

# **EE530 Eletrônica Básica I**

**Prof. Fabiano Fruett**

## **2A - Física Básica dos Semicondutores**

- Estrutura cristalina
  - Modelos de banda de energia
- Condutores
- Isolantes
- Semicondutores
  - Semicondutor intrínseco e dopado
  - Concentração de portadores
- Geração e recombinação de portadores
- Processos de deriva e difusão de portadores

1

## **Introdução:**

Desde a invenção do transistor, o estudo da eletrônica tem-se concentrado cada vez mais no projeto e utilização dos dispositivos semicondutores.

Mas o que é um semicondutor?

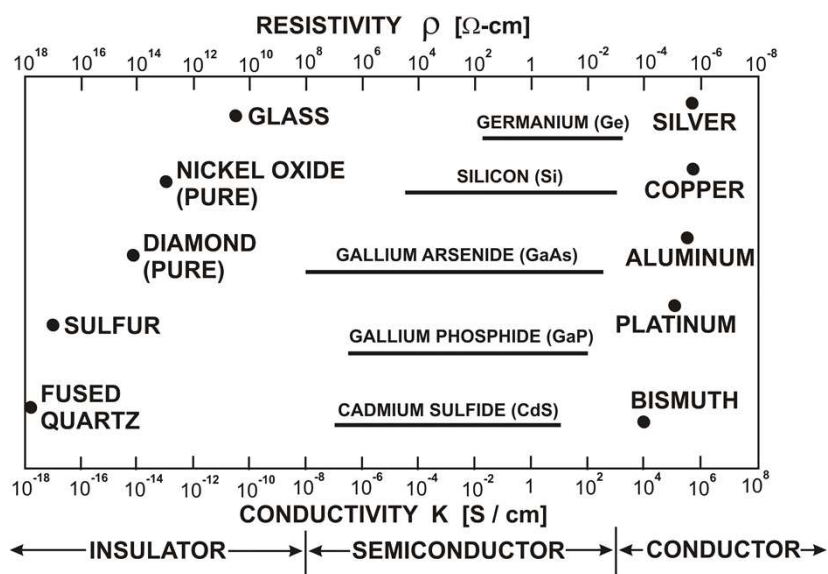
2

## Classificação dos materiais de acordo com sua condutividade:

- Condutores (metais)  $K = [10^4 - 10^7] \text{ Sm}^{-1}$
- Semicondutores  $K = [10^{-8} - 10^4] \text{ Sm}^{-1}$
- Isolantes  $K = [10^{-18} - 10^{-8}] \text{ Sm}^{-1}$

3

## Faixa de resistividade típica



4

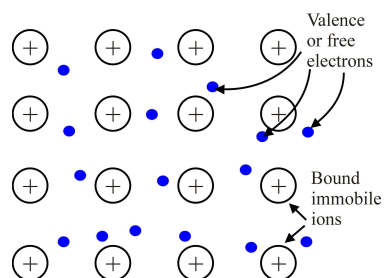
## Seção da tabela periódica

	III	IV	V	
	Boron (B)	Carbon (C)		
• • •	Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorus (P)	• • •
	Galium (Ga)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)	
		• • •		

5

## Cargas móveis em metais e semicondutores

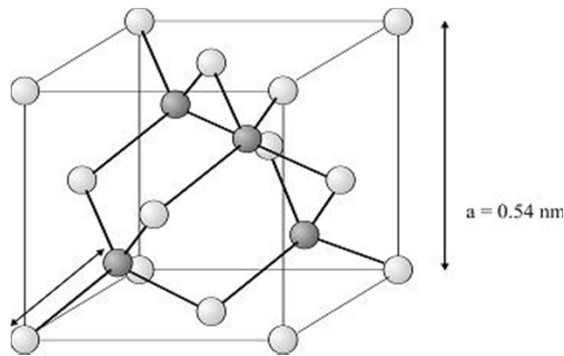
- Metais: Contém um número constante de portadores móveis em todas as temperaturas



- Semicondutor: Os portadores devem ser ativados para que se tornem livres.

