

Introdução aos semicondutores

EE 530

Prof. Fabiano Fruett

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?

Esta pergunta será respondida. Serão estudadas também as principais características dos materiais semicondutores.

Classificação dos Materiais

De uma maneira geral os materiais podem ser divididos em:

Isolantes Semicondutores Condutores

Os materiais sólidos podem ser divididos em classes principais, conforme a distribuição atômica da estrutura:

Cristais Policristais Amorfos

Nosso interesse principal está nos semicondutores cristalinos (silício).

Um exemplo de um cristal isolante é o sal NaCl.

Classificação dos materiais de acordo com sua condutividade:

Condutores (metais)	$k = [10^7 - 10^6] \text{ Sm}^{-1}$
Semicondutores	$k = [10^{-8} - 10^6] \text{ Sm}^{-1}$
Isolantes	$k = [10^{-8} - 10^{-16}] \text{ Sm}^{-1}$
Supercondutores	$k = \infty$

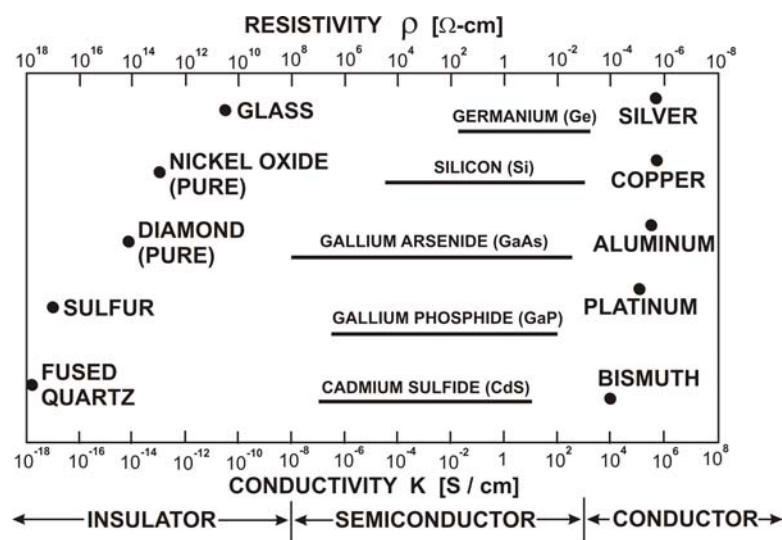
OBS: em muitos textos a condutividade é indicada por σ

Resistividade e condutividade de um material

$$\text{Resistividade} = \frac{1}{\text{Condutividade}}$$

$$\rho = \frac{1}{k} \text{ } [\Omega\text{cm}]$$

Faixa de resistividade típica para sólidos



A condutividade elétrica de um semiconductor ou isolante é altamente dependente das condições ambientais, tais como temperatura, radiação luminosa, pressão, campo magnético e pureza do material etc.

Alguns elementos e compostos semicondutores

Elemental and compound semiconductors

Elemental	Binary IV compounds	Binary III-V compounds	Binary II-VI compounds
Si	SiC	AlP	ZnS
Ge	SiGe	AlAs	ZnSe
		AlSb	ZnTe
		GaP	CdS
		GaAs	CdSe
		GaSb	CdTe
		InP	
		InAs	
		InSb	

Os semicondutores de grande importância prática são o Si, Ge, e muitos III-V e II-VI compostos, como o Arseneto de Galiumm (GaAs), indium antimonide (InSb), indium arsenide (InAs) e o cadmium sulphide (CdS).

A razão do diferente comportamento entre metais e semicondutores é que os metais contém um numero constante de portadores móveis de carga em todas temperaturas e semicondutores não. Em um semicondutor puro, para que os portadores se tornem livres, as cargas devem ser ativadas. Essa ativação requer alguma energia, que pode vir, por exemplo, da agitação térmica.

Nos metais os elétrons estão livres, podendo movimentar-se através da rede quando um campo elétrico é aplicado. O mar de elétrons da camada de valência confunde-se com a camada de condução e pode mover-se livremente.

