Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

DATA / /

GRAUS 1 2 3 4 5

Aluno(a): Aula Teórica #1

Disciplina: EEL315 — Eletrônica I

Turma:

Professor(a): José Gabriel

(1) Física Básica de Semicondutores

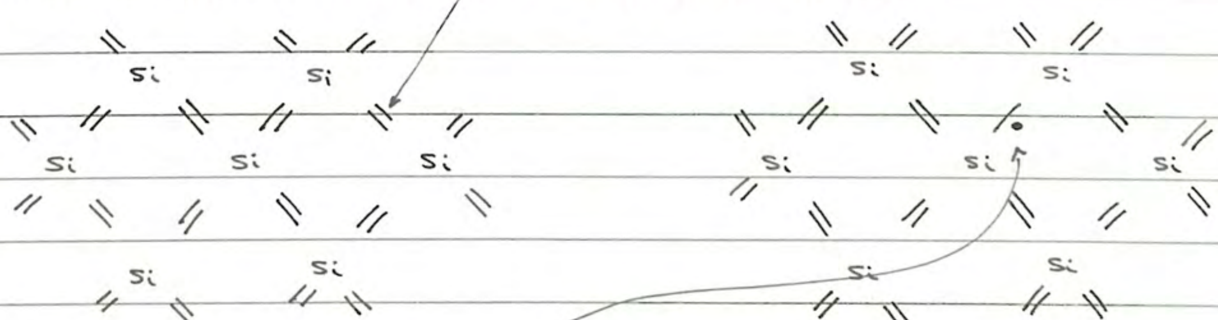
Portadores de Carga		Estrutura da Junção p.n
Dopagem	→	Polarização Reversa e Direta
Transporte		Características I/V
		Modelos para Circuitos

(1.1) Materiais Semicondutores :

III	IV	V
B	C	
Al	Si	P
Ga	Ge	As

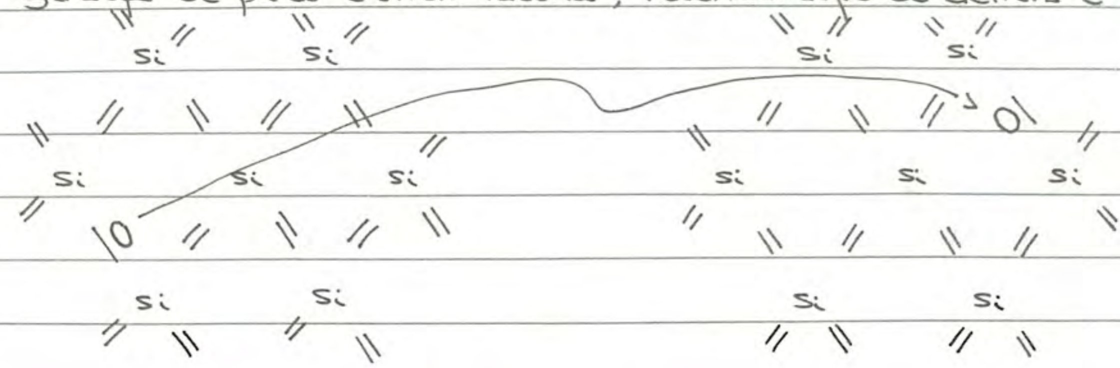
(1.1.1) Portadores de Carga

Cristais de silício e ligações covalentes : compartilhamento dos quatro elétrons da camada de valência do átomo de silício.



e^- (elétron livre) : o elétron adquire energia térmica (em temperaturas maiores que 0 K — zero kelvin), ocasionalmente escapando das ligações e funcionando como portador de carga.

Lacunas: geração de pares elétron-lacuna; recombinação de elétrons e lacunas.



Elétrons em movimento da direita para a esquerda $\longrightarrow$ lacunas em movimento da esquerda para a direita.

"Gap" de Energia (ou "Energia de Bandgap"): energia mínima para desalojar um elétron de uma ligação covalente.

