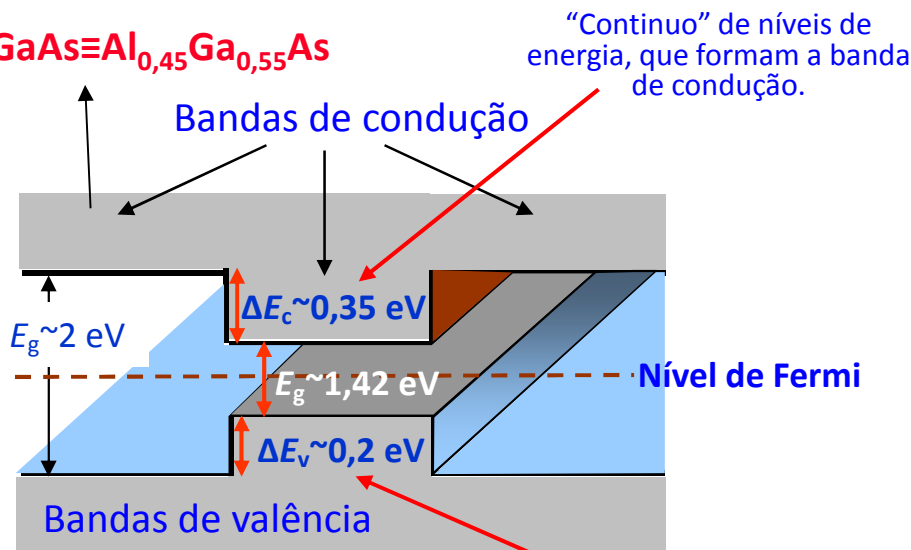
Heterojunção semicondutora



Camada nanométrica entre camadas micrométricas



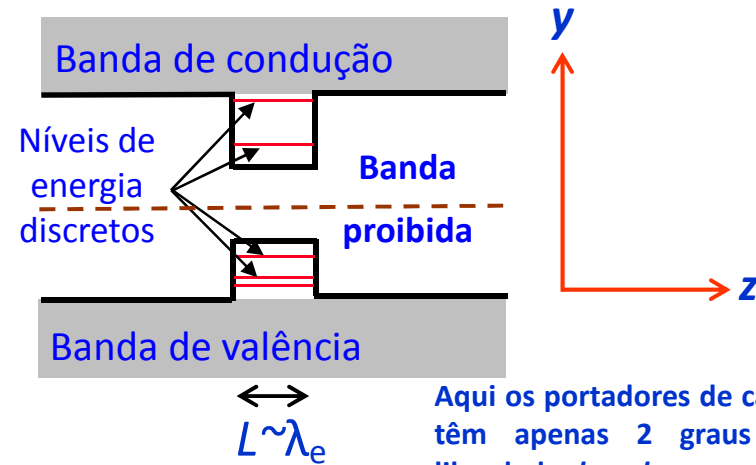
$\lambda_e = h/p$   
 ou  $k_e = p_e/\hbar$   
 $E = p^2/2m$   
 $E = (\hbar k_e)^2/2m$



Os portadores de carga mantêm os 3 graus de liberdade em toda a estrutura:  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$

“Continuo” de níveis de energia, que formam a banda de valência.

Poço quântico



Aqui os portadores de carga têm apenas 2 graus de liberdade:  $k_x$ , e  $k_y$ .



# Estrutura *básica* de um laser polarizado

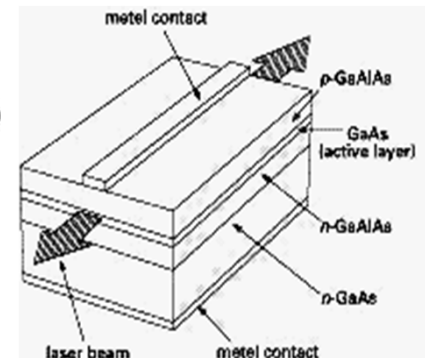
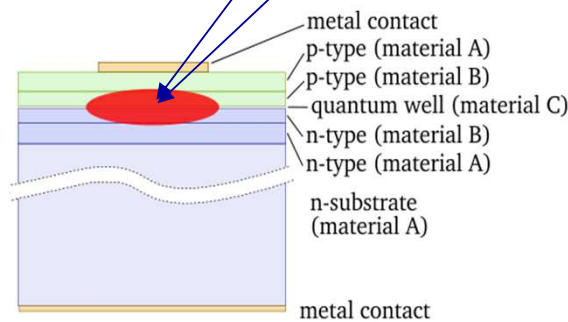
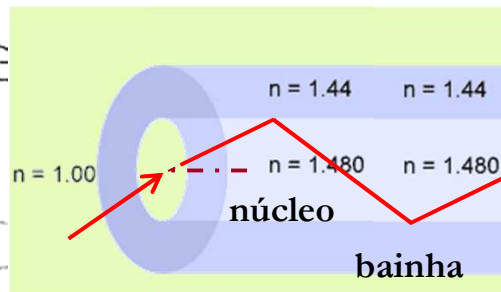
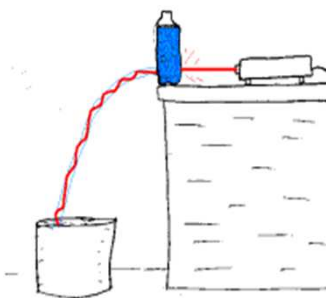
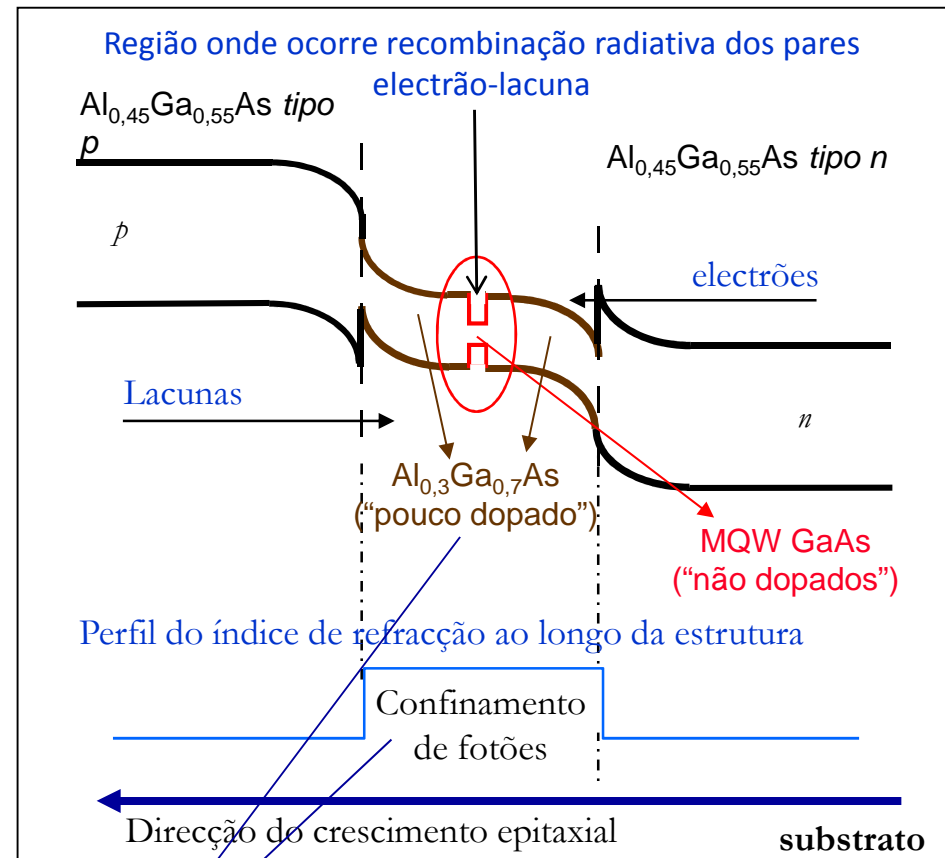
Heterojunção *p-n*:

Confinamento de portadores (poço quântico) e confinamento ótico através do perfil de índice de refração - guia de onda ótico)

Re-alimentação (rever laser de hélio-néon):

*Espelhos* - Faces transversais do cristal clivadas  
Reflexão total interna

**Nota:** em geral, o índice de refração de um semiconductor, para um dado comprimento de onda, diminui com o aumento do hiato da banda proibida. A radiação electromagnética tem tendência a propagar-se nas regiões de maior índice de refração – ver, por exemplo, o funcionamento de uma fibra ótica. (por exemplo: *Óptica*, E. Hecht; F.C. Gulbenkian).



# Heterojunção p-n com ponto quântico (*p-QD-n*)

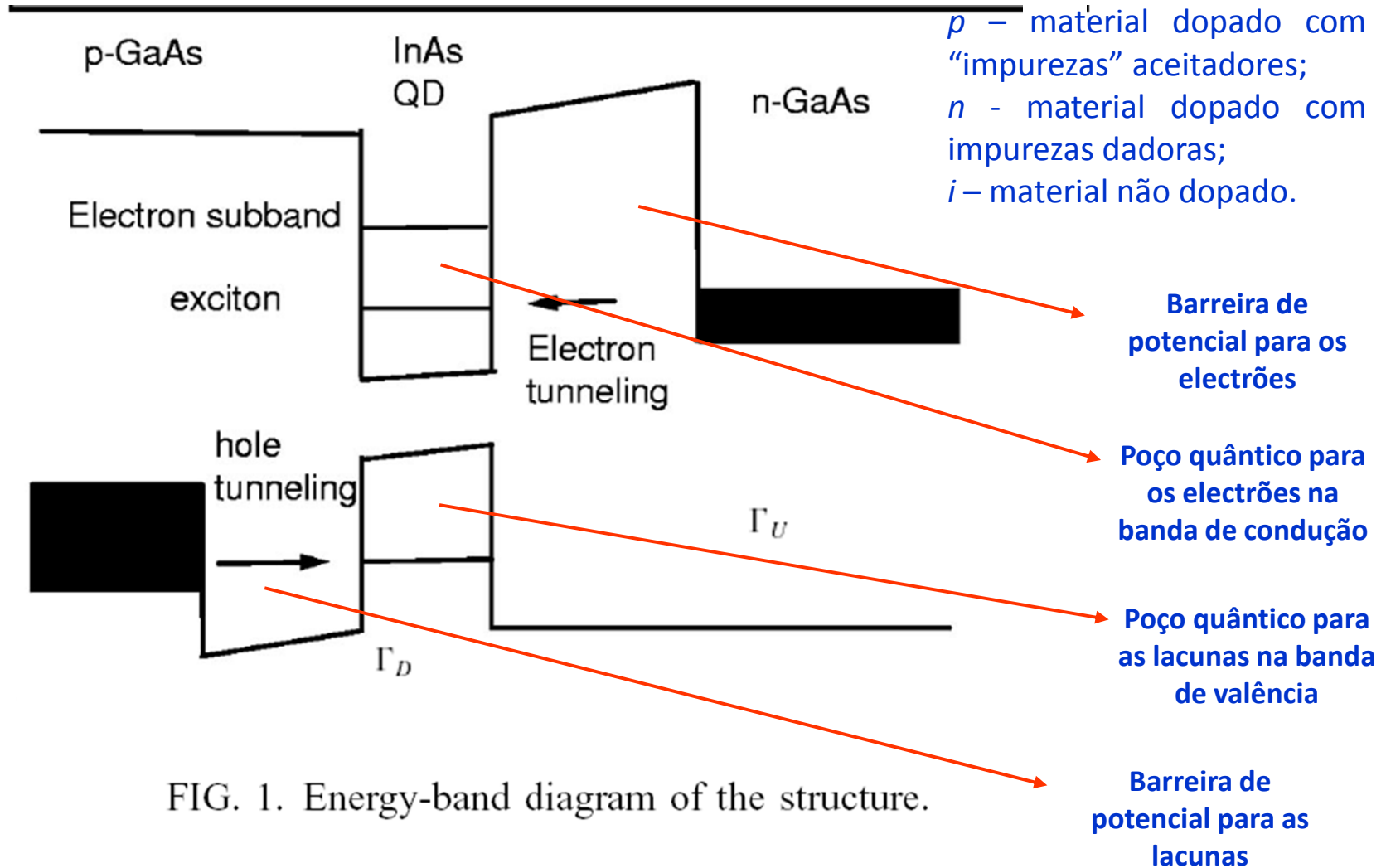
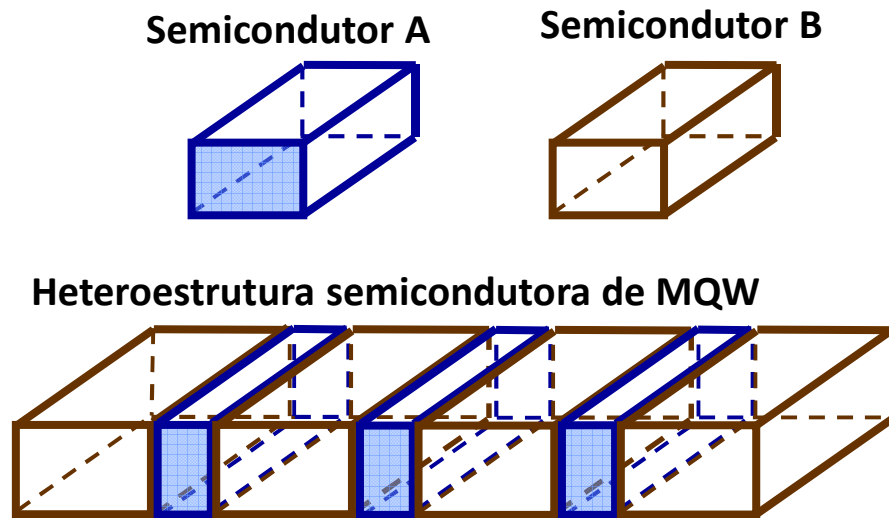
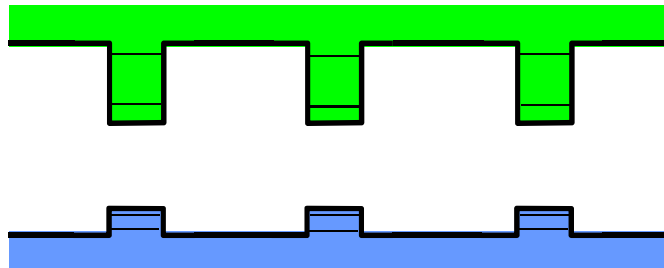


