

Sumário 21 - Propriedades Elétricas 1

**Condutividade, Resistividade e Resistência; Diagramas de bandas e condutividade elétrica;
Condutores, Semicondutores e Isolantes**

Metais

Densidade de Portadores

Distribuição de Fermi e Nível de Fermi

Efeito da Temperatura

Efeito de defeitos estruturais e de impurezas

Mobilidade dos portadores

Efeito da Temperatura

Efeito de defeitos estruturais e de impurezas

Regras de Matthiessen e de Nordheim

Condutividade em função da Temperatura

Condutividade Elétrica

$$\sigma = 1 / \rho$$

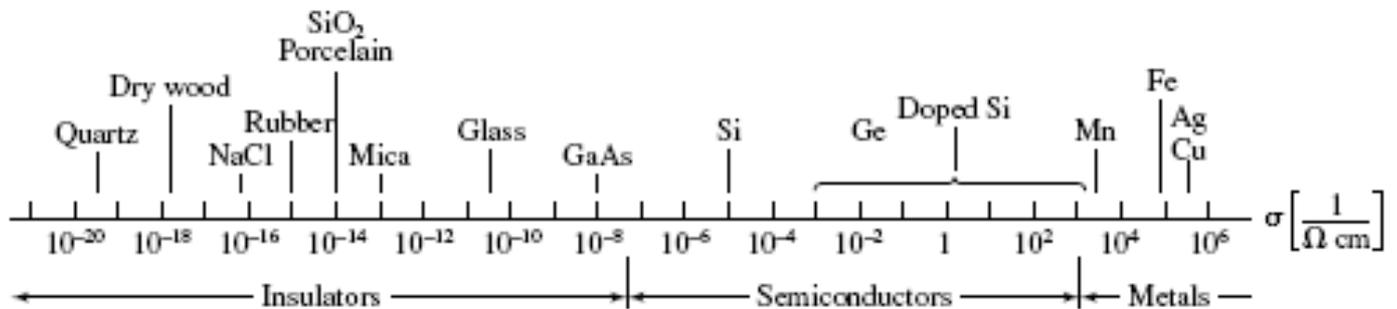
Lei de Ohm (condutores): $I = \frac{1}{R} \times V$

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \Omega$$

R - resistência L - comprimento S - secção recta

$$\sigma \text{ (S m}^{-1}\text{)} = 1/\rho \text{ (}\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}\text{)}$$

$$1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$$



Supercondutores

$$\sigma \sim 10^{18} \text{ S/m}$$

Condutores

$$\sigma > 10^5 \text{ S/m}$$

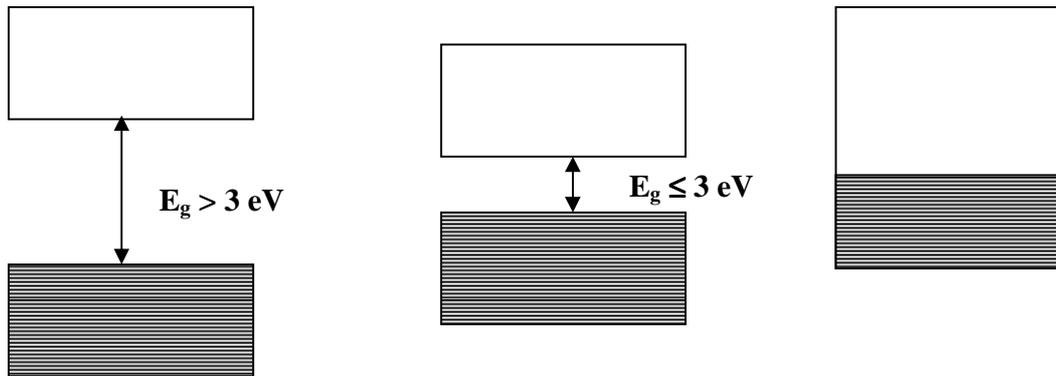
Semicondutores

$$10^5 \text{ S/m} > \sigma > 10^{-5} \text{ S/m}$$

Isolantes

$$\sigma < 10^{-5} \text{ S/m}$$

Condutividade Eléctrica (σ) e Estrutura de Bandas



$$E_g > 3.5 \text{ eV}$$

Isolante

$$0 < E_g < 3.5 \text{ eV}$$

Semicondutor

$$E_g = 0$$

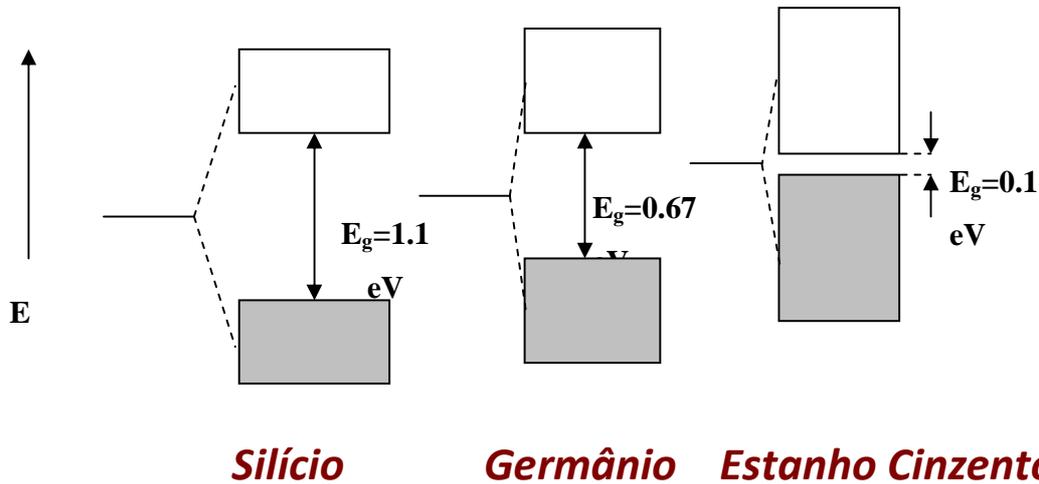
Condutor

Largura de Banda Proibida (E_g) e Condutividade Eléctrica (σ)

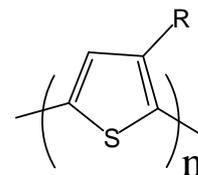
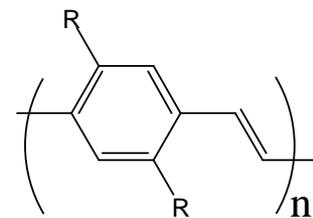
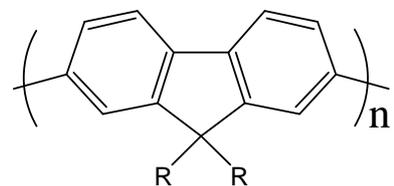
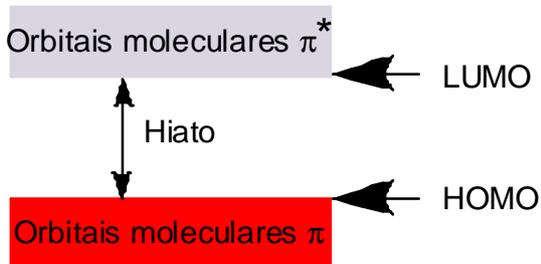
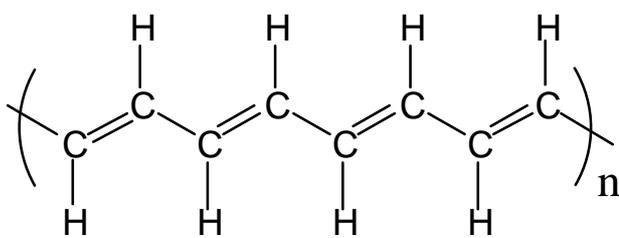
Material	E_g (eV)	σ ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	Tipo
NaCl	10	10^{-15}	Isolante
C (sp_3)	5	10^{-12} - 10^{-18}	Isolante
Si	1.09	2.5×10^{-4}	Semicondutor
Ge	0.6	1.45	Semicondutor
C(sp_2)	0	6.1×10^4	Condutor
Ag	0	6.3×10^7	Condutor

Materiais Semicondutores

1. Cristais covalentes (Metalóides do Grupo 14)



2. Polímeros Conjugados (d_{C-C} alternante)



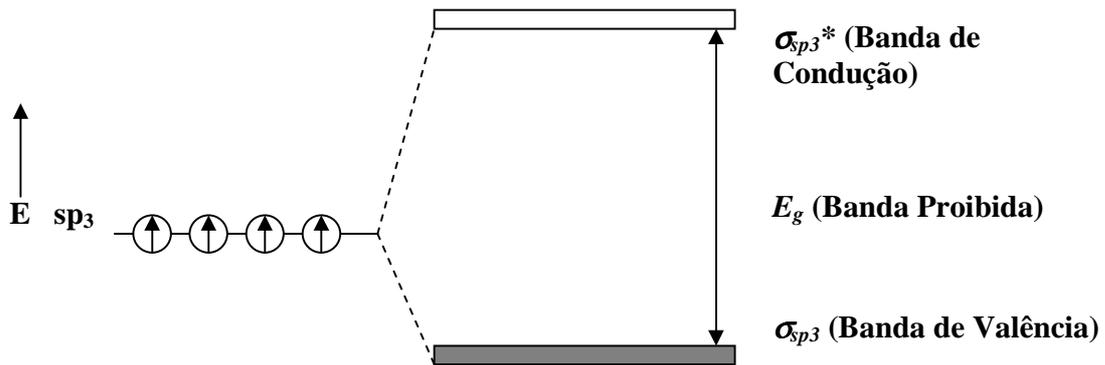
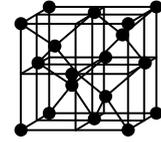
3. Cristais covalentes binários AB (III-V) e (II-VI)

