

Materiais Elétricos e Magnéticos para Engenharia

Professor: Marcus V. Batistuta

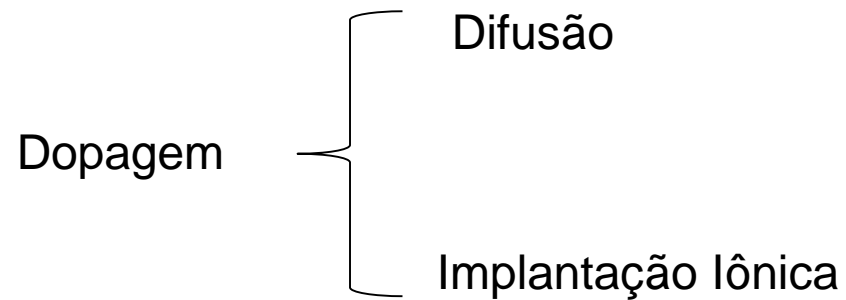
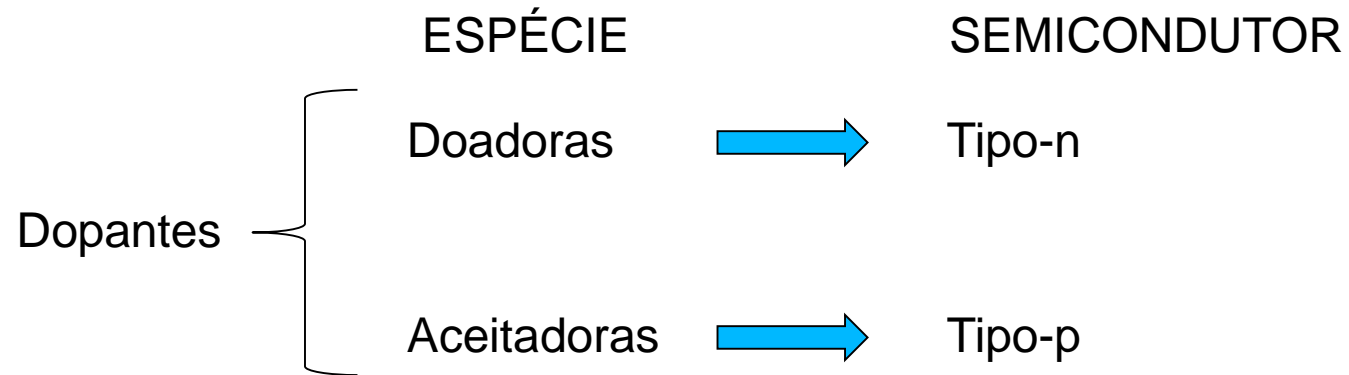
Aula-5

Dopantes e Transporte de Cargas em Semicondutores

1º Semestre de 2018

FGA - Universidade de Brasília

Semicondutores Extrínsecos



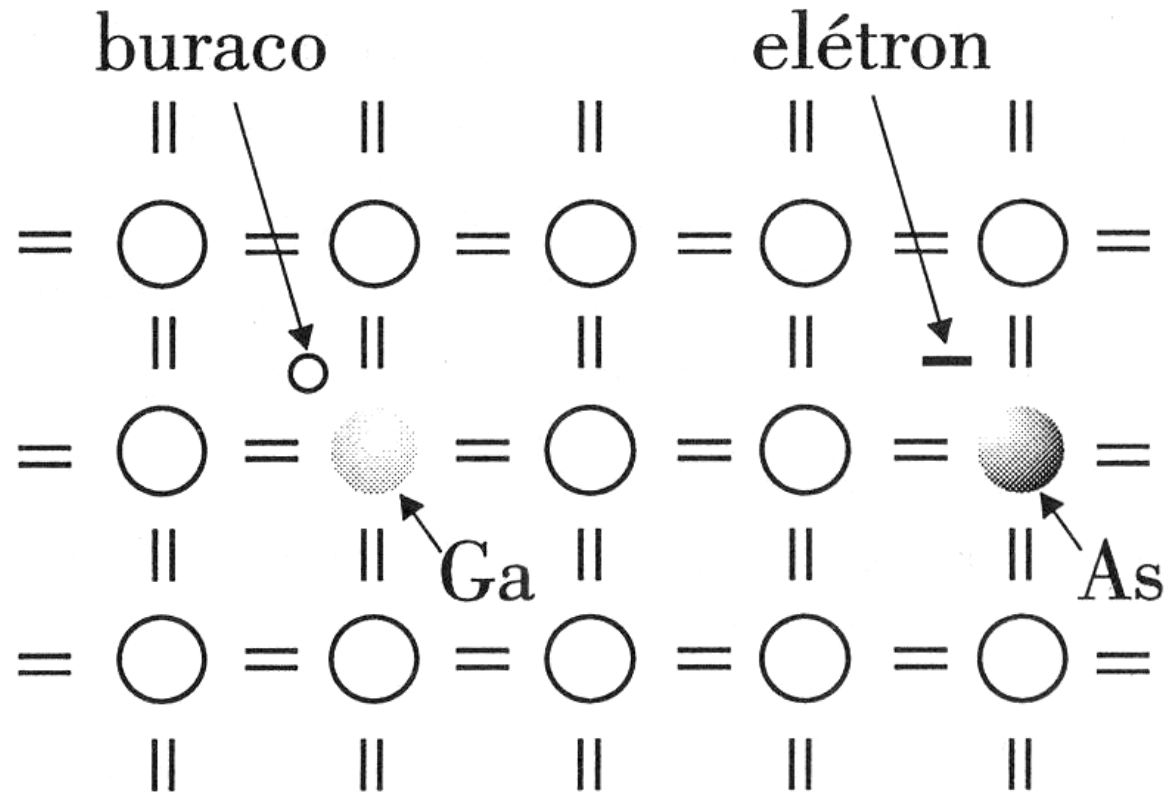


Figura 5.10: Modelo esquemático de um cristal de Ge ou Si dopado com impurezas substitucionais Ga (aceitador) e As (doador). As bolas brancas representam os átomos de Ge ou Si.

Dopantes em Semicondutores

Elemental semiconductors
C(diamond), Si, Ge

B
P-type dopant for C

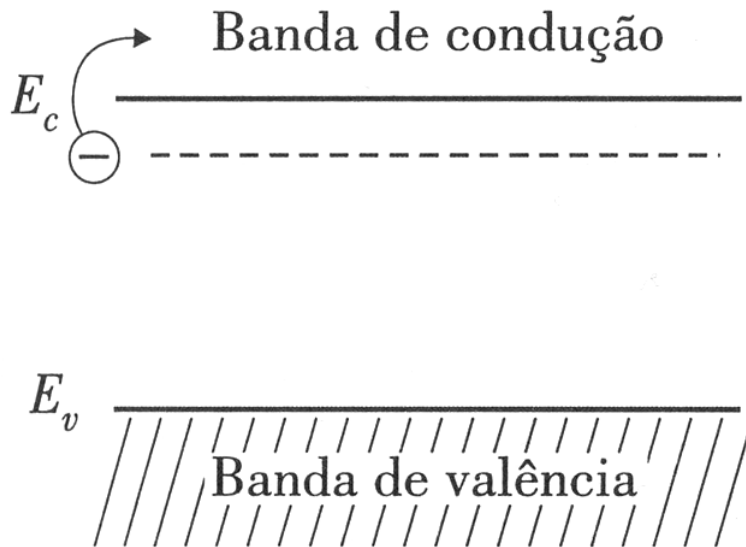
B, Al, Ga, In
P-type dopant for Si

Al, Ga, In
P-type dopant for Ge

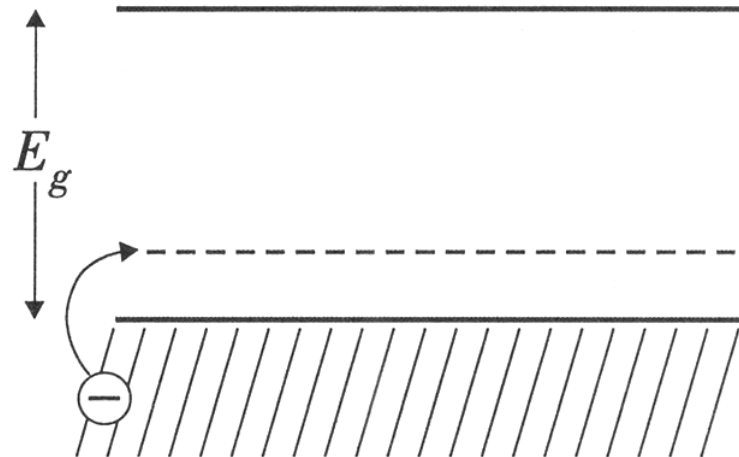
13	IIIA	14	IVA	15	VA
B 5 Boron 10.81 $2p^1$		C 6 Carbon 12.011 $2p^2$		N 7 Nitrogen 14.0067 $2p^3$	
Al 13 Aluminum 26.9815 $3p^1$		Si 14 Silicon 28.0855 $3p^2$		P 15 Phosphorus 30.9738 $3p^3$	
Ga 31 Gallium 69.723 $4p^1$		Ge 32 Germanium 72.61 $4p^2$		As 33 Arsenic 74.92159 $4p^3$	
In 49 Indium 114.82 $5p^1$				Sb 51 Antimony 121.75 $5p^3$	