FIG. 1. Energy-band diagram of the structure.

# Heterojunções do tipo “Multiple Quantum Wells” (MQWs)



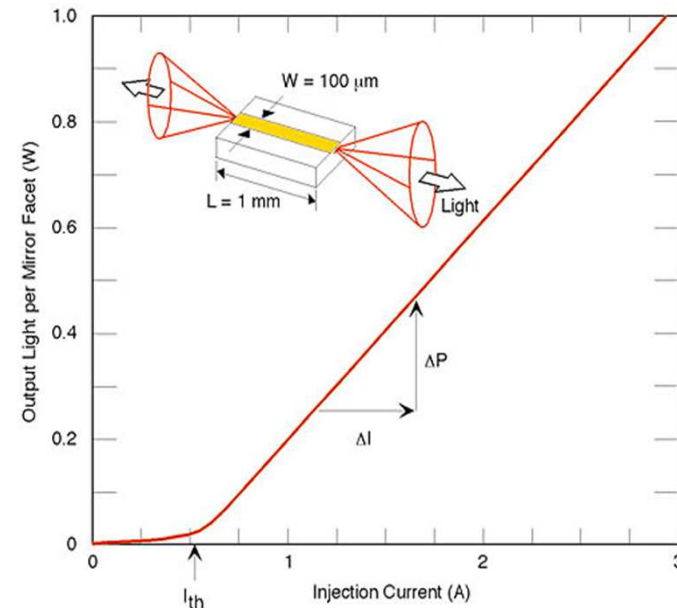
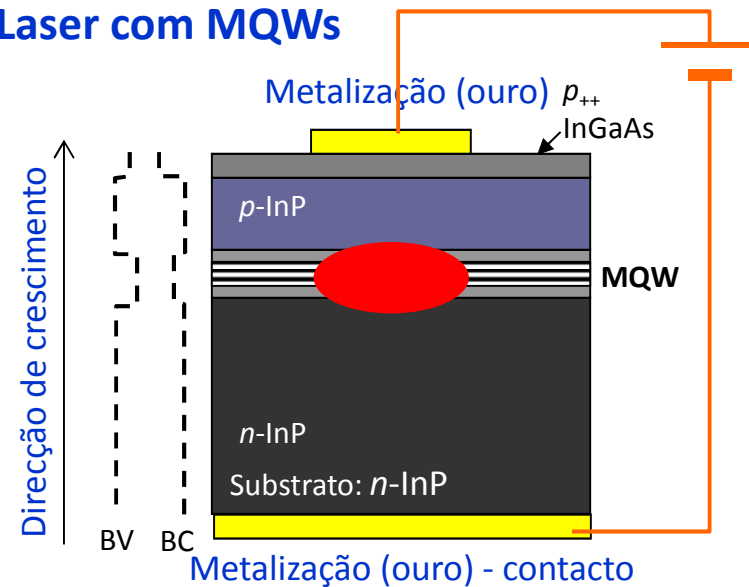
Perfil das bandas em estruturas com múltiplos poços quânticos



Estrutura “crescida” átomo a átomo usando, por exemplo, a técnica MBE (Molecular Beam Epitaxy).

Esta estrutura é o bloco essencial de muitos dispositivos optoelectrónicos (lasers, moduladores, detectores, etc).

## Laser com MQWs

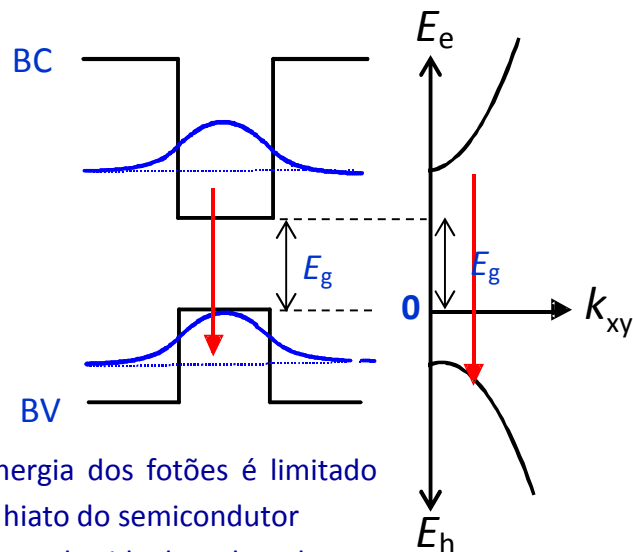


# Transições inter-bandas e inter-subbandas

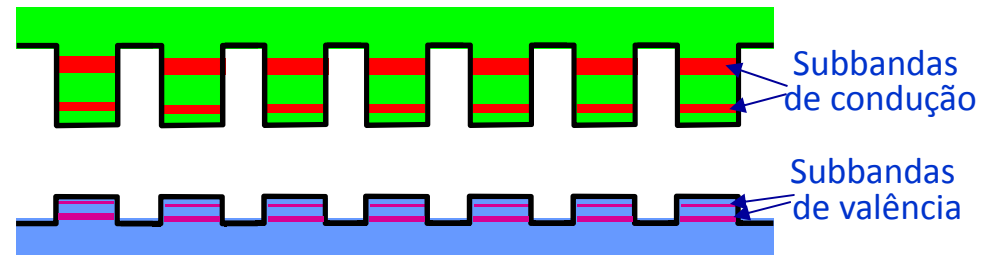
A operação dos dispositivos semicondutores, em que é baseada muita da tecnologia moderna, envolve tipicamente alguma forma de resposta das propriedades materiais a uma perturbação externa, que são, geralmente, campo estáticos ou campos electromagnéticos. O desempenho dos dispositivos, contendo homo-junções, hetero-junções, barreiras de potencial, poços quânticos, “super-redes” (“superlattice”), contactos metal-semicondutor, etc., depende da forma das bandas de energia, da concentração de portadores, da dopagem, dos mecanismos de transporte de corrente eléctrica, bem como os portadores de carga respondem a estes estímulos externos. No que se segue os fenómenos físicos em que se baseiam os dispositivos electrónicos e optoelectrónicos, a interacção da radiação com a matéria e algumas das respectivas aplicações são analisados como exemplos de aplicação.

## “Super-rede” de poços quânticos (“super-lattices”)

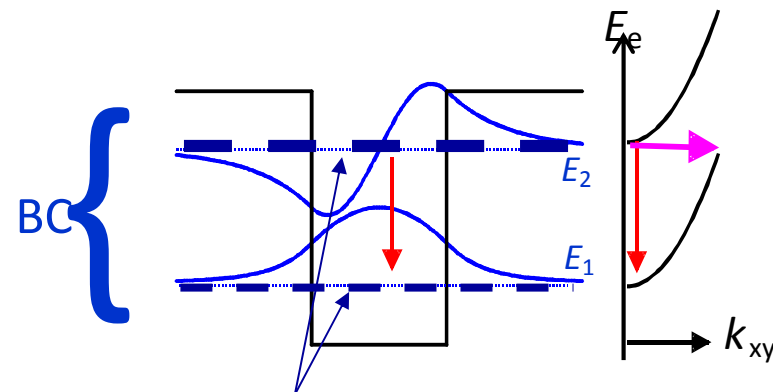
### Inter-bandas



- A energia dos fótons é limitado pelo hiato do semicondutor
- Tempos de vida da ordem de ns
- Aplicações: lasers semicondutores *mais comuns*.



### Inter-subbanda



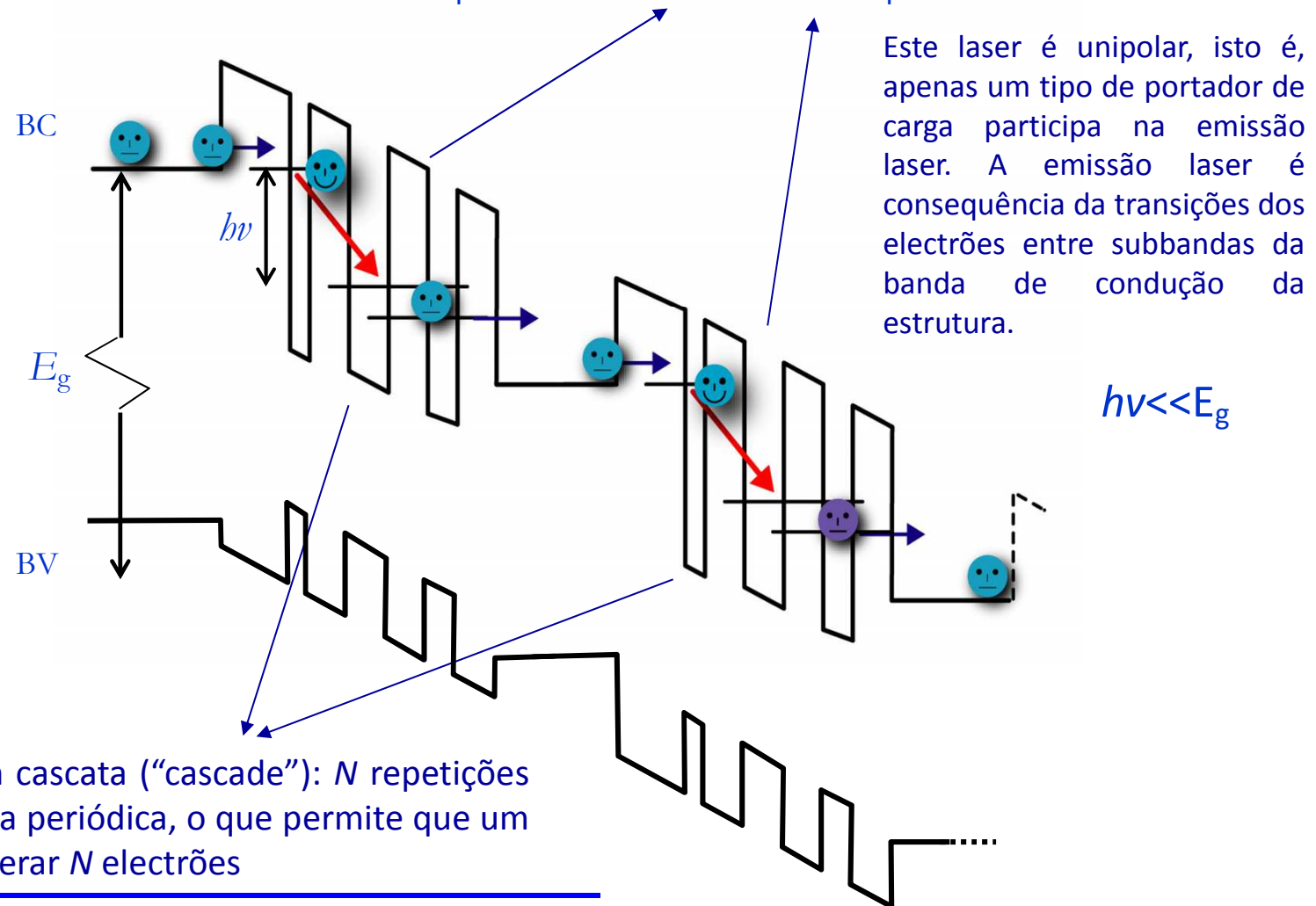
- subbandas
- Flexibilidade na “escolha” da função de onda e dos níveis de energia
- Tempos de vida curtos ( $\sim 1$  ps)
- Aplicações: lasers para o infravermelho médio ( $4 \mu\text{m}$  a  $20 \mu\text{m}$ ).