(grupo 13-grupo 15) e (grupo 12-grupo16) da TP

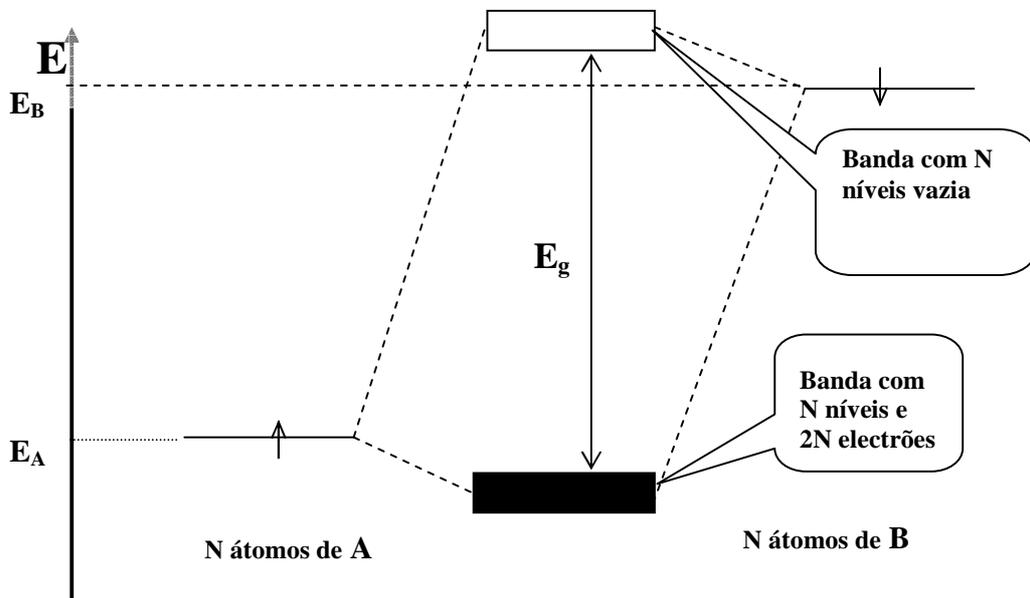
Substância	Tipo	E_g / eV
AIP	III-V	3.0
CdS	II-VI	2.45
AlAs	III-V	2.3
GaP	III-V	2.25
CdSe	II-VI	1.80
AlSb	III-V	1.52
CdTe	II-VI	1.45
GaAs	III-V	1.34
InP	III-V	1.27
Si	IV	1.1
Ge	IV	0.72
GaSb	III-V	0.70
InAs	III-V	0.33
InSb	III-V	0.18
Sn (cinzento)	IV	0.08

Materiais Isolantes

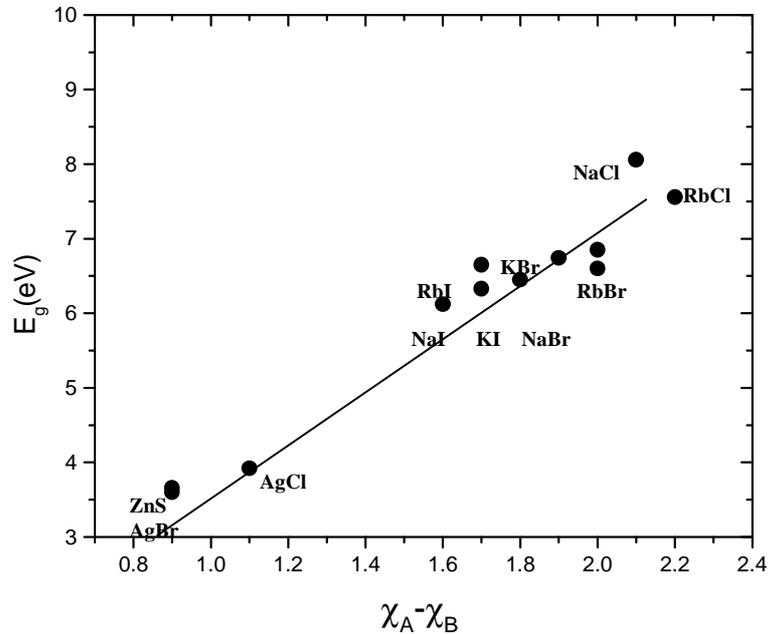
1. Cristais Covalentes (diamante)



2. Compostos Iônicos



E_g em função de $\chi_A - \chi_B$



Largura da banda proibida E_g diminui com a diminuição da diferença de eletronegatividade

ZnS e AgBr aproximam-se dos semicondutores

3. Polímeros não conjugados

Nylon (poliamida) $\sigma = 10^{-11} \text{ S.m}^{-1}$

Teflon (politetrafluoro etileno) $\sigma = 10^{-14} \text{ S.m}^{-1}$

1. Condutores

$$\sigma = n\mu e$$

n – densidade de portadores de carga

μ - mobilidade dos portadores de carga ($\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)

e – carga do electrão

1.1 Densidade de portadores

$$n = N/V$$

(número de portadores por unidade de volume)

N – número de portadores: electrões que têm acesso (energético e espacial) a “orbitais”/níveis não preenchidos (topo da banda).

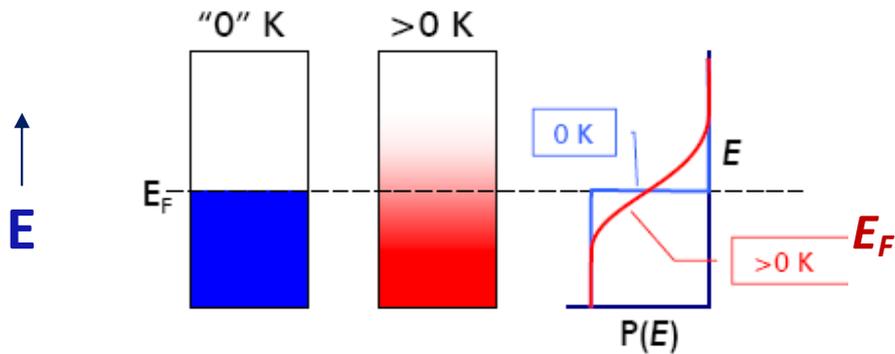
V – volume

Quantos electrões têm níveis acessíveis?

Modelo de Drude: Todos os electrões de valência.

Modelo quântico : N dado pela **densidade de estados** (número de estados por unidade de energia) e respectiva **probabilidade de preenchimento** (distribuição de Fermi-Dirac).

1.1.1 Nível de Fermi



1.1.2 Distribuição de Fermi-Dirac

(Princípio de exclusão de Pauli)

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

Casos notáveis:

1. $T = 0 \text{ °K}$

$$E < E_F$$

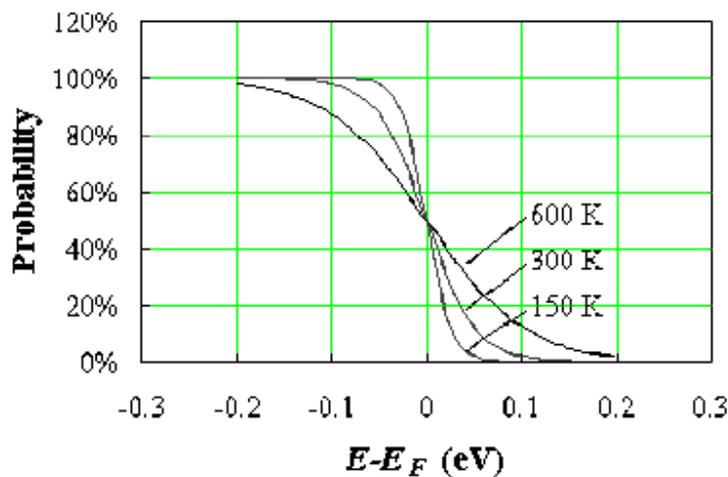
$$f(E) = 1$$

$$E > E_F$$

$$f(E) = 0$$

2. $T > 0 \text{ °K}$ e $E = E_F$

$$f(E_F) = \frac{1}{2}$$



2. Densidade de estados

$$\frac{N}{V} = \frac{2\sqrt{2}m_e^{3/2}}{3\pi^2\hbar} E^{3/2}$$

$V = L^3$ – volume do cristal

N/V – densidade de electrões

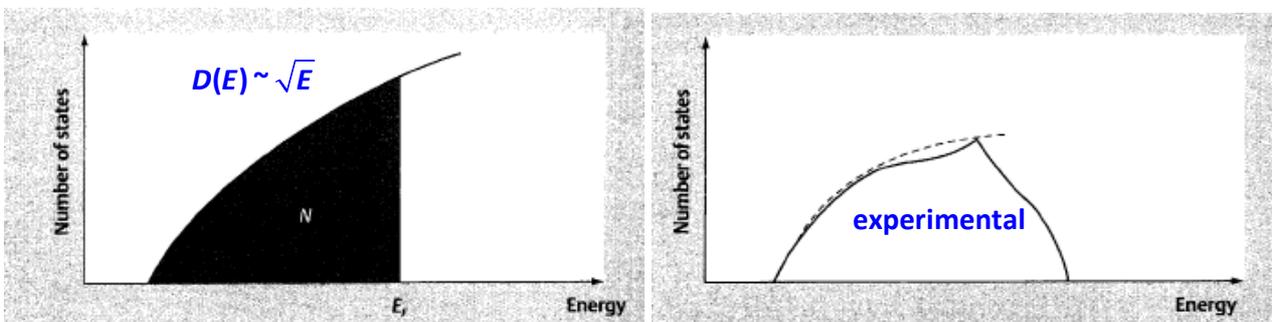
Possibilidades:

