

Onde fica o potencial químico?

- Densidades de portadores tipo p e n:

$$n = N_c(T) e^{-\frac{E_c - \mu}{k_B T}} \quad p = N_v(T) e^{-\frac{\mu - E_v}{k_B T}}$$

- No caso de uma banda neutra, temos $n=p$

$$n = p \Rightarrow \frac{N_v}{N_c} = e^{\frac{2\mu - (E_c + E_v)}{k_B T}}$$

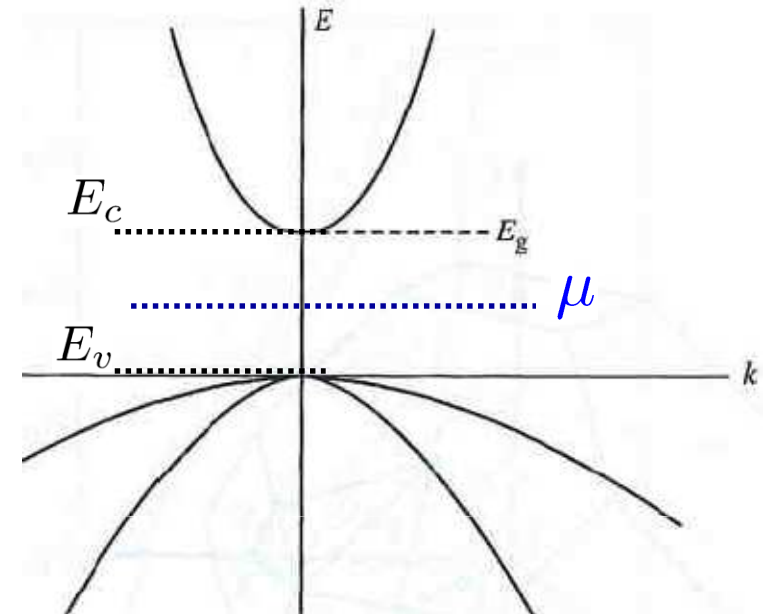
- Invertendo, obtemos o potencial químico:

$$\mu(T) = \frac{1}{2} (E_c + E_v) + (k_B T) \frac{3}{4} \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$$

$$\frac{N_v}{N_c} = \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)^{\frac{3}{2}}$$

A $T=0$, o potencial químico fica no centro da banda!