Metais:

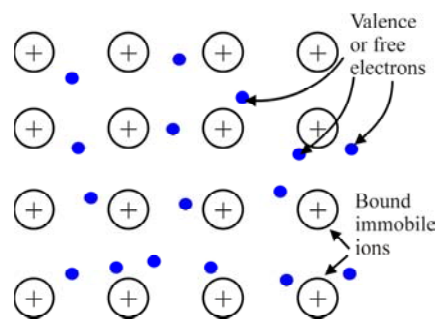


Fig. Representação bidimensional da estrutura atômica de um metal

Exemplo de uma célula unitária de silício:

No Silício, cada átomo (com 4 elétrons de valência) é cercado por outros 4 átomos de Si. Cada átomo compartilha seus elétrons de valência com 4 átomos vizinhos de forma que a última camada, ou camada de valência, está completa com 8 elétrons. Nenhum elétron livre está disponível para condução em condições normais. Todavia os elétrons não pertencem a nenhum átomo particular e estão fracamente conectados. Quando excitados (por exemplo, excitação térmica) alguns elétrons podem quebrar as ligações, ficando livres para conduzir.

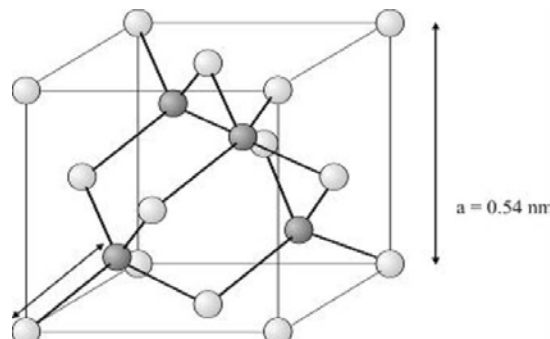


Fig. Representação tridimensional da célula unitária de Si, mostrando as ligações covalentes.

Bandas de energia:

O grau de condutividade é determinado pela estrutura de bandas de energia de um sólido.

Se um sólido é um condutor, um semi-condutor ou um isolante depende do preenchimento da banda de Valência e da energia de gap entre as camadas de valência e de condução.

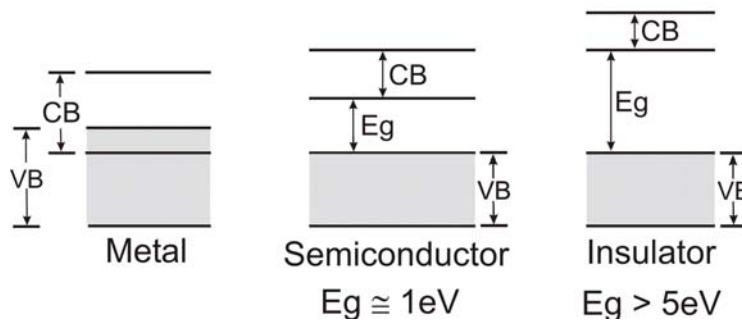


Fig. Estrutura simplificada das bandas de energia a 0K.

Metal

Observa-se a superposição de bandas de energia

Semiconductor

Na temperatura de 0 K a banda de energia repleta com elétrons mais alta é chamada de banda de valência e a próxima banda é chamada de banda de condução.

Isolante

O nível proibido é grande demais para ser transposto

Um semiconductor pode conduzir eletricidade apenas se há alguns elétrons em sua banda de condução ou lacunas na camada de valência. A energia na parte inferior da banda de condução é denominada E_C . O próximo nível de energia permitido é chamado de banda de valência. A energia na parte superior da banda de valência é chamada de E_V . Entre as duas bandas permitidas está o gap de energia ou banda proibida. Sendo que o chamado bandgap é dado por:

$$E_G = E_C - E_V$$

Esse é um dos parâmetros mais importante dos semicondutores.