# Laser unipolar: Quantum Cascade Laser (QCL)

Neste tipo de laser a emissão radiativa resulta de transições entre níveis pertencentes à banda de condução.

Com esta estrutura de múltiplos poços quânticos é possível fabricar lasers com comprimentos de onda de emissão entre  $\sim 4 \mu\text{m}$  e  $\sim 20 \mu\text{m}$  (ter presente que a energia da emissão laser  $h\nu$  é muito menor que  $E_g$ ).

O comprimento de onda de emissão é determinado pelas dimensões das camadas e pela altura das barreiras.

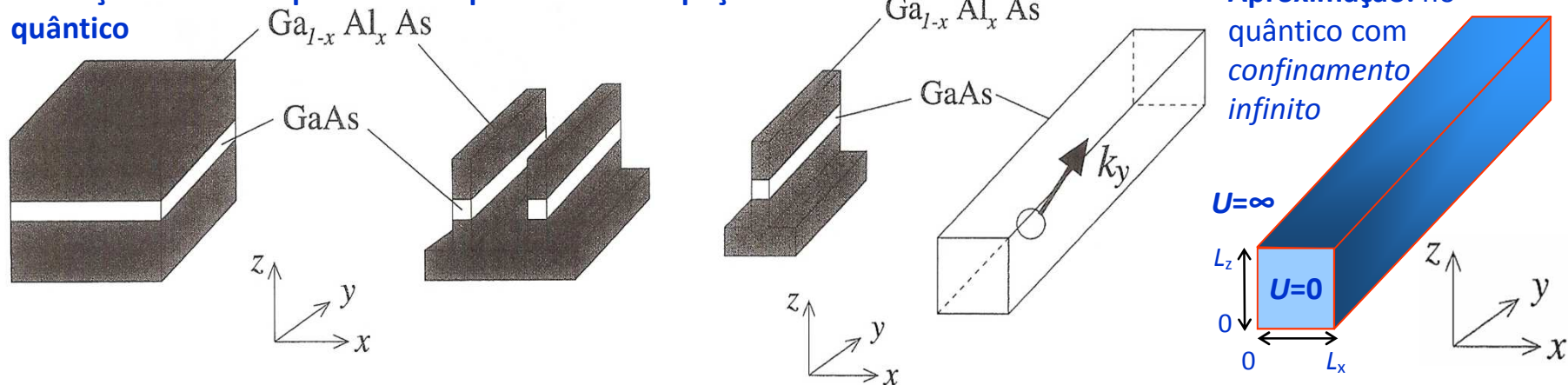


# Heterojunções do tipo “fios quânticos”

Já vimos as consequências da redução da dimensionalidade numa estrutura em consequência do confinamento dos electrões (ou lacunas) numa fina camada semicondutora: a alteração radical do seu comportamento. Este princípio pode ser usado para reduzir ainda mais a dimensionalidade da vizinhança dos portadores de carga do poço quântico de bidimensional para uma o fio quântico unidimensional, e deste para o fio quântico (zero-dimensional). Aqui, o termo dimensionalidade refere-se ao número de graus de liberdade do momento dos portadores de carga na estrutura. Num fio quântico, os portadores de carga estão confinados em duas dimensões, ao invés do que acontece no poço quântico onde ocorre apenas confinamento numa direcção.

Se  $D$  representar o número de graus de liberdade e  $C$  o número de direcções de confinamento tem-se  $D+C=3$ .

## Obtenção de fios quânticos a partir de um poço quântico



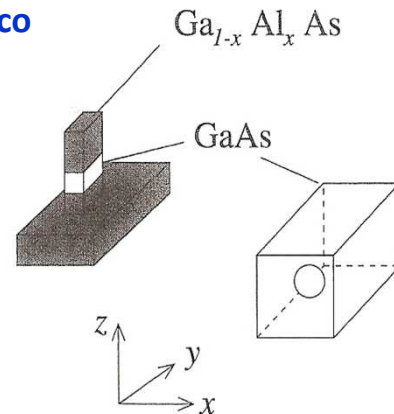
Se o fio tivesse secção circular dever-se-ia usar coordenadas polares (de forma semelhante ao cálculo dos modos de propagação numa fibra óptica). Como o potencial segundo  $y$  é nulo,  $U(y)=0$ , a primeira equação é satisfeita por soluções do tipo onda plana  $\exp(ik_y y)$ , obtendo-se a relação de dispersão padrão  $E_y = (\hbar k_y)^2 / 2m$ . A 2ª equação corresponde à equação de Schrödinger para um potencial *confinante* a 2 D. Numa primeira aproximação considera-se um fio quântico com *confinamento infinito* (ver figura da direita): as soluções são do tipo:

$$\psi(x, z) = \psi(x)\psi(z) = \sqrt{\frac{2}{L_x}} \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L_x}\right) \sqrt{\frac{2}{L_z}} \sin\left(\frac{\pi n_z z}{L_z}\right), \text{ cuja energia de confinamento é: } E_{xz} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left( \frac{n_x^2}{L_x} + \frac{n_z^2}{L_z} \right)$$

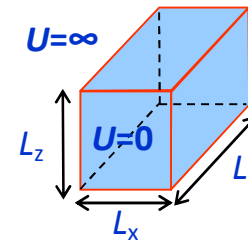
# Pontos quânticos

No ponto (ou caixa) quântico, os portadores de carga estão confinados nas três dimensões espaciais, reduzindo a zero o número de graus de liberdade do momento.

## Obtenção de pontos quânticos a partir de um fio quântico



## Aproximação: ponto quântico com confinamento infinito



Pontos quânticos cubóides, também designados caixas quânticas, pode ser considerados como uma simples generalização dos fios quânticos, nos quais ocorre também confinamento adicional segundo a direcção  $y$ . Este confinamento adicional elimina o último grau de liberdade do momento da partícula, *localizando* a partícula em todas as direcções. Como consequência, os níveis de energia permitidos não podem continuar a referir-se como subbandas, sendo agora designados como subníveis.

O confinamento nas três direcções dá origem a três números quânticos que permitem identificar cada estado.

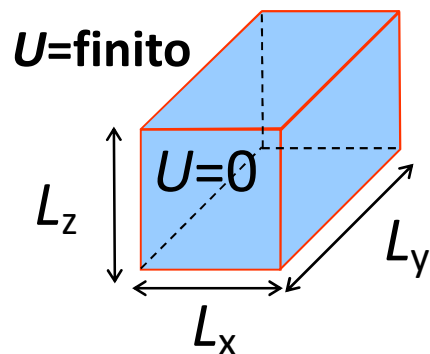
Considere-se um potencial infinito separando o interior da caixa quântica do exterior (ver figura). A equação de Schrödinger no interior é:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \psi(x, y, z) = E_{xyz} \psi(x, y, z). \text{ Fazendo } \psi(x, y, z) = \psi(x) \psi(y) \psi(z), \text{ obtêm-se três equações separadas:}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \psi(x_j) = E_{x_j} \psi(x_j), \quad x_j = x, y, z; \quad E_{x,y,z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left[ \frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right]$$

# Pontos quânticos reais

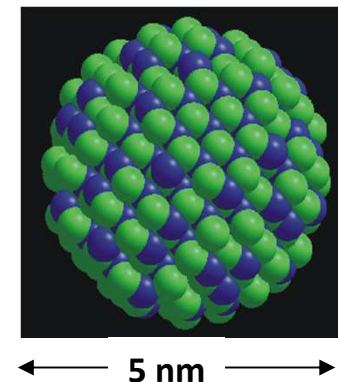
Ponto quântico: [ $U(x)=0$  no interior e finito no exterior]



$$E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left[ \frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right]$$

<http://images.google.pt/images?q=quantum%20dot&oe=utf-8&rls=org.mozilla:pt-PT:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&sa=N&hl=pt-PT&tab=wi>

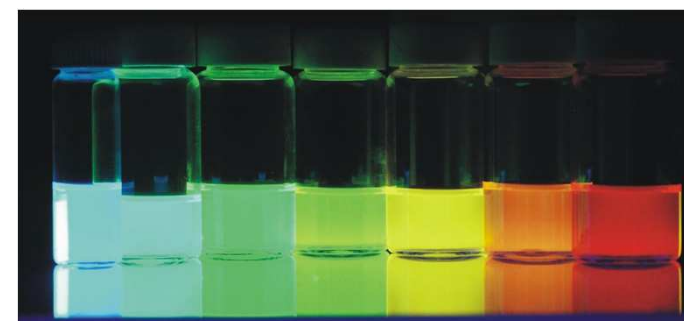
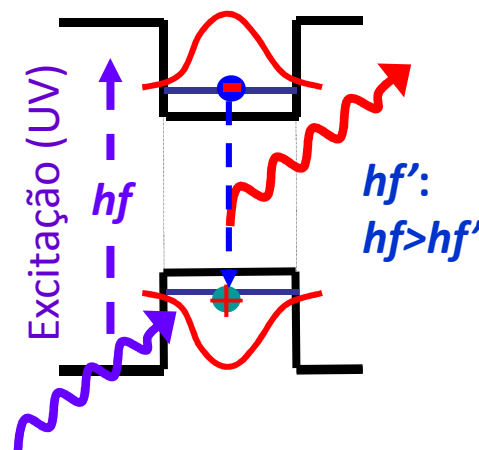
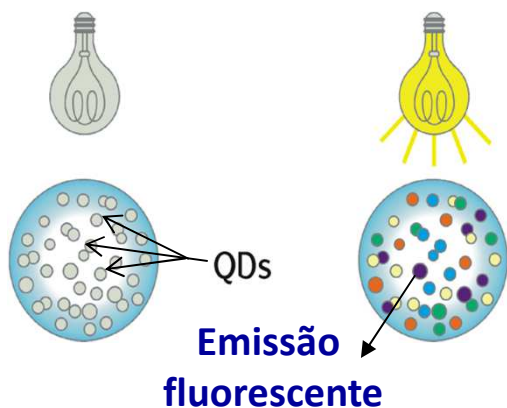
QDs de InP



[qds-nasa.wmv](#)

[ocancro-e-quantum-dots.wmv](#)

Luz ultravioleta



2.3 → 5.5  
Dimensões dos QDs  
Size (nanometers)