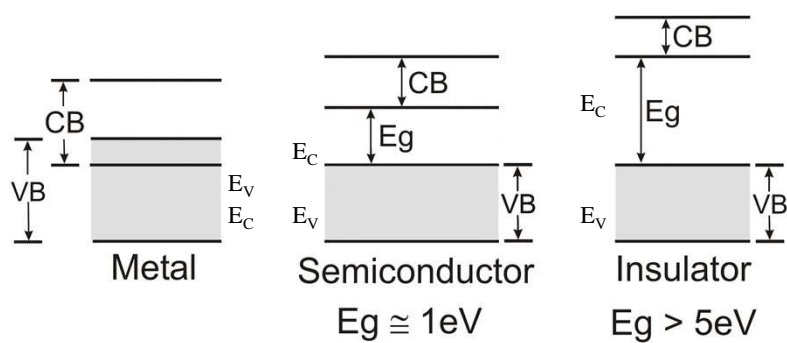
6

## Célula unitária do silício (monocristalino)



7

## Bandas de energia (modelo simples)

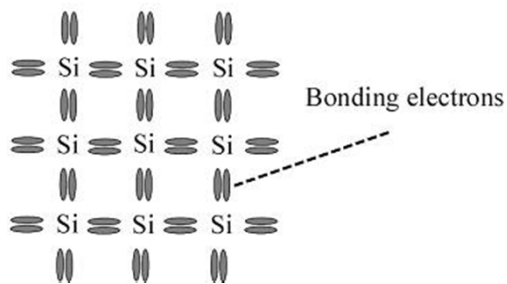


CB: Conduction Band  
 VB: Valence Band  
 Eg: Energia de gab (Bandgap)

8

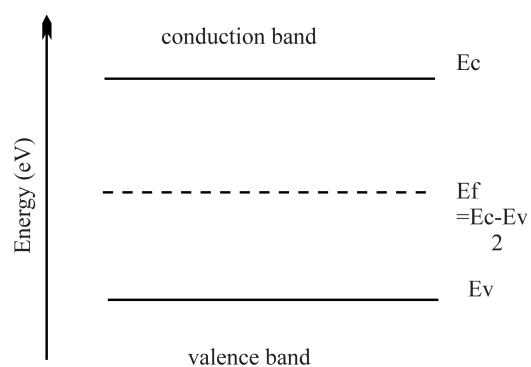
## Silício intrínseco

O Si intrínseco é um semiconductor puro, um cristal abstrato que não conta com nenhum outro tipo de elemento que não seja o principal.



9

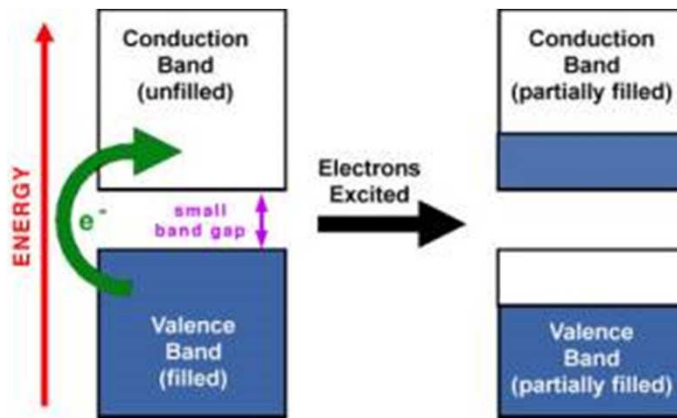
## Semiconductor intrínseco



Os elétrons livres encontram-se acima de  $E_C$ , e os elétrons de ligação abaixo de  $E_V$ . A energia necessária para a formação dos pares elétron-lacuna é  $E_G = E_C - E_V$ .