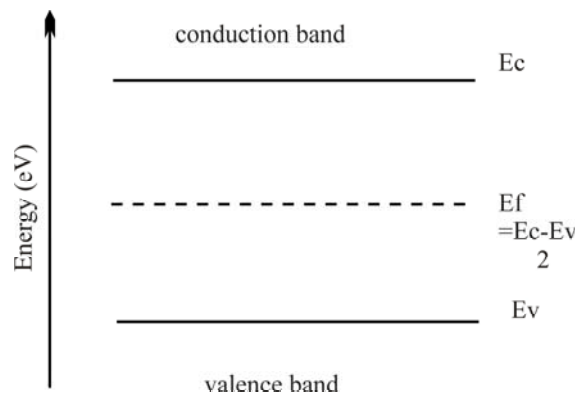
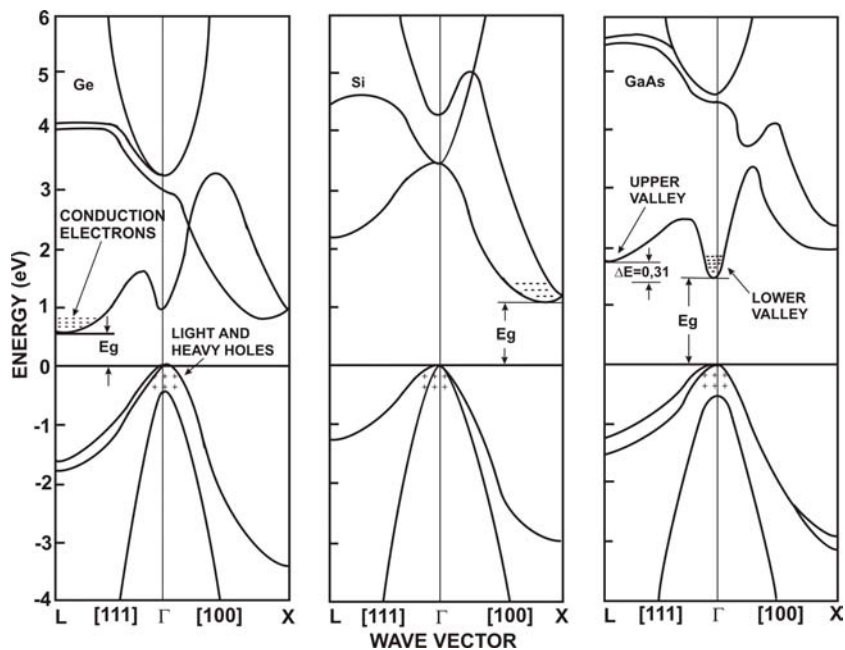


Fig. Faixas de energia em um semiconductor intrínseco.

Os elétrons livres encontram-se acima de E_c (nível de condução), e os elétrons de ligação abaixo de E_v (nível de valência). A energia necessária para a formação dos pares elétron-lacuna é $E_g = E_c - E_v$. No cristal do semiconductor puro, os elétrons não podem ter energias intermediárias.

O diagrama de banda de energia em um semiconductor é bem complexo. O diagrama de banda de energia detalhado é mostrado a seguir:



Podemos simplificar o diagrama de bandas de energia desde que apenas os elétrons na banda quase preenchida superior e a banda quase-vazia inferior dominam o comportamento do semiconductor.

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.

A 0K o semiconductor não pode conduzir, pois a camada de condução está vazia e a camada de valência está repleta de elétrons.

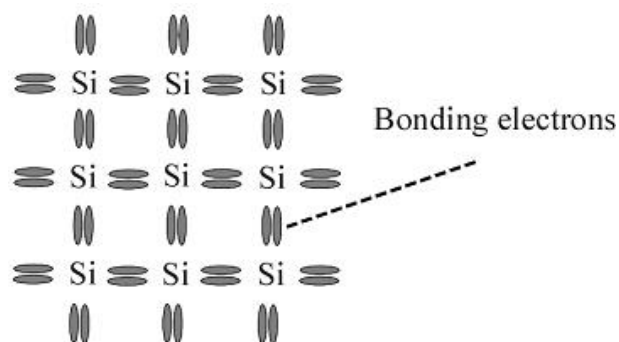
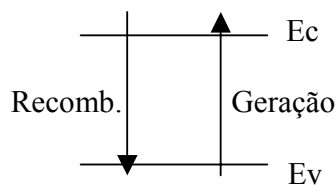


Fig. Representação bidimensional de um cristal de Si

Geração térmica: $G(T)$

Quando a temperatura aumenta, alguns elétrons deixam a camada de valência indo para a camada de condução. A densidade (concentração) destes elétrons na camada de condução é denotada por n . Os níveis desocupados na camada de valência são chamados de lacunas e sua densidade é dada por p . Nessa condição o condutor pode conduzir eletricidade.