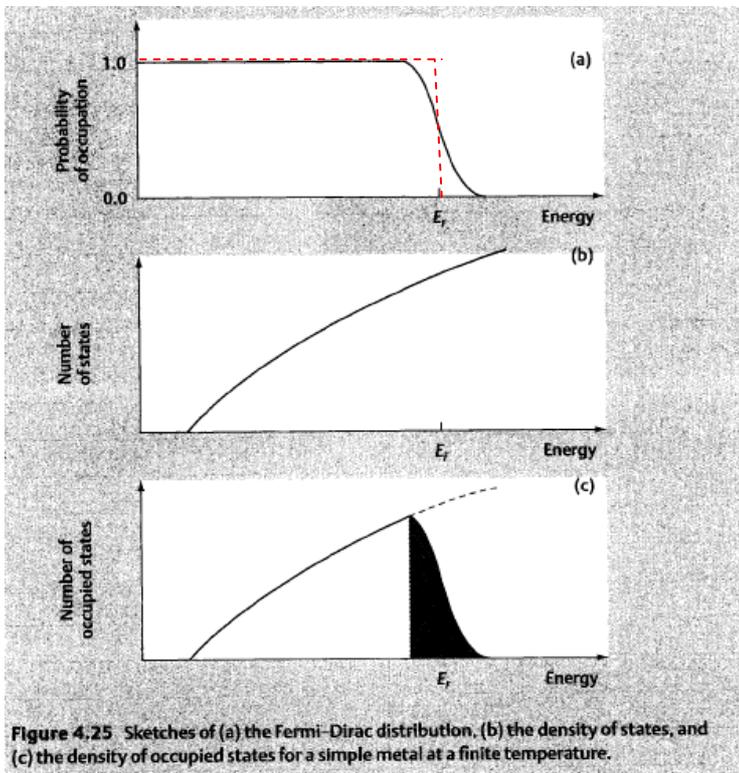
Cálculo da velocidade no nível de Fermi

$$v_F = \frac{\hbar}{m_e} \left(\frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$$

Cálculo da densidade de estados/electrões, $D(E)$

$$D(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{V}{2\pi} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$$





$f(E)$
 probabilidade de ocupação
 em função de E

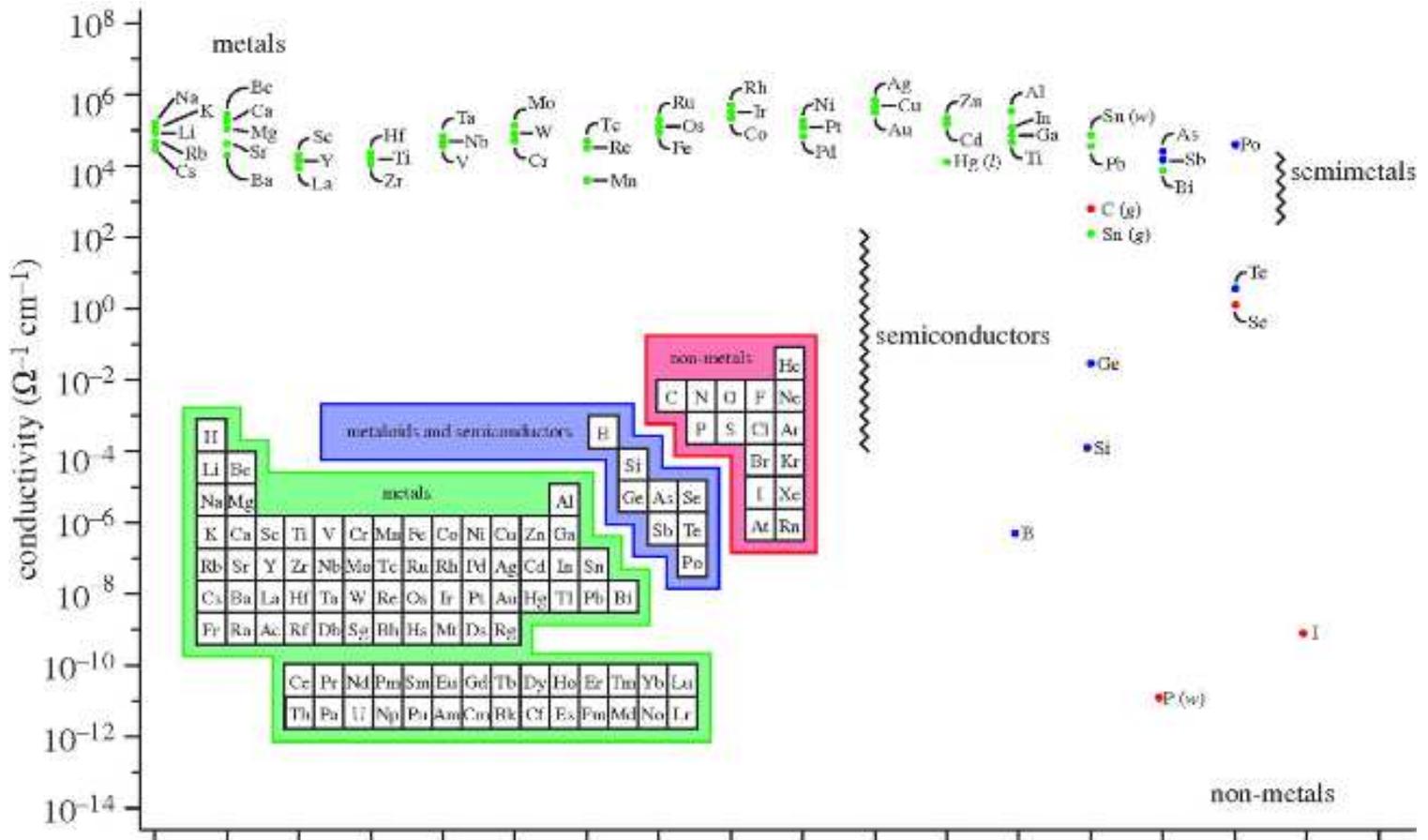
$D(E)$
 densidade de estados

$D(E) \times f(E)$
 densidade de estados
 ocupados

Apenas os electrões com energias situadas na zona assinalada a preto em (c) têm níveis acessíveis e contribuem para a densidade de portadores.

Ex⁰ : para o Na, só cerca de 3% dos electrões de valência contribuem para a condução

Condutividade Elétrica e Tabela Periódica



Efeito da temperatura

a) Densidade de portadores

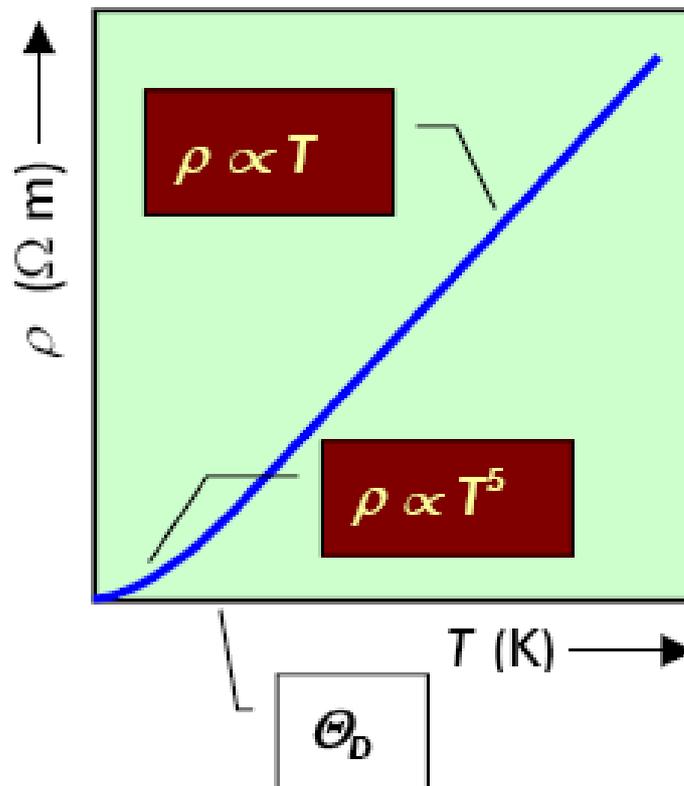
n aumenta muito pouco porque $E - E_F \ll k_B T$

b) Mobilidade

μ diminui mais devido à interacção electrão-fonão

⇒ σ diminui com aumento da temperatura,

$\rho = 1/\sigma$ aumenta com T^5 abaixo de Θ_D e linearmente com T acima de Θ_D .



Θ_D – temperatura de Debye

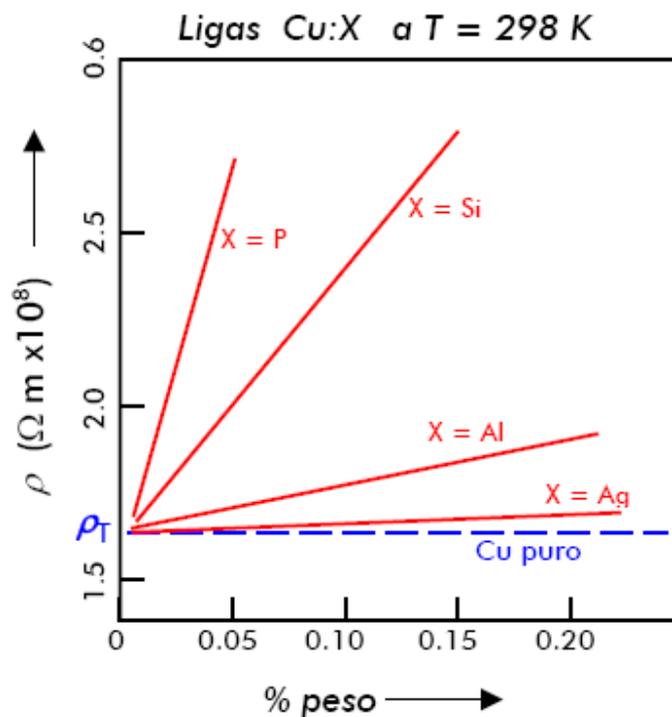
Efeito de defeitos e impurezas

Regra de Matthiessen : $\rho = \rho_r + \rho_T$

Regra de Nordheim : $\rho_r = Ax(1-x)$

$$\rho = Ax(1-x) + \rho_T$$

x – fracção de impurezas; **A** - Constante de Nordheim



A constante de Nordheim (declive da reta) é tanto maior quanto maiores forem as diferenças entre o metal e a impureza (estrutura cristalina, raio metálico, electronegatividade), ou seja, quanto maior for a perturbação da estrutura cristalina pela impureza.