10

## Semicondutor intrínseco



11

## Geração térmica

$$n=p=n_i \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$n$  é a concentração dos elétrons livres na camada de condução

$p$  é a concentração de lacunas livres na camada de valência

$n_i$  é a concentração ou densidade intrínseca de portadores

$$n_i = BT^{3/2} e^{-E_G/2kT}$$

sendo que:

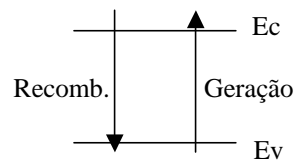
$B$  é um parâmetro do material =  $5,2 \times 10^{15}$  para o silício

$k$  é a constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  Joules/K

$E_G=1,12$  eV =  $1,792 \times 10^{-19}$  Joules

1 eV=  $1,602 \times 10^{-19}$  Joules

$T$  é a temperatura absoluta em Kelvin



12

## Valores de referência para a concentração intrínseca

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT} \text{ electrons/cm}^3$$

$$n_i(T = 300 \text{ K}) = 1.08 \times 10^{10}$$

$$n_i(T = 600 \text{ K}) = 1.54 \times 10^{15}$$

I

13

## Perguntas:

Como se comporta a resistividade de um  
semicondutor puro (intrínseco)  
a medida que aumentamos sua temperatura?

Idem para um material condutor?

14

## Silício Extrínseco (dopado)

Portadores de carga em um semiconductor

III	IV	V
Boro <b>B</b>	Carbono <b>C</b>	Fósforo <b>P</b>
Alumínio <b>Al</b>	Silício <b>Si</b>	Arseneto <b>As</b>
Gálio <b>Ga</b>	Germânio <b>Ge</b>	Antimônio <b>Sb</b>
Índio <b>In</b>		