N, P
N-type dopant for C

P, As, Sb
N-type dopant for Si, Ge



(a) Impurezas doadoras



(b) Impurezas aceitadoras

Figura 5.11: Representação esquemática dos níveis de impurezas no gap de semicondutores dopados. E_c e E_v representam as energias mínima e máxima das bandas de condução e valência respectivamente. Note que esta figura representa a energia ao longo de uma dimensão física do semicondutor.

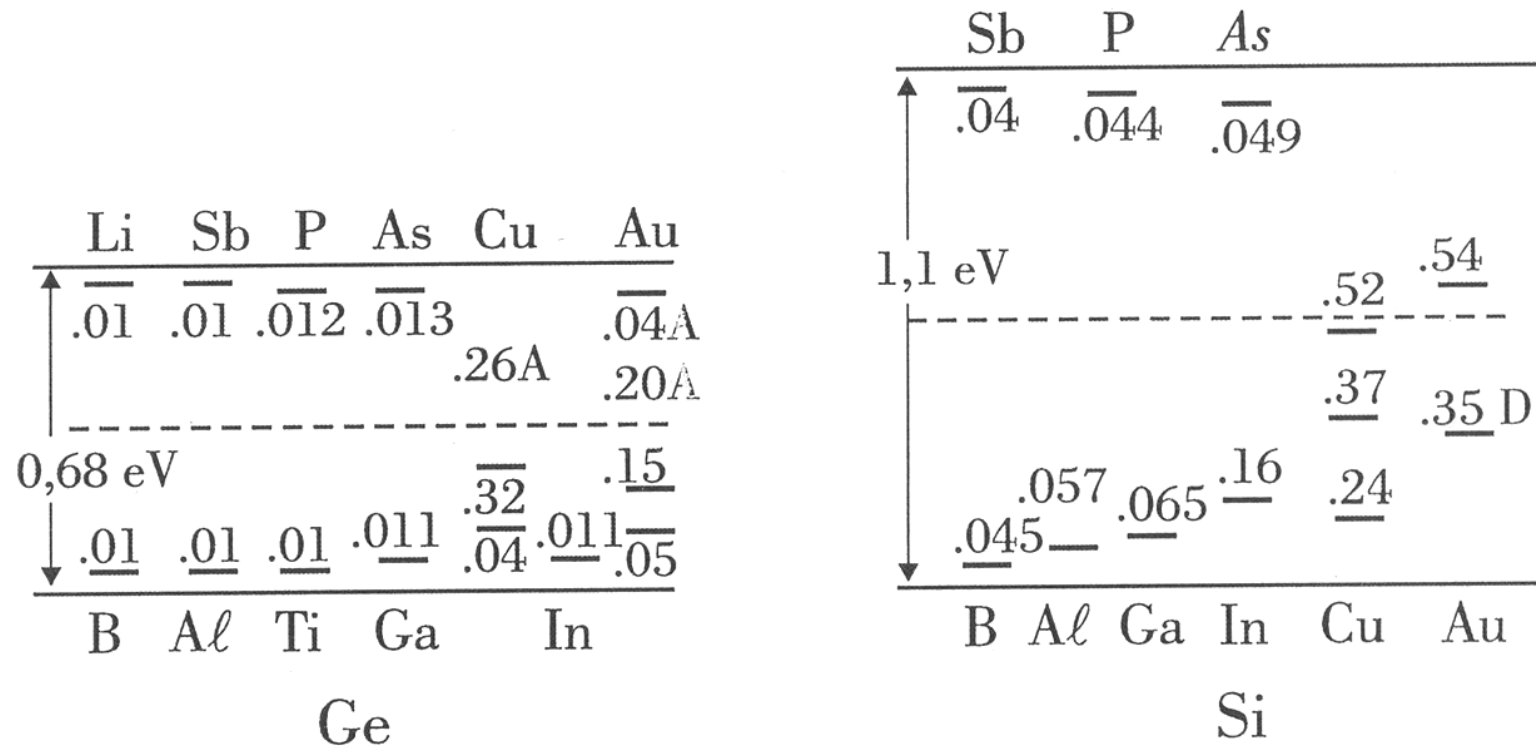


Figura 5.12: Energias de ionização de várias impurezas em Ge e Si em $T = 300$ K. Os números indicam as distâncias em eV do mínimo da banda de condução para os níveis acima do meio do gap e do máximo da banda de valência para os níveis abaixo do meio do gap. Note que Cu e Au têm vários níveis de impurezas, tanto doadoras como aceitadoras [Sze].

Resistividade

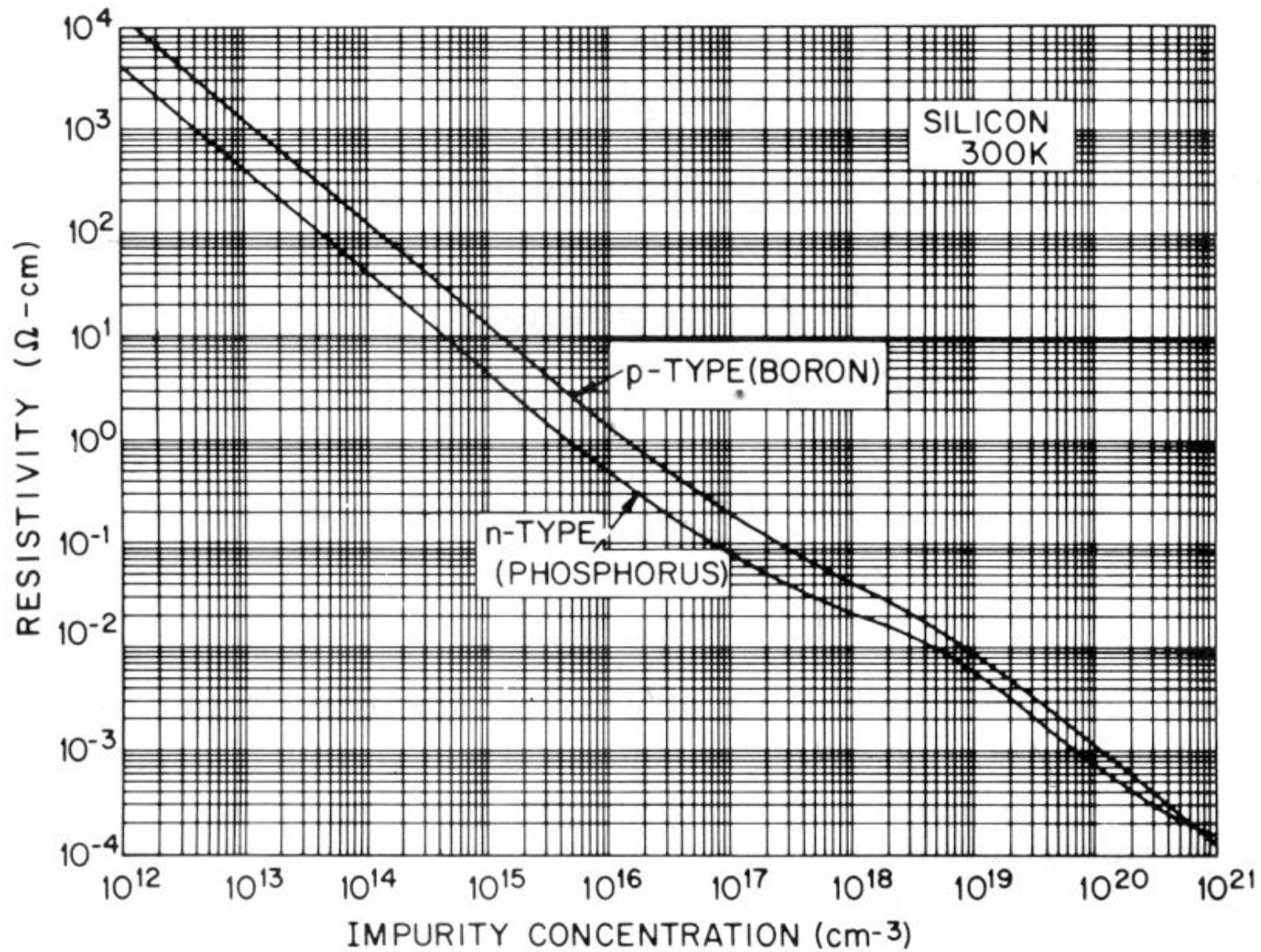


Fig. 21 Resistivity versus impurity concentration for silicon at 300 K. (After Beadle, Plummer, and Tsai, Ref. 38.)