Pares elétron-lacuna são continuamente gerados e recombinados à temperatura ambiente. Em um semiconductor puro a densidade de elétrons é igual a densidade de lacunas:

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

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

Em um semicondutor puro (intrínseco), o número da concentração intrínseca de portadores (n_i) de elétrons (livres) na camada de condução é igual ao número de lacunas (livres) (isto é elétrons faltantes) na camada de valência.

n_i depende do material considerado (da energia de bandgap), temperatura, iluminação e stress.

A concentração intrínseca de portadores, número de elétrons livres e lacunas por centímetro cúbico, é dada por:

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

sendo que:

B é um parâmetro dependente do material = $5,4 \times 10^{31}$ para o silício

k é a constante de Boltzmann = $8,62 \times 10^{-5}$ eV/K = $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/K

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

$E_G = 1,12$ eV = $1,76 \times 10^{-19}$ Joules

T é a temperatura absoluta em Kelvin

Exemplo: Calcule n_i a temperatura ambiente:

$$n_i @ 300 \text{ K} = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Geração Irradiante (ótica): $G(I)$

O elétron é excitado, saindo da banda de valência para dentro da banda de condução por um fóton com a energia maior que o band-gap. Quando ele se recombina, um fóton com energia igual ao de elétron será libertado.

Somente com a geração de pares elétron-lacuna o semicondutor intrínseco pode conduzir eletricidade.

Recombinação

Definimos como recombinação a associação de um elétron a uma lacuna, reconstituindo uma ligação covalente e a liberação de uma certa quantidade de energia.

Em equilíbrio térmico a taxa de geração G (por unidade de volume e por unidade de tempo) será igual a taxa de recombinação R .

Semicondutor extrínseco

Adicionando átomos com três ou cinco elétrons na rede cristalina do silício, alteramos o equilíbrio entre lacunas e elétrons. A adição de pequenas quantidades de outras substâncias a um semicondutor pode modificar as características elétricas do mesmo.

As propriedades elétricas de um semicondutor são dependentes da dopagem. Conforme a dopagem, a resistividade do semicondutor pode mudar por várias ordens de magnitude.

Elementos da tabela periódica

III	IV	V
B	C	
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In		Sb

Algumas características do semicondutor extrínseco:

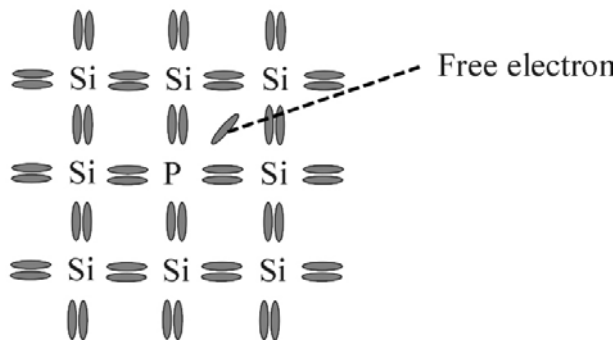
- Pode-se ajustar a condutividade pela escolha da quantidade de impurezas (nível de dopagem)
- Pode-se escolher o tipo e a quantidade dos portadores majoritários

Cristal extrínseco tipo n

De acordo com o princípio pelo qual a tabela periódica é montada, os elementos da coluna V têm um elétron a mais, na camada de valência, que os da coluna IV; cinco portanto. Esses elementos tem uma tendência de formar compostos de ligação covalente, em particular com os tetravalentes.

Os quatro elétrons de valência do elemento V, no caso arsênio (As), formam ligações covalentes com átomos de silício vizinhos, continuando a estrutura periódica da rede cfc, o quinto elétron, sem ligação covalente suplementar na qual se alojar, torna-se um elétron livre, deixando trás de si um íon positivo.

Os átomos do elemento V, na rede do semiconductor recebem o nome de doadores (de elétrons).