Sumário 23 - Propriedades Elétricas 2

Semicondutores intrínsecos

Diagrama de bandas e Nível de Fermi.

Mecanismo de condução em semicondutores (portadores n e p).

Efeito da temperatura na Densidade e Mobilidade dos portadores.

Condutividade em função da temperatura.

Semicondutores extrínsecos

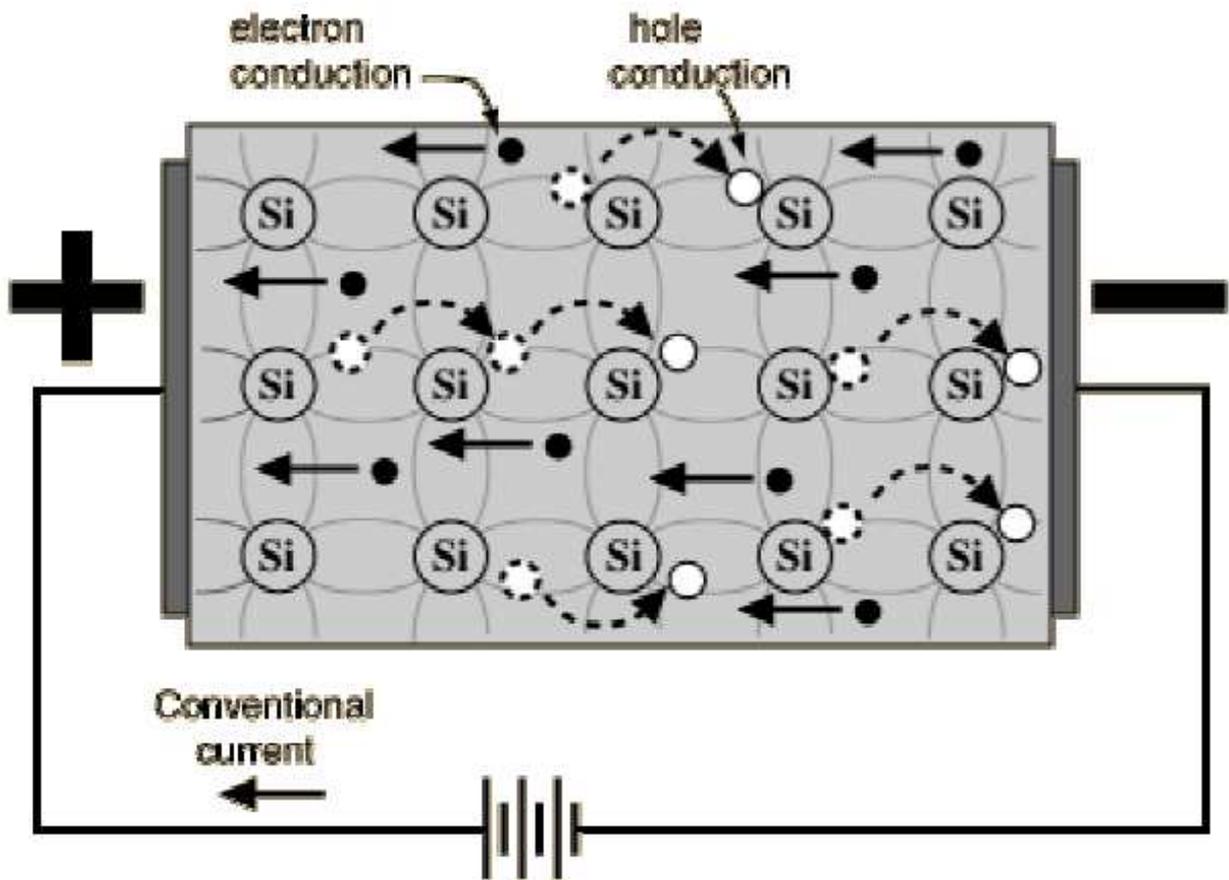
Semicondutores extrínsecos do tipo n e tipo p

Efeito da temperatura e das impurezas na Densidade e Mobilidade dos portadores.

Condutividade em função da Temperatura.

Semicondutores intrínsecos ($n = p$)

Mecanismo de condução num Semicondutor intrínseco



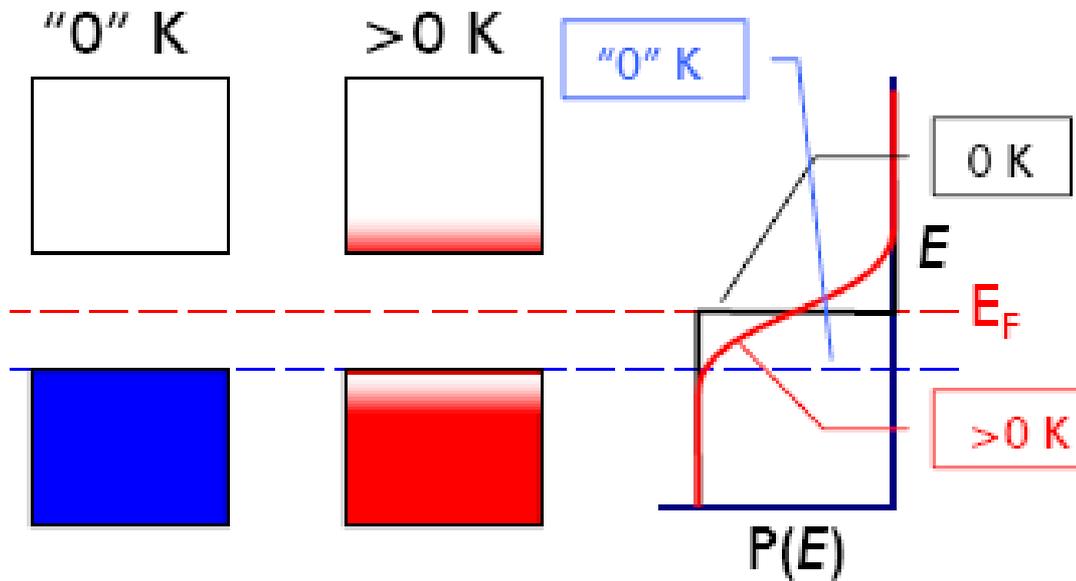
$$\sigma = (n \mu_n + p \mu_p) e$$

n - Densidade de portadores (elétrões) na banda de condução

p - Densidade de portadores (lacunas) na banda de valência

a) Densidade de portadores

Distribuição de electrões num semiconductor



Nos semicondutores $E - E_F \gg k_B T = 0.025 \text{ eV}$ ($T = 298 \text{ K}$).

A distribuição de Fermi-Dirac,

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

reduz-se à distribuição de Boltzman:

$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n = AT^{3/2} e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$$

$$p = AT^{3/2} e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

como $E_C - E_F = E_F - E_V = E_g/2$:

$$n = p = AT^{3/2} \exp(-E_g/2k_B T)$$

b) Mobilidade dos portadores

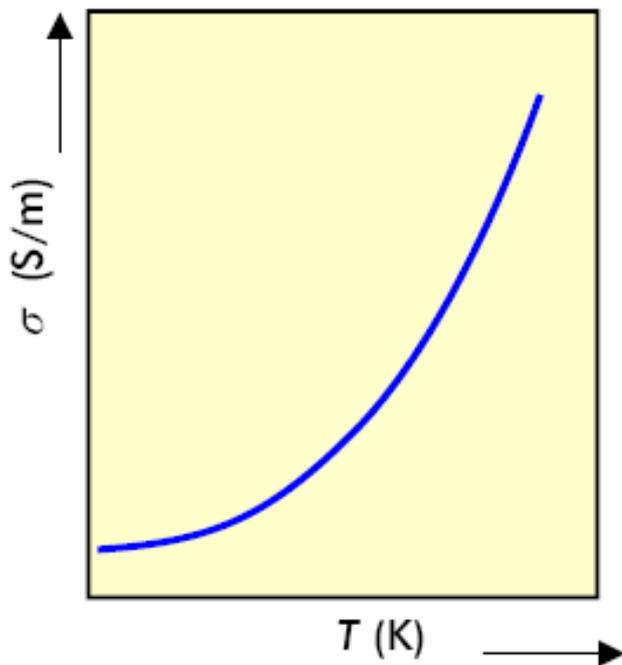
$$\mu_n = a_n T^{-3/2}$$

$$\mu_p = a_p T^{-3/2}$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_g/2k_B T)$$

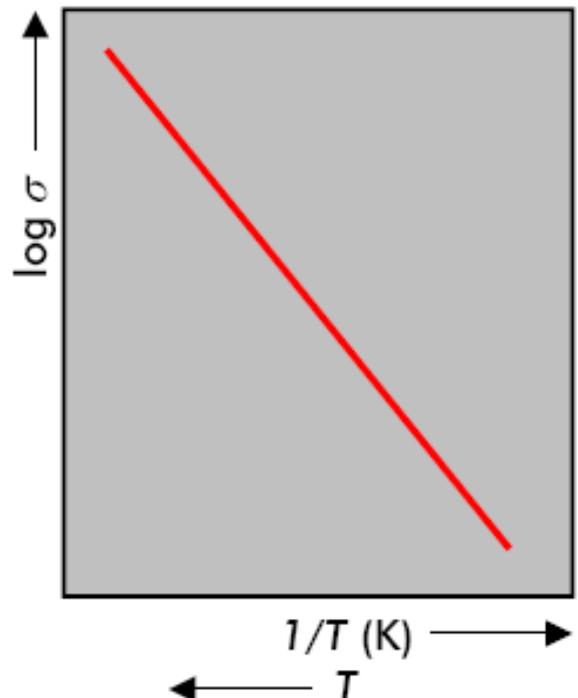
Efeito da Temperatura

n e p aumentam muito ($E_g \gg \Delta E$ de metais $\sim 10^{-20}$ eV)



σ aumenta exponencialmente com o aumento de T.

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_G}{2k_B} \frac{1}{T}$$



A representação de $\ln \sigma$ em função de $1/T$ é uma reta com declive $= -E_g/2k_B$ e intersecção na origem $= \ln \sigma_0$.

