

EE 530 Eletrônica Básica I

Física dos Semicondutores:

Prof. Pedro Xavier

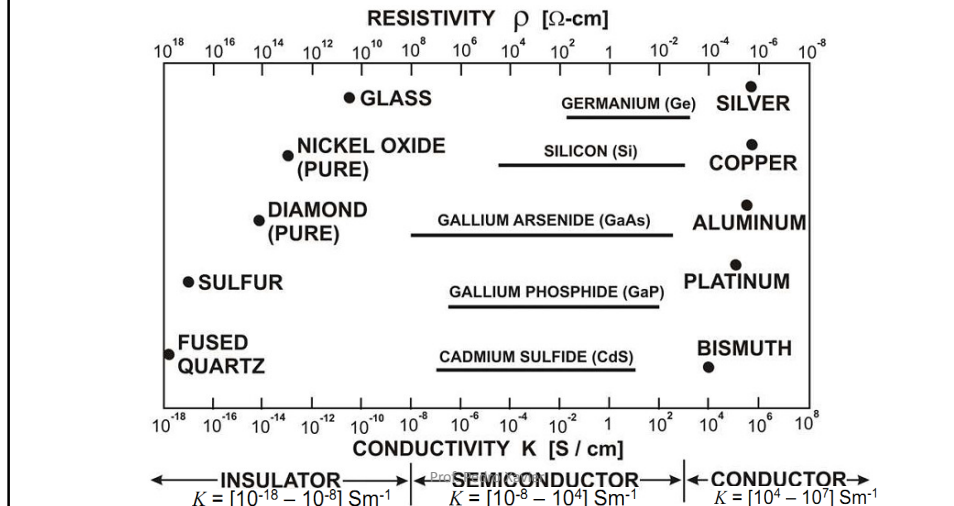
Semicondutores

- Os semicondutores são a base da eletrônica moderna.
- O que é um semicondutor? Quais são suas propriedades?

Prof. Pedro Xavier

Semicondutores

- São sólidos geralmente cristalinos de condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes.



Semicondutores

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

Prof. Pedro Xavier

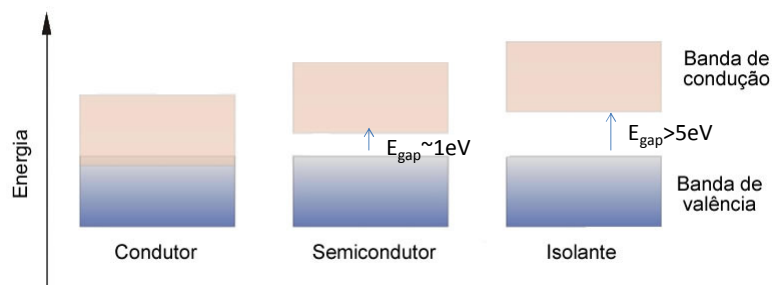
Semicondutores

- Os metais possuem portadores de carga (elétrons) livres em todas as temperaturas
- Os semicondutores precisam de ser ativados (energia) para possuírem portadores de carga livres