Alterando o tamanho, a forma, e a composição dos QDs, as propriedades espectroscópicas dos QDs alteram-se de forma dramática.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_dot](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/qds-nasa.wmv>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/ocancro-e-quantum-dots.wmv>



# Pontos quânticos e nanopartículas

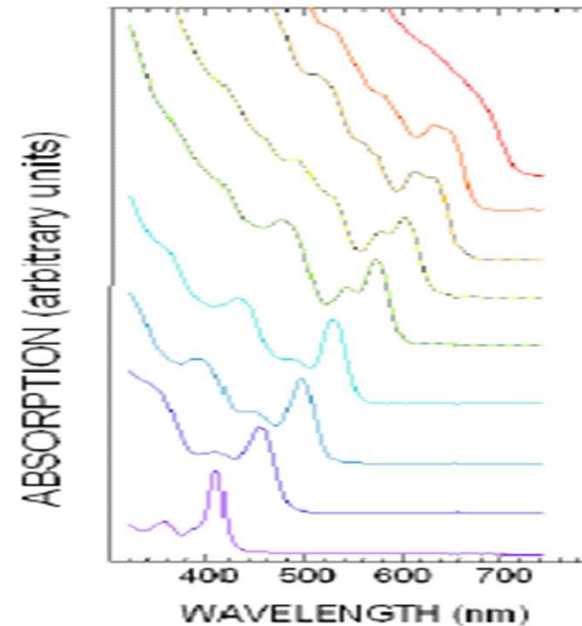
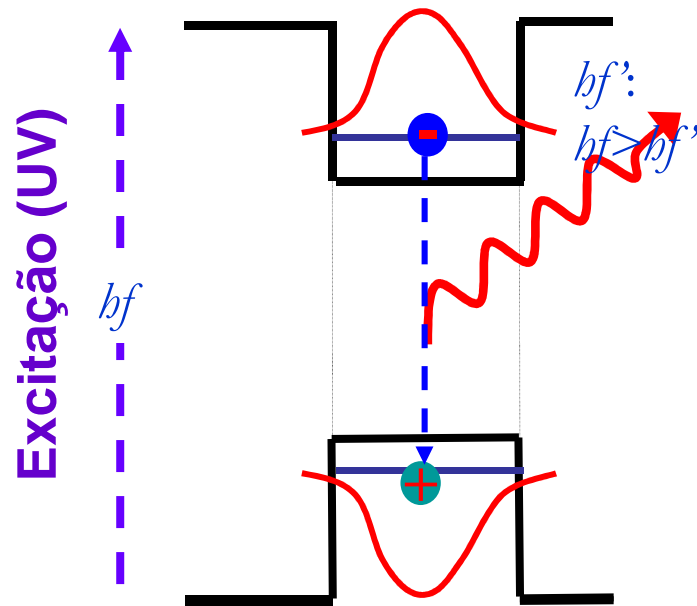


Foto: F. Fraenkel, MIT Grupo de M. Bawendi, MIT



Comprimento de onda (nm)

A cor de emissão depende do tamanho do QD

<http://www.evidenttech.com/quantum-dots-explained/how-quantum-dots-work.html>

<ocancro-e-quantum-dots.wmv>

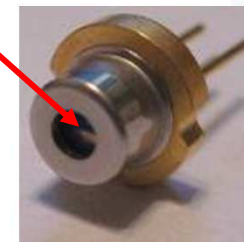
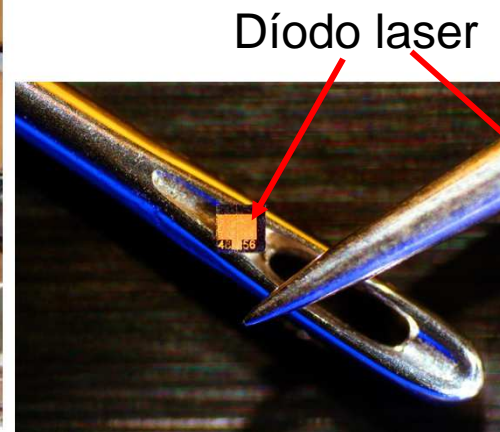
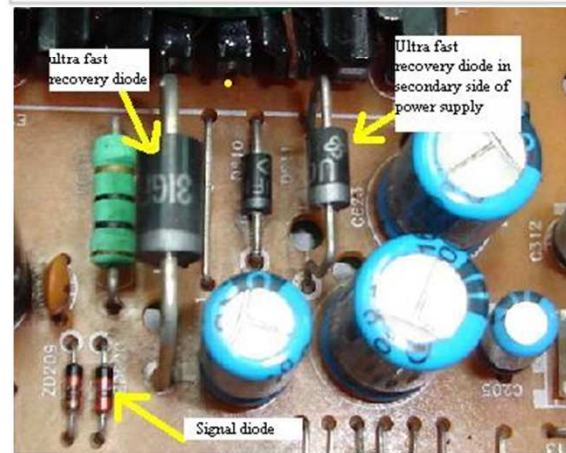
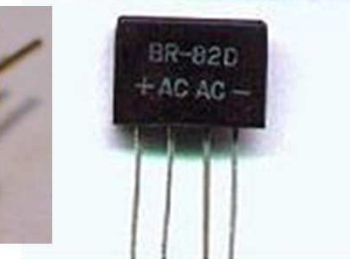
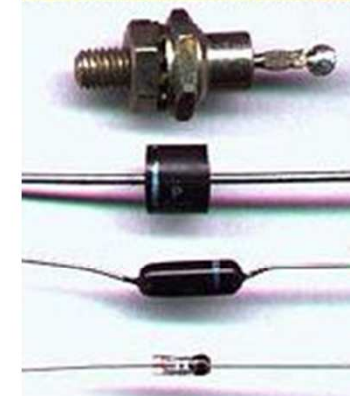
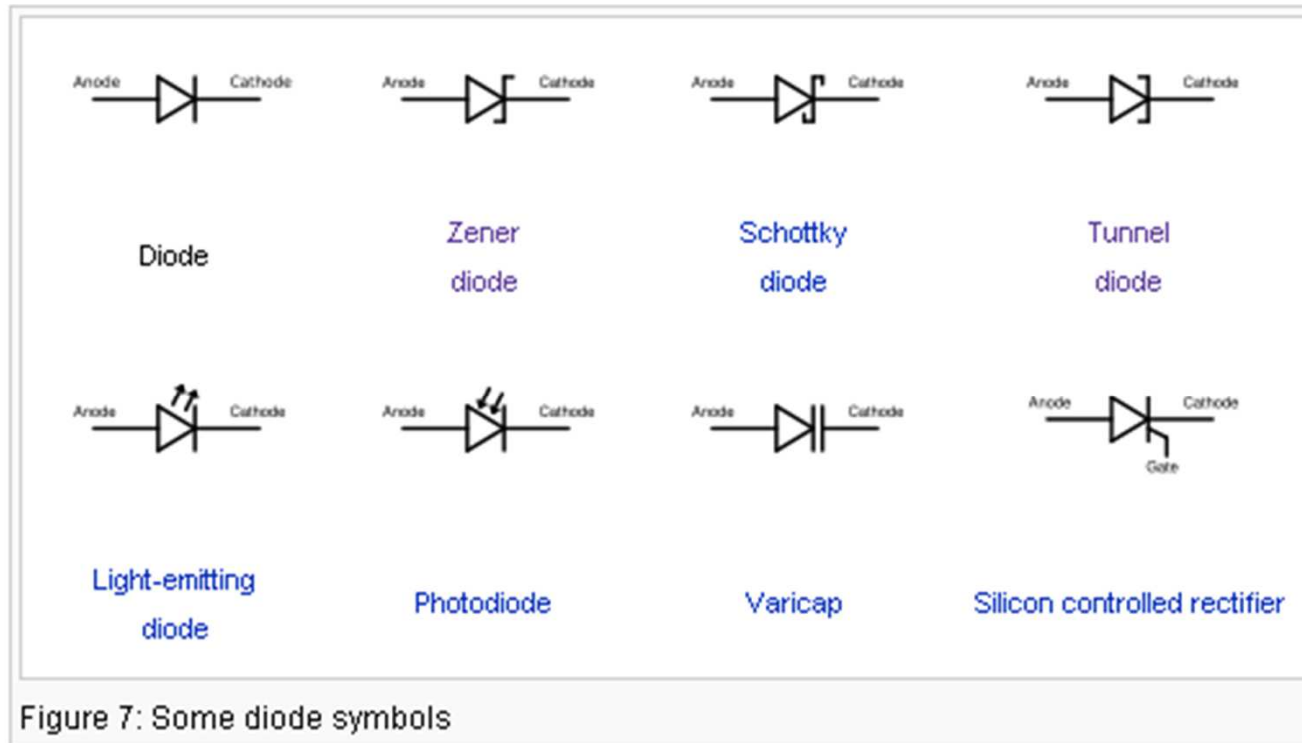
<qds-nasa.wmv>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/qds-nasa.wmv>

Ver aplicações em medicina de diferentes dispositivos quânticos em:

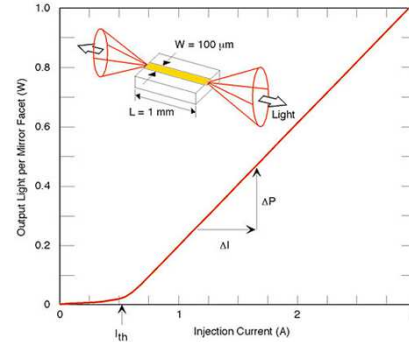
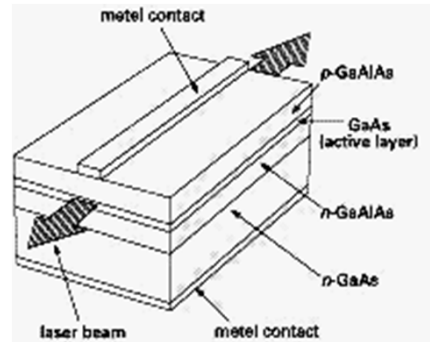
<http://www.cancer.gov/cancertopics/understandingcancer/nanodevices>

# Dispositivos baseados em junções p-n



# Outros dispositivos baseados em Junções p-n

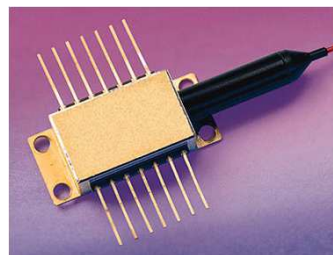
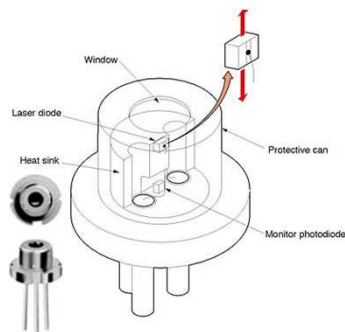
## Díodo Laser



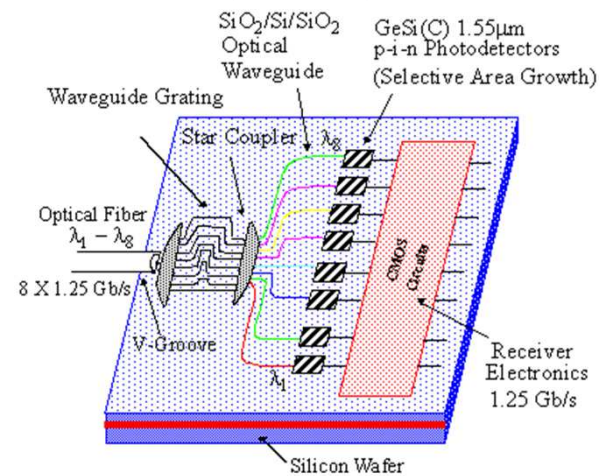
[http://w3.ualg.pt/~jlongras/med\\_diode.mov](http://w3.ualg.pt/~jlongras/med_diode.mov)

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/laser.mov>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TxRxOp.mov>



