

CAPITULO 3

Aula 13

Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.
(Cap. 3 p. 117-121)

Prof. Sedra
PSI3321

Eletrônica I – PSI3321 Programação para a Segunda Prova

11 ^a 05/04	Circuito retificador em ponte. Circuito retificador de meia onda com o capacitor de filtro.	Sedra, Cap. 3 p. 109-111
12 ^a 08/04	Retificador de onda completa com capacitor de filtro, superdiodo. Exercícios (exemplo 3.9).	Sedra, Cap. 3 p. 112-115
13 ^a 12/04	Circuitos limitadores, circuitos grampeadores, dobrador de tensão, exercícios: 3.27, 3.28.	Sedra, Cap. 3 p. 115-118
14 ^a 15/04	Conceitos básicos de dispositivos semicondutores: silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva), exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 117-121
15 ^a 26/04	Modelos de cargas, junção pn na condição de circuito aberto, potencial interno da junção, junção pn polarizada, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 121-126
16 ^a 29/04	Distribuição de portadores minoritários na junção pn diretamente polarizada. Dedução elementar da equação de corrente na junção pn, exercícios.	Aula avulsa + Sedra, Cap. 3 p. 127-128
17 ^a 03/05	Capacitância de difusão, largura da região de depleção da junção pn polarizada, capacitância de depleção, a junção pn na região de ruptura (efeito zener e efeito avalanche), exercícios.	Sedra, Cap. 3 p. 124-125 e p. 128-129
18 ^a 06/05	Aula de Exercícios	

2^a. Semana de Provas (09/05 a 13/05/2016)

Data: 11/05/2016 (quarta feira) – Horário: 13:10h às 15:10h

Prof. Sedra
PSI3321

13ª Aula:

Silício dopado, mecanismos de condução (difusão e deriva)

Ao final desta aula você deverá estar apto a:

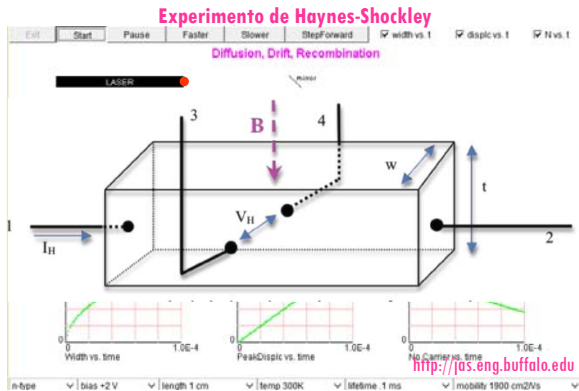
- Descrever os principais mecanismos de geração de corrente elétrica em um material semiconductor
- Apresentar a estrutura cristalina 3D e sua representação 2D, dando uma ordem de grandeza das dimensões envolvidas
- Explicar a existência de elétrons livres na estrutura e o conceito de lacunas (buracos)
- Calcular a concentração intrínseca de portadores livres
- Explicar as consequências da dopagem de materiais semicondutores
- Olhar a Lei de Ohm do lado de dentro do material, explicando os conceitos de condutividade e mobilidade

Prof. Seldre
FIS/UFPA

Materiais para Eletrônica

A resistividade de um semiconductor é sensível à:

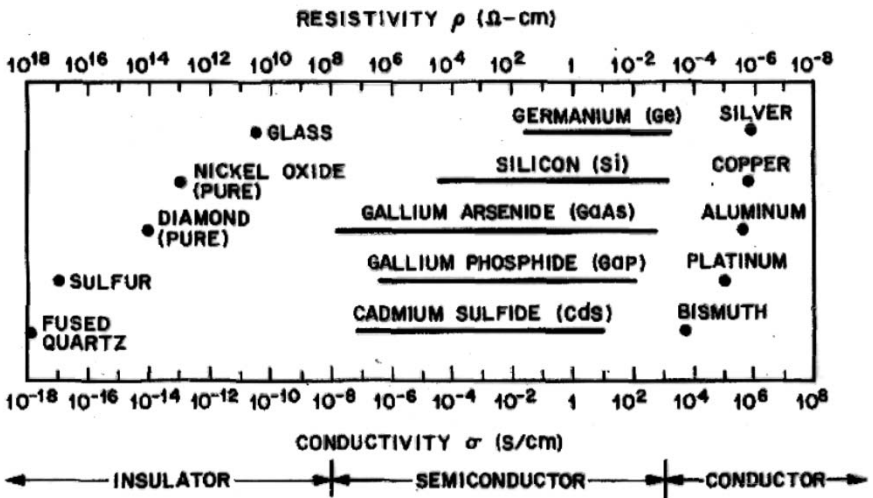
- Temperatura
- Iluminação
- Campos magnéticos
- Pequenas doses de impurezas



Prof. Seldre
FIS/UFPA

Materiais para Eletrônica

(pequenas doses de impurezas)



Estrutura Cristalina

Os materiais semicondutores são encontrados na forma cristalina, policristalina e amorfa.