Prof. Pedro Xavier

Semicondutores

- Física Quântica



Prof. Pedro Xavier

Semicondutores

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

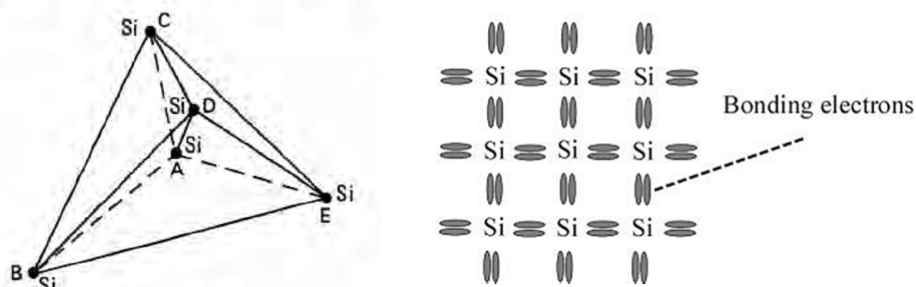
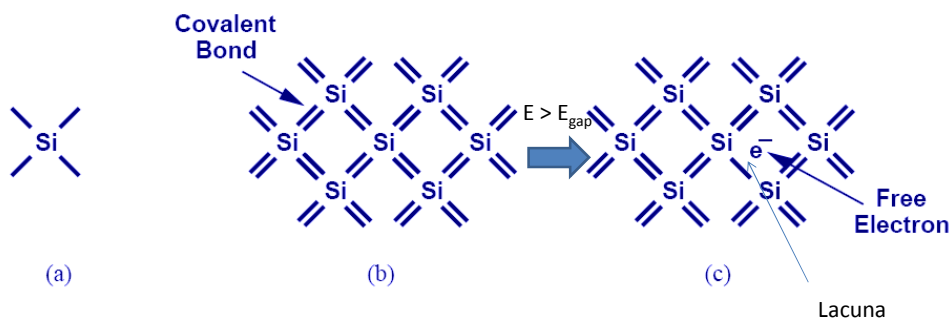


Figura 6.1 Átomo de silício localizado no centro do tetraedro formado pelos 4 átomos vizinhos. Prof. Pedro Xavier

Semicondutores

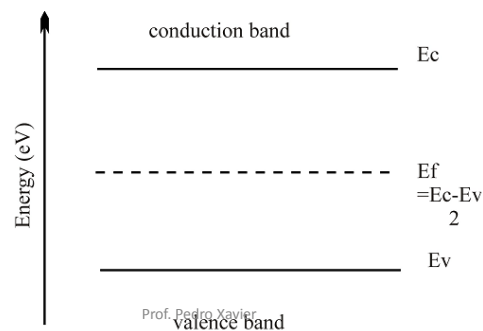
- Silício intrínseco
 - O Si intrínseco é um semicondutor puro, um cristal abstrato que não conta com nenhum outro tipo de elemento que não seja o principal



Prof. Pedro Xavier

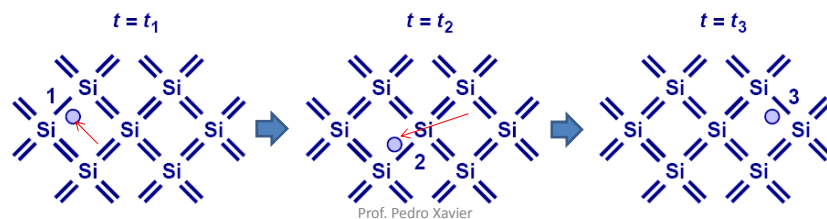
Semicondutor intrínseco

- 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 $E_G = E_C - E_V$.



Semicondutor intrínseco

- As lacunas são geradas a partir da quebra das ligações covalentes e podem ser preenchidas por outros elétrons livres.
- A lacuna pode "caminhar" por um cristal, na direção contrária à do movimento do elétron que as preenche.
- A lacuna se comporta como uma carga positiva, com o mesmo valor absoluto da carga do elétron.



Semicondutor intrínseco

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

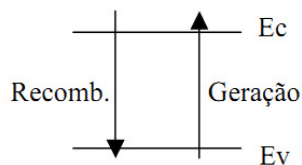
k é a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/K

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

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

Prof. Pedro Xavier

T é a temperatura absoluta em Kelvin



Geração térmica

- Determine a densidade de elétrons no silício para $T = 300\text{K}$ e $T = 600\text{K}$. $E_G = 1,12\text{eV}$

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

$$n_i(T = 300^0 K) = 1.08 \times 10^{10} \text{ electrons / cm}^3$$

$$n_i(T = 600^0 K) = 1.54 \times 10^{15} \text{ electrons / cm}^3$$

Prof. Pedro Xavier

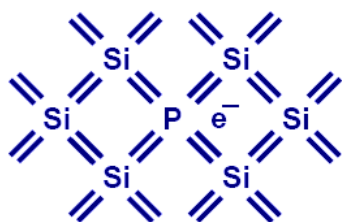
Semicondutor extrínseco

- Na prática, as propriedades dos semicondutores são controladas por meio da adição de certas impurezas em concentrações cuidadosamente medidas. As impurezas substitucionais mais usadas são certos elementos pentavalentes (arsênio, fósforo, antimônio) e trivalentes (boro, alumínio, gálio, índio).