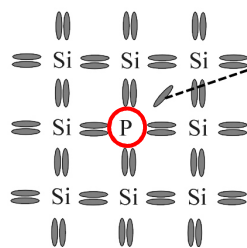
I

15

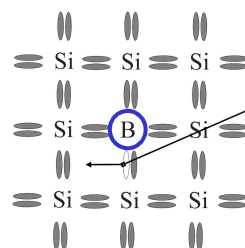
## Cristal extrínseco

tipo n

tipo p



Free electron



Hole or missing electron

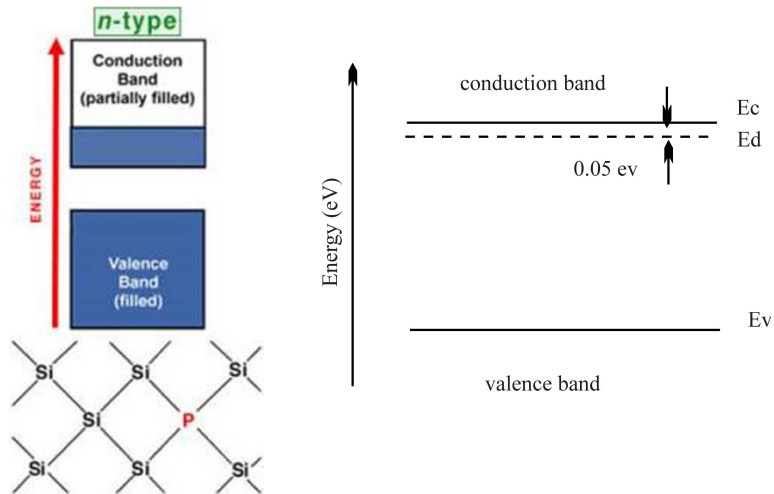
○ Ion Fixo Positivo  $N_D^+$

○ Ion Fixo Negativo  $N_A^-$

16

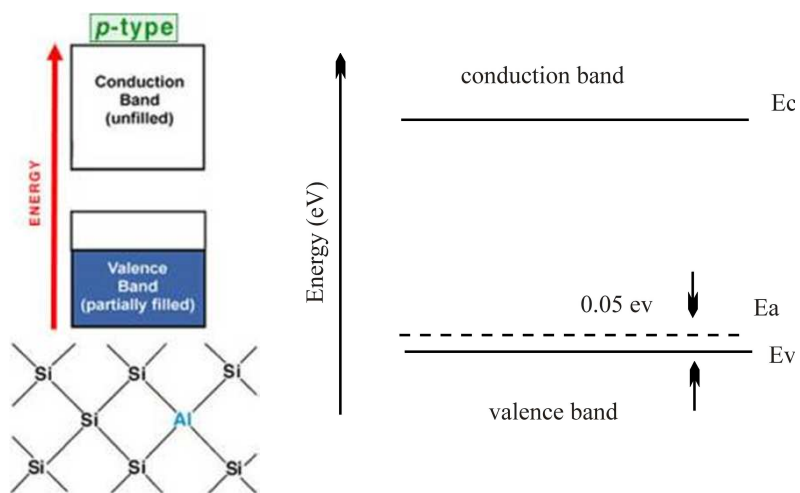


## Elétrons na faixa de condução



17

## Lacunas na faixa de valência

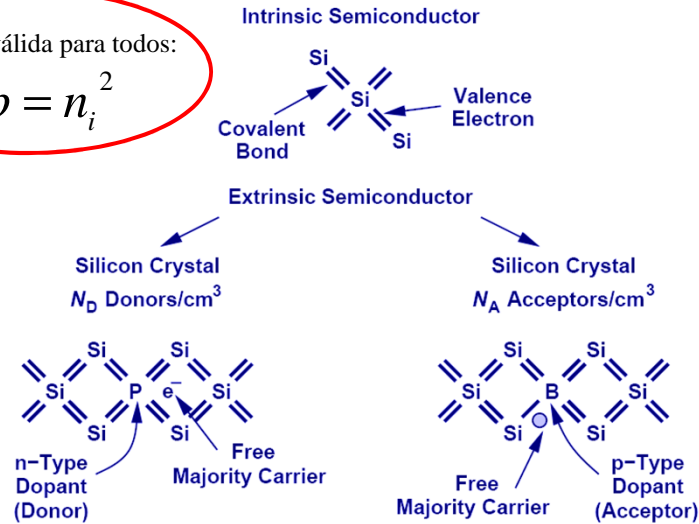


18

## Resumo dos tipos de semicondutores com relação aos portadores

Relação válida para todos:

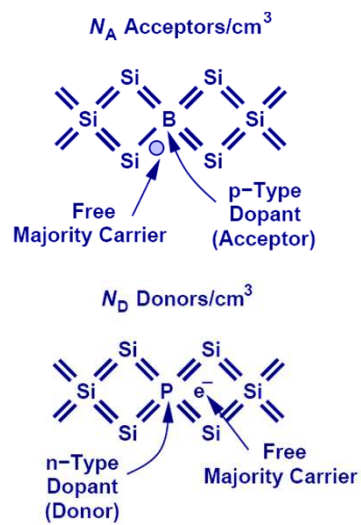
$$np = n_i^2$$



I

19

## Densidade de portadores em cada semicondutor



Majority Carriers :  $p_p \approx N_A$

Minority Carriers :  $n_n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$

Majority Carriers :  $n_n \approx N_D$

Minority Carriers :  $p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$

20

Para calcular a corrente elétrica em um semicondutor, precisamos:

- Estimar a quantidade de cargas móveis que estão presentes no material.
- Analisar o transporte destas cargas móveis através do cristal.

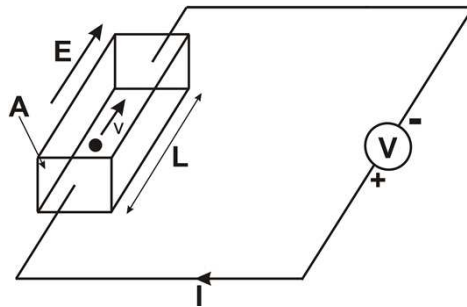
21

## Correntes elétricas nos semicondutores

- Corrente de campo (deriva)
- Corrente de difusão

22

## Corrente de campo (deriva)



$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$$

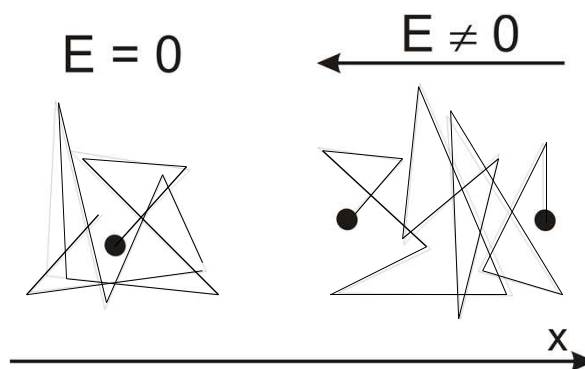
$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$$