Para o silício: $\boxed{E_g = 1.12 \text{ eV}}$, onde $\boxed{1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}$

Para o diamante: $\boxed{E_g = 5.47 \text{ eV}}$

Semicondutores: E_g de 1.0 eV a 1.5 eV

Quantidade de elétrons livres, por unidade de volume, à temperatura T:

$$\boxed{n_i = 5.2 \times 10^{15} \, T^{3/2} \, e^{\frac{-E_g}{2kT}} \text{ elétrons/cm}^3}, \text{ onde } \boxed{k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}}$$

(constante de Boltzmann)

Exemplo: $E_g = 1.12$ eV

Se $T = 300$ K, então $\boxed{n_i = 1.08 \times 10^{10} \text{ elétrons/cm}^3}$

Se $T = 600$ K, então $n_i = 1.54 \times 10^{15}$ elétrons/cm^3

Obs.: O silício tem 5×10^{22} atomos/cm^3

Exemplo: $E_g = 1.5$ eV

Se $T = 300$ K, então $n_i = 6.97 \times 10^{6}$ elétrons/cm^3

Se $T = 600$ K, então $n_i = 3.88 \times 10^{13}$ elétrons/cm^3

1.1.2. Dopagem

É a alteração das densidades dos portadores de carga.

Semicondutor <u>Intrínseco</u>: o cristal de silício puro tem "resistência" (resistividade) tipicamente muito alta.

Densidade de elétrons: n

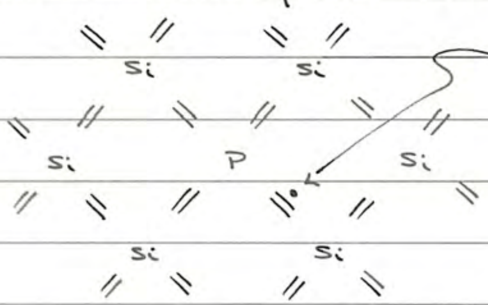
Densidade de lacunas: p

Temos <u>sempre</u>: $\boxed{np = n_i^2}$

(semicondutor intrínseco ou não)

Para o semicondutor intrínseco, temos densidade de elétrons = densidade de lacunas: $n = p = n_i$

<u>Doadores</u>: o átomo de <u>fósforo</u> contém cinco elétrons em sua camada de valência. Considere a inserção de átomos de fósforo no cristal de silício:



o fósforo é "doador" de elétron.

Como resultado da dopagem, temos um semicondutor "<u>extrínseco</u>". No caso da dopagem com doadores, temos um semicondutor "<u>tipo n</u>". Continua sendo verdade que $np = n_i^2$.

À medida em que mais e mais dopantes "do tipo n" (doadores) vão sendo inseridos no cristal, a densidade p vai caindo muito abaixo do seu nível intrínseco n_i.

<u>Exemplo</u>: Adicionando 10^{16} átomos/cm^3, temos $n = 10^{16}$ elétrons/cm^3 (dopagens típicas são de 10^{15} a 10^{18} átomos/cm^3).

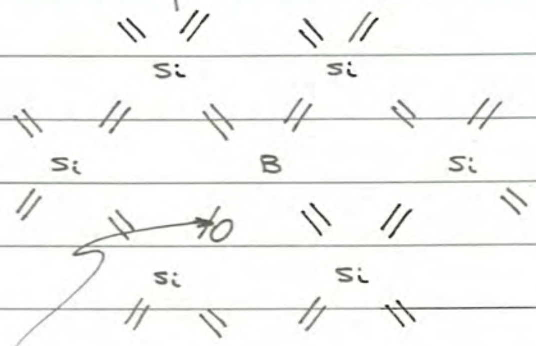
Então, $p = \dfrac{n_i^2}{n} = 1.17 \times 10^4$ lacunas/cm^3

Exemplo: Adicionando átomos de modo que $n = 10^{13}$ elétrons/cm^3, temos

$$p = \frac{n_i^2}{n} = 1.17 \times 10^7 \text{ lacunas/cm}^3.$$

No semicondutor tipo n, os elétrons são portadores "majoritários" e as lacunas são portadores "minoritários".

Aceitadores: o átomo de boro contém três elétrons em sua camada de valência. Considere a inserção de átomos de boro no cristal de silício:



O boro é "aceitador" de elétron. Tem-se neste caso um semicondutor "tipo p". As lacunas são, no semicondutor tipo p, os portadores majoritários de carga.

