

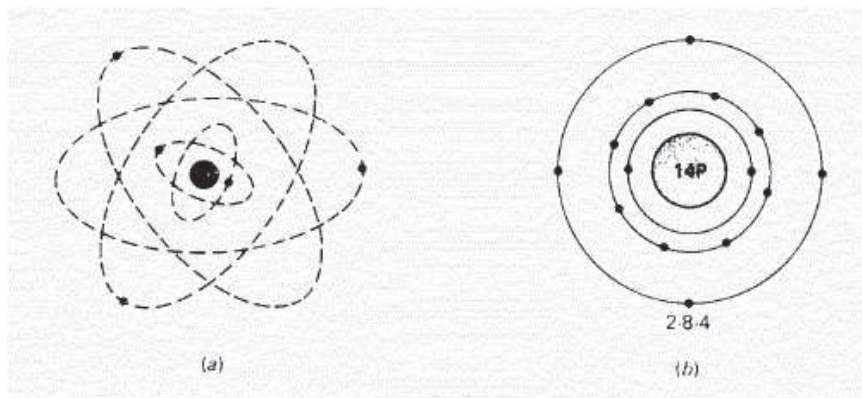
INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

Extrato do capítulo 2 de (Malvino, 1986).

2.1. TEORIA DO SEMICONDUTOR

ESTRUTURA ATÔMICA

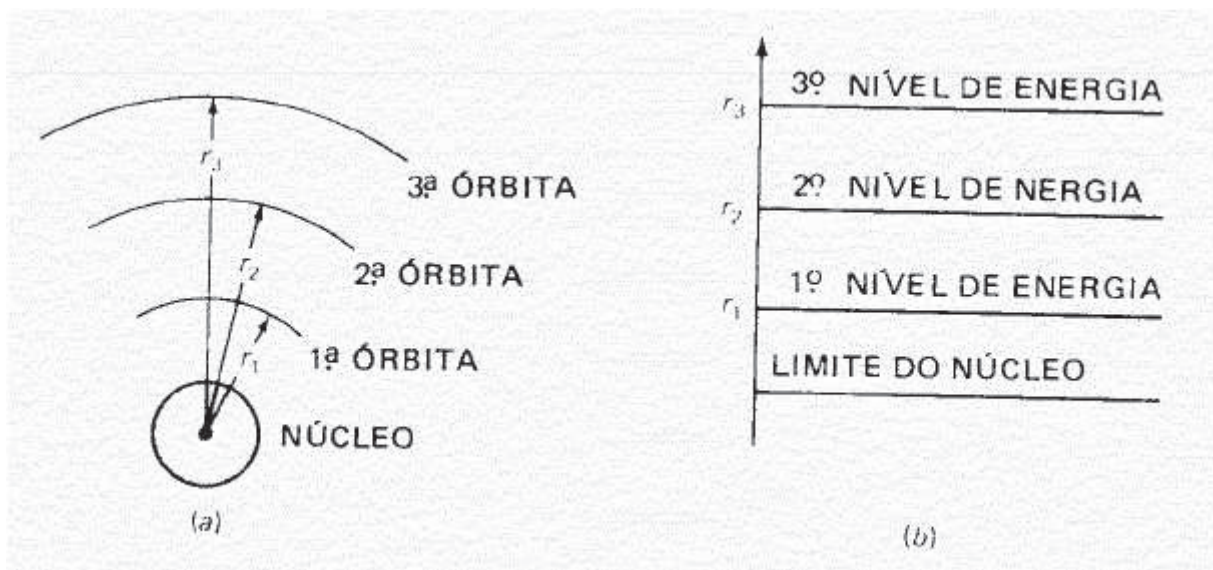
- Modelo de Bohr para o átomo (Figura 2.1 (a))
 - Núcleo rodeado por elétrons em órbita.
 - Núcleo com carga positiva associada aos prótons.
 - O elétron descreve uma órbita estável com exatamente a velocidade certa para que a força centrífuga equilibre a atração nuclear.
- Átomo isolado de Silício (Figura 2.1 (b))
 - 14 prótons e 14 elétrons.
 - Órbitas estáveis
 - Primeira: 2 elétrons.
 - Segunda: 8 elétrons.
 - Terceira (órbita externa ou órbita de valência): 4 elétrons .
 - Eletricamente neutro.
 - Átomo *tetravalente*, isto é, 4 elétrons na órbita de valência.
 - Núcleo e elétrons internos à órbita de valência são denominados *âmago* do átomo.