Estudaremos basicamente os materiais semicondutores na forma cristalina:

- Os átomos estão arranjados de uma forma periódica tridimensional
- A esse arranjo chamaremos de rede cristalina

Materiais para Semicondutores

The periodic table shows the following elements highlighted for semiconductor materials:

- Boron (B):** Group IIIA, Period 2
- Silicon (Si):** Group IVA, Period 3
- Germanium (Ge):** Group IVA, Period 4
- Arsenic (As):** Group VA, Period 4
- Selenium (Se):** Group VIA, Period 4

Other regions labeled include: Transition Metals, Lanthanides, Actinides, Metalloids (semimetals), and Nonmetals.

Materiais para Semicondutores

Table 1 Portion of the Periodic Table Related to Semiconductors

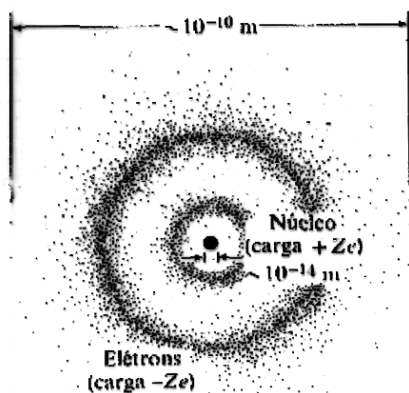
Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sb Antimony	Tl Thallium	Pb Lead
6	Hg Mercury				

Materiais para Semicondutores

Table 2 Element and Compound Semiconductors

Element	IV-IV Compounds	III-V Compounds	II-VI Compounds	IV-VI Compounds
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

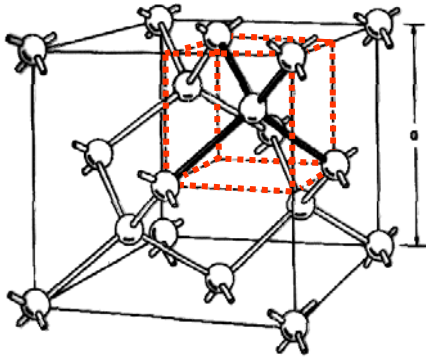
O Átomo



- Núcleo composto por nêutrons e prótons (+q) com massas iguais de $1,66 \times 10^{-27}$ kg (1.700 vezes a massa do elétron). O núcleo tem diâmetro de $\sim 10^{-14}$ cm
- Uma nuvem de elétrons recobre o núcleo, estendendo-se até $\sim 10^{-10}$ cm
- O átomo é eletricamente neutro

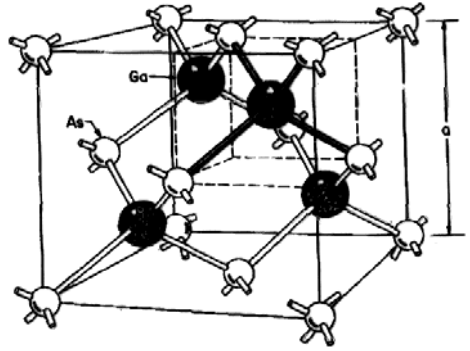
Estrutura Cristalina

A estrutura do diamante (e dos principais materiais semicondutores)



Silício ($a = 5,43 \text{ \AA}$)

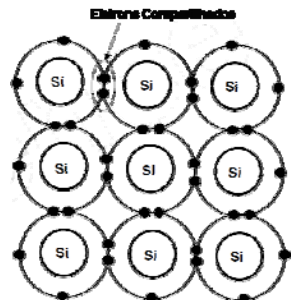
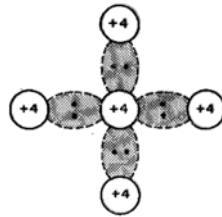
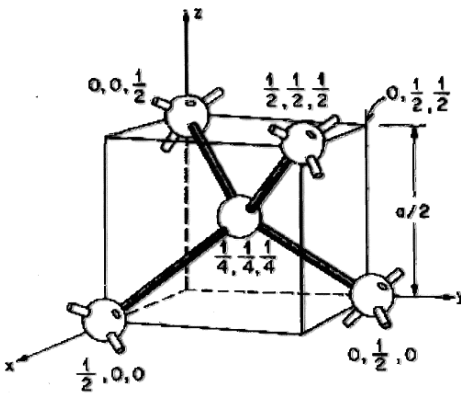
Prof. Sábido
PS/0957