Resumo dos portadores, por material:

nº de átomos doadores/cm^3

Material tipo n: portadores majoritários: $n \simeq N_D \gg n_i$

portadores minoritários: $p \simeq n_i^2 / N_D$

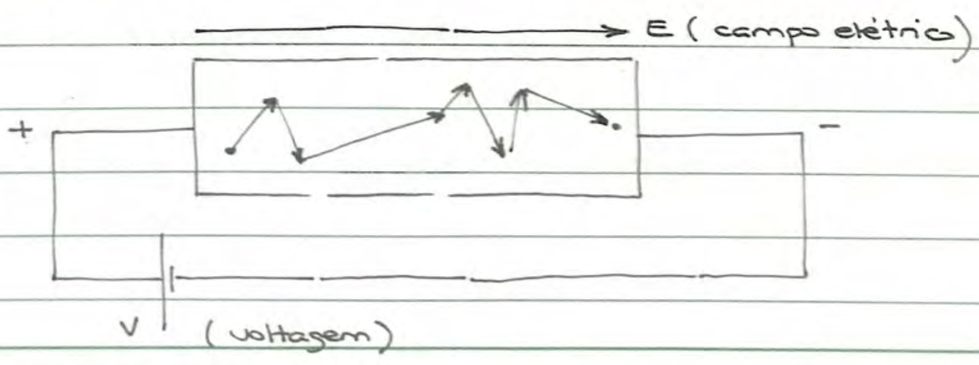
nº de átomos aceitadores/cm^3

Material tipo p: portadores majoritários: $p \simeq N_A \gg n_i$

portadores minoritários: $n \simeq n_i^2 / N_A$

1.1.3 Transporte de Portadores

Deriva: campo elétrico aplicado a um material $\longrightarrow$ corrente



Velocidade constante : $v = \mu E$

Mobilidade dos elétrons no silício : Mobilidade das lacunas no silício :

$$\boxed{\begin{array}{l} \mu_n = 1350 \ cm^2/(Vs) \\ \mu_p = 480 \ cm^2/(Vs) \end{array}}$$

Vetores (com indicação da velocidade dos portadores) : $v_e = -\mu_n E$ (elétron)

$v_h = \mu_p E$ (lacuna)

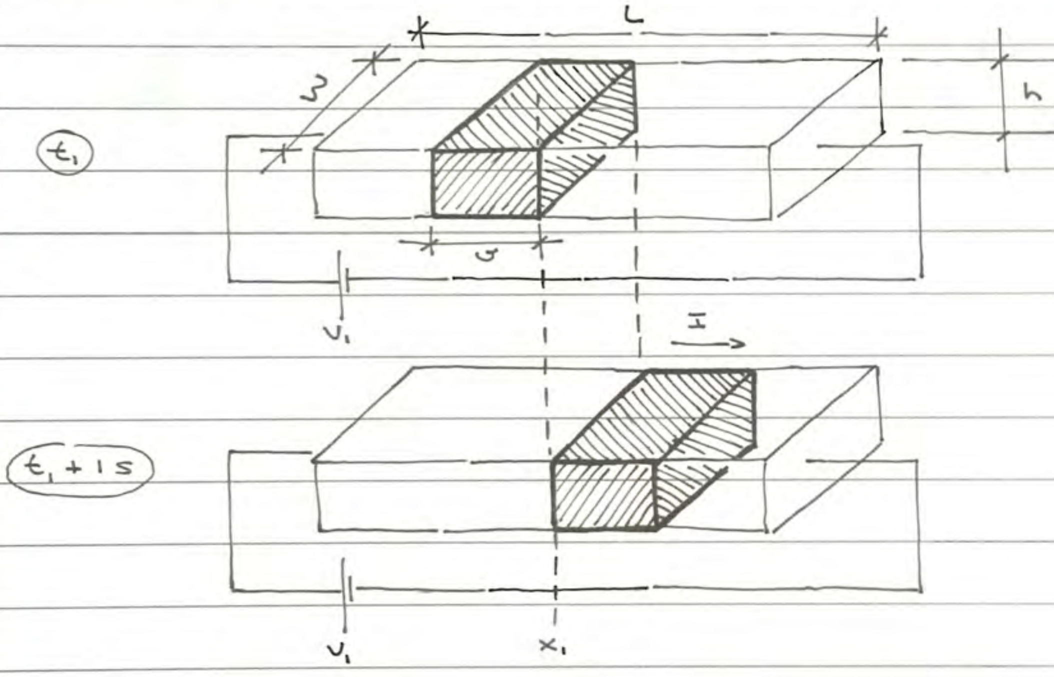
Exemplo: 1 V aplicado a 1 μm de silício tipo n.