[Figura 2.1 (a) Modelo de Bohr (b) Átomo de Silício]

NÍVEIS DE ENERGIA

- Somente certas dimensões de órbita são permitidas (Figura 2.2 (a)).
- Quanto maior a órbita do elétron, mais alto é o seu nível de energia potencial em relação ao núcleo (Figura 2.2 (b)).
- Se o átomo for bombardeado por energia externa (calor, luz ou outra radiação), um dos elétrons pode ser elevado a um nível de energia mais alto (órbita maior).
- O átomo está então no estado de *excitação*.
- Este estado não dura muito porque o elétron energizado logo volta ao seu nível de energia original, devolvendo a energia adquirida na forma de calor, luz ou outra radiação.



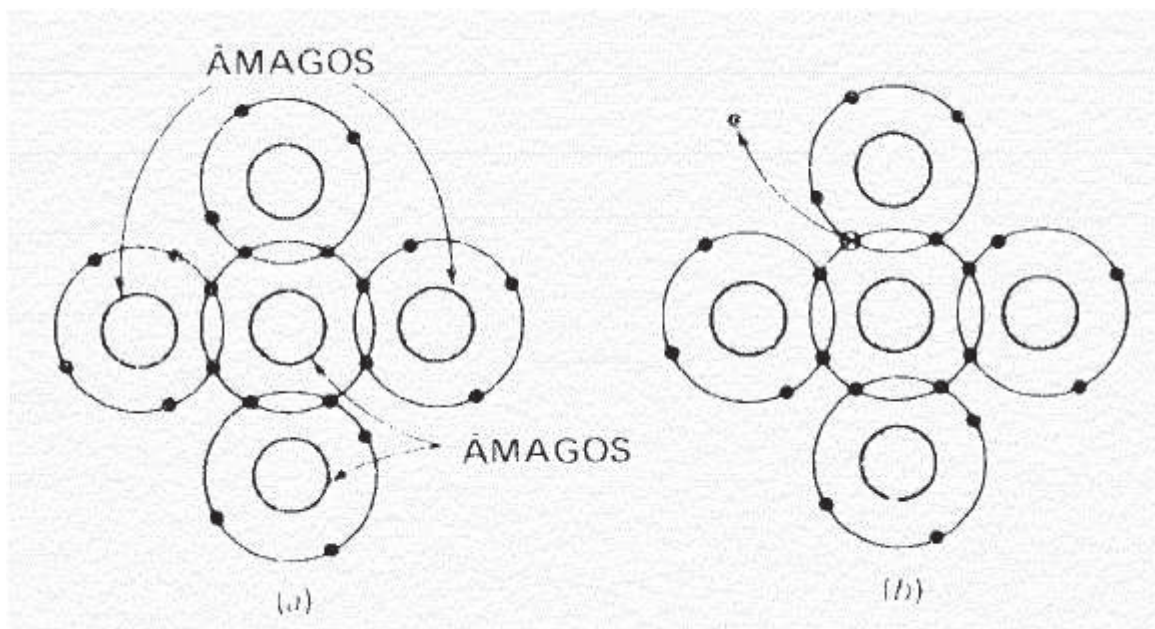
[Figura 2.2 (a) Detalhamento das órbitas (b) Níveis de energia]

CRISTAIS

- Um átomo de silício isolado possui quatro elétrons na sua órbita de valência, porém para ser quimicamente estável, precisa de oito elétrons.
- Combina-se então com outros átomos de forma a completar os outros elétrons na sua órbita de valência.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Quando os átomos de silício se combinam entre si para formar um sólido, eles se arranjam numa configuração ordenada denominada *crystal*.
- As forças que mantêm os átomos unidos são denominadas *ligações covalentes* (Figura 2.3 (a)).
- No cristal, o átomo de silício posiciona-se entre outros quatro átomos de silício, cada vizinho a compartilhar um elétron com o átomo central.
- O átomo central passa a possuir então oito elétrons na órbita de valência.
- Os oito elétrons não pertencem ao átomo central, são compartilhados pelos quatro átomos em volta.