GaAs ($a = 5,63 \text{ \AA}$)

307

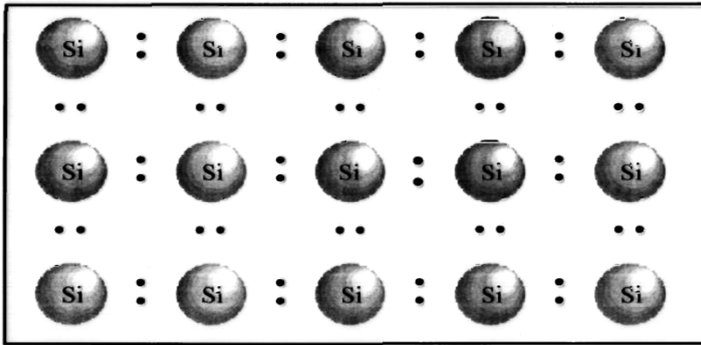
Estrutura Cristalina do Silício



Prof. Sábido
PS/0957

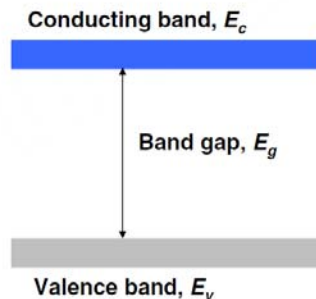
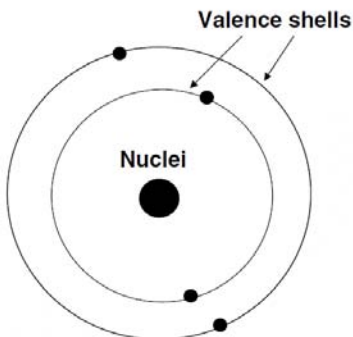
308

Utilizando uma representação bidimensional (simplificação), cada átomo de silício (4 elétrons na última camada) precisa de 4 ligações covalentes (4 átomos de Si) para atingir a estabilidade.



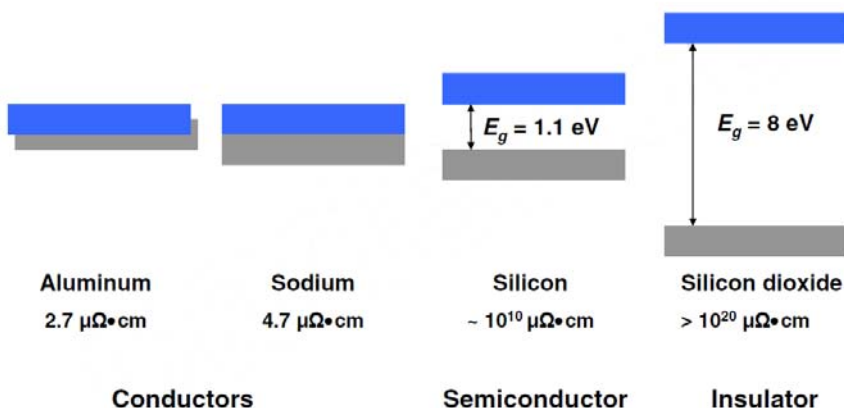
Em 0 Kelvin todos os elétrons estão presos em suas ligações covalentes

A Interpretação da Física de Estado Sólido

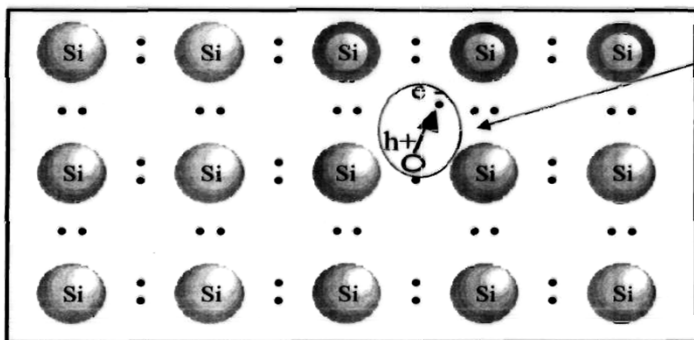


A Interpretação da Física de Estado Sólido

Porque um material é condutor, semiconductor ou isolante?