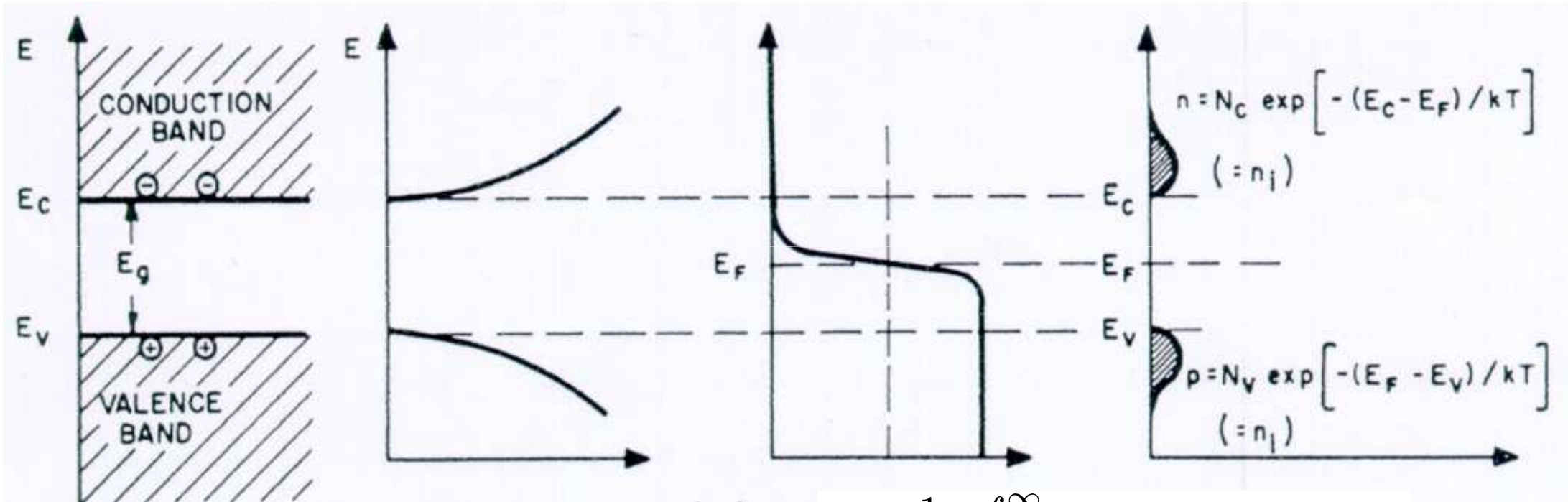
$$\mu(0) = \frac{1}{2} (E_c + E_v)$$



Onde fica o potencial químico? ($n=p$)

$$\rho_{3D}(\varepsilon)$$

$$f_D(\varepsilon, T, \mu)$$



$$n = \frac{1}{V_r} \int_{E_c}^{\infty} \rho_{3D}(\varepsilon) f_D(\varepsilon, T, \mu) d\varepsilon$$

$$p = \frac{1}{V_r} \int_{-\infty}^{E_v} \rho_{3D}(\varepsilon) [1 - f_D(\varepsilon, T, \mu)] d\varepsilon$$

Portadores intrínsecos e extrínsecos.

- Se apenas excitações térmicas criam elétrons e buracos ($n=p$), temos:

$$n_i = W^{\frac{1}{2}} T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

- Esses são portadores *intrínsecos*.

- Portadores vindos de impurezas e defeitos (átomos *doadores* e *aceitadores* de elétrons) são portadores *extrínsecos*.

- Se o número de impurezas for baixo, μ não se altera. Logo, temos simplesmente:

$$n - p = N_D - N_A$$

N_A : densidade de aceitadores

N_D : densidade de doadores

n_i : dependência exponencial com $E_g/k_B T$

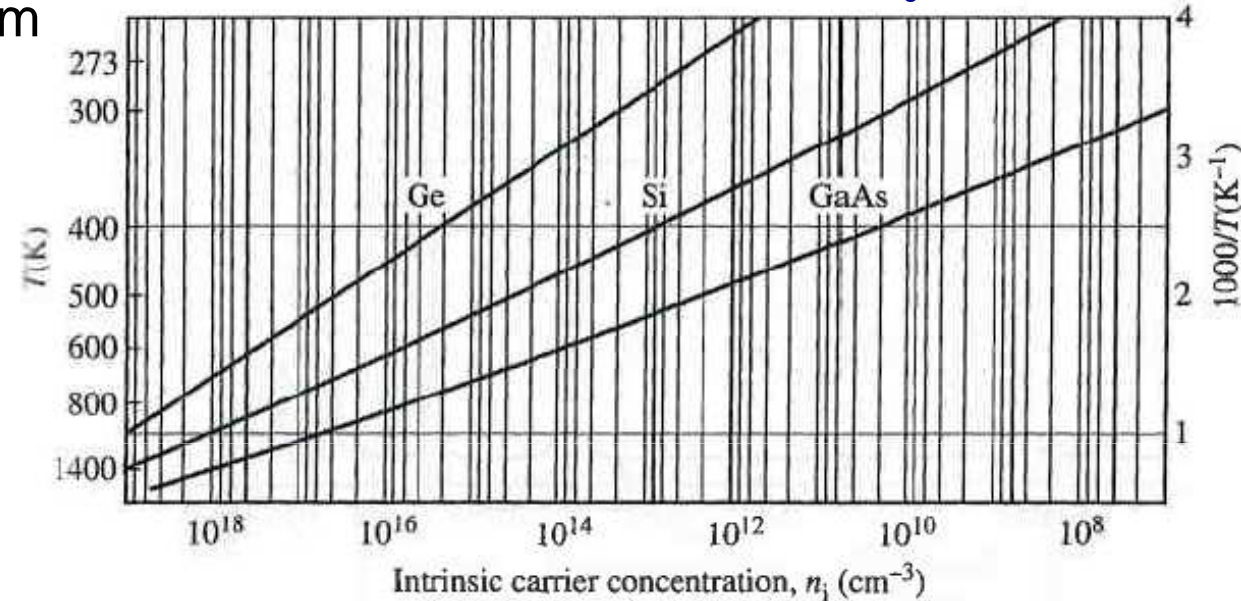
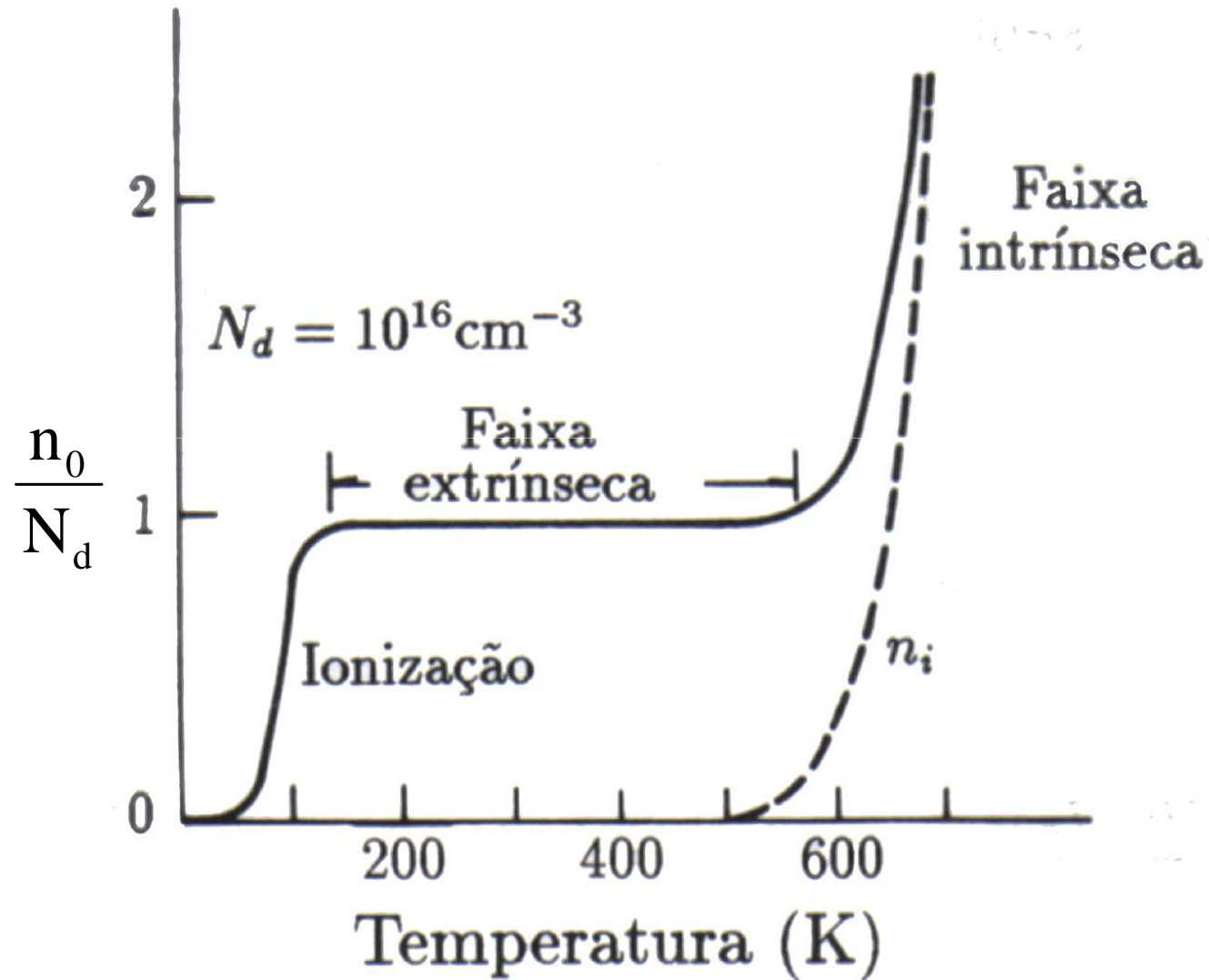