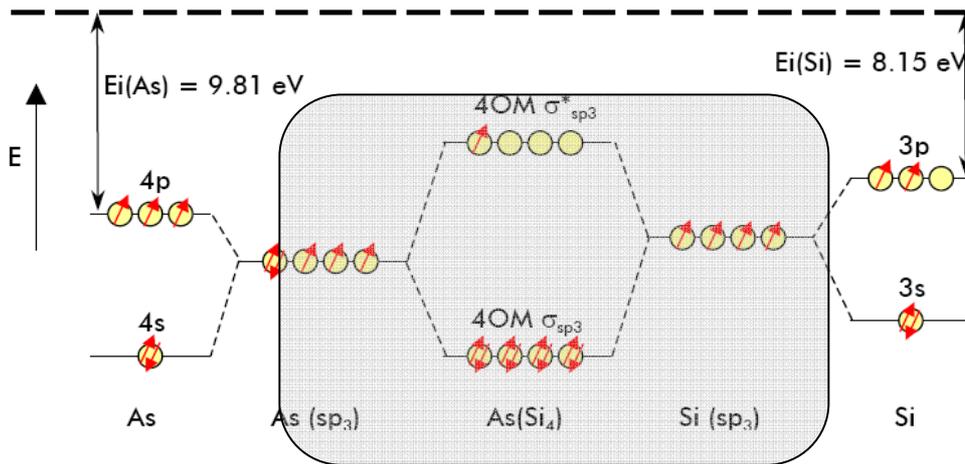
Semicondutores intrínsecos binários

Substância	Tipo	E_g / eV
AIP	III-V	3.0
CdS	II-VI	2.45
AlAs	III-V	2.3
GaP	III-V	2.25
CdSe	II-VI	1.80
AlSb	III-V	1.52
CdTe	II-VI	1.45
GaAs	III-V	1.34
InP	III-V	1.27
Si	IV	1.1
Ge	IV	0.72
GaSb	III-V	0.70
InAs	III-V	0.33
InSb	III-V	0.18
Sn (cinzento)	IV	0.08

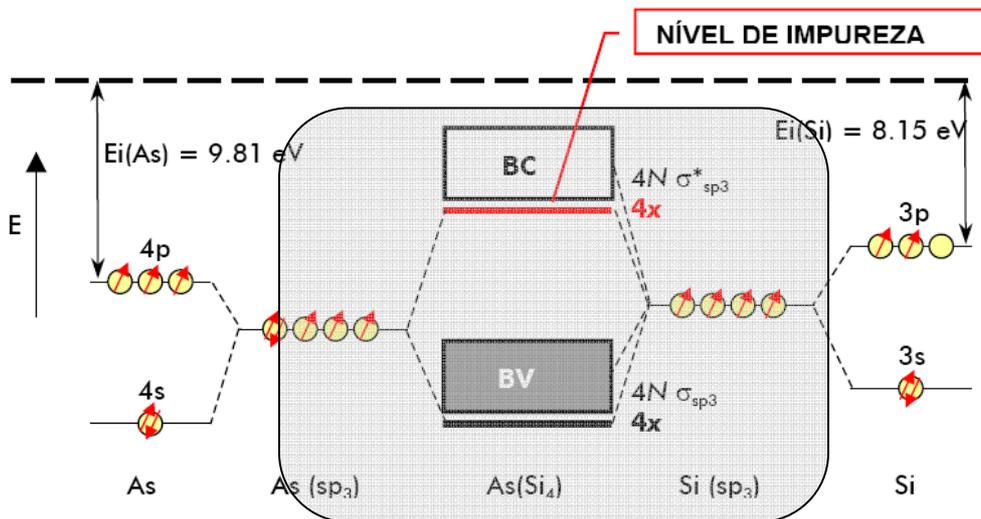
Semicondutores extrínsecos

Tipo n – impureza pentavalente ($n > p$)

Exº: Orbitais moleculares para 1 átomo de As rodeado por 4 átomos de Si



Número total de átomos $2N$ x átomos de arsénio



$$n^\circ \text{ de electrões} = 4(2N-x) + 5x$$

$$n^\circ \text{ de níveis ligantes} = 4N$$

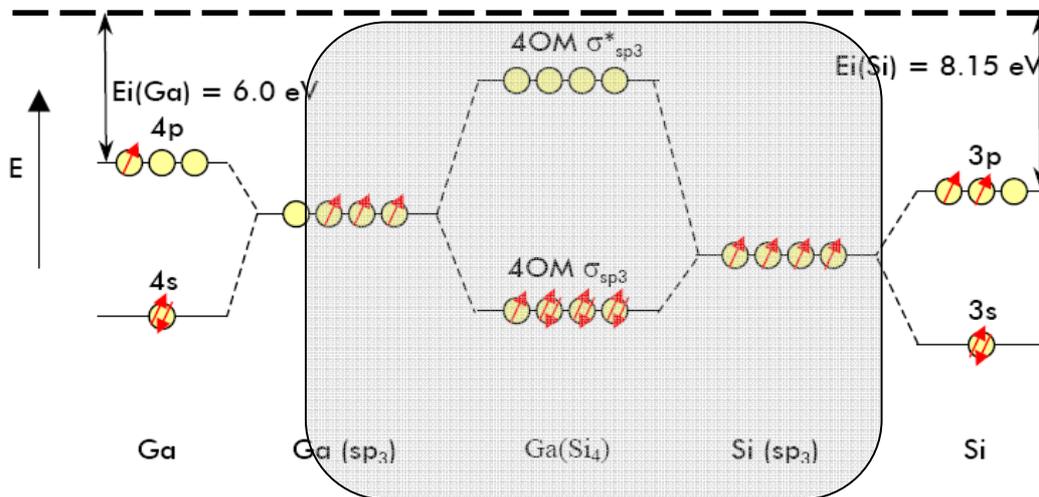
sobram x electrões no nível de impureza para $4x$ orbitais localizadas

$$E_c - E_{imp} = 0.049 \text{ eV}$$

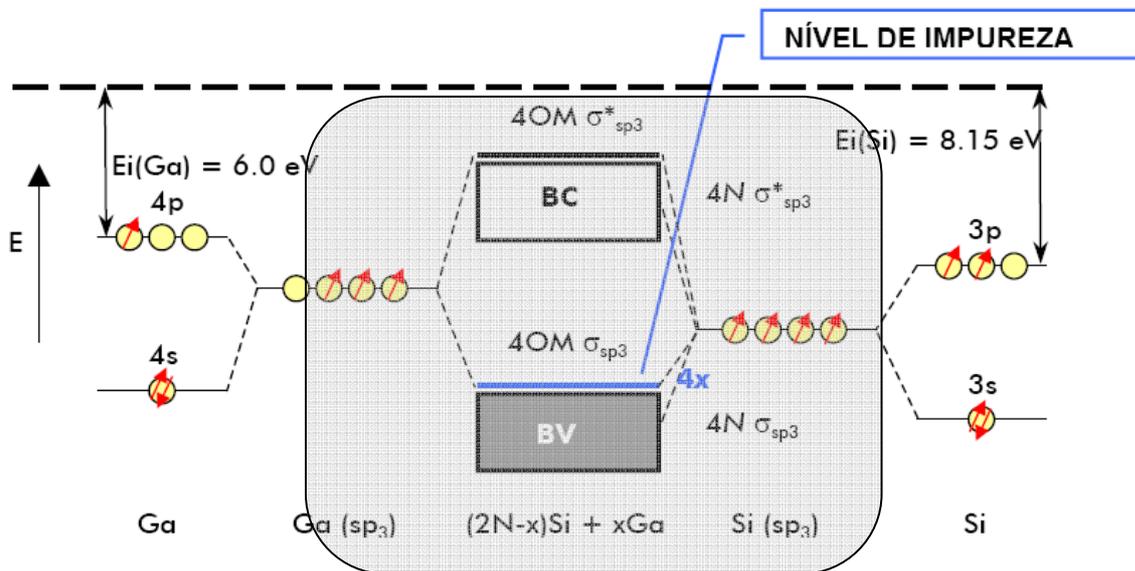
$$k_B T \sim 0.025 \text{ eV}$$

Tipo p – impureza trivalente (n < p)