Em temperatura maior que 0 K (temperatura ambiente, por exemplo, $T = 300 \text{ K}$), elétrons podem adquirir energia suficiente (ionização térmica) para escapar da ligação covalente.



Geração do par
Elétron(e^-)-lacuna(h^+)

$n = \text{conc. de elétrons}$
 $p = \text{conc. de lacunas}$

$n_i = \text{conc. intrínseca}$
 $n = p = n_i$

Neste processo, chamado de Geração de portadores, o elétron torna-se livre e deixa no seu lugar um buraco (lacuna) que também apresentará característica de portador de corrente.

Concentração Intrínseca

$$n_i(T) = [B \cdot T^3 \cdot e^{-E_G/kT}]^{1/2}$$

- B = parâmetro que depende do material
($B = 5,4 \times 10^{31} / \text{K}^3 \cdot \text{cm}^3$ para o silício)
- T = temperatura em Kelvin
- E_G = Energia mínima para quebrar uma ligação covalente
(1,12 eV para o silício)
- $K = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

Exemplo: Para $T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ portadores/cm}^3$, ou seja, $1,45 \cdot 10^{10} \text{ elétrons/cm}^3$ e $1,45 \cdot 10^{10} \text{ lacunas/cm}^3$, já que no silício intrínseco $n = p = n_i$

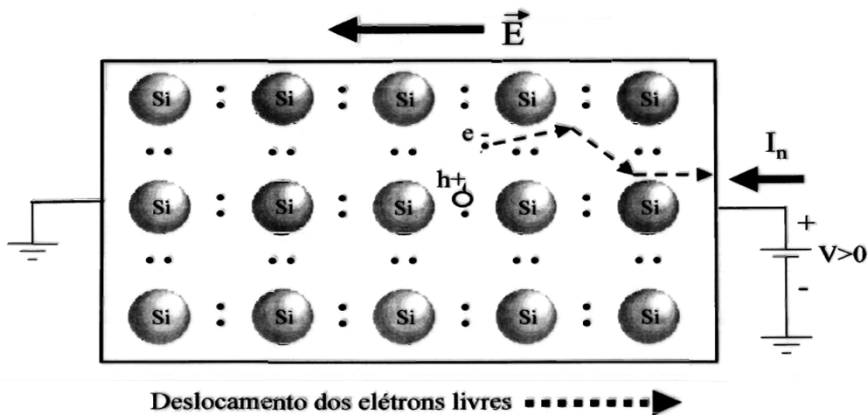
Lembrar que o silício tem $5 \cdot 10^{22} \text{ átomos de silício/cm}^3$

Prof. Sábido

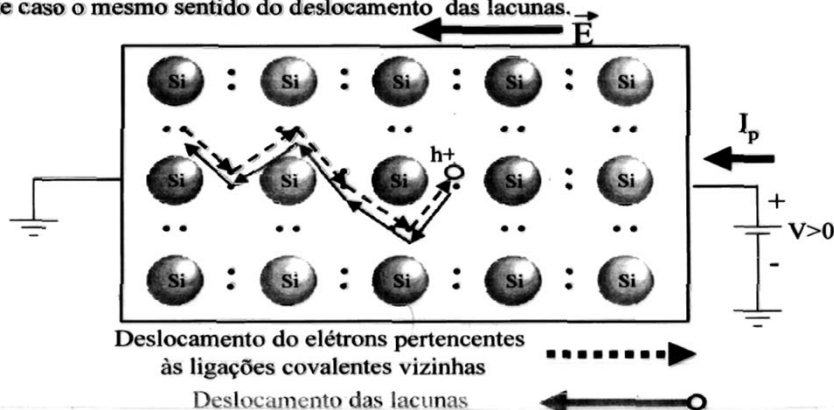
FSL/UFPA

313

O elétron gerado encontra-se livre para se deslocar dentro do silício. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons no sentido inverso ao do campo elétrico. A corrente convencional associada (I_n), porém, terá o mesmo sentido do campo elétrico, como de praxe.