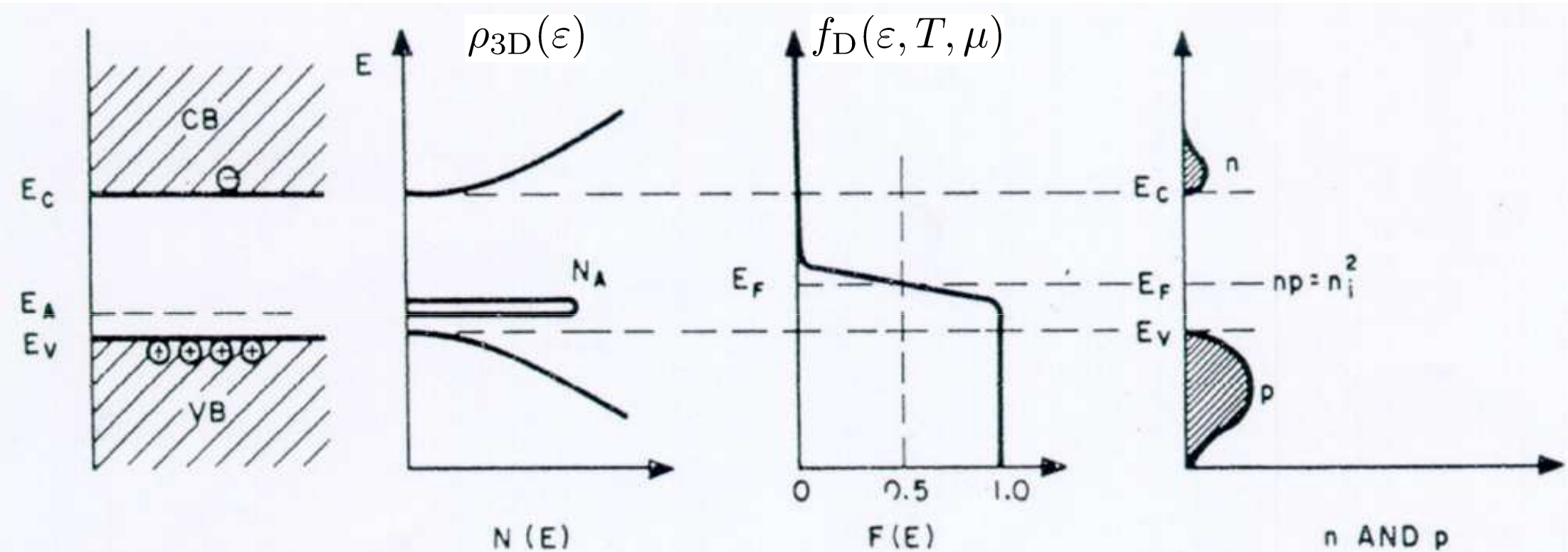
Fig. 6.10 Calculated intrinsic carrier densities n_i versus temperature in Ge ($E_g = 0.74$ eV), Si ($E_g = 1.17$ eV) and GaAs ($E_g = 1.52$ eV).

Quem ganha? Extrínseco ou intrínseco?



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

Onde fica o potencial químico ? ($n < p$)