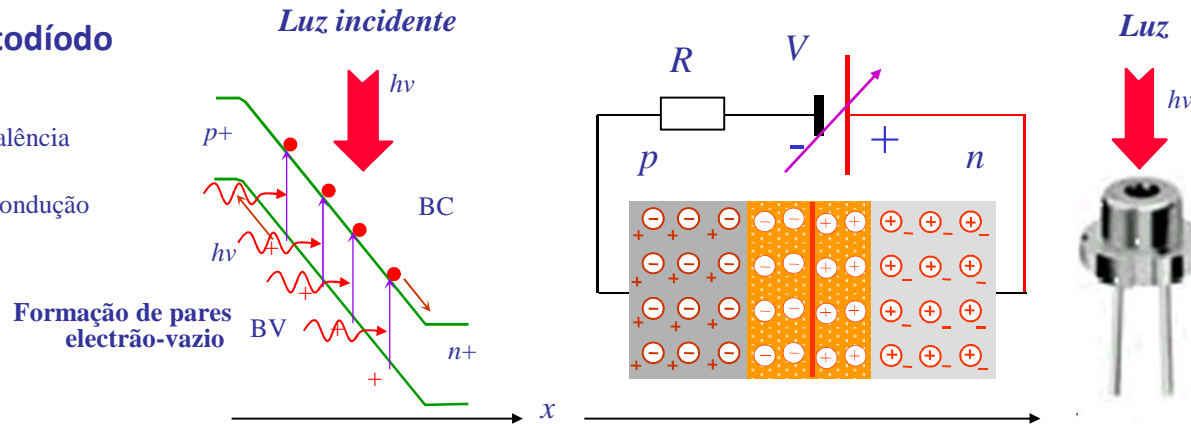
## Circuitos Integrados Optoelectrónicos



# Outros dispositivos baseados em Junções $p-n$

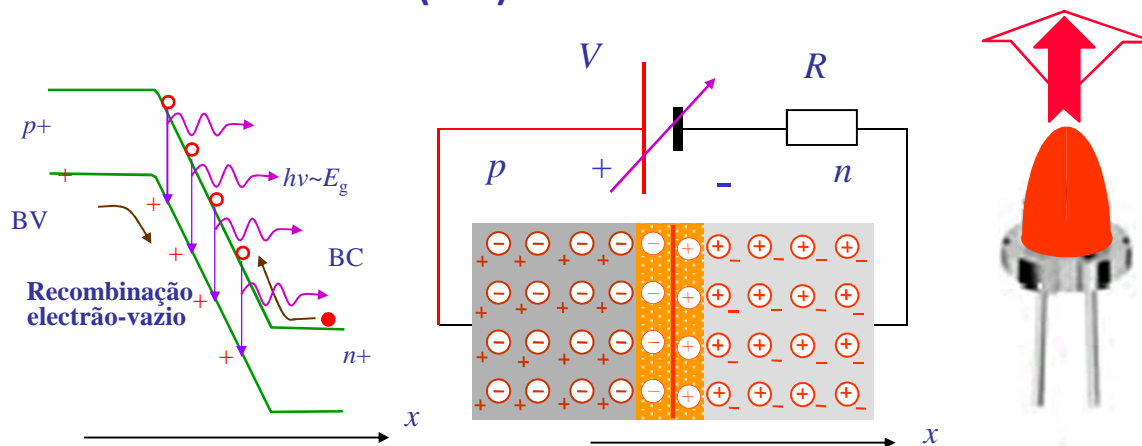
## Fotodíodo

BV:  
banda de valência  
BC:  
banda de Condução



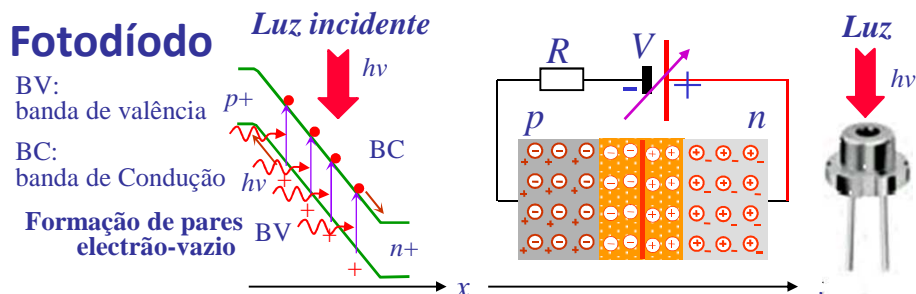
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Pdiode.mov>

## Díodo Emissor de Luz (LED)



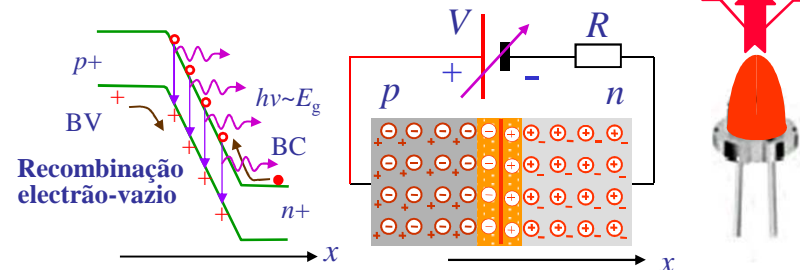
# Outros dispositivos baseados em Junções p-n

## Fotodíodo

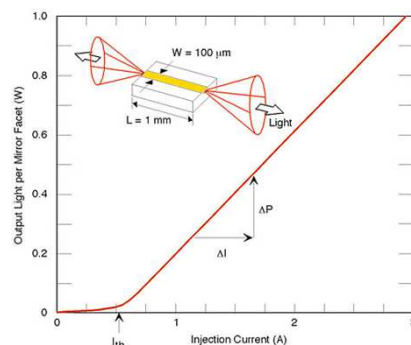
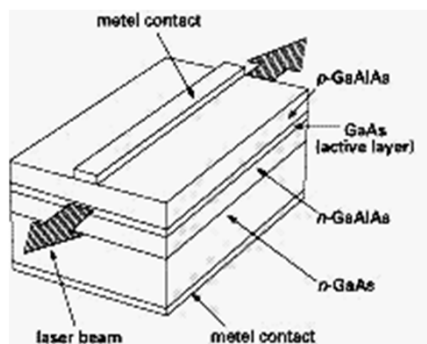


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/Pdiode.mov>

## Díodo Emissor de Luz (LED)



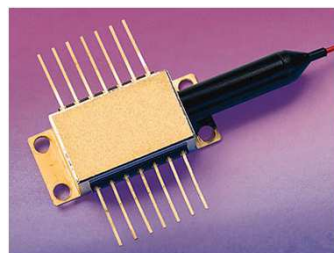
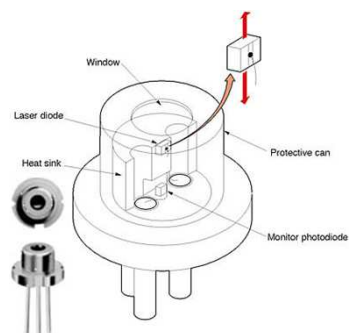
## Díodo Laser



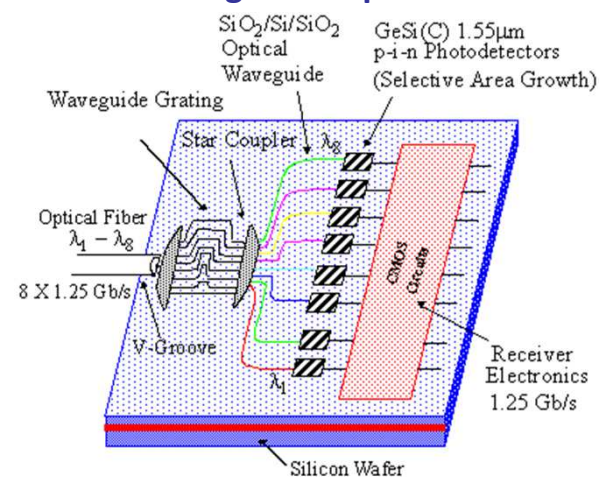
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/med diode.mov>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/laser.mov>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/TxRxOp.mov>



## Circuitos Integrados Optoelectrónicos



# Transístores e Aplicações

# Transístores

O **transístor** é um dos componentes mais importantes na Electrónica. Num elemento com três terminais é possível usar a tensão entre dois dos terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal, i.e., obter uma fonte controlável. O transístor permite a amplificação e comutação de sinais, tendo substituído as válvulas termo-iónicas na maior parte das aplicações.

O transístor bipolar foi inventado em 1947 por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley, todos na altura investigadores nos “Bell Telephone Laboratories”, EUA (ver página seguinte). Pela sua invenção estes investigadores receberam o prémio Nobel da Física em 1956.

Cedo se percebeu que o transístor revolucionaria a Electrónica e, por arrastamento, toda a tecnologia, essencialmente porque possibilitava realizar as operações electrónica básicas de amplificação e de comutação de uma forma fiável e barata.

Além disso, o facto de o transístor poder ter dimensões muito reduzidas (hoje em dia a tecnologia de fabrico permite construir transístores com uma área inferior ao micrómetro quadrado) possibilita a integração de milhões de unidades numa única pastilha de silício, sendo assim possível construir circuitos integrados de grande complexidade e capazes de efectuarem operações elaboradas como no caso dos microprocessadores.

O material semiconductor mais usado na fabricação de transístores é o silício. Contudo, o primeiro transístor foi fabricado em germânio. O silício é preferível, essencialmente, porque possibilita o funcionamento a temperaturas mais elevadas (175 0C, quando comparado com os ~75 0C dos transístores de germânio) e também porque apresenta correntes de fuga menores.

O transístor bipolar é o transístor mais importante do ponto de vista histórico e, também, o de utilização mais corrente. No entanto, convém também, desde já, referir os transístores de efeito de campo (FET, “Field Effect Transistor”), nomeadamente, os transístores FET de junção unipolar, e os transístores MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”). Os circuitos CMOS (“complementary MOSFET”) são muito usados na electrónica integrada de alta densidade.

<http://pt.wikipedia.org/wiki/CMOS>

# Transístores

As figuras da direita da página anterior mostram, de forma esquemática, transístores bipolares  $p-n-p$  e  $n-p-n$ . Estes transístores são formados por duas junções  $p-n$  que partilham a região do tipo  $n/p$  (muito fina e não representada à escala). Neste aspecto, os dispositivos correspondem à sanduíche de um material do tipo  $n/p$ , entre duas regiões do tipo  $p/n$ . Dependendo da polarização de cada junções (directa ou inversa), o transístor pode operar no modo activo/linear (actua como amplificador), estar em corte ou em saturação (actuando como interruptor). Os transístores  $n-p-n$  são os mais comuns que os  $p-n-p$ , basicamente, porque a mobilidade dos electrões é muito superior à das lacunas, isto é, os electrões movem-se mais facilmente ao longo da estrutura cristalina, o que traz vantagens significativas no processamento de sinais de alta frequência. E são, também, mais adequados à produção em massa. No entanto, deve-se referir que, em várias situações, é muito útil ter os dois tipos de transístores num circuito.

O transístor **MOSFET** (acrónimo de **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor**), é mostrado nas figuras inferiores da esquerda, e é, de longe, o tipo mais comum de transístores de efeito de campo em circuitos tanto digitais quanto analógicos. A palavra "metal" no nome é um anacronismo vindo dos primeiros chips, onde as comportas (gates) eram de metal. Os chips modernos usam comportas de polissilício, mas ainda são chamados de MOSFETs.

Um NMOSFET é composto de um canal de material semiconductor de tipo n; num PMOSFET o canal é do tipo p. Geralmente o semiconductor escolhido é o silício, mas alguns fabricantes, principalmente a **IBM**, começaram a usar uma mistura de silício e germânio (SiGe) nos canais dos MOSFETs.