Triclorossilano

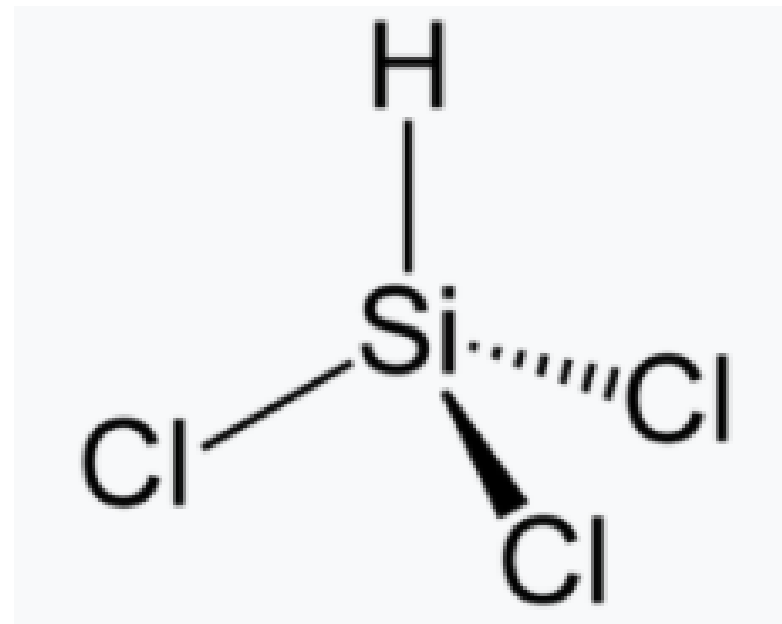
Produção:



Cloreto de Hidrogênio



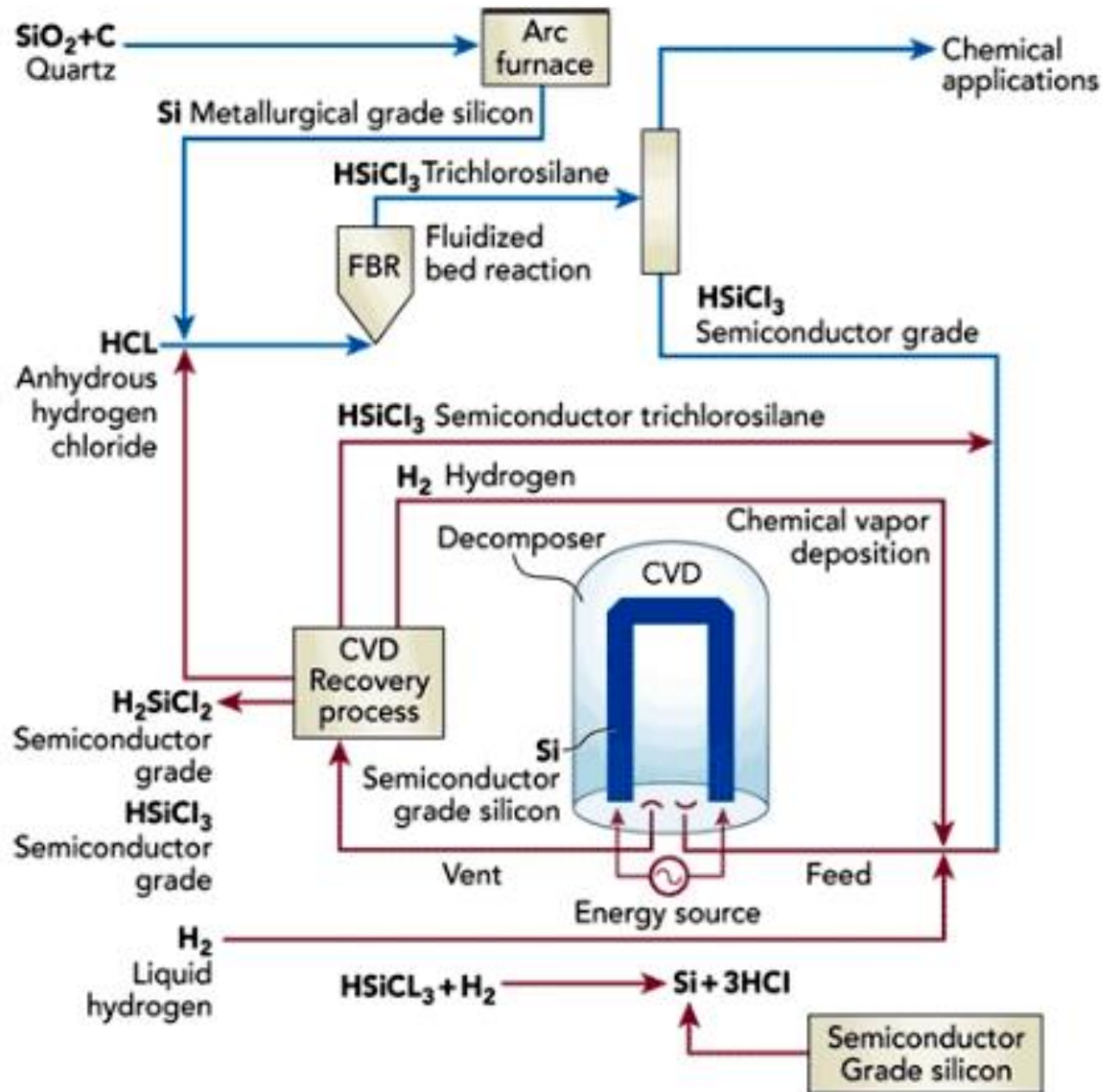
Tetracloreto de Silício



- Líquido Volátil sem Cor
- Ponto de Fusão: $-126.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-195.9\text{ }^{\circ}\text{F}$; $146.6\text{ }^{\circ}\text{K}$)
- Ponto de Ebulição: $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($89.2\text{ }^{\circ}\text{F}$; 304.9 K)



Processo de Fabricação do Si Grau Eletrônico



Processo Czochralski (CZ)