$$\vec{J}_{pder} = qp\vec{v}_p = q\mu_p p\vec{E}$$

$$\vec{J}_{nder} = -qn\vec{v}_n = q\mu_n n\vec{E}$$

23

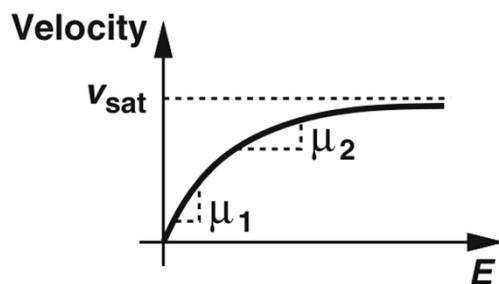
## Movimento aleatório de um portador em um semiconductor com e sem um campo elétrico aplicado



A mobilidade diminui com o grau de dopagem (ou contaminação) do semiconductor e com o aumento da temperatura.

24

## Saturação da velocidade do portador



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

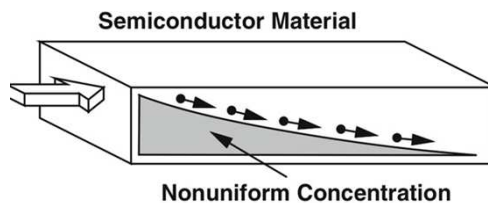
Qual o impacto deste efeito na eletrônica nanométrica?

25

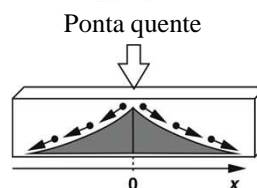
## Corrente de difusão

A Corrente de difusão resulta da diferença de concentração dos portadores de carga e da difusão térmica aleatória.

Fonte gerando aumento da concentração de portadores



Exemplo:



26

## Corrente de difusão

A Corrente de difusão resulta da diferença de concentração dos portadores de carga e da difusão térmica aleatória.

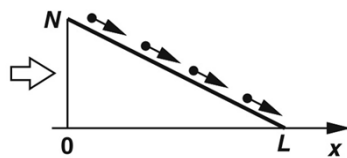
$$\vec{J}_{pdif} = -qD_p \nabla p(x, y, z) \quad \vec{J}_{ndif} = qD_n \nabla n(x, y, z)$$

$D_p$  e  $D_n$  são os coeficientes de difusão das lacunas e dos elétrons, respectivamente

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q} = V_T = \text{Tensão Termodinâmica}$$

27

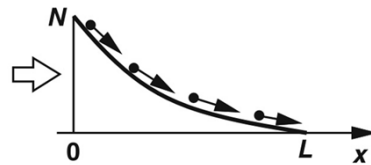
## Difusão com perfil linear e não linear



$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx}$$

$$I = AqD_n \frac{N}{L}$$



$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d},$$

sendo que  $L_d$  que é uma constante

$$J_n = qD \frac{dn}{dx} = \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}$$

28

## Corrente Total

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n \frac{dn}{dx} \qquad \vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

A corrente total é a soma das densidades de corrente dos elétrons e das lacunas multiplicada pela área  $A$ , que é perpendicular a direção do fluxo dos portadores:

$$I_{total} = A(J_n + J_p)$$

29

## Sugestão de estudo

- Razavi, seção 1.1 até 2.1 incluindo exercícios
- Sedra/Smith seção 3.3.1 com exercícios

Para saber mais:

- H. A. Mello e R.S. Biasi, “Introdução à Física dos semicondutores” MEC1975

1

30

FIM

31