# Transístor

## O Primeiro Transístor, 1947

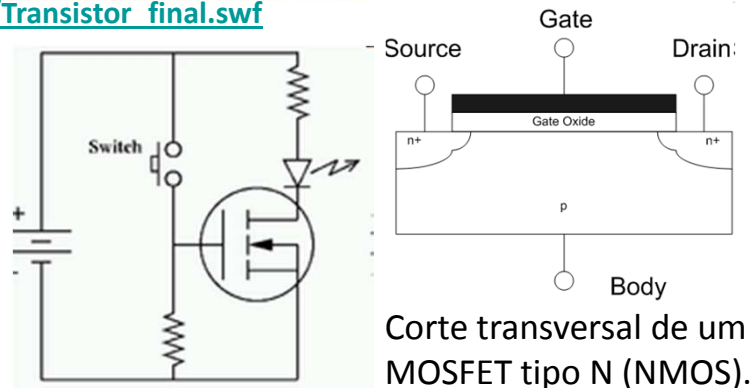


É um dispositivo com três terminais.

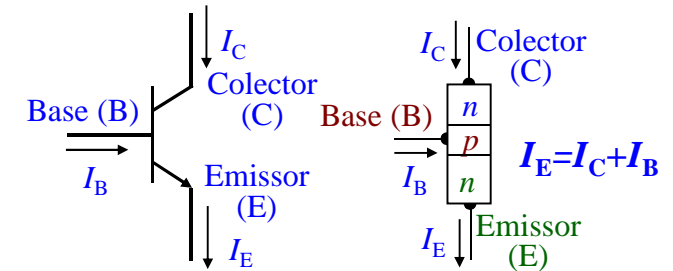
[http://w3.ualg.pt/~jlongras/Transistor\\_final.swf](http://w3.ualg.pt/~jlongras/Transistor_final.swf)

## Transístor MOSFET

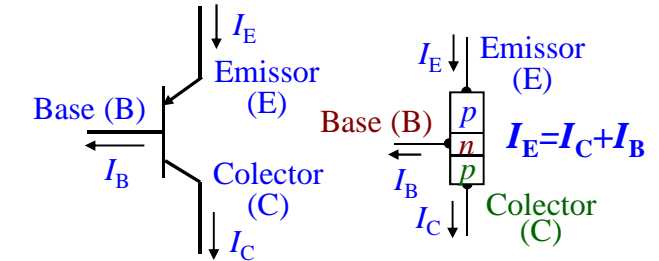
Example application of an N-Channel MOSFET. When the switch is pushed the LED lights up.[2]



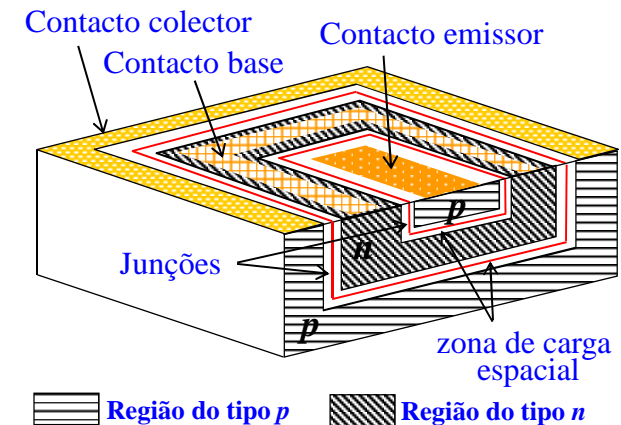
## Símbolo do transístor bipolar n-p-n



## Símbolo do transístor bipolar p-n-p



## Esquema simplificado da estrutura de um transístor bipolar pnp moderno



# Da válvula ao transístor e o circuito integrado

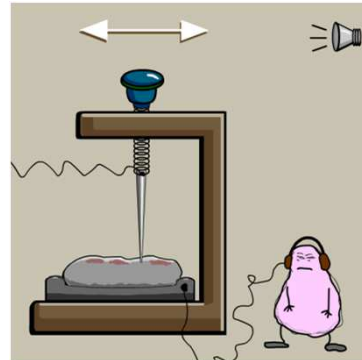
## Antes do transístor

### Válvula de vácuo



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/03-monkeysVIDEO T1.mov>

## Dopagem de semicondutores



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/crystalBillFinal.swf>

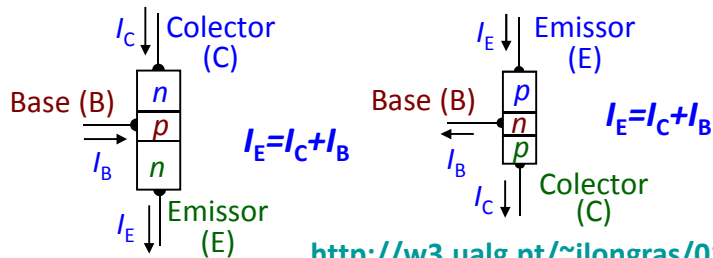
## Primeiro transístor



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/05-pointcontact T1.mov>

## Transístores bipolares

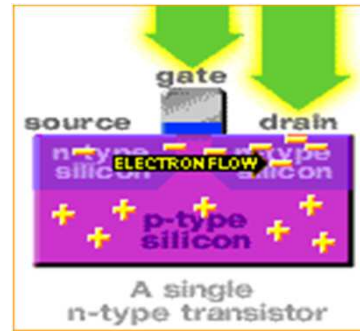
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/06-sandwich T1.mov>



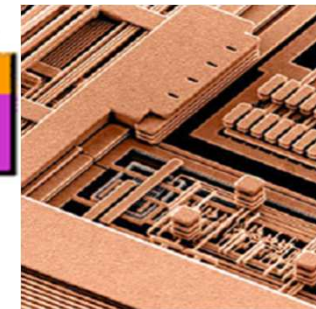
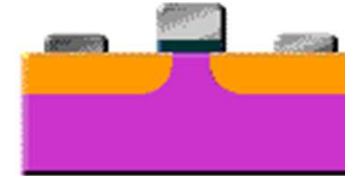
<http://w3.ualg.pt/~jlongras/01-fieldeffectVIDEO T1.mov>

## MOSFET

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/mosfet.mov>

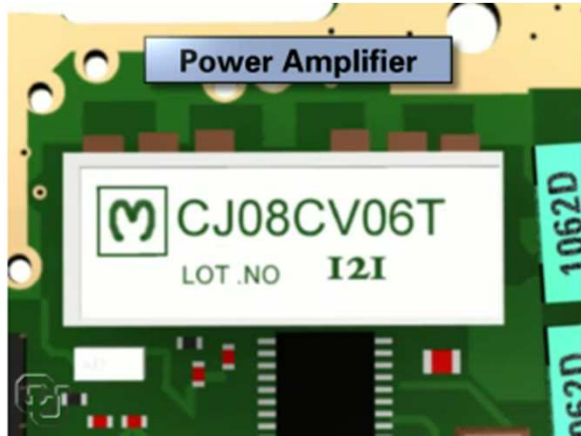


## Circuito integrado

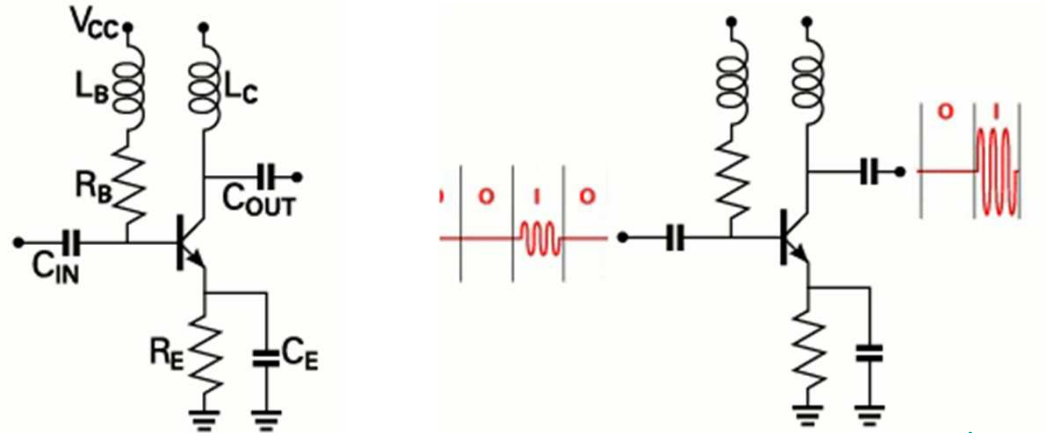


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/07-traitorous 8 T1.mov>

# Circuitos com transístores

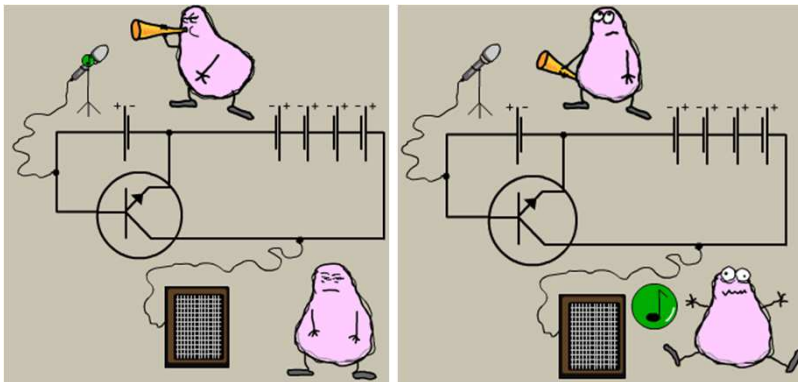


<http://w3.ualg.pt/~jlongras/wireless.mov>



[wireless.mov](http://wireless.mov)

## Amplificador

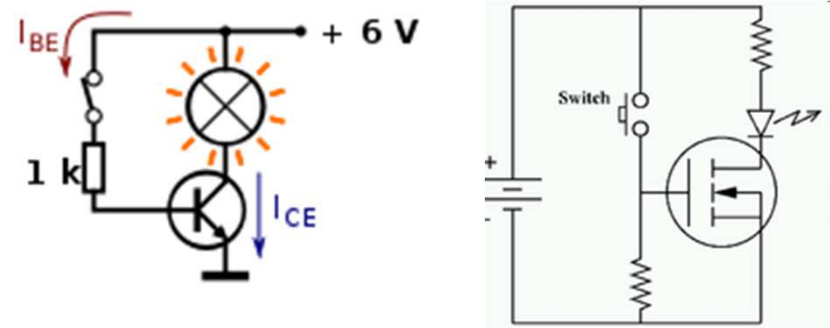


<http://www.youtube.com/watch?v=UfnmF-QmnqQ&feature=fvw>  
<http://www.youtube.com/watch?v=G0Se1nc5ggw&feature=channel>  
<http://www.youtube.com/watch?v=duzO0YX4WnA&feature=channel>  
<http://www.youtube.com/watch?v=VI5GCsZCgeo&feature=channel>

## IBM DNA Transistor

<http://www.youtube.com/watch?v=pKi30ai35mU&feature=related>  
[http://www.youtube.com/watch?v=vvclP3GySUY&feature=player\\_embedded](http://www.youtube.com/watch?v=vvclP3GySUY&feature=player_embedded)

## Interruptor



<http://www.youtube.com/watch?v=cbHMSFkP8nM&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=XENTuii2PzM&feature=related>

<http://connectedsocialmedia.com/2480/whats-a-transistor-meet-haf-the-smallinator/>