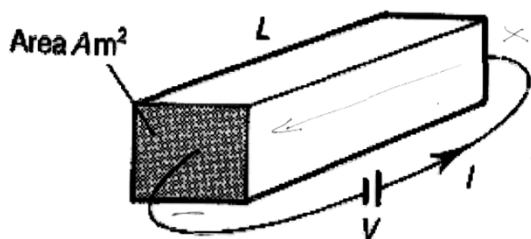


A lacuna gerada pode ser ocupada por um outro elétron vizinho (também pertencente a uma ligação covalente), que por sua vez deixará uma lacuna no seu lugar e assim sucessivamente. Por exemplo, se for aplicada uma tensão como indicada abaixo, o campo elétrico induzirá o deslocamento dos elétrons pertencentes as ligações covalentes no sentido inverso ao do campo elétrico. O processo também pode ser visto como o deslocamento de lacunas no mesmo sentido do campo elétrico, com carga positiva de carga equivalente a do elétron em módulo. A corrente convencional associada (I_p) terá neste caso o mesmo sentido do deslocamento das lacunas.



Revisitando a Lei de Ohm

Suponha uma barra de material condutor ou semiconductor homogêneo (com características uniformes) de resistividade ρ_e ($\Omega \cdot m$), comprimento L (m) e seção A (m^2), submetido a um campo elétrico E :



A corrente que circula por ele é dada por: $I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho_e L}$

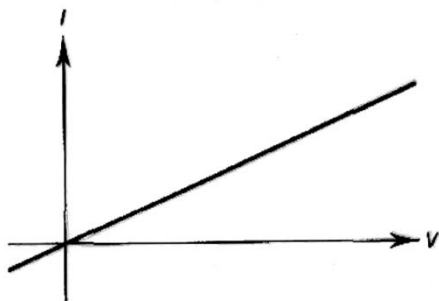
Podemos reescrever essa relação de outra forma:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{VA}{\rho_e L}$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho_e} \frac{V}{L} \quad [\text{A/m}^2]$$

ou

$$J = \sigma \times E \quad [\text{A/m}^2]$$



Materiais para Eletrônica

Resistividade elétrica:

$$\rho_e \text{ em } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$\rho_e \neq \rho(z) \rightarrow$ dens. de cargas

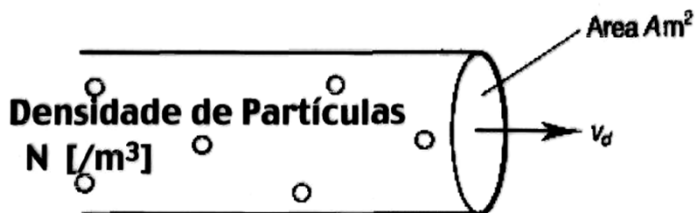
Condutividade elétrica:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \quad [1/(\Omega \cdot \text{m})]$$

Velocidade de Deriva

$$I, V \Leftrightarrow J, E$$

Vamos olhar melhor para σ :



Número de partículas em 1 m de tubo: $N.A \text{ [/m]}$

Número de partículas em um

determinado ponto/segundo : $N.A.v_d \text{ [/s]}$

em cargas por segundo: $Q.N.A.v_d \text{ [A]}$

ou, em outras palavras:

$$J = Q.N.v_d \text{ [A/m}^2\text{]}$$

A velocidade v_d é conhecida como velocidade de deriva.

Ela se aplica a qualquer material e situação onde pode-se definir uma certa densidade de partículas móveis e uma velocidade MÉDIA pode ser definida.

Condutividade e Mobilidade

Concluimos que:

$$J = \sigma \times E \quad [\text{A/m}^2]$$

$$J = Q.N.v_d \quad [\text{A/m}^2]$$

Logo:

$$v_d = \text{constante} \times E$$

Essa constante, $\sigma / Q.N$, é conhecida como MOBILIDADE μ [$\text{m}^2/\text{V.s}$]

Podemos reescrever J como:

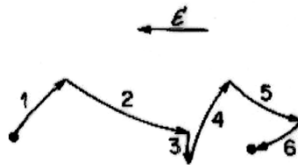
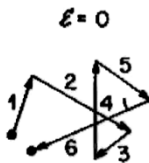
$$J = Q.N.\mu.E \quad [\text{A/m}^2]$$