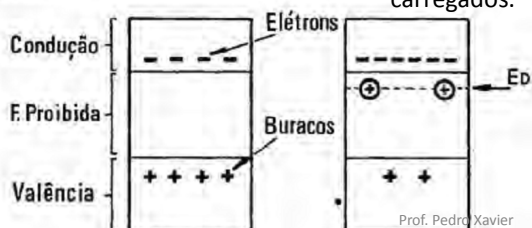
Prof. Pedro Xavier

Semicondutor extrínseco

- Tipo N



A inclusão da impureza doadora deu origem a um nível permitido de energia (E_D) dentro da faixa proibida, próximo da faixa de condução. É nesse nível que estão os elétrons em excesso dos átomos doadores. Assim, à temperatura ambiente, quase todos esses elétrons adquirem energia suficiente para passarem para a faixa de condução e se tornarem "livres". Com isso os átomos dos doadores ficam positivamente carregados.



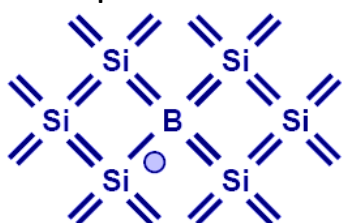
Definição:

 N_D : densidade de átomos doadores [cm^{-3}]

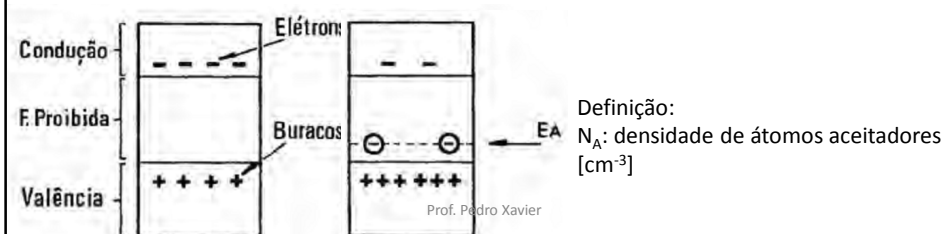
Prof. Pedro Xavier

Semicondutor extrínseco

- Tipo P



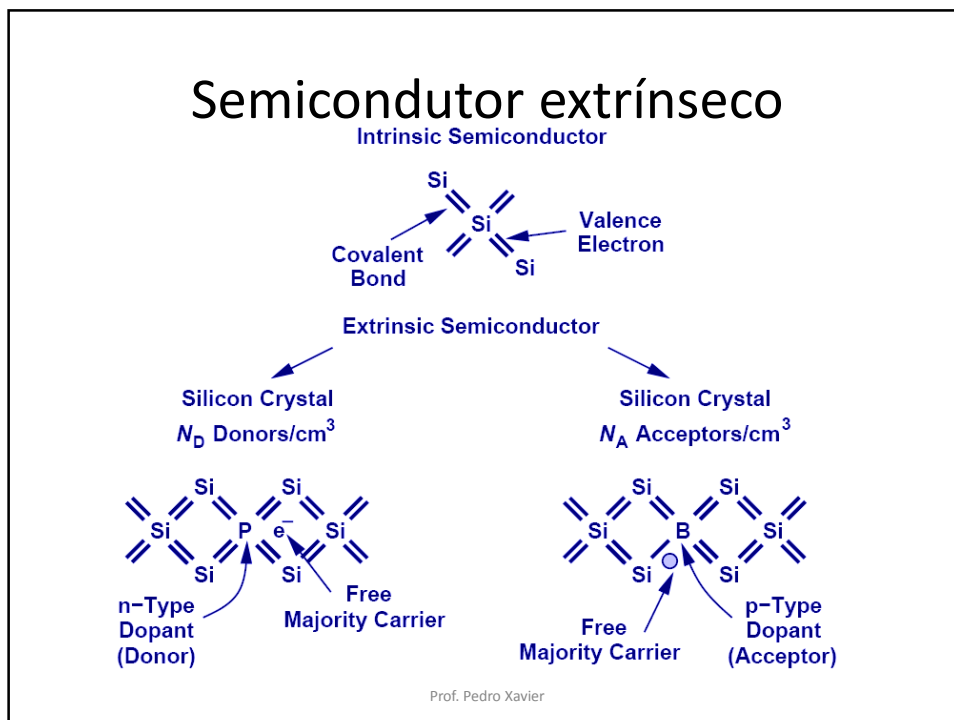
As impurezas são aceitadoras, o nível permitido (E_A) está próximo da faixa de valência. Assim os elétrons da faixa de valência podem passar com grande facilidade para o nível dos aceitadores, deixando buracos na faixa de valência. Com isso, os aceitadores ficam carregados negativamente.