Níveis de energia para 1 átomo de gálio rodeado por 4 de silício



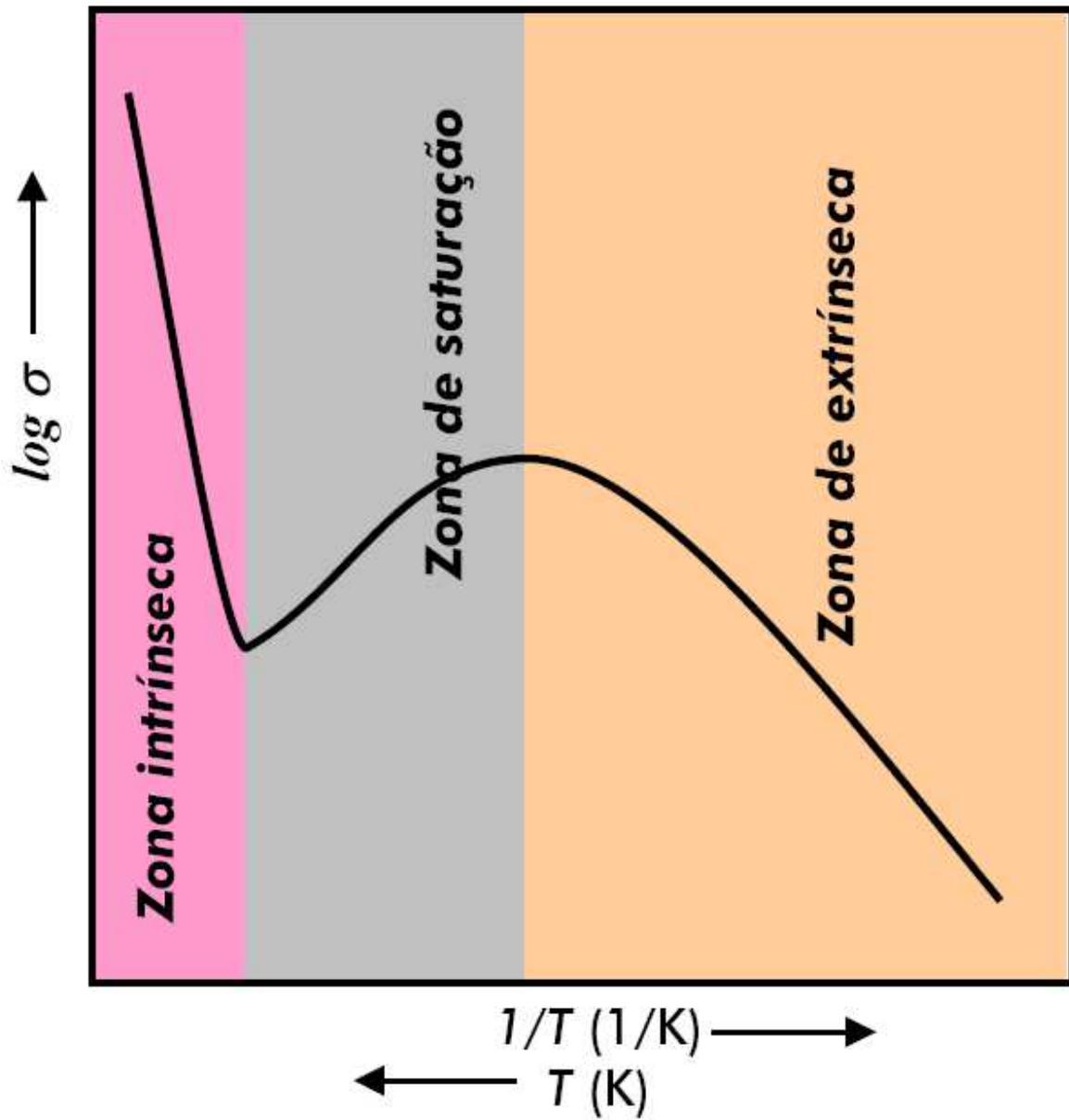
Número total de átomos $2N$ x átomos de gálio



$$E_{imp} - E_v = 0.0127 \text{ eV}$$

Conductividade em função da temperatura

Semicondutores extrínsecos



Sumário 24 - Propriedades Elétricas 3

Dispositivos e Aplicações

Junções

Junção metal-metal

Efeito de Seebek

Efeito de Peltier

Junção semicondutor-semicondutor

Junção p-n em equilíbrio

Junção p-n em polarização direta

Junção p-n em polarização inversa

Díodos

Resposta Corrente-Voltagem

Retificação de corrente

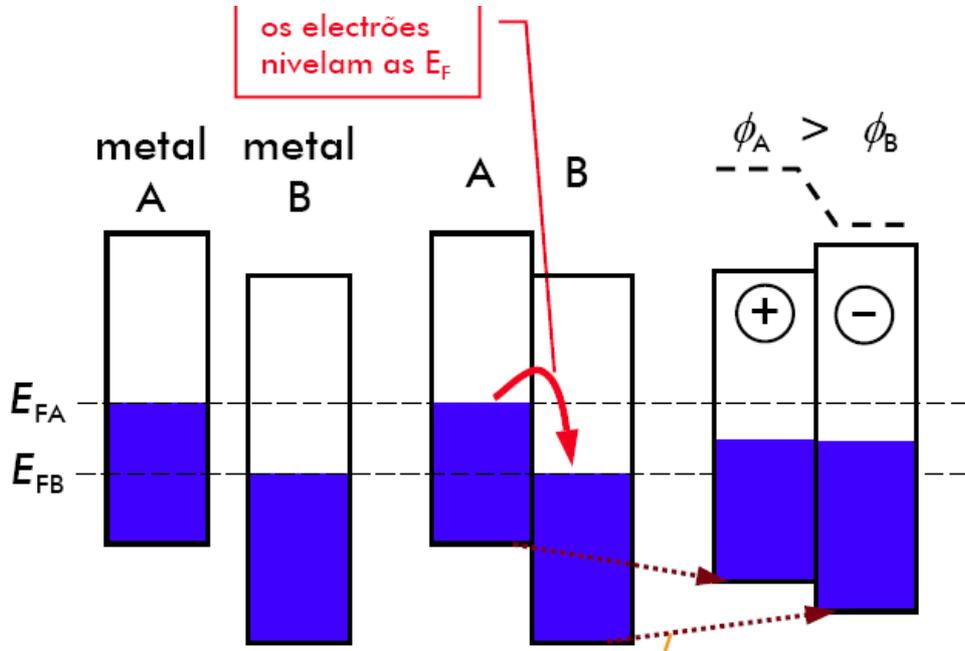
Amplificação de corrente

Eletroluminescência: Fotodíodos (LEDs)

Conversão fotovoltaica (Células solares)

Junções

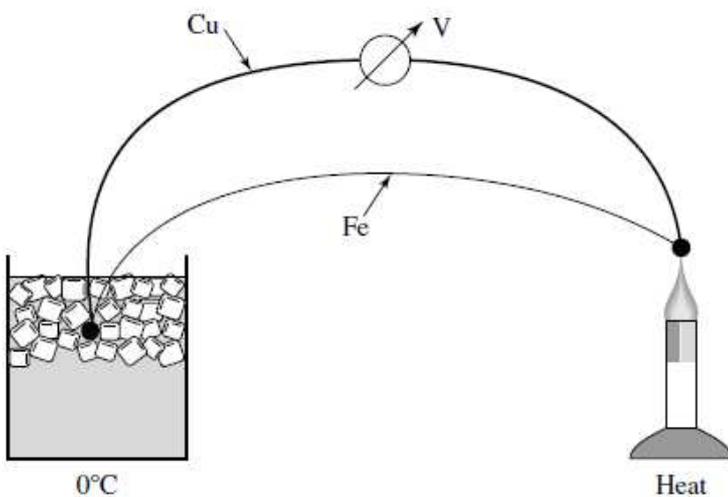
1. Junção metal-metal



Aplicações

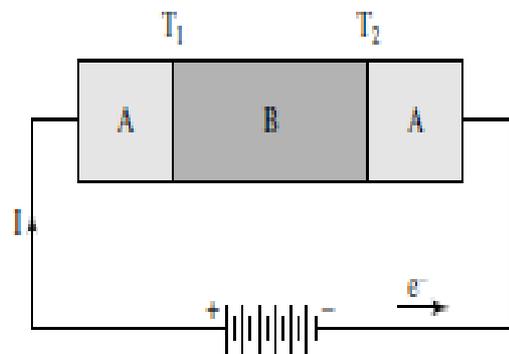
1. Efeito de Seebeck

Termopares ($\Delta V = S\Delta T$)