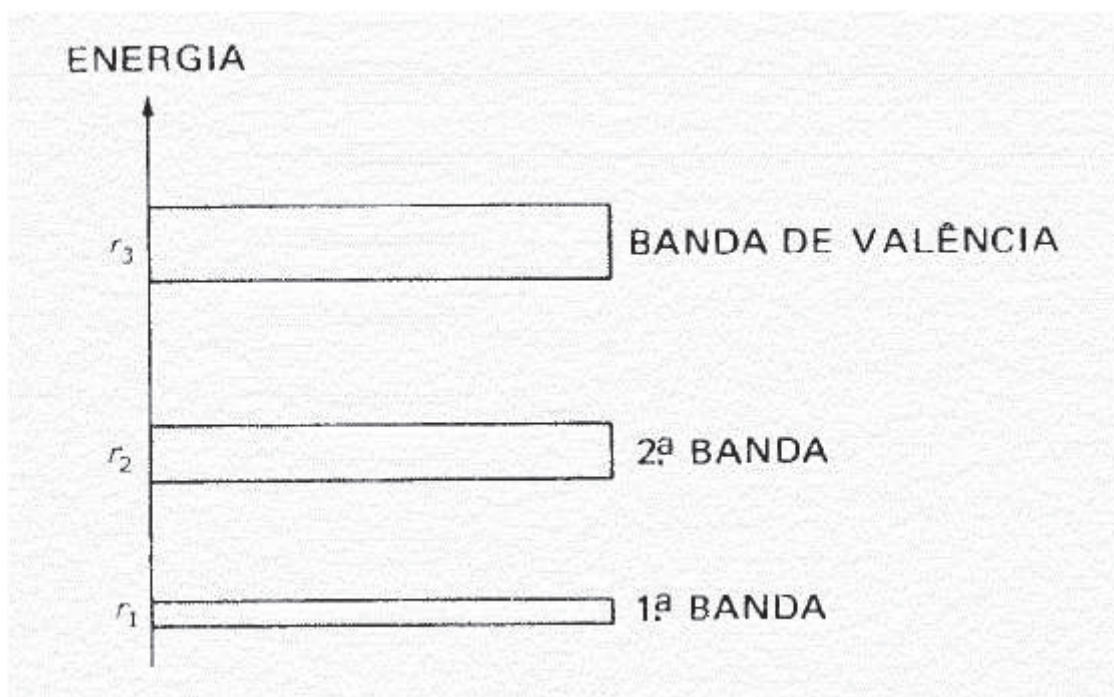
[Figura 2.3 (a) Ligações covalentes (b) Lacuna]

LACUNAS

- Quando a energia externa eleva o elétron de valência a um nível energético mais alto (órbita maior), o elétron que sai deixa uma vacância na órbita mais externa (Figura 2.3 (b)).
- Esta vacância é denominada *lacuna*.

BANDAS DE ENERGIA

- Quando os átomos de silício se combinam para formar um cristal, a órbita de um elétron sofre a influência das cargas dos átomos adjacentes.
- Como cada elétron tem uma posição diferente dentro do cristal, nenhum vê exatamente a mesma configuração de cargas vizinhas.
- Assim a órbita de cada elétron é modificada.
- Os níveis de energia associados às órbitas formam nuvens ou bandas (Figura 2.4).