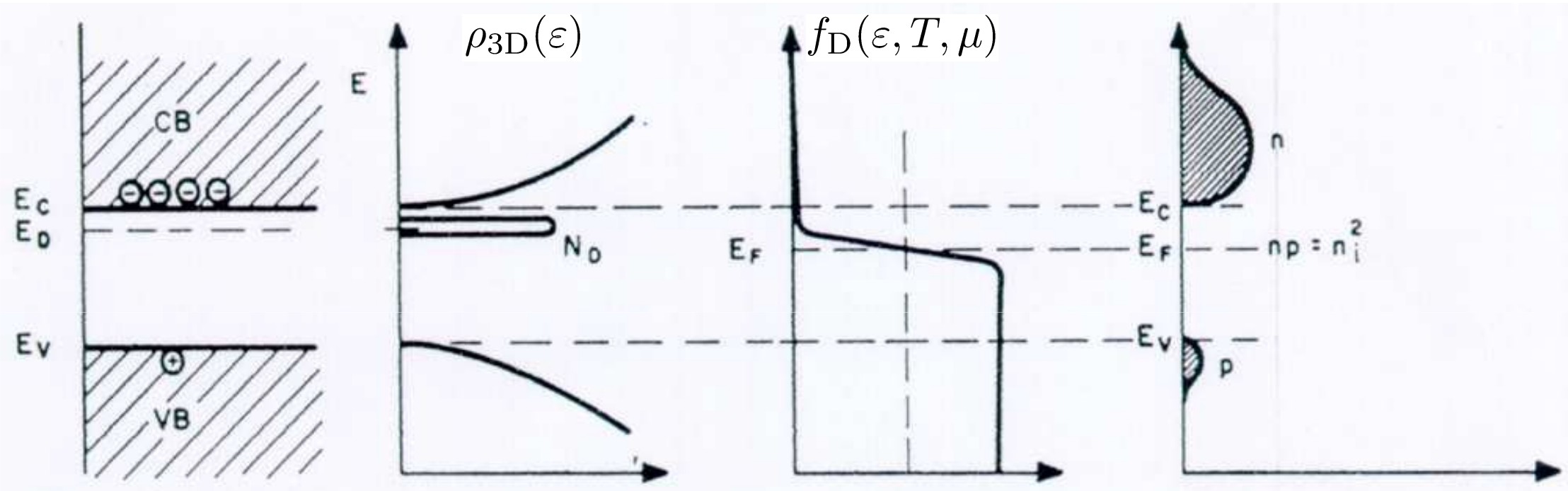


$$n - p = N_D - N_A$$

$$n = \frac{1}{V_r} \int_{E_c}^{\infty} \rho_{3D}(\epsilon) f_D(\epsilon, T, \mu) d\epsilon$$

$$p = \frac{1}{V_r} \int_{-\infty}^{E_v} \rho_{3D}(\epsilon) [1 - f_D(\epsilon, T, \mu)] d\epsilon$$

Onde fica o potencial químico? ($n > p$)



$$n - p = N_D - N_A$$

$$n = \frac{1}{V_r} \int_{E_c}^{\infty} \rho_{3D}(\epsilon) f_D(\epsilon, T, \mu) d\epsilon$$

$$p = \frac{1}{V_r} \int_{-\infty}^{E_v} \rho_{3D}(\epsilon) [1 - f_D(\epsilon, T, \mu)] d\epsilon$$

Condutividade elétrica em semicondutores.

- Lei de “ação de massa”: $np = T^3 W e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$ $W = \frac{1}{2\pi^3 \hbar^6} (m_c^* m_h^*)^{\frac{3}{2}} k_B^3$
- Densidades: “doadores e aceitadores”: $n - p = N_D - N_A$
- Mobilidade:

{	$\mu_e \equiv \frac{\langle v_e \rangle}{(-E)}$	Elétrons
	$\mu_h \equiv \frac{\langle v_h \rangle}{E}$	Buracos
- Densidade de corrente:

Elétrons	Buracos
$J = (-e)n\langle v_e \rangle + ep\langle v_h \rangle$	
- Aproximação de tempo de relaxação (“Drude”): $\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*}$ $\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*}$
- Condutividade : $J = \sigma E \Rightarrow \sigma = en\mu_e + ep\mu_h$