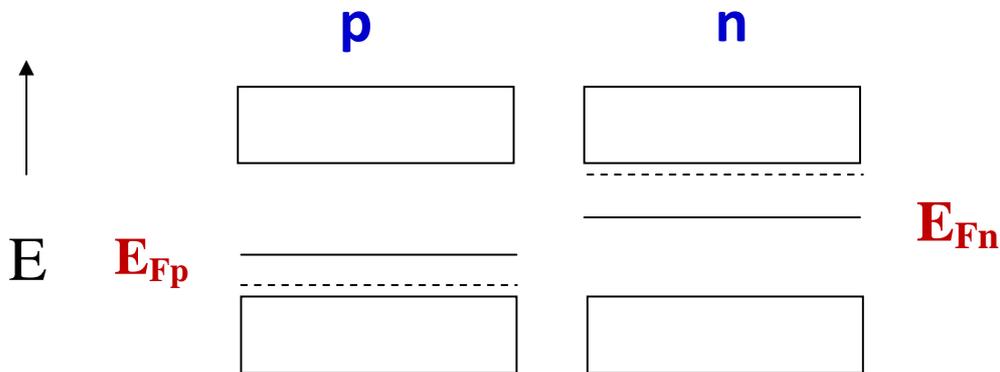
2. Efeito de Peltier

Arrefecimento

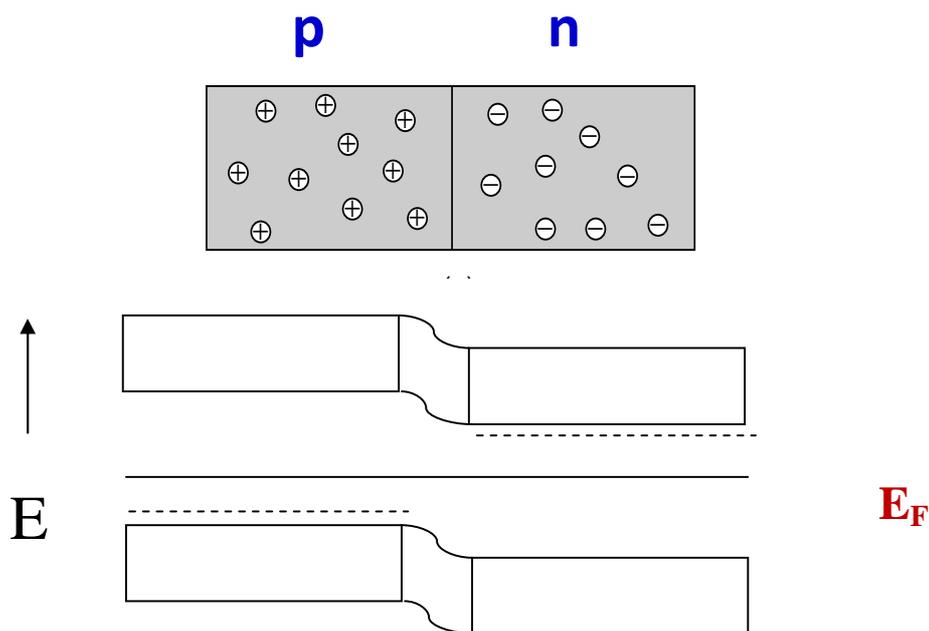


2. Junção Semicondutor – Semicondutor

a) separados

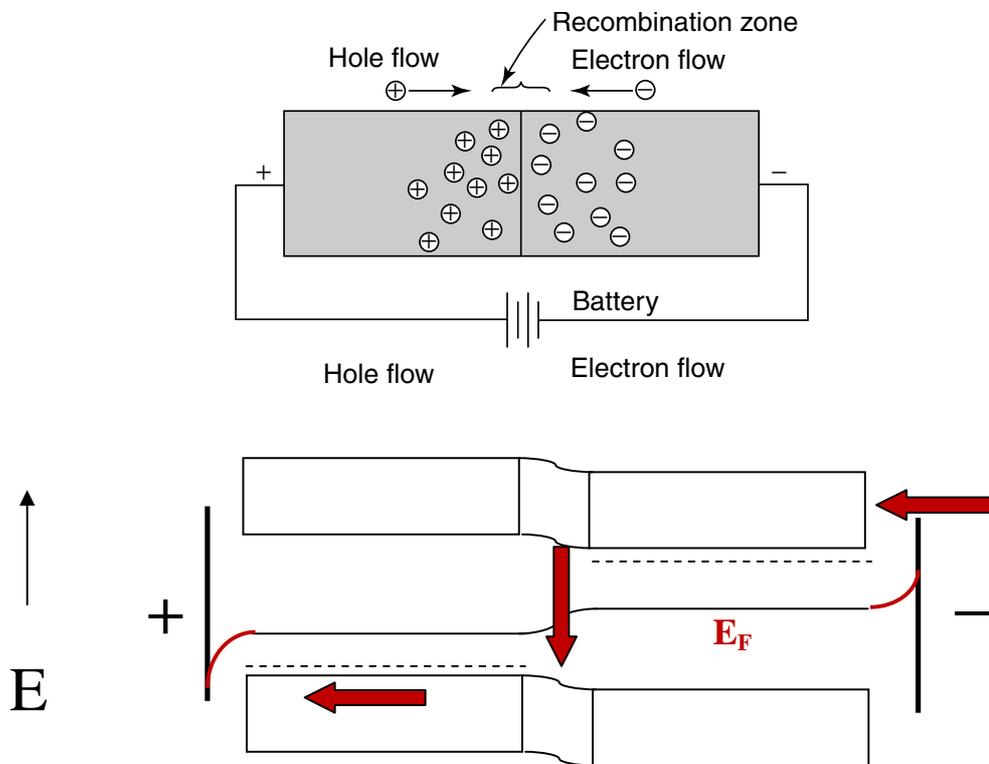


b) junção p-n em equilíbrio

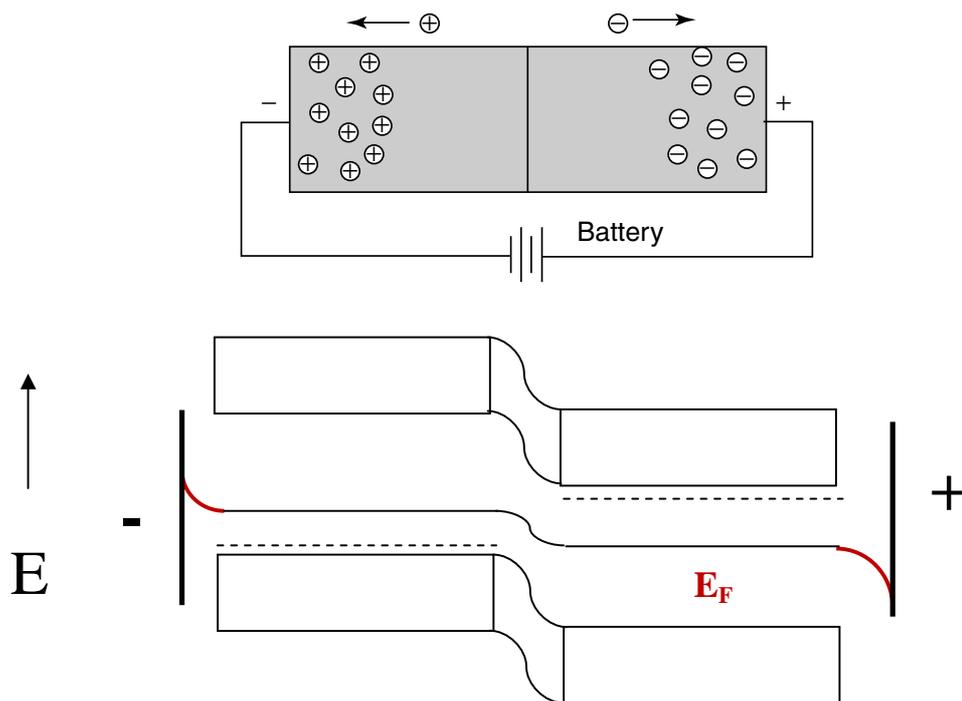


O fluxo de electrões de n para p aumenta as repulsões inter-eletrónicas em p, aumentando a energia dos electrões em p. Em n, a diminuição das repulsões resulta na diminuição da energia em n.

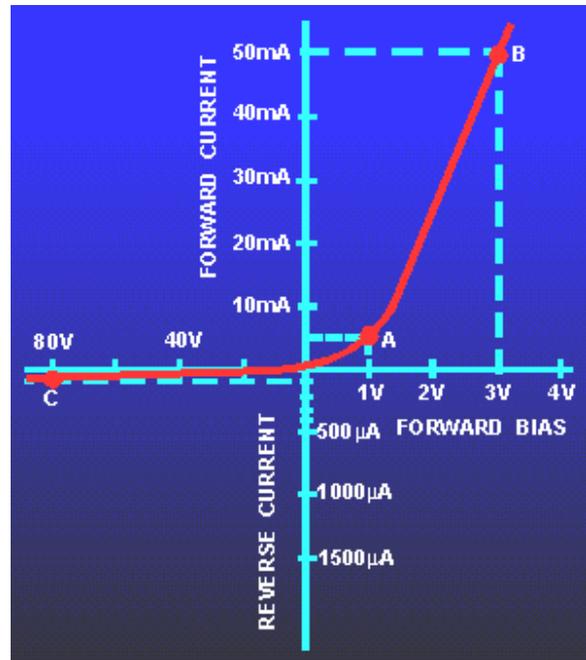
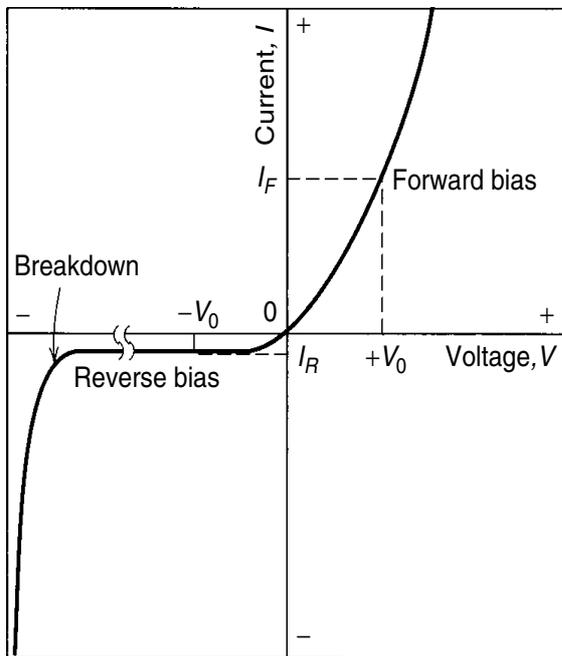
c) junção p-n em polarização directa (condutora)



d) Junção p-n em polarização inversa (isolante)

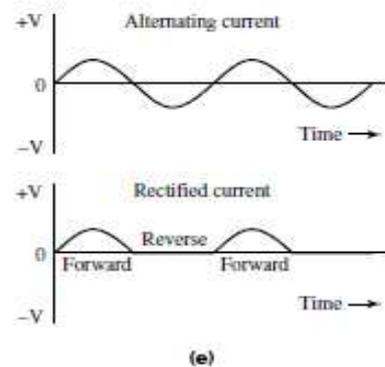
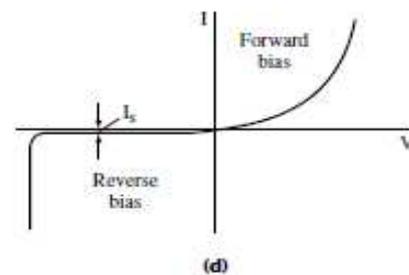
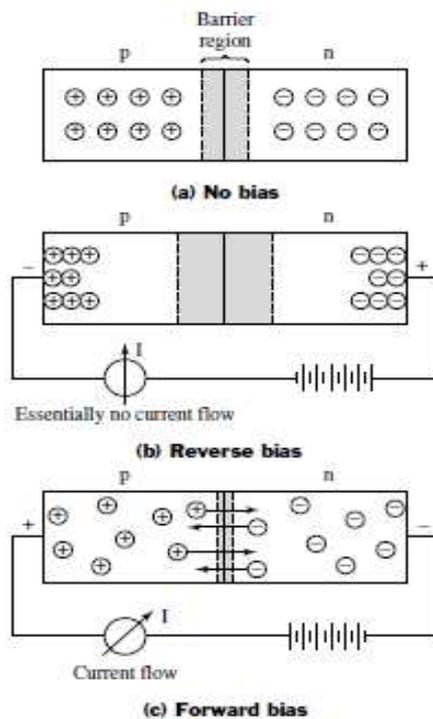