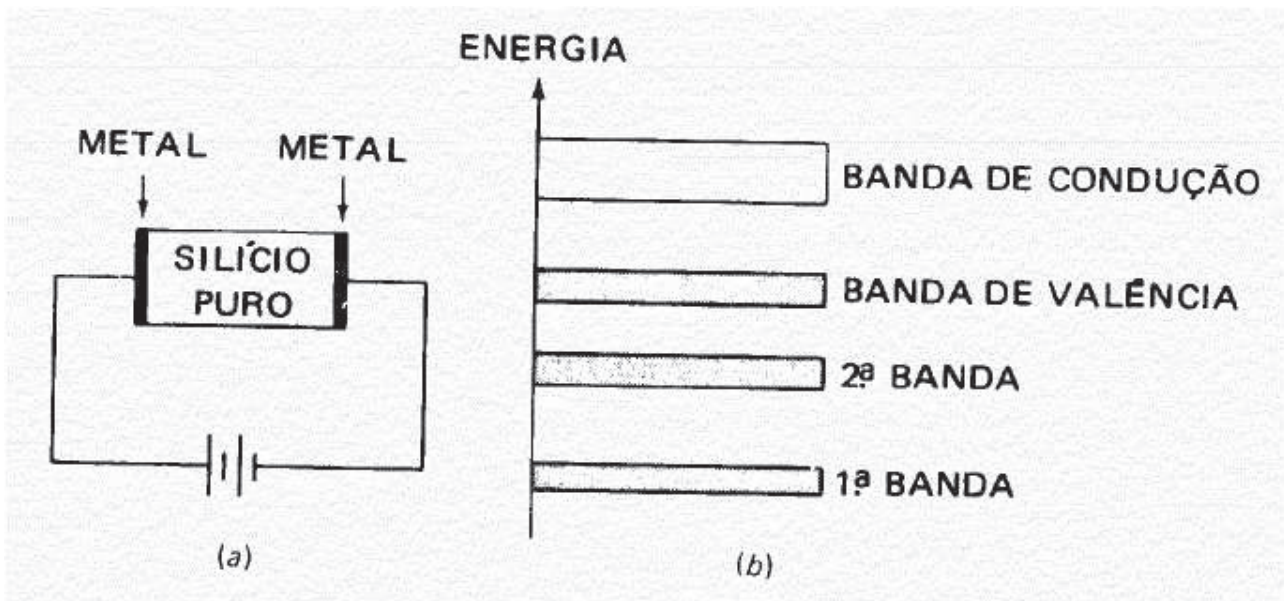
[Figura 2.4 – Bandas de Energia]

2.2. CONDUÇÃO EM CRISTAIS

- A condução num fio de cobre:
 - Cada átomo de cobre possui um elétron livre.
 - Como o elétron percorre uma órbita extremamente grande (alto nível de energia), o elétron mal pode sentir a atração do núcleo.
 - Num pedaço ou fio de cobre, os elétrons livres estão contidos numa banda de energia denominada banda de condução.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Esses elétrons livres são capazes de produzir correntes altas.
- A condução num cristal de silício:
 - A Figura 2.5 (a) mostra uma barra de silício com extremidades metálicas e uma tensão externa estabelece um campo elétrico entre as extremidades do cristal.



[Figura 2.5 (a) Circuito (b) Bandas de energia à temperatura de zero absoluto.]