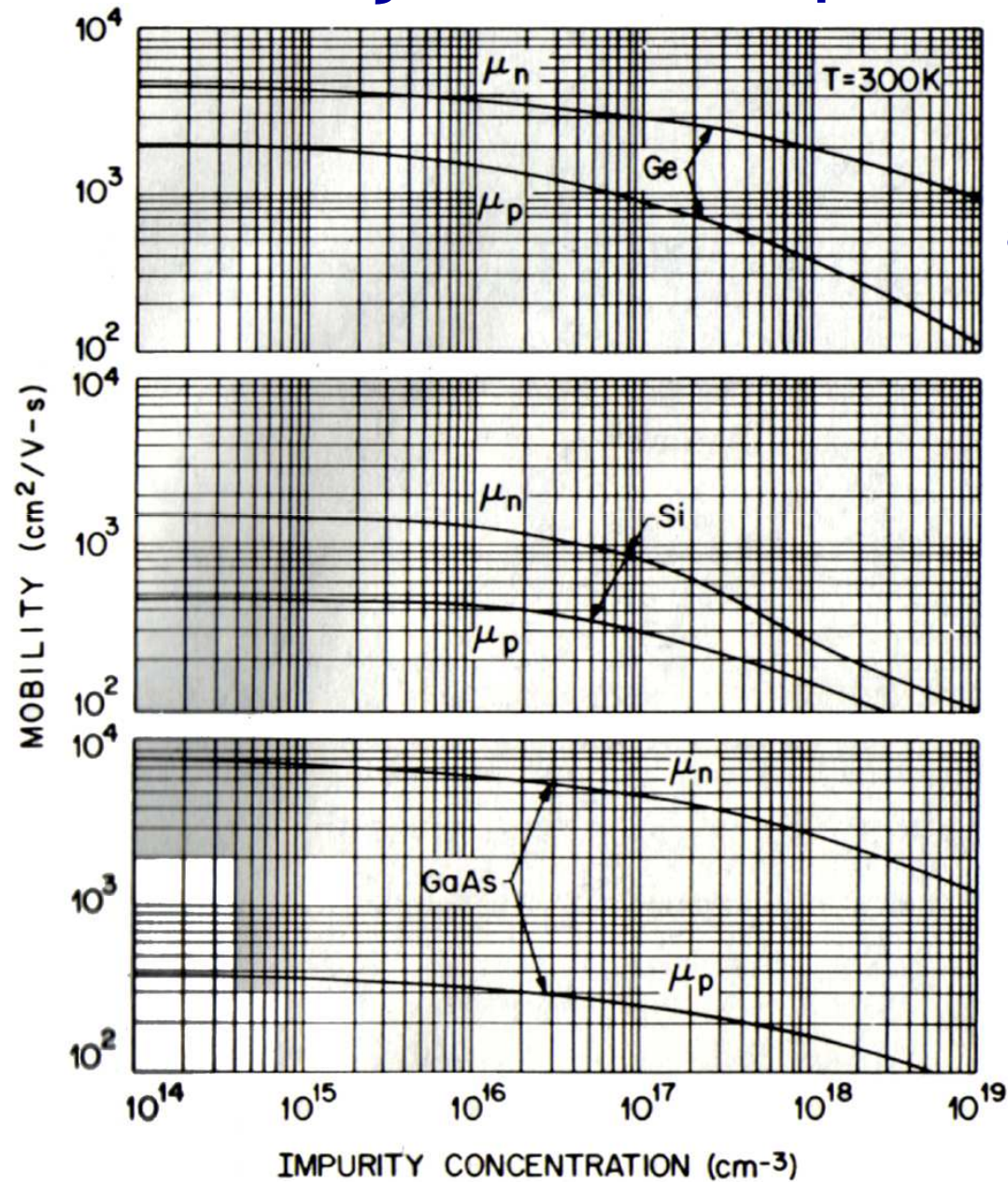
Elétrons	Buracos
----------	---------
- Resistividade (logitudinal): $\rho_{xx} = \frac{E_x}{J_x} (= \frac{1}{\sigma})$

Dados de alguns semicondutores.

Grandeza	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>
Átomos ou moléculas ($10^{22}/\text{cm}^3$)	4,42	5,0	2,21
Parâmetro da rede a (Å)	5,658	5,431	5,654
Constante dielétrica ϵ/ϵ_0	16,0	11,8	10,9
Gap de energia E_g (eV)	0,68	1,12	1,43
Concentração intrínseca n_i (cm^{-3})	$2,5 \times 10^{13}$	$1,5 \times 10^{10}$	10^7
Concentração efetiva N_c (cm^{-3})	$1,04 \times 10^{19}$	$2,8 \times 10^{19}$	$4,7 \times 10^{17}$
Concentração efetiva N_v (cm^{-3})	$6,1 \times 10^{18}$	$1,02 \times 10^{19}$	$7,0 \times 10^{18}$
Mobilidade μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	3900	1350	8600
Mobilidade μ_p ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1900	480	400
Coef. difusão D_n (cm^2/s)	100	35	220
Coef. difusão D_p (cm^2/s)	50	12,5	10

Tabela 5.2: Valores de grandezas importantes em *Ge*, *Si* e *GaAs* a $T = 300$ K [Sze e Streetman].

Mobilidade em função da temperatura



Drift mobility of Ge, Si, and GaAs at 300 K versus impurity concentration.

Fonte: Notas de aula do prof. Adalberto Fazzio