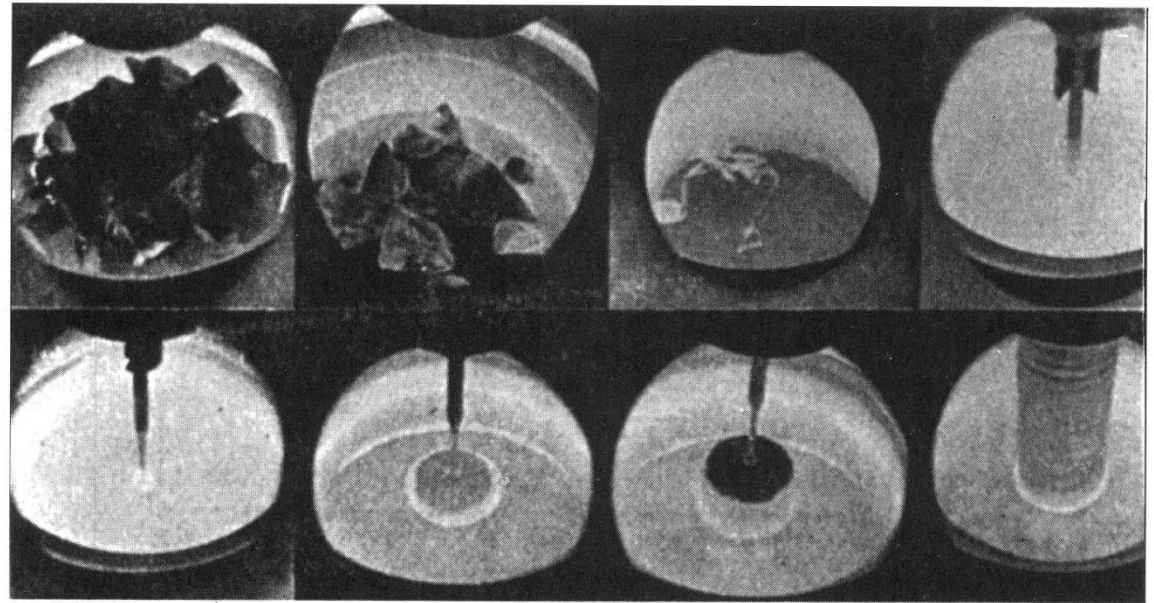
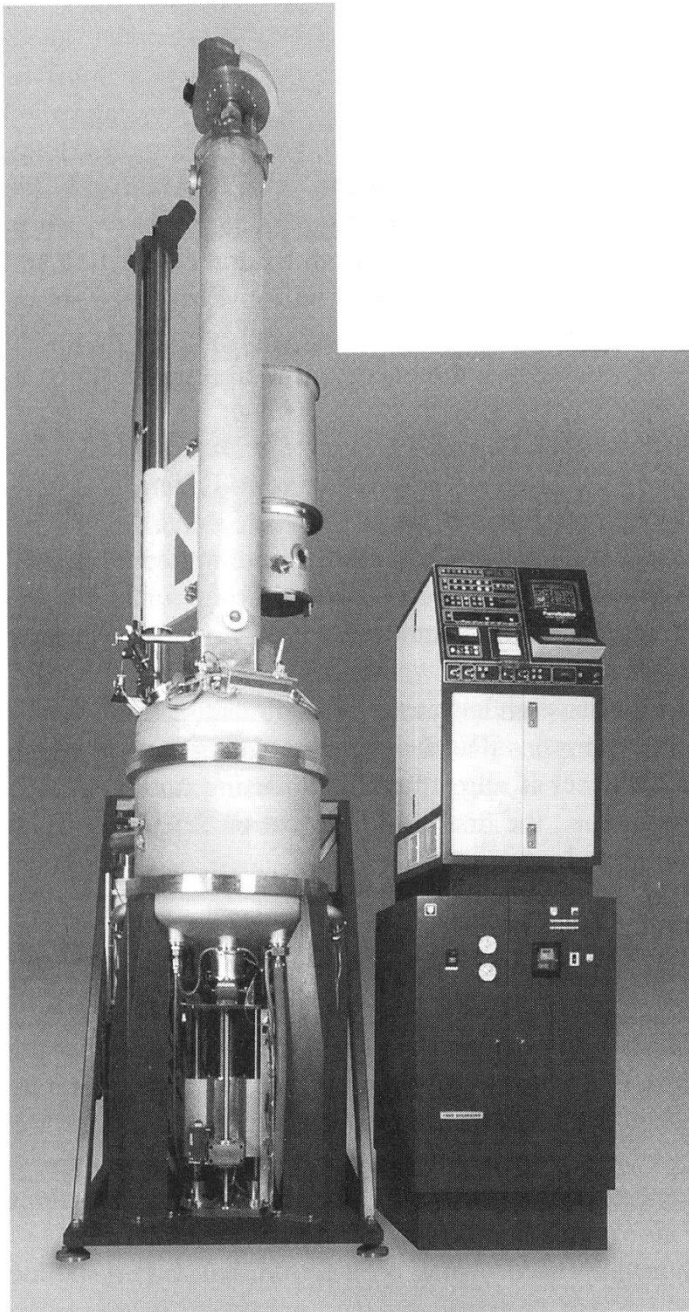
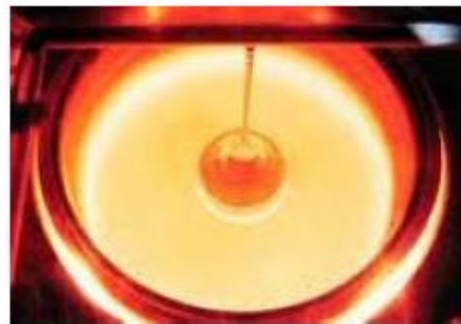


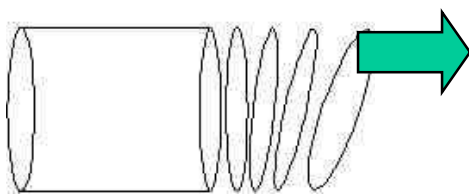
Figure 2-13 Time lapse sequence of boule being pulled from the melt in a Czochralski growth (reprinted with permission of Lattice Press).



Lingote (*Ingot ou Boule*) Monocristalino de Silício



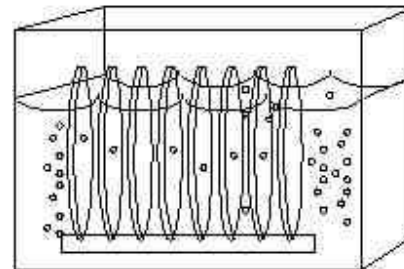
Slicing



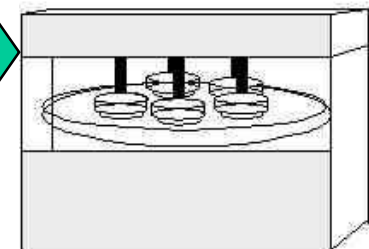
Lapping



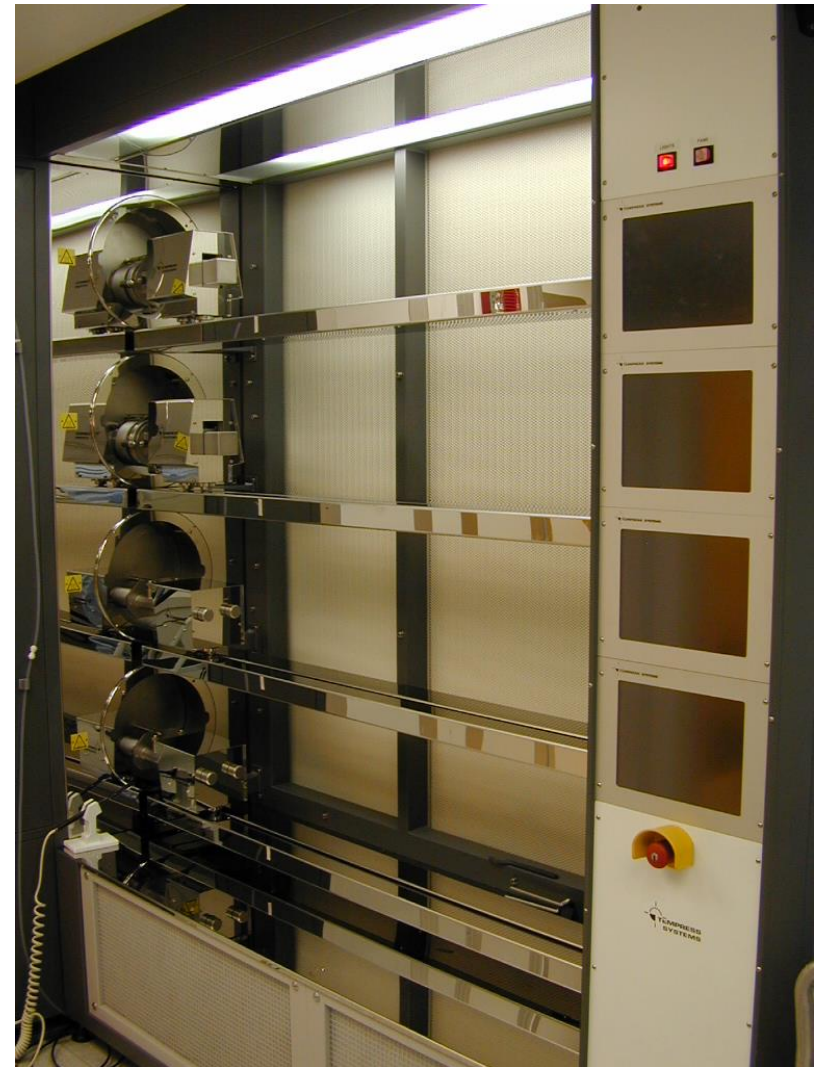
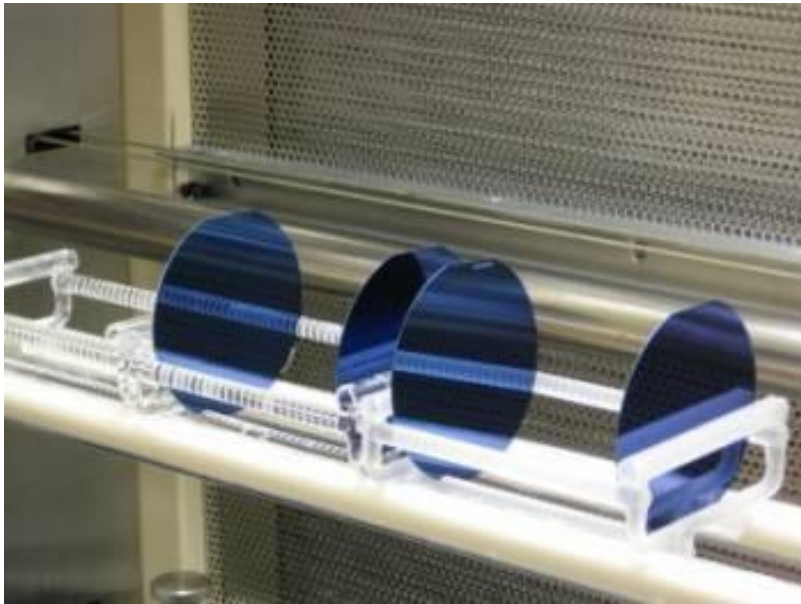
Etch