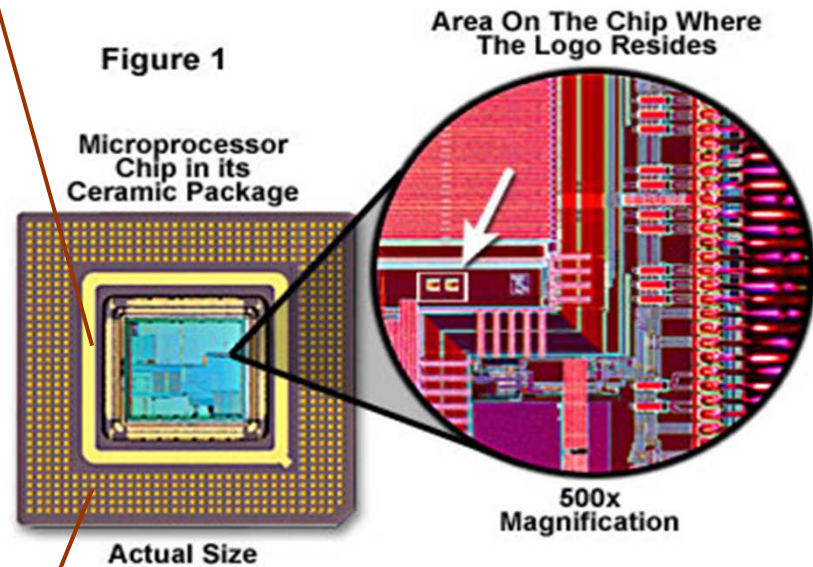
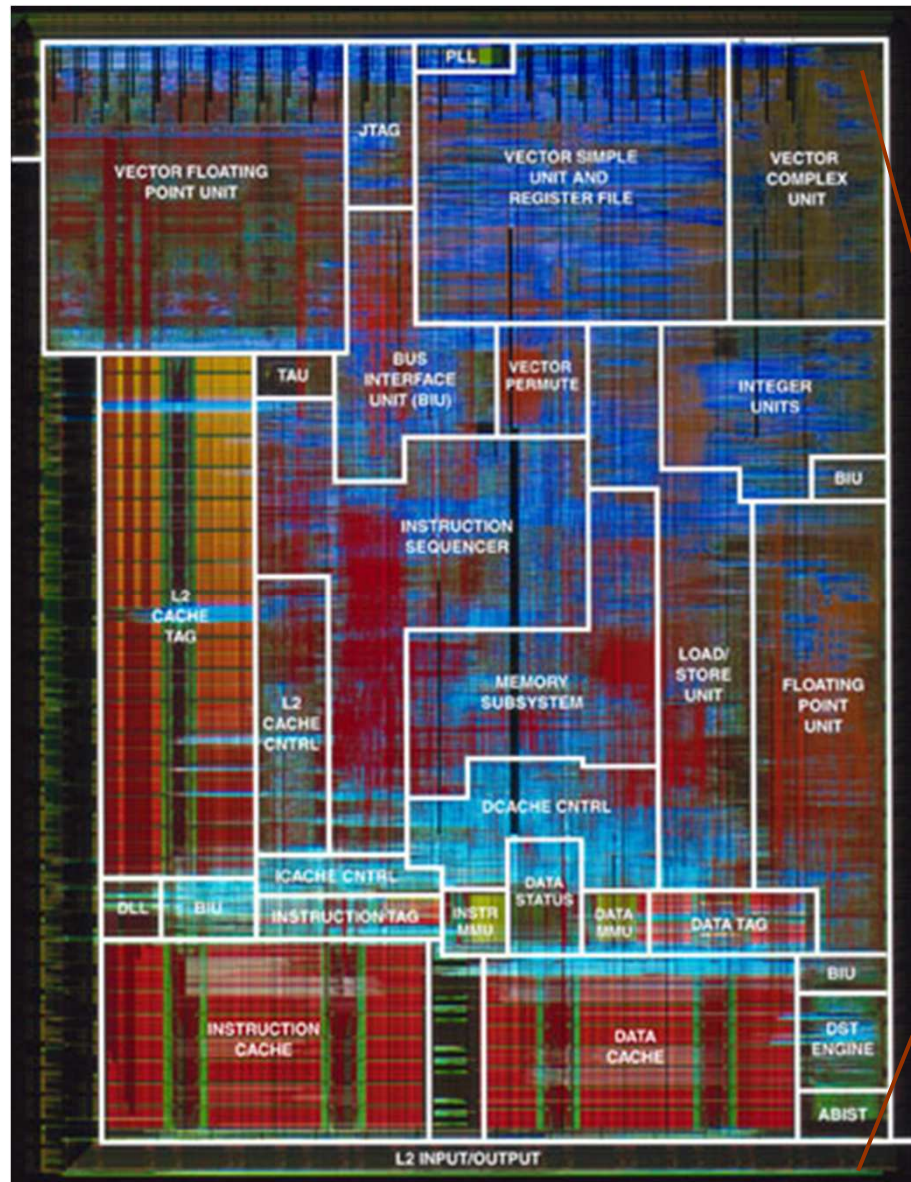
<http://www.youtube.com/watch?v=ZaBLiciesOU>

[http://www.youtube.com/watch?v=loMz\\_lFpx4&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=loMz_lFpx4&feature=related)

[http://www.youtube.com/watch?v=vdEG\\_5zlsks&feature=related](http://www.youtube.com/watch?v=vdEG_5zlsks&feature=related)

# Microelectrónica

# Circuitos integrados



<http://w3.ualg.pt/~jlongras/mosfet.mov>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/wireless.mov>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/space-shuttle-STS95.avi>

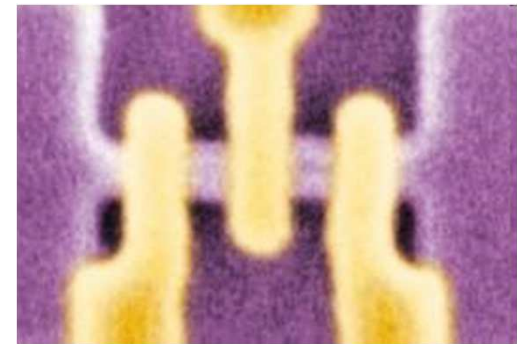
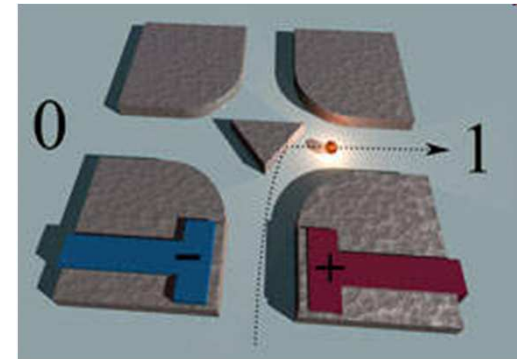
# Electrónicas do futuro

Os transístores actuais já começam a ter sua velocidade limitada pela excessiva geração de calor nos chips, que acontece principalmente em razão dos electrões que "vazam" da estrutura dos transístores. Os avanços tecnológicos continuam, inclusive com [transístores capazes de funcionar com um único electrão](#).

## Ballistic transistor

From Wikipedia, the free encyclopedia Jump to: [navigation](#), [search](#)

A Ballistic Deflection Transistor is an electronic device being developed for high-speed [ICs](#). Instead of switching the flow of several electrons using gates, as it is done in [FETs](#), it tries to manipulate the course of single electrons using EM forces. These free flowing electrons are forced around a wedge-shaped obstacle to in one direction or another, corresponding to a logical '1' or '0'. The advantages are a smaller size, less noise, less needed power and higher speeds (up to the terahertz region). At the moment it is a concept, although a research prototype has been created. This is a technique currently being investigated by the [University of Rochester](#)



<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110060818>

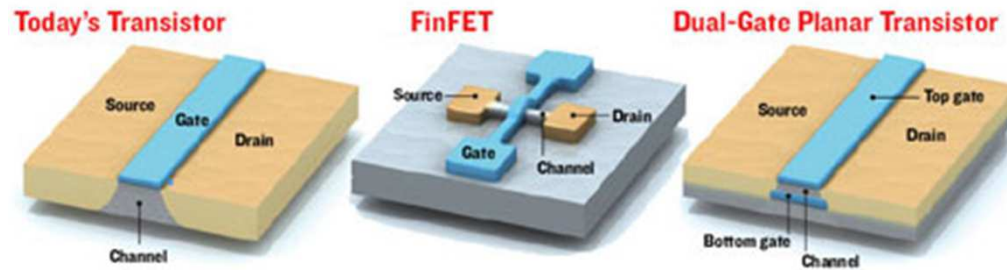
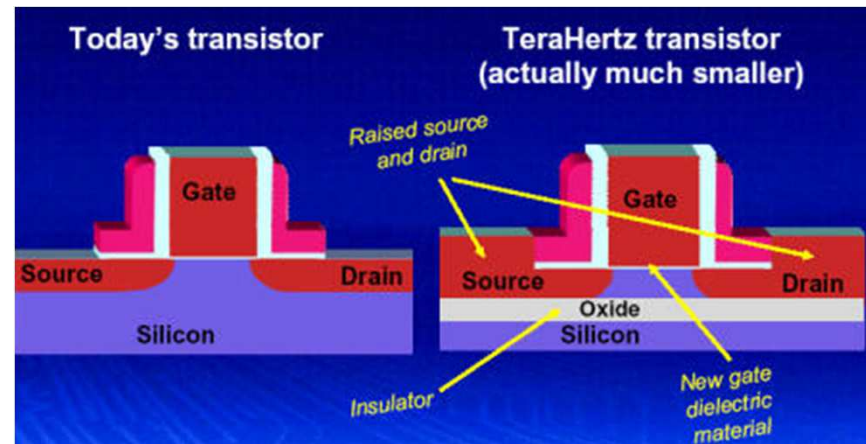
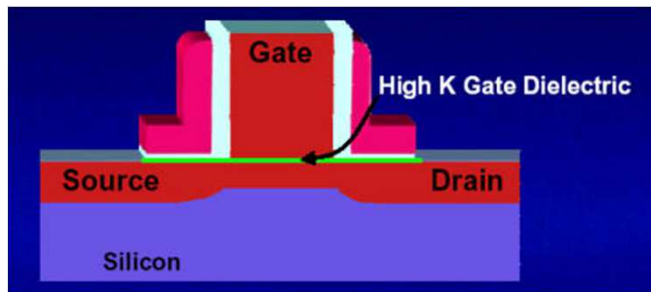
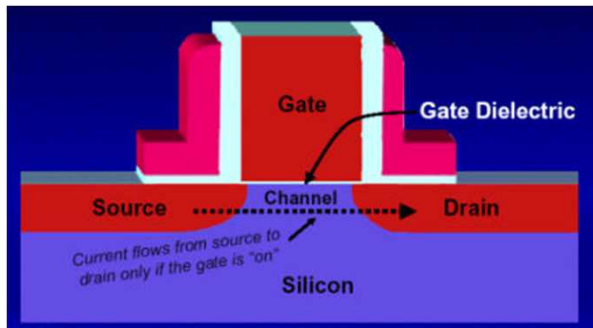
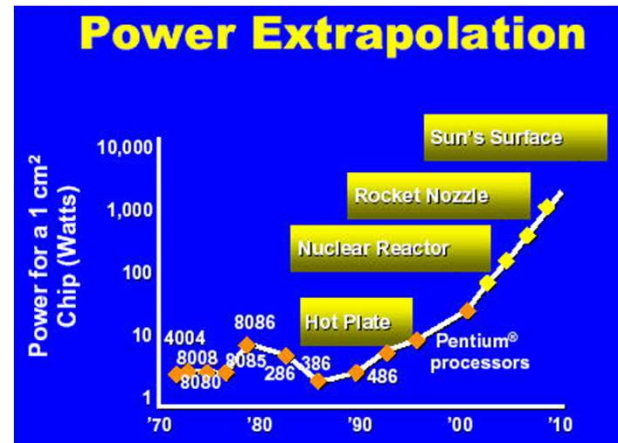
<http://www.rochester.edu/news/show.php?id=2585>

<http://w3.ualg.pt/~jlongras/BallisticMovie.wmv>

# Transistor MOSFET

## Moore's Law Redefined

Process Name	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268
1 <sup>st</sup> Production	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009
Lithography	.25 $\mu$ m	.18 $\mu$ m	.13 $\mu$ m	90nm	65nm	45nm	32nm
Gate Length	.20 $\mu$ m	.13 $\mu$ m	<70nm	<50nm	<35nm	<25nm	<18nm
Wafer Size (mm)	200	200	200/300	300	300	300	300



<http://www.spectrum.ieee.org/semiconductors/design/transistors-go-vertical>

<http://www.techimo.com/articles/index.pl?photo=24>: Future Look: Terahertz and Beyond

# Nanoelectrónica e nanotecnologia



# Cérebro

De 100 milhões a 100 mil milhões  
de milhões instruções por segundo  
(MIPS)

A lei de Moore prevê que os  
computadores atingirão o poder de  
cálculo do cérebro antes de 2017!