ZERO ABSOLUTO

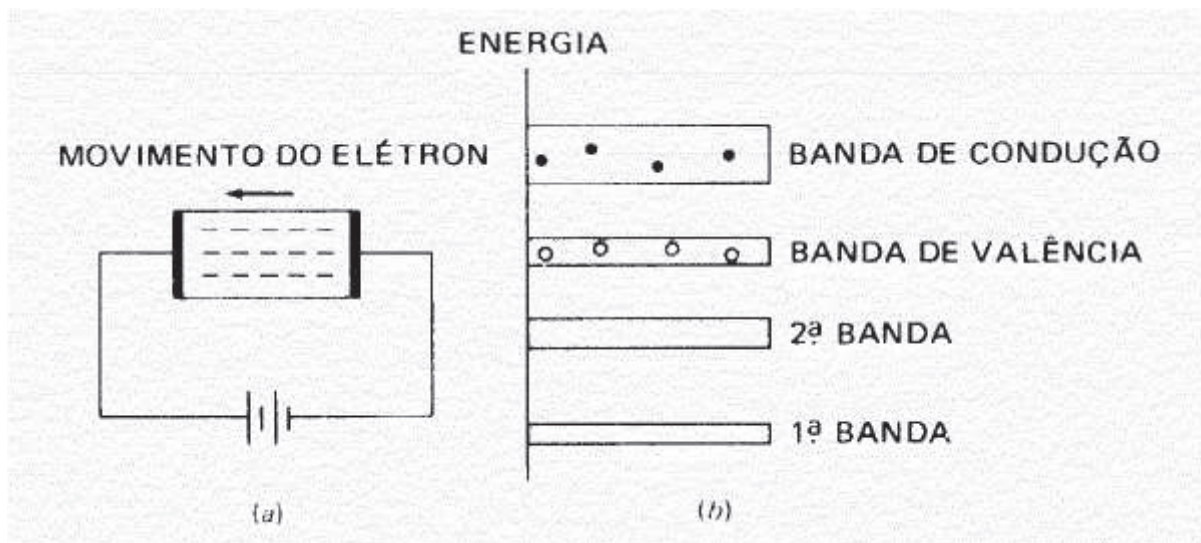
- No zero absoluto, todos os elétrons de valência estão fortemente presos aos átomos de silício, a participar das ligações covalentes entre os átomos.
- A banda de condução está vazia e não há corrente no silício (Figura 2.5 (b)).

ACIMA DO ZERO ABSOLUTO

- A energia térmica quebra algumas ligações covalentes, isto é, envia alguns elétrons da banda de valência para a banda de condução.
- Sob ação do campo elétrico, estes elétrons livres movem-se para a esquerda e estabelecem uma corrente (Figura 2.6 (a)).
- Cada vez que um elétron é bombeado para a banda de condução, cria-se uma lacuna na banda de valência.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- A banda de valência já não se encontra saturada ou preenchida, cada lacuna na banda de valência representa uma órbita de rotação disponível.
- Quanto mais alta a temperatura, maior o número de elétrons de valência empurrados para a banda de condução e maior a corrente.
- À temperatura ambiente (25°C) a corrente é pequena demais para ser utilizável.
- À essa temperatura um pedaço de silício não é bom isolante nem bom condutor, por esta razão é chamado *semicondutor*.



[Figura 2.6 (a) Fluxo de elétrons (b) Faixas de energia à temperatura ambiente]

SILÍCIO VERSUS GERMÂNIO

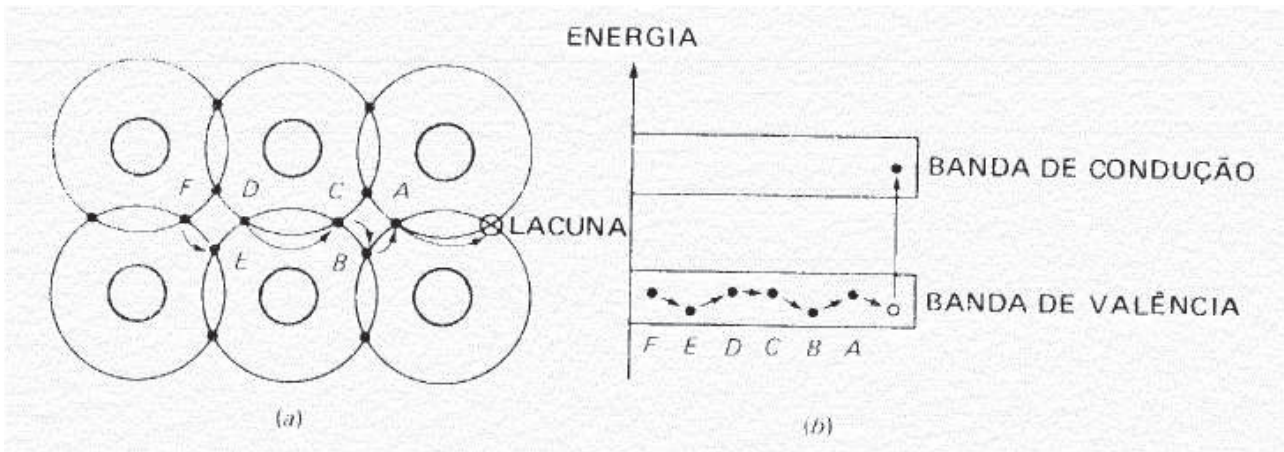
- O germânio, um outro elemento tetravalente, foi amplamente usado no início do estudo dos semicondutores.
- À temperatura ambiente, um cristal de silício não possui praticamente elétrons livres, quando comparado a um cristal de germânio sob as mesmas condições.