Semicondutor extrínseco

Tabela 6.2 Energias de ionização em elétrons-volt (eV)

Impurezas	Semicondutor		
	Silício	Germânio	
D O A D O R A S	P	0,044 0,0120	
	As	0,049 0,0130	
	Sb	0,039 0,0096	
	Li	0,033 0,0010	
A C E I T A D O R A S	B	0,045 0,010	
	Al	0,057 0,010	
	Ga	0,065 0,011	
	In	0,160 0,011	



Semicondutor extrínseco

$$np = n_i^2$$

Tipo P	{	Majority Carriers :	$p \approx N_A$
	}	Minority Carriers :	$n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$
Tipo N	{	Majority Carriers :	$n \approx N_D$
	}	Minority Carriers :	$p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$

Onde:

N_A : densidade de átomos aceitadores

N_D : densidade de átomos doadores

n : concentração dos elétrons livres na camada de condução

p : concentração de lacunas livres na camada de valência

n_i : concentração ou densidade intrínseca de portadores

Semicondutor extrínseco

- Uma amostra de silício cristalino é dopada com átomos de fósforo. A densidade de dopagem é de 10^{16} átomos/cm³. Determine a densidade elétrons livres e lacunas à temperatura ambiente (300K).
- $n_i = 1,08 \times 10^{10}$ portadores/cm³

$$n = 10^{16} \text{ electrons/cm}^3$$

$$p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$= 1.17 \times 10^4 \text{ holes/cm}^3$$

Prof. Pedro Xavier

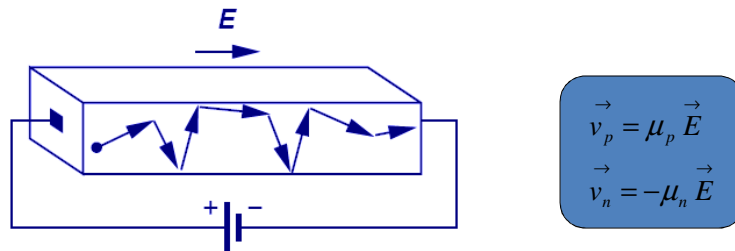
Correntes Elétricas nos Semicondutores

- Corrente de deriva
 - Campo Elétrico
- Corrente de difusão
 - Diferença de concentração

Prof. Pedro Xavier

Correntes Elétricas nos Semicondutores

- Corrente de deriva:
 - A aceleração devida ao campo elétrico e a colisão como o cristal têm ações opostas, portanto a velocidade é constante para um campo constante.



μ : mobilidade dos portadores [$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$]

Prof. Pedro Xavier

Correntes Elétricas nos Semicondutores

- Corrente de deriva:
 - Determine a v_n de uma pastilha uniforme de silício tipo N com $1\mu\text{m}$ de comprimento submetida a uma ddp de 1V.

$$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$$

$$E = V/L = 10000 \text{ V/cm}$$

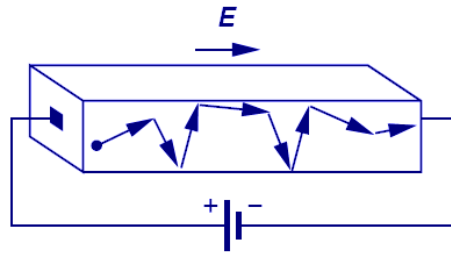
$$v = \mu_n E = 1.35 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