# Nanotecnologia: “a tecnologia quântica”

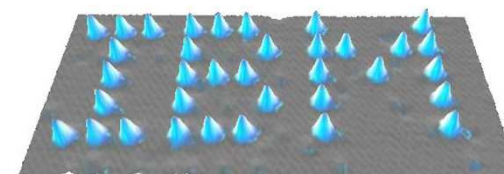
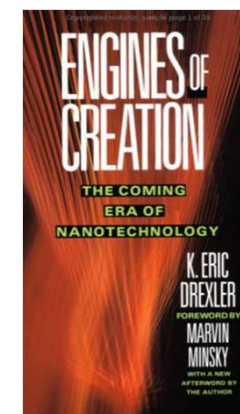
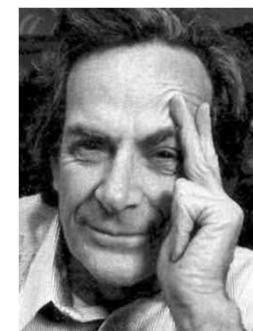
*There's Plenty of Room at the Bottom*, Richard P. Feynman, 29-12-1959

O termo **nanotecnologia** refere-se à capacidade de construir dispositivos funcionais baseados no agrupamento controlado de nanoestruturas (átomos, moléculas, etc.). A **engenharia de bandas** permite implementar nanoestruturas e nanocristais em que o arranjo espacial dos diferentes constituintes é usado para confinar electrões, lacunas, excitações, polarões, plasmões, etc., obtendo-se estruturas com novas propriedades mecânicas, ópticas, electrónicas ou magnéticas. A região activa destas heteroestruturas situa-se próxima de uma heterojunção ou envolve camadas atómicas/moleculares de diferentes materiais, ou volumes individualizados com poucos blocos constituintes (da ordem de 10 a 1000 camadas atómicas ou moleculares, e/ou dimensões entre 1 nm e 100 nm). Várias estruturas semicondutoras III-V e II-VI têm sido propostas e investigadas em face do elevado potencial tecnológico.

As propriedades mecânicas, ópticas, eléctricas, magnéticas, etc., destas estruturas são determinadas pela composição e/ou pela distribuição espacial dos diferentes constituintes. Estruturas baseadas em poços e/ou pontos quânticos estão na base de vários dispositivos optoelectrónicos como, e.g., díodos laser, que tiram partido da absorção/emissão de luz em gamas de frequências diferentes das que seriam possíveis obter com apenas materiais/estruturas clássicas. Outros exemplo são os pontos quânticos (“quantum dots”, QDs) e os nanocristais. Estas nanoestruturas apresentam elevada relação superfície-volume, o que dá origem a propriedades únicas, distintas das dos átomos constituintes e da matéria comum.

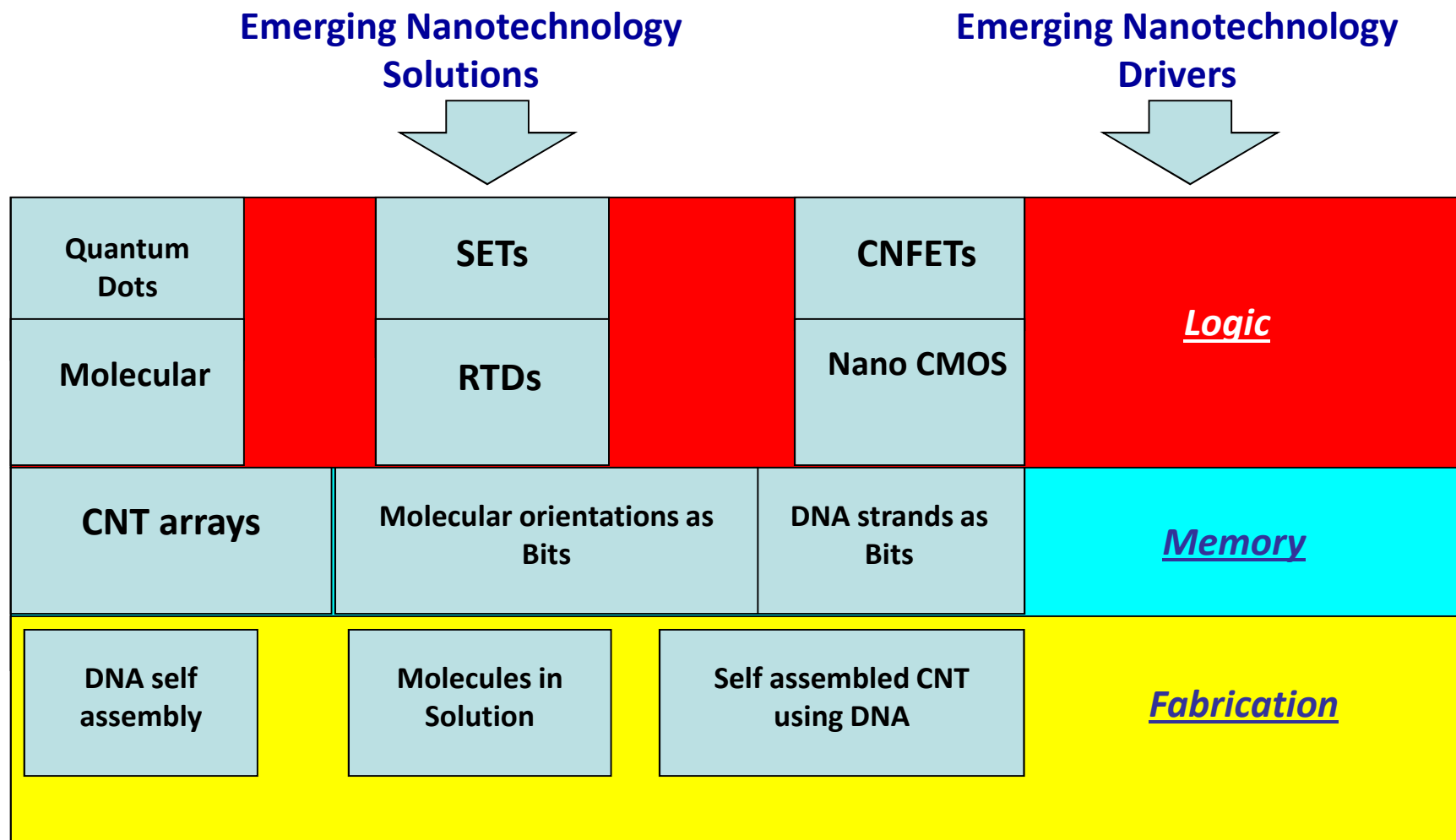
Os pontos (ou caixas) quânticos e os nanotubos de carbono têm aplicações da física fundamental à medicina. A título de exemplo, as características do espectro de emissão dos QDs (cor e intensidade da luz emitida) dependem da composição e do seu tamanho, embora os respectivos espectros de absorção sejam pouco dependente desses parâmetros. Assim, é possível excitar um conjunto de QDs diferentes usando radiação de energia substancialmente superior à maior energia da emissão fluorescente do conjunto de QDs – ver figura à direita -, o que é uma vantagem em relação aos materiais orgânicos fluorescentes normalmente usados em biologia, bioquímica e biotecnologia. O que se segue compreende o estudo das características de diferentes sistemas de baixa dimensionalidade como, por exemplo, poços quânticos, fios quânticos e/ou pontos quânticos, constituintes de dispositivos funcionais com novos e inovadores desempenhos, desde a electrónica à bio-medicina.

<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>



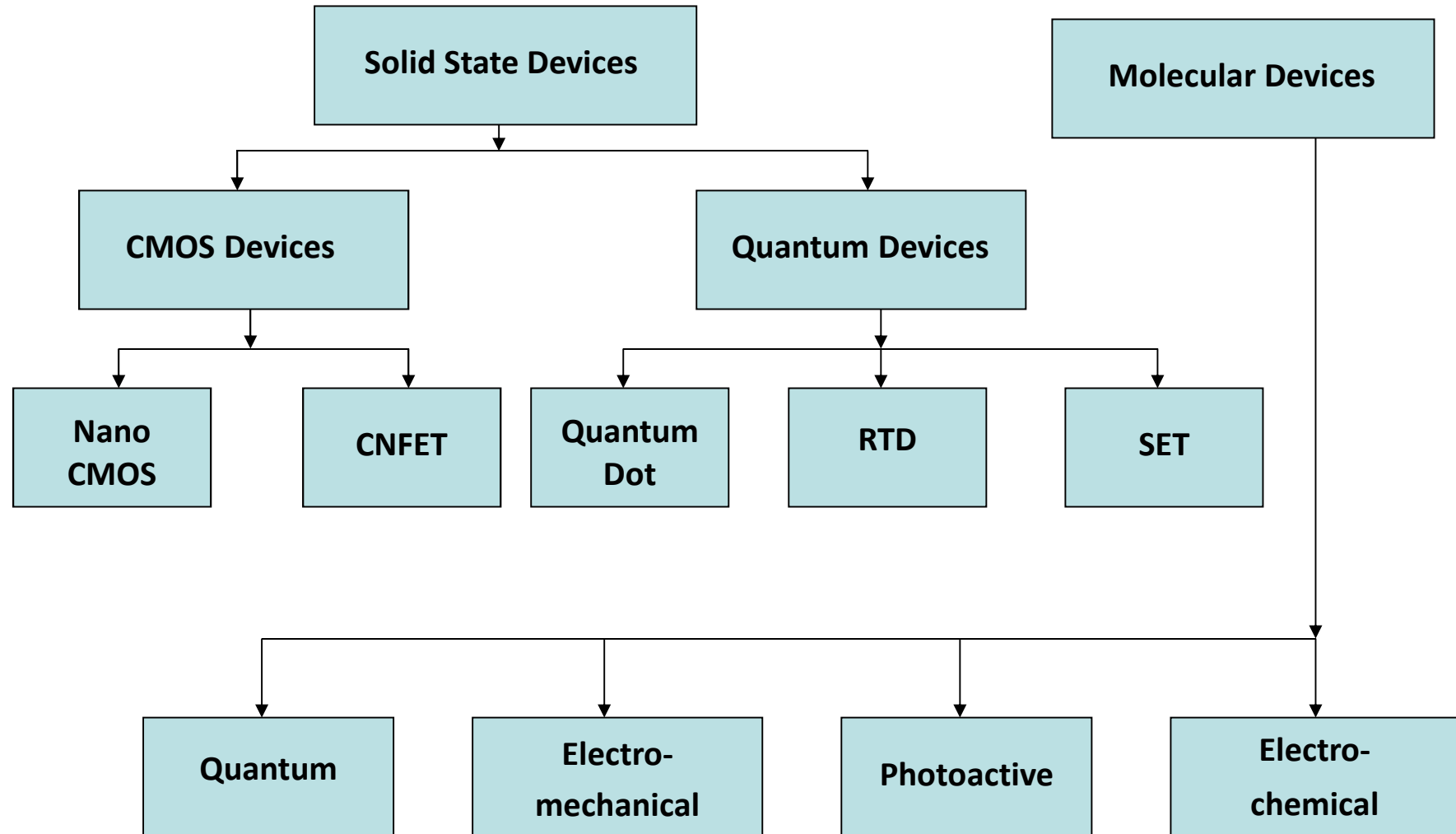
# Nanoelectrónica e nano-óptica: duas tecnologias do futuro

“Switching devices of nanometer (below 100 nm, typically 10 nm) dimensions define nanotechnology – nano-electronics and nano-optics”.



RTDs: resonant tunneling diodes; SETs: single electron transistors; CNFETs: carbon nanotube field effect transistors; CNT: carbon nanotube;

# Nanoelectrónica: “Computing Devices”



**RTDs:** resonant tunneling diodes; **SETs:** single electron transistors; **CNFETs:** carbon nanotube field effect transistors; **CNT:** carbon nanotube;