É possível provar em condição de equilíbrio termodinâmico, sem outra influência presente que não seja a temperatura do próprio cristal que a densidade média de lacunas no cristal N (p_N) e a densidade média de elétrons livres também no cristal N (n_N) obedece a seguinte relação:

$$p_n n_n = n_i^2 (T)$$

Essa relação também é válida para o intrínseco (puro), naquele caso:

$$n=p=n_i$$

A densidade de átomos doadores é designada por N_D . Para valores de impurezas não muito altos ($<10^{18} \text{ cm}^{-3}$), pode-se afirmar que praticamente todos os átomos doadores/aceitadores estarão ionizados, a 300 K.

Podemos fazer um balanço de carga elétrica equacionando:

$$N_D^+ + p_n = n_n$$

Levando-se em consideração que a dopagem N_D^+ é muito maior que n_i (na faixa de operação, em temperatura, dos dispositivos de estado sólido), os valores finais são:

$$n_n \cong N_D^+ \quad p_n \cong \frac{n_i^2}{N_D^+}$$

OBS:

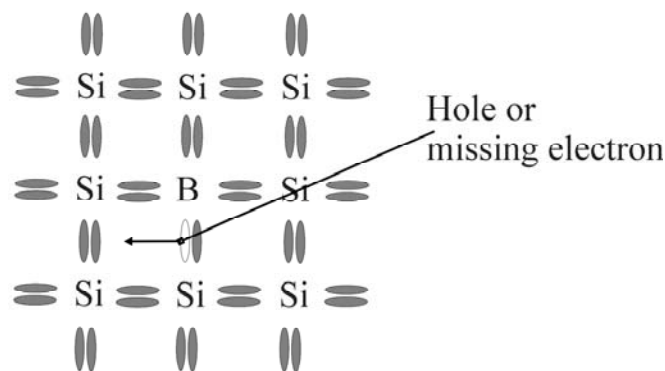
Concentração de impurezas (N_D ou N_A) na faixa de 10^{15} a 10^{20} cm^{-3}

O cristal de Si possui $5,00 \times 10^{22}$ átomos/cm³

Sendo que n_i é uma função da temperatura, isto implica que a concentração de lacunas (portadores minoritários no semiconductor tipo n) será uma função da temperatura, ao passo que a concentração de elétrons (portadores majoritários no semiconductor tipo n) será praticamente independentes da temperatura.

Cristal extrínseco tipo p

Neste tipo de cristal o elemento adicionado ao silício pertence à coluna III da tabela periódica. Temos agora a inserção de um átomo com três elétrons de valência em um ponto onde se exigem quatro ligações covalentes para que a substituição equivalente se produza, necessariamente, uma delas ficará incompleta, numa configuração instável. As impurazas da coluna III são chamadas aceitadoras e os cristais são extrínsecos do tipo p.



Da mesma maneira que para os cristais N, pode dizer que:

$$n_p p_p = n_i^2(T)$$

As relações que dão a neutralidade a carga livre são também aplicáveis para o cristal tipo P. Usando o símbolo N_A para a concentração de átomos da impureza aceitadora, e designando como N_A^- a densidade de íons negativos, a expressão de neutralidade fica:

$$N_A^- + n_p = p_p$$

Da mesma forma que no cristal tipo N, as concentrações de equilíbrio se tornam:

$$p_p \cong N_A^- \quad \text{e} \quad n_p \cong \frac{n_i^2(T)}{N_A^-}$$

Nos dois casos de dopagem, p ou n, há o aumento de apenas um tipo de portador. O balanço de carga é zero, pois os íons doadores ou aceitadores tornam-se carregados por proporcionar cargas livres.

Para associar os níveis de energia ocupados com a quantidade existente de portadores, investigamos quais são os estados possíveis para os elétrons se distribuírem.