Polish



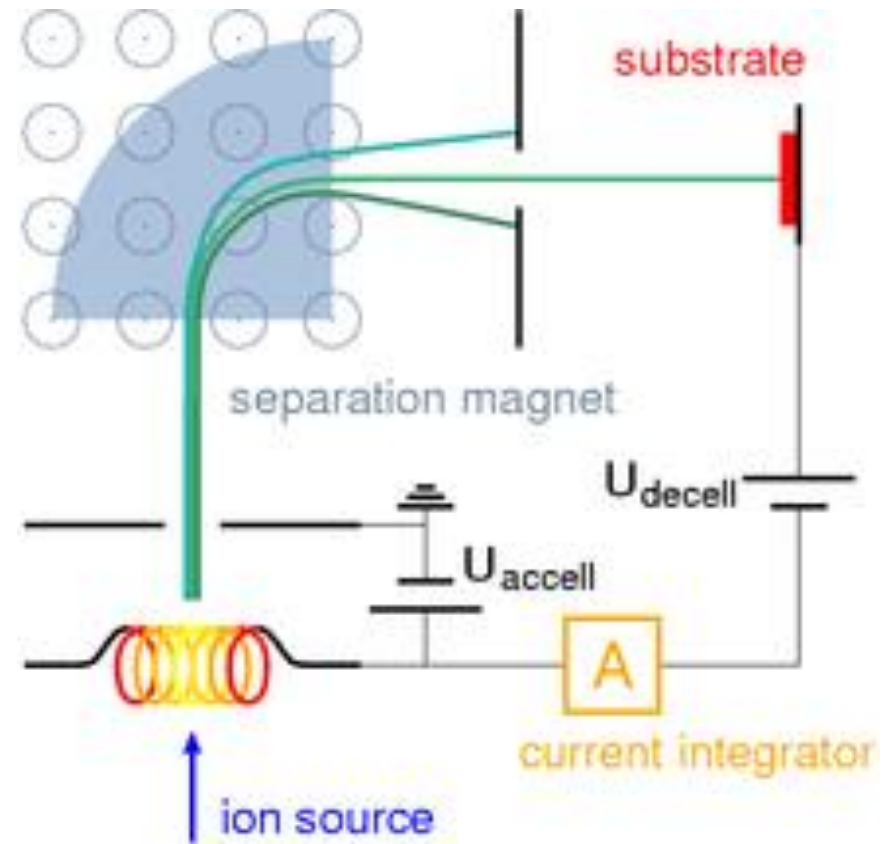
Fornos de Dopagem



Implantador de Íons



Ion Implanter
(Varian Associates)



Concentração de Portadores em Semicondutores Intrínsecos

$$n_0 = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T}$$

$$p_0 = N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T}$$

$$n_0 p_0 = N_c N_v e^{-E_g/k_B T}$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

$$n_0 = n_i e^{(E_F - E_i)/k_B T}$$

$$p_0 = n_i e^{(E_i - E_F)/k_B T}$$

Concentração de Portadores em Semicondutores Extrínsecos

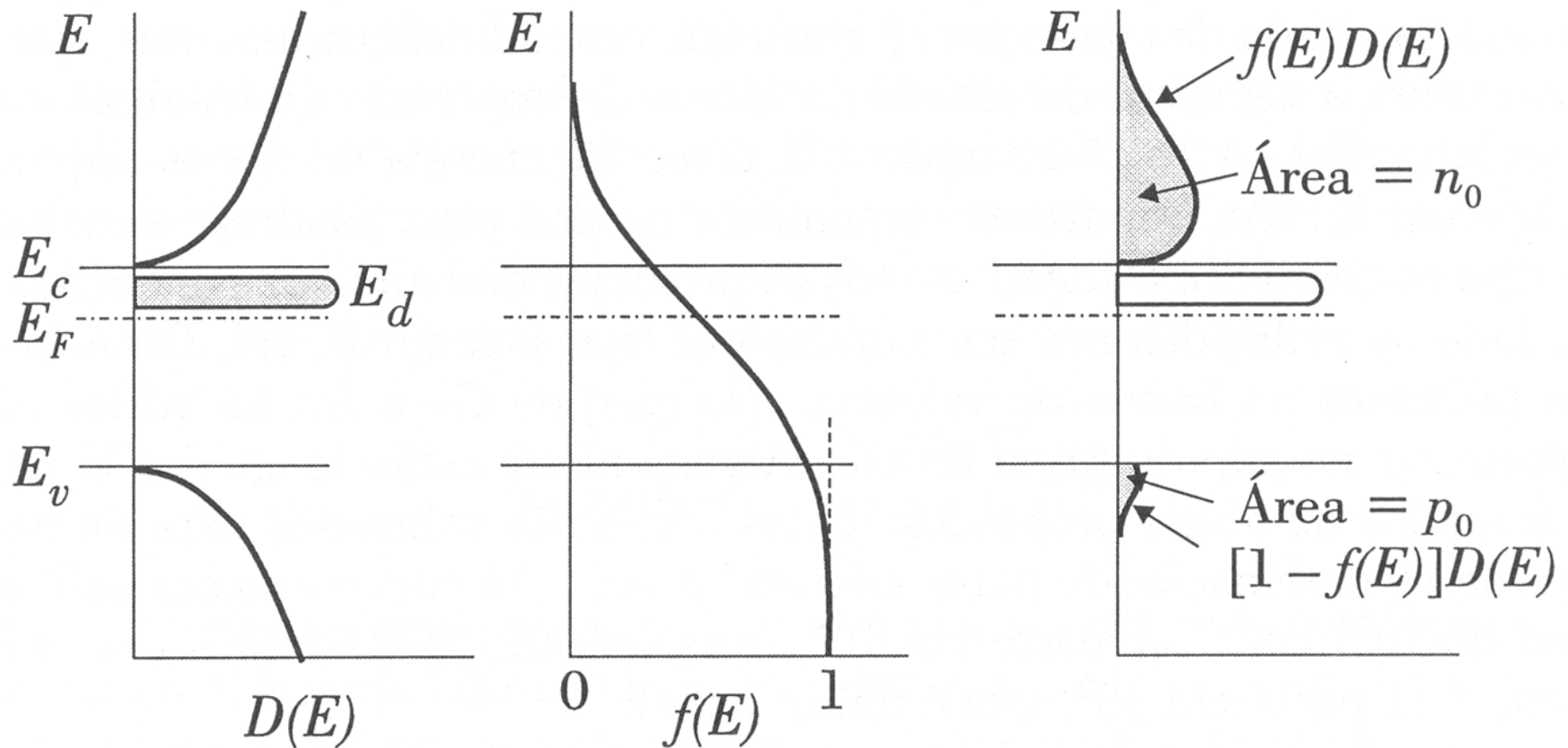


Figura 5.13: Ilustração gráfica do cálculo das concentrações de portadores num semiconductor tipo n .