Então, $E = V/L = 1V / (10^{-4} cm) = 10000 \ V/cm$ e

$v = \mu_n E = 1.35 \times 10^7 \ cm/s$

$\Delta t = 1 \mu m / (1.35 \times 10^7 cm/s) = 7.4 \ ps$ ⟶ intervalo de tempo que um elétron leva para atravessar o material.

Cálculo da corrente de deriva a partir da velocidade dos portadores :



$q = 1.6 \times 10^{-19} C$

Corrente I calculada em termos da densidade de carga : $I = -vWhnq$

Densidade de corrente (é corrente por área transversal, em A/cm^2) :

$J_n = I/(Wh) \Rightarrow J_n = \mu_n E n q$

("corrente" = "velocidade da carga" x "densidade da carga")

Considerando portadores n e portadores p, temos : $J_{total} = \mu_n E n q + \mu_p E p q$

$$\boxed{J_{total} = q(\mu_n n + \mu_p p) E}$$ (densidade da corrente de deriva)

<u>Exemplo</u>: $\mu_n n = \mu_p p$ (neste caso, as contribuições dos portadores n e dos portadores p para a corrente de deriva são iguais).

Então $n/p = \mu_p/\mu_n$.

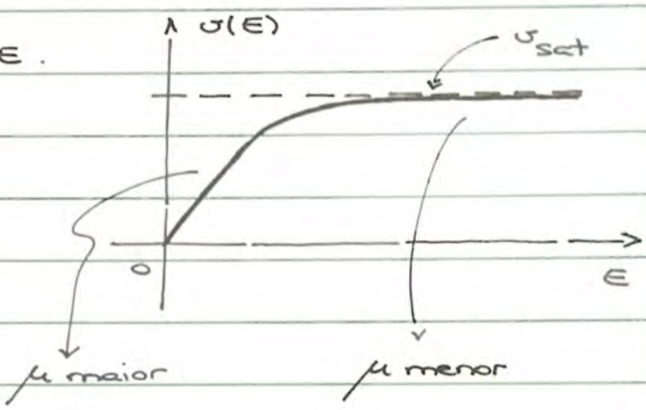
Usando $np = n_i^2$, obtemos: $p = n_i\sqrt{\mu_n/\mu_p}$ e $n = n_i\sqrt{\mu_p/\mu_n}$

Se $\mu_n/\mu_p = 2.81$ (silício), então: $p = 1.68\, n_i$ e $n = 0.596\, n_i$

Trata-se de uma dopagem muito leve.

<u>Exemplo</u>: Se $\mu_n n = 2\mu_p p$, então $p = 1.19\, n_i$ e $n = 0.844\, n_i$

<u>Saturação de velocidade</u>: μ depende de E.



$$\mu = \frac{\mu_0}{1+bE}$$

$$\lim_{E\to\infty} v = \lim_{E\to\infty} \frac{\mu_0 E}{1+bE} = v_{sat}$$

Então: $\mu_0/b = v_{sat} \Rightarrow b = \mu_0/v_{sat}$

$$\boxed{v = \frac{\mu_0}{1+\frac{\mu_0}{v_{sat}}\cdot E}\cdot E}$$

<u>Exemplo</u>: $L = 0.2\,\mu m$; $V = 1\,V$; $v_{sat} = 10^7\, cm/s$; $\mu_0 = 1350\, cm^2/(Vs)$

Então: $E = V/L = 50\, kV/cm$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1+\frac{\mu_0 E}{v_{sat}}} = \frac{\mu_0}{7.75} = 174\, cm^2/(Vs)$$

<u>Obs.</u>: voltagem $V = 16.5\, mV$ já é suficiente para que a mobilidade seja reduzida em 10%: para que $\mu = 0.9\mu_0$, temos $0.9\mu_0 = \frac{\mu_0}{1+\frac{\mu_0 E}{v_{sat}}}$,

então $E = \frac{1}{9}\cdot\frac{v_{sat}}{\mu_0} = 823\, V/cm$. $(V = E.L)$

$V = E.L = (823\, V/cm)\times(0.2\times10^{-4}\, cm) = 16.5\, mV$.

Isso significa que dispositivos semicondutores modernos ($L \simeq 200\, nm$) operam com saturação de velocidade considerável.

<u>Exemplo</u>: Para que $\mu = 0.8\mu_0$, temos $V = 37\, mV$.