E a condutividade como:

$$\sigma = Q.N.\mu \quad [\Omega/\text{m}]$$

A3_14

Velocidade de Deriva e Velocidade Térmica



$$v_{th} = \left(\frac{8kT}{\pi M} \right)^{1/2} \quad [\text{m/s}]$$

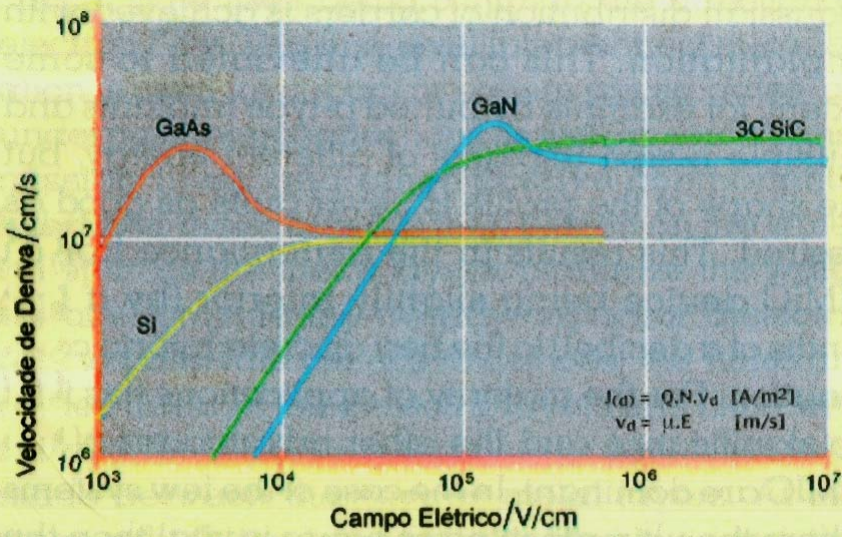
$10^5 \text{ m/s a } 300\text{K}$

ou $0,026 \text{ eV}$

para elétrons em Si
 $\mu \cong 0,1 \text{ m}^2/(\text{V.s})$

$$v_d = \mu \times E$$

$$v_d \ll v_{th}$$



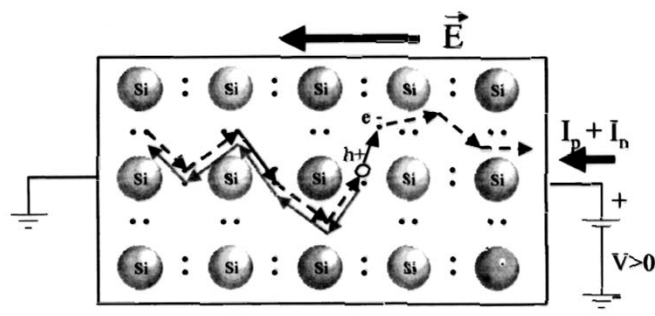
Velocidade de deriva dos elétrons para arseneto de gálio, silício, nitreto de gálio e carbeto de silício

GEC REVIEW, VOL. 13, NO. 2, 1998

Prof. Dr. P. S. D. P.

324

Mecanismos de Condução de Corrente em Semicondutores: Deriva (Drift)



Resistividade:

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

μ_p e μ_n = mobilidade das lacunas e elétrons respectivamente.
 $(\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}, \mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s})$

Relação de Einstein:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

$$v_{p\text{-der}} = \mu_p E$$

$$v_{n\text{-der}} = \mu_n E$$

$$J_{p\text{-der}} = qp\mu_p E$$

$$J_{n\text{-der}} = qn\mu_n E$$

$$I_{p\text{-der}} = q \cdot A \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

$$I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$I_{T\text{-der}} = I_{p\text{-der}} + I_{n\text{-der}} = q \cdot A \cdot E \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

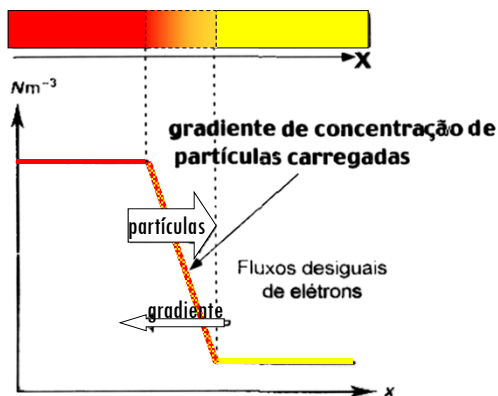
Prof. Dr. P. S. D. P.

325

A Corrente de Difusão

Devido a agitação térmica, as partículas carregadas movem-se aleatoriamente, mesmo na ausência de campo elétrico.