Resposta Intensidade-Voltagem

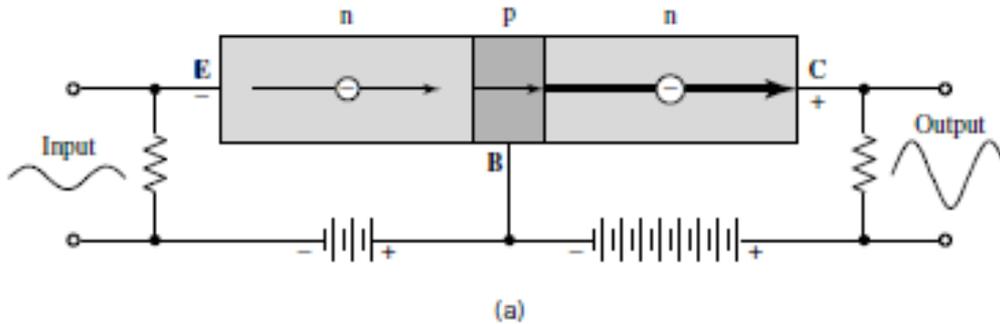


Aplicações

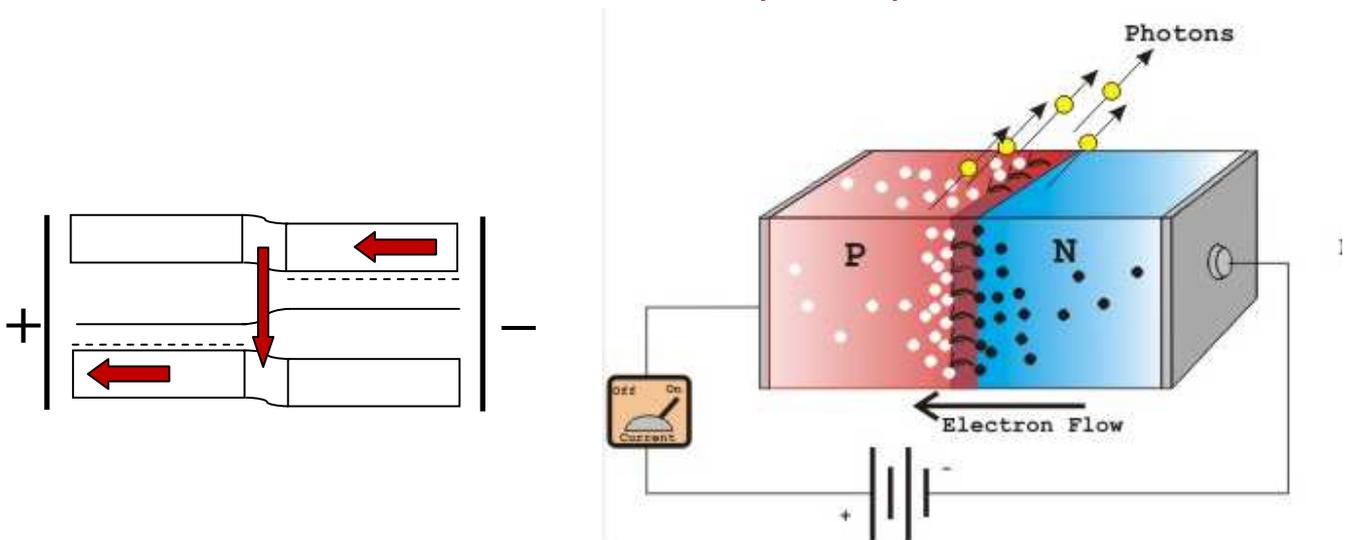
1. Retificação de corrente



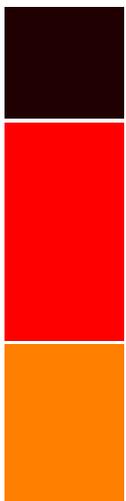
2. Amplificação de corrente (Transistor)



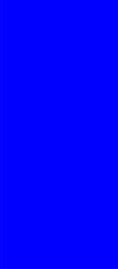
3. Díodos emissores de luz (LEDs)



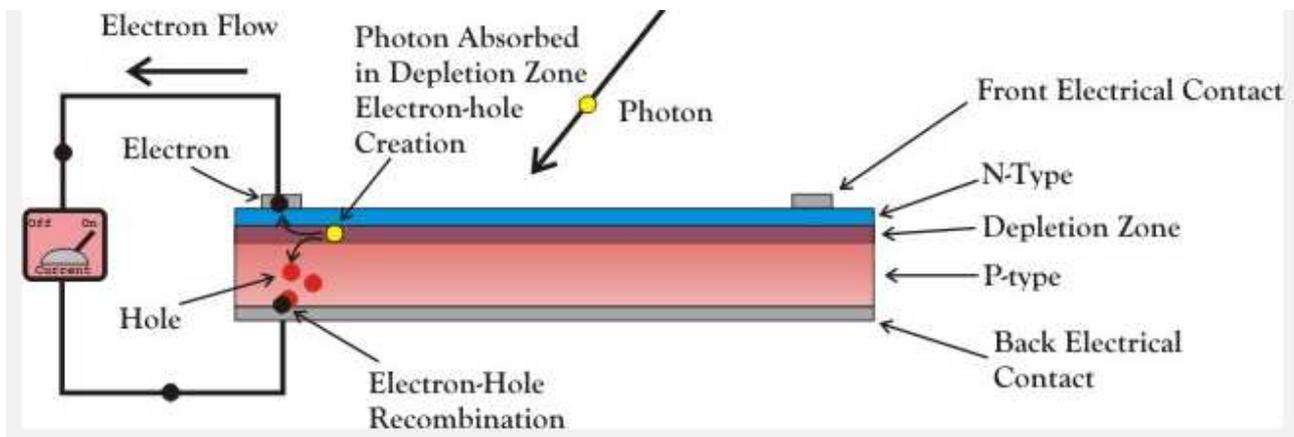
Color



<u>Color</u>	<u>Wavelength/nm</u>	<u>Voltage drop</u>	
<u>Infrared</u>	$\lambda > 760$	$E_g < 1.63$	(GaAs) (AlGaAs)
<u>Red</u>	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < E_g < 2.03$	(GaAsP) (AlGaInP) (GaP)
<u>Orange</u>	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < E_g < 2.10$	(GaAsP) (AlGaInP) (GaP)

	<u>Yellow</u>	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < E_g < 2.18$	(GaAsP) (AlGaInP) (GaP)
	<u>Green</u>	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < E_g < 4.0$	Traditional green (GaP) (AlGaInP) (AlGaP) Pure green (InGaN)/(GaN) (ZnSe)
	<u>Blue</u>	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < E_g < 3.7$	(InGaN) (SiC) as substrate
	<u>Violet</u>	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < E_g < 4.0$	(InGaN)
	<u>Purple</u>	multiple types	$2.48 < E_g < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red
	<u>Ultraviolet</u>	$\lambda < 400$	$3.1 < E_g < 4.4$	<u>Diamond</u> (235nm) <u>BN</u> (215 nm) (AlN) (210 nm) ^[66] (AlGaInN) (AlGaInN) down to 210 nm
	<u>Pink</u>	multiple types	$E_g \sim 3.3$ ^[68]	
	<u>White</u>	Broad spectrum	$E_g = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

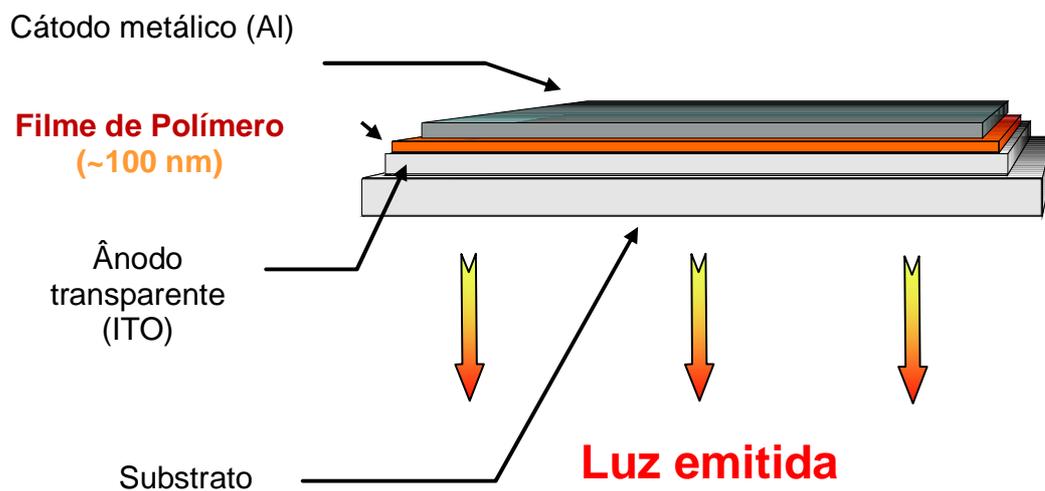
4. Células solares (conversão fotovoltaica)



\

5. Dispositivos orgânicos

OLEDs



Problemas

11.7 - Um semiconductor intrínseco apresenta uma resistividade eléctrica, ρ , de $1.20 \text{ S}^{-1} \text{ cm}$ a 293 K e de $0.97 \text{ S}^{-1} \text{ cm}$ a 323 K . Calcule o valor aproximado, em eV, da diferença de energia, ΔE , entre a banda de valência e a banda de condução.

11.8 - Classifique os semicondutores: silício (Si), arsenieto de gálio (GaAs) e selenieto de cádmio (CdSe). Coloque-os por ordem crescente de largura da banda proibida, justificando.

11.10 - Represente, *num mesmo gráfico*, as curvas de variação da condutividade, $\ln \sigma$, em função de $1/T$ para os seguintes semicondutores, comparando-as detalhadamente entre si:

i) Germânio contendo 10^{12} átomos de arsénio por cm^3

ii) Silício contendo 10^{12} átomos de arsénio por cm^3

iii) Germânio contendo 10^9 átomos de arsénio por cm^3

iv) Germânio contendo 10^9 átomos de boro por cm^3 .

11.11 - a) Esboce, *num mesmo gráfico*, os diagramas de bandas do germânio dopado com impurezas tri e pentavalentes.

b) Esboce o diagrama de bandas da junção p-n obtida com estes semicondutores.