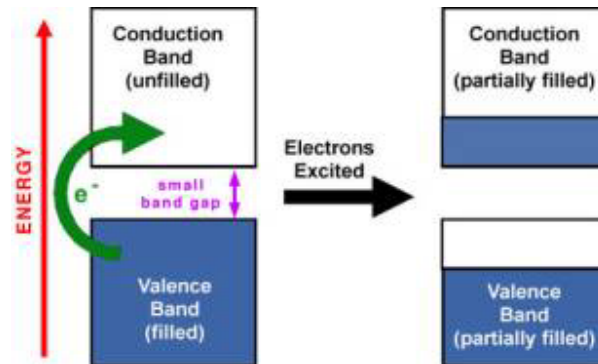


Fig. Níveis permitidos de energia para elétrons livres e lacunas no cristal semicondutor puro.

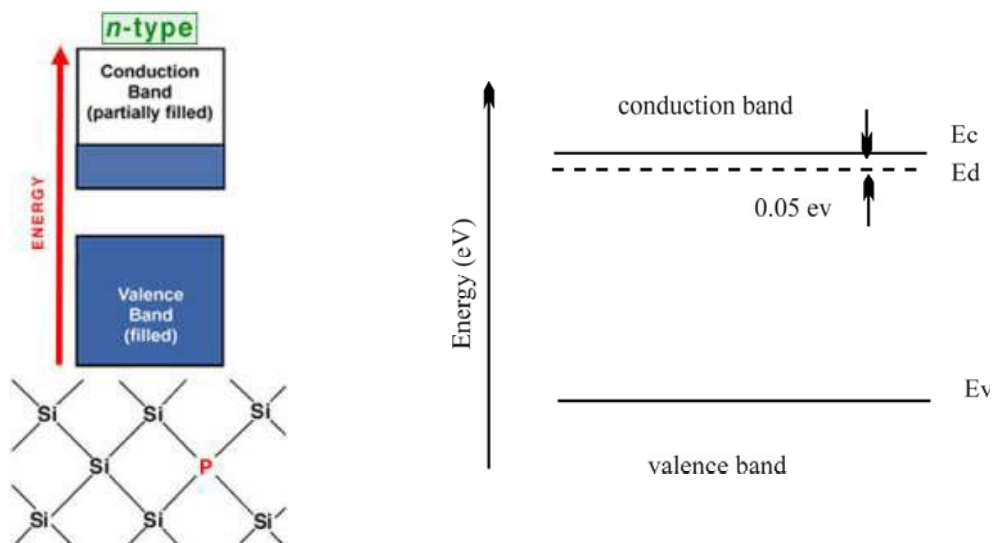
A energia necessária para a formação do par elétron lacuna é dada por:

$$E_G = E_C - E_V$$

Elétrons na faixa de condução

A inclusão de impurezas doadoras gera um nível permitido de energia (E_d) dentro da faixa proibida.

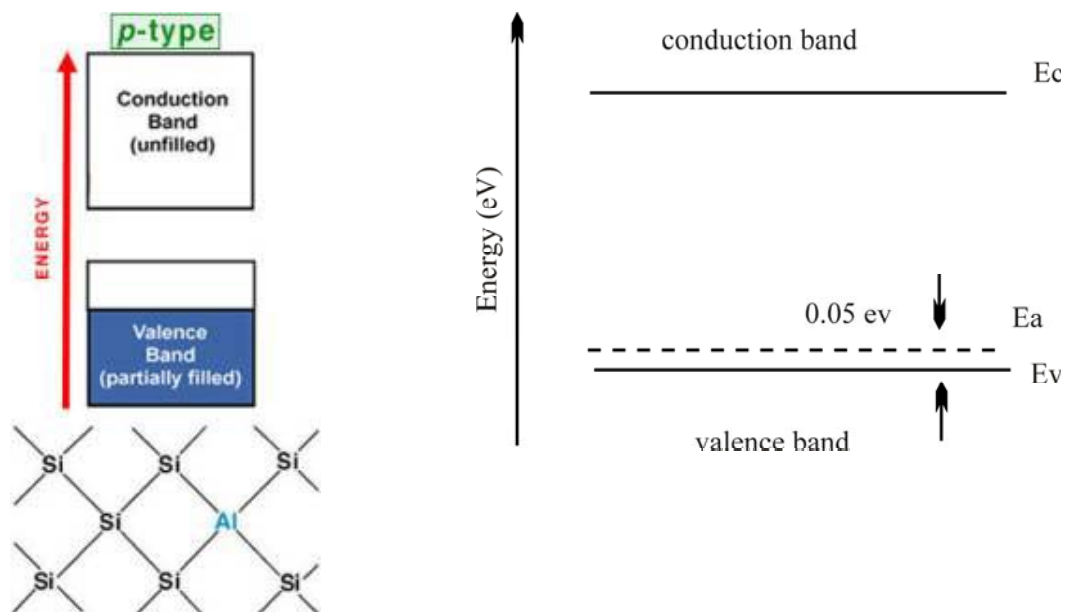
O nível ocupado pelo quinto elétron da impureza doadora encontra-se pouco abaixo de E_c , numa estreita faixa designada por ED (nível doador). Para o elemento do fósforo (coluna V) no cristal silício, o valor necessário para a transição é $E_c - E_d$, corresponde a 44 meV.