Considere a situação a seguir:



Note:

- a) Há movimento aleatório
- b) Há um gradiente de concentração

A4 11

A Corrente de Difusão

$$\text{Fluxo}_{\text{dif}} = -D \frac{dN}{dx} \quad [1/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$$

onde D é o coeficiente de difusão das partículas

Logo:

$$J_{\text{dif}} = -QD \frac{dN}{dx} \quad [\text{A}/\text{m}^2]$$

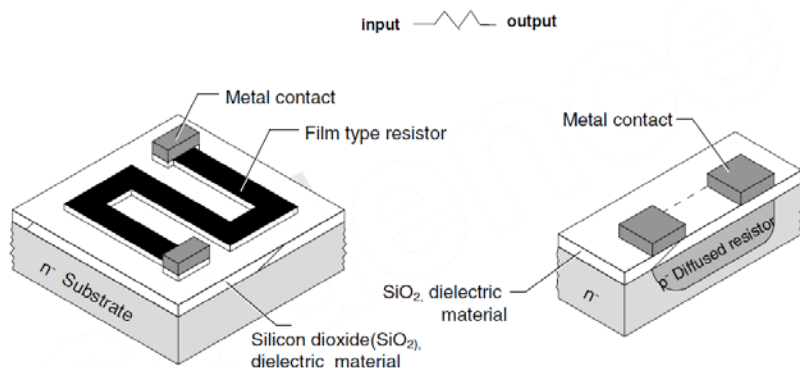
As Correntes de Deriva e de Difusão

Em semicondutores observamos que em condições normais as correntes de deriva e de difusão constituem praticamente toda a corrente que flui no material. Logo:

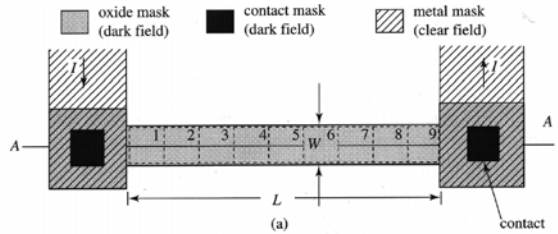
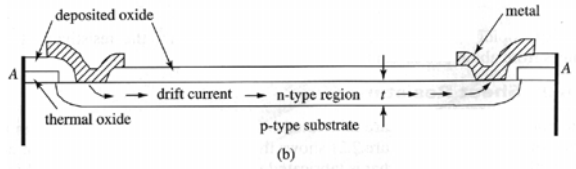
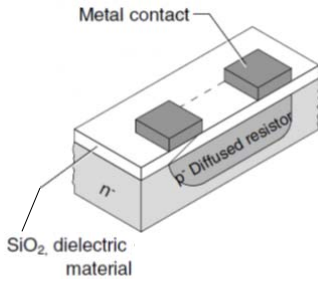
$$J_{TOTAL} = J_{der} + J_{dif} \quad (\text{vale a lei da superposição!})$$

$$J_{TOTAL} = Q \cdot N_A \cdot \mu_n \cdot E - QD \frac{dN}{dx} \quad [A/m^2]$$

Exemplos de Resistores em um CI



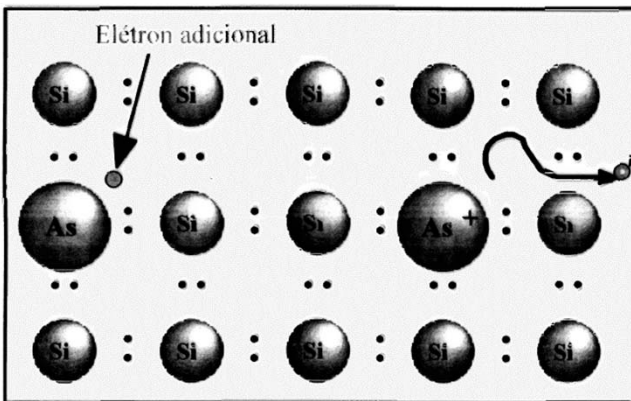
Exemplos de Resistores em um CI



Prof. Sander
FIS/UFPE

233

Silício Tipo n (elétrons adicionais)