Concentração de Portadores em Semicondutores Extrínsecos

		Majoritário	Minoritário
Tipo-n:	$(E_F - E_i)/k_B T \gg 1$	$n_0 \gg n_i$	$p_0 \ll n_i$
Tipo-p:	$(E_F - E_i)/k_B T \ll -1$	$p_0 \gg n_i$	$n_0 \ll n_i$

Neutralidade de cargas:

$$n_0 + N_a^- = p_0 + N_d^+$$

Exemplo: Semicondutor Tipo-n $N_d^+ \simeq N_d \quad \longrightarrow \quad n_0 \simeq p_0 + N_d$

$$n_0 = \frac{N_d}{2} + \left[\left(\frac{N_d}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2}$$

$$N_d \gg n_i$$



$$p_0 = -\frac{N_d}{2} + \left[\left(\frac{N_d}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2}$$

$$n_0 \simeq N_d$$

$$p_0 \simeq \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$E_F = E_c - k_B T \ln \frac{N_c}{N_d}$$

$$E_F = E_i + k_B T \ln \frac{N_d}{n_i}$$

Exemplo 5.4: Calcule as concentrações de elétrons e de buracos e a posição do nível de Fermi num cristal de silício dopado com 10^{16} cm^{-3} átomos de As, à temperatura ambiente $T \simeq 290 \text{ K}$.

Da Tabela 5.2 temos $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Usando (5.37) e (5.38),

$$n_0 \simeq N_d^+ \simeq N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad ,$$

$$p_0 \simeq \frac{n_i^2}{N_d} = 2,25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \quad .$$

Usando $k_B T \simeq 0,025 \text{ eV}$ e $N_c = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ em (5.39) vem

$$E_c - E_F = 0,025 \ln(2,8 \times 10^3) = 0,20 \text{ eV} \quad .$$

Comparando este resultado com a energia dada na Fig.(5.12), vê-se que neste caso o nível de Fermi está próximo e um pouco abaixo do nível da impureza de As no silício. Por outro lado com (5.40) obtemos

$$E_F = E_i + 0,34 \text{ eV} \quad .$$

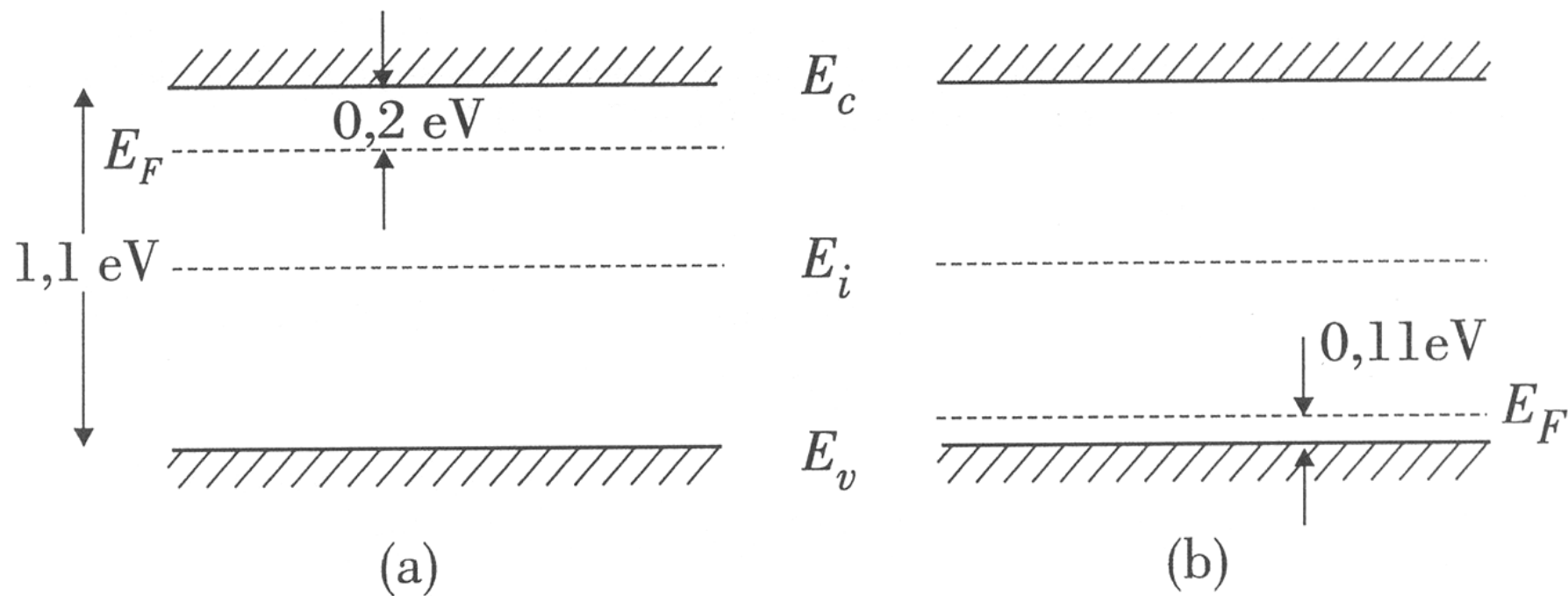


Figura 5.14: Diagrama de energia do silício: (a) Tipo n , com $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ impurezas doadoras; (b) Tipo p , com $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ impurezas aceitadoras.

Exemplo 5.5: Calcule as concentrações de elétrons e buracos e a posição do nível de Fermi num cristal de silício com $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ impurezas de Ga, a $T = 290 \text{ K}$.

Usando (5.41) e (5.42) vêm,

$$p_0 \simeq 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad ,$$

$$n_0 \simeq 2,25 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \quad .$$

Usando $k_B T = 0,025 \text{ eV}$ e $N_v = 1,02 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ em (5.43) temos