Prof. Pedro Xavier

Correntes Eléctricas nos Semicondutores

- Corrente de deriva:

– A densidade de corrente de deriva é dada por



$$\begin{aligned} \vec{v}_p &= \mu_p \vec{E} \\ \vec{v}_n &= -\mu_n \vec{E} \end{aligned}$$

$$\vec{J}_{pder} = qp\vec{v}_p = q\mu_p p\vec{E} \quad \vec{J}_{nder} = -qn\vec{v}_n = q\mu_n n\vec{E}$$

μ : mobilidade dos portadores [$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$]

q : carga elemental do elétron ($-1,6\cdot 10^{-19}$ C)

p : densidade de lacunas [lacunas/ cm^3]

n : densidade de elétrons [elétrons/ cm^3]

Correntes Eléctricas nos Semicondutores

- Corrente de deriva:

– A densidade de corrente de deriva é dada por

$$\begin{aligned} J_{tot} &= \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q \\ &= q(\mu_n n + \mu_p p) E. \end{aligned}$$

μ : mobilidade dos portadores [$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$]

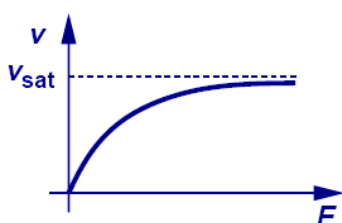
q : carga elemental do elétron ($-1,6\cdot 10^{-19}$ C)

p : densidade de lacunas [lacunas/ cm^3]

n : densidade de elétrons [elétrons/ cm^3]

Correntes Eléctricas nos Semicondutores

- Velocidade de Saturação
 - A velocidade tende a um valor de saturação com o aumento do campo, pois os portadores começam a colidir com maior frequência, diminuindo, assim, a aceleração.



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

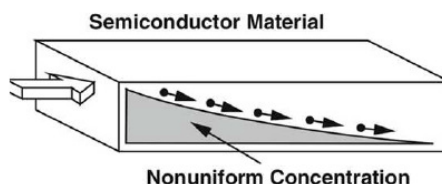
↓
 μ

μ_0 : mobilidade a campo baixo

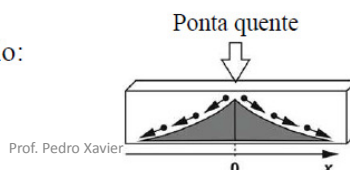
Correntes Eléctricas nos Semicondutores

- Corrente de difusão:
 - Os portadores se movem em direção às regiões de baixa concentração.

Fonte gerando aumento da concentração de portadores



Exemplo:



Prof. Pedro Xavier

Correntes Elétricas nos Semicondutores

- Corrente de difusão:

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

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

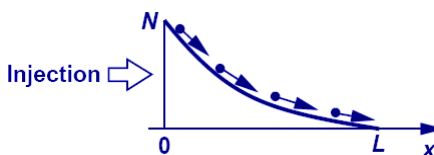
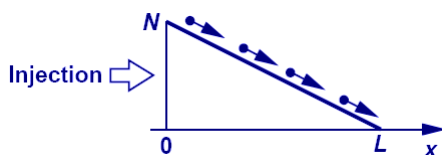
$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q} = V_T = \text{Tensão Termodinâmica}$$

Relação de Einstein

Prof. Pedro Xavier

Correntes Elétricas nos Semicondutores

- Defina a corrente de difusão para os seguintes casos:



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

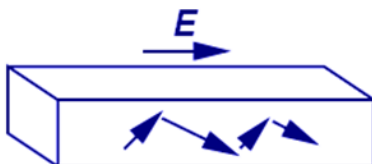
sendo que L_d que é uma constante

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n \cdot \frac{N}{L}$$

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

Resumo

Drift Current



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

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

Diffusion Current



$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Prof. Pedro Xavier

Corrente Total

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

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:

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

Prof. Pedro Xavier

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

Fontes de figuras da aula

- Aula do prof. Fabiano Fruett
- Introdução à física dos semicondutores (H.A. Mello)
- Fundamentos da microeletrônica (Razavi)

FIM

Prof. Pedro Xavier