A energia (de ionização) necessária para a formação de um par elétron-lacuna é de $E_c - E_v = 44 \text{ meV}$

Lacunas na faixa de valência

O lugar vazio formado pela ligação incompleta da impureza aceitadora encontra-se pouco acima de E_v . Sendo então a energia de ionização $E_a - E_v$. Para o elemento boro no cristal silício esse valor é de 45 meV.



$$\text{Energia de ionização} = E_a - E_v$$

Correntes elétricas nos semicondutores

Para calcular a corrente elétrica em um cristal semiconductor, precisamos:

- 1) Estimar a quantidade de cargas móveis que estão presentes no material.
- 2) Estudar o processo de transporte destas cargas móveis através do cristal.
 - Processo de Deriva
 - Processo de Difusão

As partículas de vários tipos que estão presentes no semiconductor estão animadas pelo fenômeno da agitação térmica, que por sua própria característica aleatória, resulta num deslocamento em termos globais igual a zero.

A forma de se conseguir uma corrente que prevaleça é superpor alguma polarização a esse movimento natural, seja por um campo elétrico externo ou seja pela alteração nas concentrações de equilíbrio.

Corrente de campo (deriva) Corrente causada pela presença de um campo elétrico externo

Corrente dominante em resistores e transistores FET

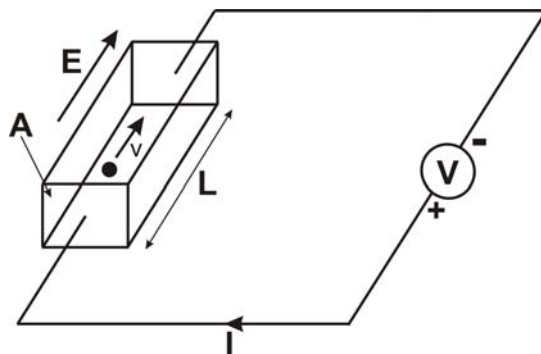
Para campos elétricos moderados, da ordem de 1 kV/cm, a relação entre a corrente aplicada a uma amostra e a corrente produzida é do tipo linear, o que equivale a dizer que a resistência elétrica é constante. Dessa forma os portadores de carga se movem com velocidade média constante da direção da corrente medida.

Deriva de um portador devido a um campo elétrico aplicado

Para campos elétricos moderados, a velocidade da carga proporcional a tensão aplicada. A velocidade pode ser calculada, sendo:

$$v_p = \mu_p E \qquad v_n = -\mu_n E \qquad [\text{cm/s}] = [\text{cm}^2/\text{Vs}] * [\text{V/cm}]$$

sendo que v_p e v_n são as velocidades médias de lacunas e elétrons, μ_p e μ_n são as mobilidades respectivas. As mobilidades exprimem a relação entre o campo elétrico (E) e a velocidade superposta à velocidade térmica existente.



A mobilidade diminui com o grau de contaminação do semicondutor e com o aumento da temperatura.

A velocidade da partícula é limitada por uma forma qualquer de atrito. A perda de energia cinética se dá por choques inelásticos com obstáculos da rede. Estes choques são eventos do tipo térmico.

Na falta de um campo elétrico aplicado, os portadores exibem um movimento aleatório, movendo-se rapidamente e mudando de direção. Quando um campo elétrico é aplicado, o movimento aleatório continua ocorrendo, superposto a um movimento ao longo da direção do campo elétrico.