$$E_F = E_v + 0,025 \times \ln(1,02 \times 10^2)$$

$$E_F = E_v + 0,11 \text{ eV} \quad .$$

Faixas Extrínseca e Intrínseca

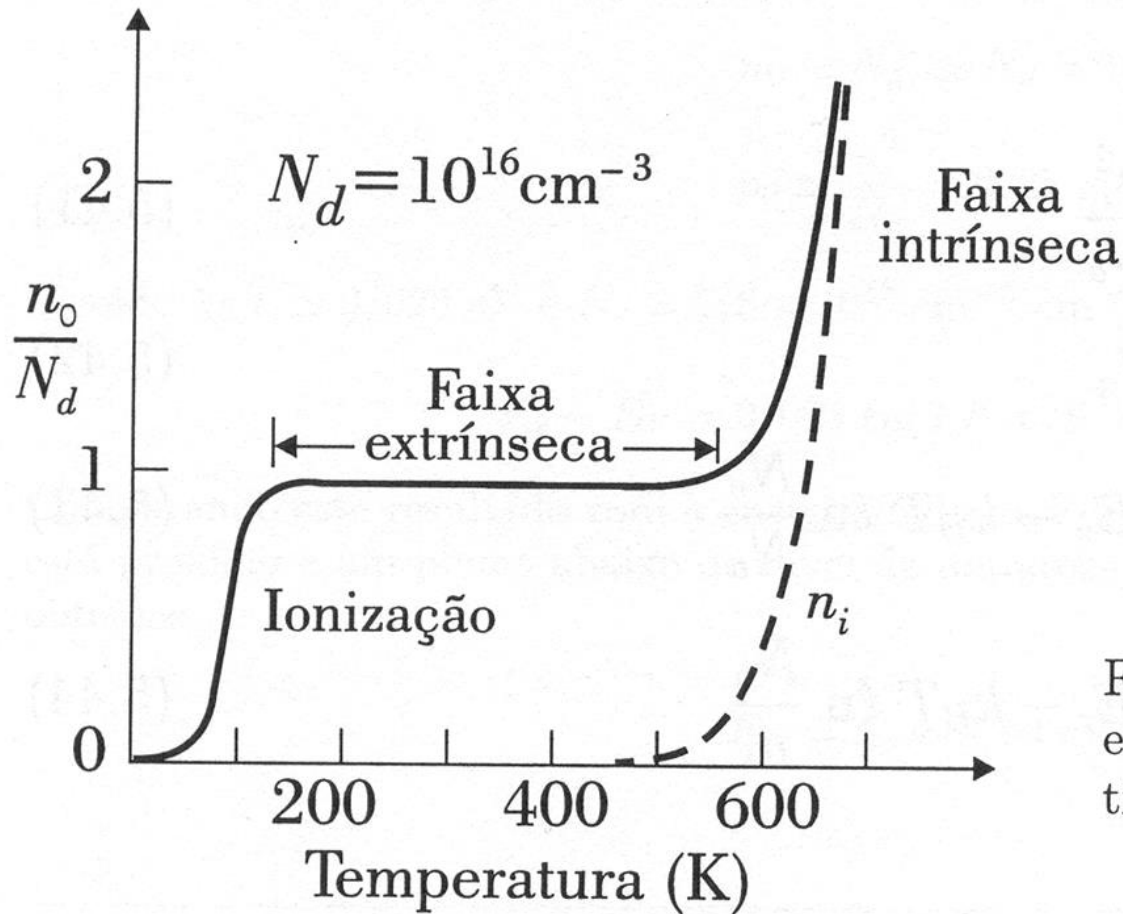
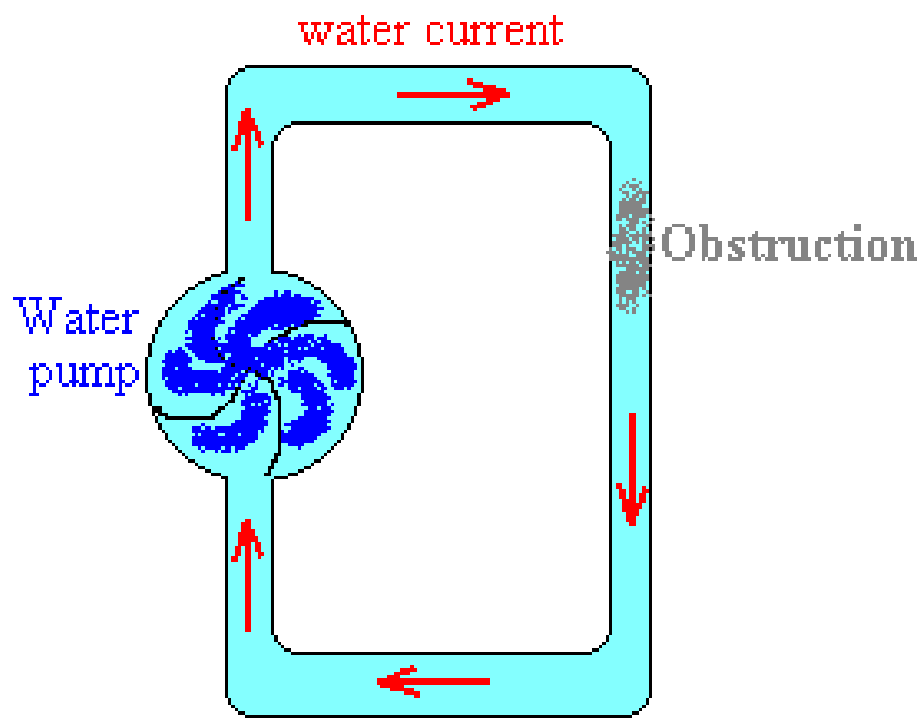
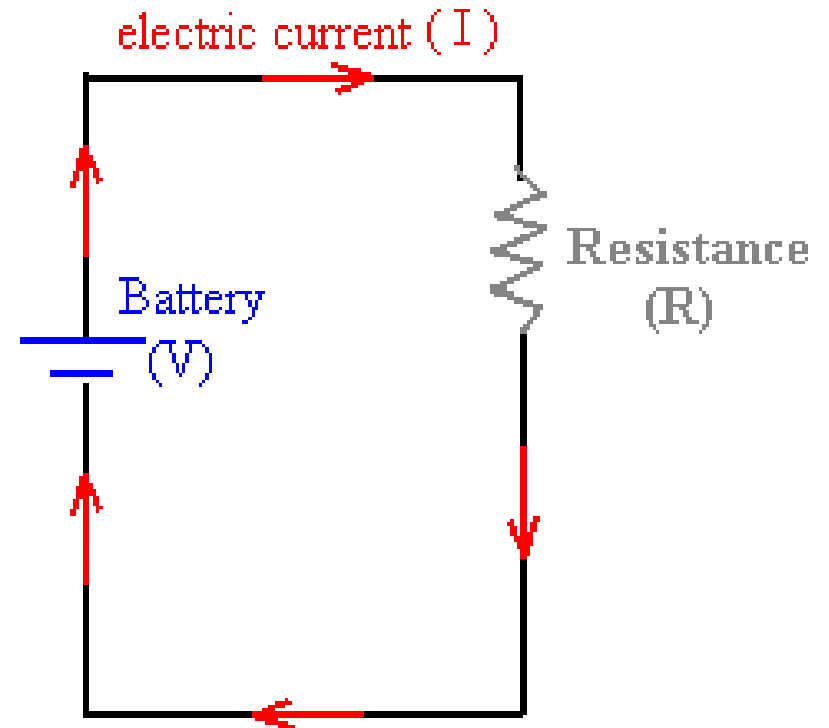


Figura 5.15: Concentração de elétrons em função da temperatura em silício tipo n com $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [Yang].

Analógia Hidráulica



Water Circuit



Electrical Circuit

Transporte de Portadores em Semicondutores Extrínsecos

Corrente de Condução ou Deriva

Elétrons:

$$J_n = \sigma_n \mathcal{E}$$

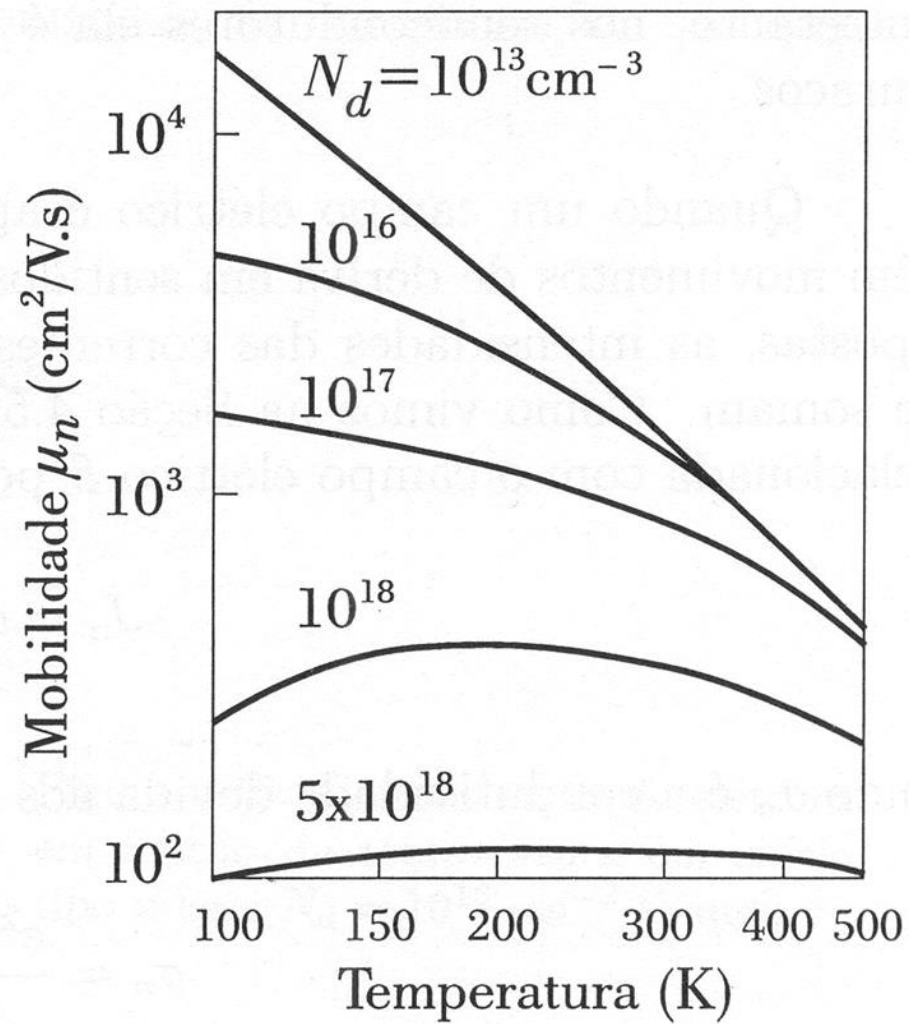
$$\sigma_n = \frac{e^2 n_0 \tau_e}{m_e^*}$$