Elétron livre se deslocando

Em equilíbrio térmico:

$$n.p = ni^2$$

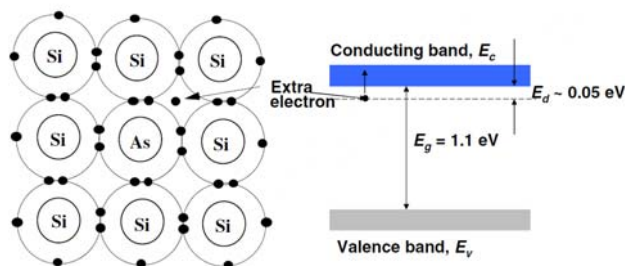
$$n = N_D + ni \cong N_D$$

$$p = \frac{ni^2}{n} = \frac{ni^2}{N_D}$$

No processo de dopagem do silício com elementos PENTAVALENTES (Arsênio por exemplo), cada átomo de arsênio que ocupa a posição de um átomo de silício doa um elétron livre para a estrutura cristalina (DOADORA), já que os 4 outros estarão fazendo parte das ligações covalentes. Quando este elétron se distancia das proximidades do arsênio, diz-se que o átomo ficou "ionizado" com carga positiva igual em módulo à carga do elétron perdido.

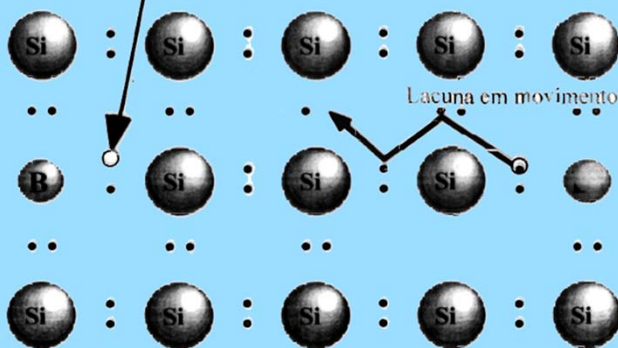
14

38



Silício Tipo *p* (lacunas adicionais)

Elétron faltando na ligação covalente (lacuna)



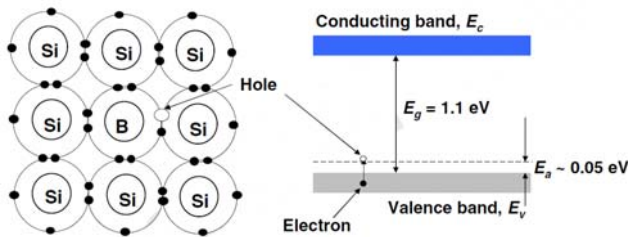
Em equilíbrio térmico:

$$n \cdot p = ni^2$$

$$p = N_A + ni \cong N_A$$

$$n = \frac{ni^2}{p} = \frac{ni^2}{N_A}$$

No processo de dopagem do silício com elementos TRIVALENTES (BORO por exemplo), cada átomo de boro que ocupa a posição de um átomo de silício dá origem a uma lacuna para a estrutura cristalina (ACEITADORA), já que uma das ligações covalentes não se concretiza. Quando esta lacuna se desloca das proximidades do boro, diz-se que o átomo ficou "ionizado" com carga negativa igual à carga do elétron que ocupou a lacuna.



Resumo

Tabela 3.1 RESUMO DAS EQUAÇÕES IMPORTANTES PARA A OPERAÇÃO DA JUNÇÃO *pn*.

Grandeza	Relação	valores de Constantes e Parâmetros (para Si intrínseco a $T = 300 \text{ K}$)
Concentração de portadores no silício intrínseco ($/\text{cm}^3$)	$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$	$B = 5,4 \times 10^{31} / (\text{K}^3 \text{cm}^6)$ $E_G = 1,12 \text{ eV}$ $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ $n_i = 1,5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$
Densidade da corrente de difusão (A/cm^2)	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = -qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$ $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$
Densidade da corrente de deriva (A/cm^2)	$J_{\text{deriva}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Resistividade ($\Omega \text{ cm}$)	$\rho = 1/q(p\mu_p + n\mu_n)$	μ_n e μ_p diminuem com o aumento na concentração de dopantes
Relação entre mobilidade e difusividade	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q$ $\cong 25 \text{ mV}$
Concentração de portadores no silício tipo <i>n</i> ($/\text{cm}^3$)	$n_{n0} \cong N_D$ $p_{n0} = n_i^2/N_D$	
Concentração de portadores no silício tipo <i>p</i> ($/\text{cm}^3$)	$p_{p0} \cong N_A$ $n_{p0} = n_i^2/N_A$	
Tensão interna da junção (V)	$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$	