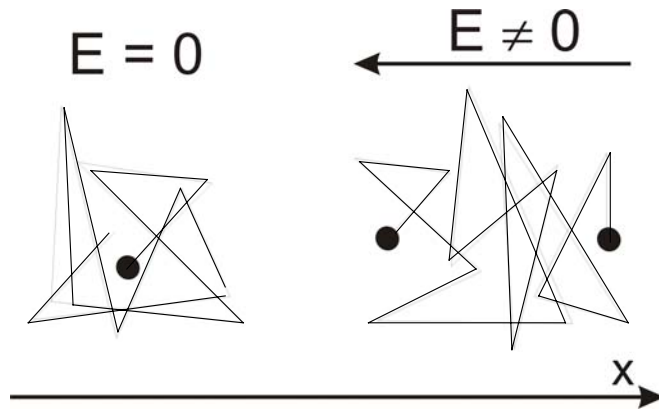


Fig. Movimento aleatório de um portador em um semiconductor com e sem um campo elétrico aplicado

Analiticamente a mobilidade é dada por:

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

τ é o tempo médio entre colisões da carga com a rede

m^* é a massa efetiva do portador¹

Nas condições de campo e contaminação moderados e a 300 K, os valores médios das mobilidades no cristal de silício são:

$$\mu_n = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \qquad \mu_p = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

Esse tipo de corrente, a partir de um potencial externo, recebe o nome de corrente de deriva. Usando o conceito de mobilidade, pode-se deduzir que as densidades de corrente são:

¹ O conceito de massa efetiva leva em consideração a influência dos átomos da rede que estão na vizinhança do portador

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

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

A corrente total de deriva, em relação ao campo, dá a condutividade k da amostra:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{J_{nder} + J_{pder}}{E} = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

Resistividade e condutividade:

$$J = \frac{E}{\rho} = kE$$

Para semicondutores extrínsecos

Cristal P

$$\frac{1}{\rho_p} \cong q\mu_p N_A^-$$

Cristal N

$$\frac{1}{\rho_n} \cong q\mu_n N_D^+$$

Corrente de difusão

Efeito dominante em junções p-n e transistores bipolares

A corrente de difusão resulta da diferença de concentração dos portadores de carga e da difusão térmica aleatória. A densidade do fluxo de difusão é proporcional ao gradiente de concentração.

Se a concentração de portadores tiver uma distribuição não uniforme, resultará em um fluxo de portadores que se materializará na corrente de difusão.

Se um gradiente de concentração é presente, o processo de difusão agirá para tornar a densidade de portadores uniforme: portadores difundem-se de regiões onde a densidade é maior para regiões onde a densidade é menor.

O processo de difusão é análogo ao movimento de um punhado de areia em uma mesa vibratória.

O equacionamento do valor desta corrente se faz como segue:

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

$$\vec{J}_{ndif} = qD_n \nabla n(x, y, z)$$

sendo que D_n e D_p são os coeficientes de difusão dos elétrons e das lacunas.

É intuitivo que tenham algo a ver com as mobilidades respectivas; essa ligação é expressa pela relação de Einstein (relaciona o coeficiente de difusão e a mobilidade) :

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

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

q é a carga do elétron $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C

V_T é um parâmetro muito importante no estudo dos semicondutores e recebe o nome de **tensão termodinâmica**.

A 0 K não há difusão! Portanto o processo de difusão depende da energia térmica.

No modelo unidimensional as correntes de difusão podem ter as suas expressões reduzidas a:

$$J_{ndif} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \qquad J_{pdif} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

A corrente de difusão ocorre mais frequentemente em junções pn devido a grande mudança na concentração de portadores.

Corrente total:

O processo de difusão depende da agitação térmica e da diferença de concentração dos portadores enquanto o processo de deriva depende do campo elétrico.

A corrente de elétrons total é obtida adicionando as componentes de deriva e difusão:

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

O mesmo pode ser feito para as lacunas:

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

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:

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

Referências:

Sedra/Smith Microeletrônica

Hilton Andrade de Mello e Ronaldo Sérgio de Biasi, Introdução à Física dos Semicondutores