$$\mu = \frac{v}{\mathcal{E}}$$

$$\sigma_n = e n_0 \mu_n$$

$$\mu_n = \frac{e \tau_e}{m_e^*}$$

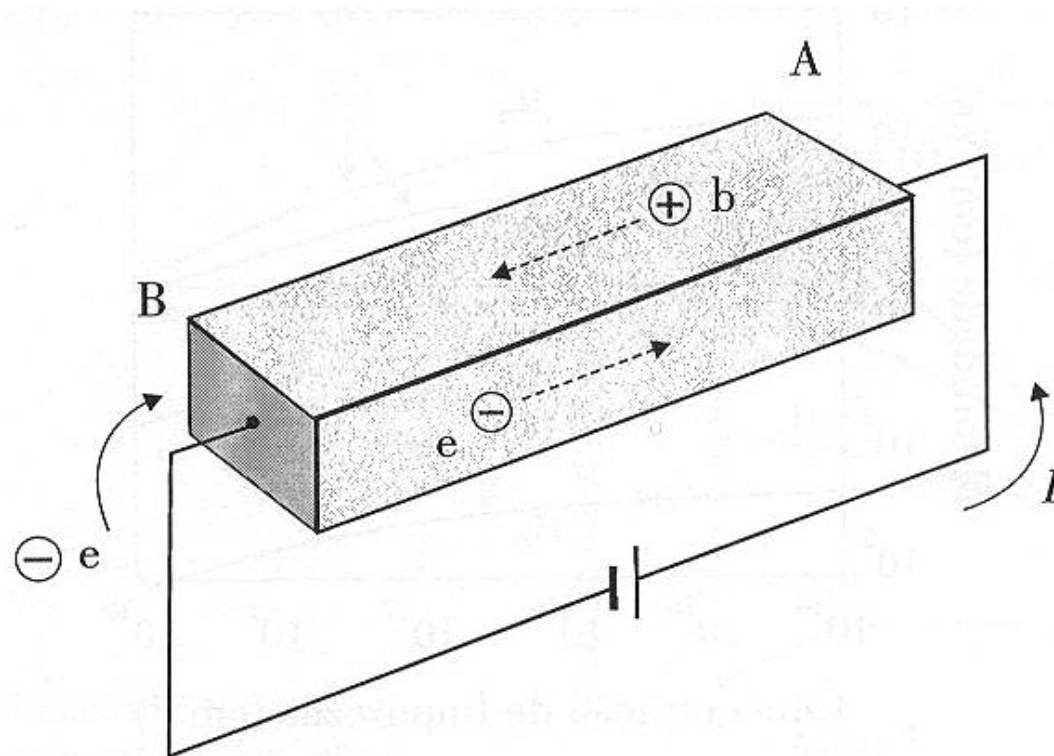
Figura 5.16: Mobilidade de elétrons em função da temperatura, em silício tipo n , para várias concentrações de impurezas N_d [Yang].



Lacunas: $J_p = \sigma_p \mathcal{E}$ $\sigma_p = e p_0 \mu_p = \frac{e^2 p_0 \tau_b}{m_b^*}$

Densidade Total de Corrente: $J = (\sigma_n + \sigma_p) \mathcal{E} = \sigma \mathcal{E}$

$$\sigma = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$$



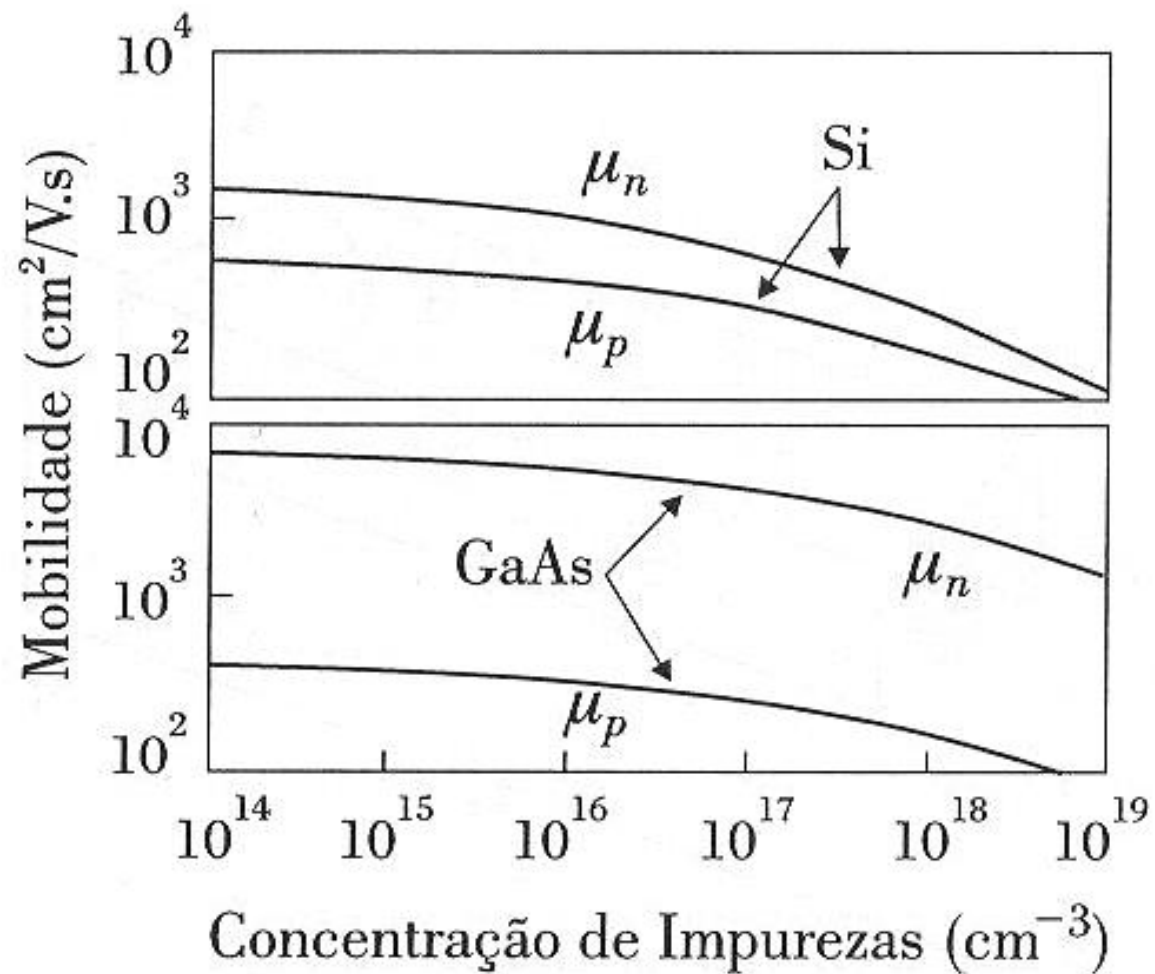


Figura 5.17: Mobilidade de elétrons e buracos em Si e GaAs em função da concentração de impurezas em $T = 300$ K [Sze].

Exemplo 5.6: Calcule a resistividade do silício em $T = 300$ K em duas situações: a) Intrínseco; b) Dopado com impurezas de As com concentração $N_d = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

a) No Si intrínseco a condutividade total é calculada com a Eq.(5.52), utilizando os parâmetros da Tabela 5.2

$$\begin{aligned}\sigma &= e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) = e n_i(\mu_n + \mu_p) \\ &= 1,6 \times 10^{-19} \times 1,5 \times 10^{10} (1350 + 480) \text{ C cm}^{-3} \text{ cm}^2/\text{V s} \\ &= 4,39 \times 10^{-6} (\Omega \text{ cm})^{-1}\end{aligned}$$

A resistividade é o inverso da condutividade, logo,

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{4,39 \times 10^{-6}} = 2,28 \times 10^5 \Omega \text{ cm}.$$

b) No Si com impurezas doadoras com $N_d \gg n_i$, a concentração de elétrons é dada por (5.37),

$$n_0 \simeq N_d = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}.$$

Como $p_0 \ll n_0$, a condutividade é $\sigma \simeq e n_0 \mu_n$, sendo μ_n dado pelo gráfico da Fig.5.17.

$$\sigma \simeq 1,6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{16} \times 10^3 = 3,2 (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

Logo,

$$\rho = \frac{1}{3,2} = 0,31 \Omega \text{ cm}$$

Fig-5.17

Veja que uma dopagem relativamente fraca (1 parte em 10^6) aumenta a resistividade do silício em quatro ordens de grandeza.