CORRENTE DE LACUNAS

- Um semicondutor oferece dois trajetos para corrente, um associado a elétrons na banda de condução e outro associado a elétrons na banda de valência.
- Observe o mecanismo de condução na banda de valência ilustrado na figura 2.7 (a).

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

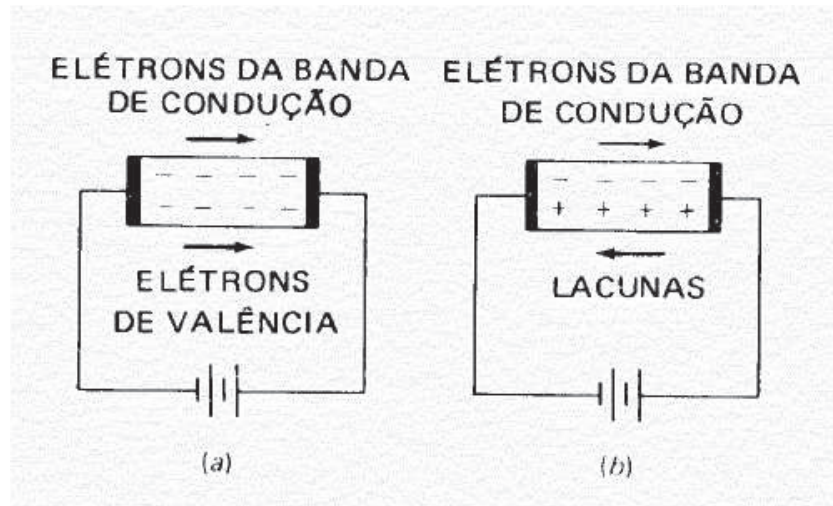
- A lacuna na extremidade direita da figura 2.7 (a) atrai o elétron em A.
- Apenas com uma pequena variação de energia o elétron de valência em A pode se deslocar para a lacuna.
- A lacuna inicial então desaparece e uma nova lacuna aparece no ponto A.
- A nova lacuna em A atrai o elétron de valência em B, e quando o elétron desloca-se para A, a lacuna desloca-se para B.
- Os elétrons de valência podem continuar a deslocar-se ao longo do trajeto mostrado pelas setas, enquanto as lacunas deslocam-se no sentido oposto.
- Pelo fato de haver lacunas nas órbitas de valência, há um segundo percurso ao longo do qual os elétrons podem se deslocar dentro do cristal.
- Na Figura 2.7 (b) ilustra-se a condução de lacunas em termos de nível de energia:
 - A energia térmica bombeia um elétron da banda de valência para a banda de condução, abrindo-se uma lacuna.
 - Com uma pequena variação de energia, o elétron de valência em A pode se deslocar para a lacuna.
 - Quando isto ocorre, a lacuna inicial desaparece e uma nova lacuna aparece em A.
 - A seguir, um elétron de valência em B pode se deslocar para a nova lacuna com uma pequena variação de energia.
- Com pequenas variações de energia os elétrons de valência podem se deslocar ao longo do trajeto indicado pelas setas.
- Isso equivale a um movimento da lacuna através da banda de valência ao longo do trajeto ABCDEF.



[Figura 2.7 (a) Corrente de lacunas (b) Diagrama de energia para a corrente de lacunas.]

PARES ELÉTRON-LACUNA

- A aplicação de uma tensão externa ao cristal força os elétrons a deslocarem-se.
- Na figura 2.8 (a) há dois tipos de elétrons móveis, os elétrons da banda de condução e os elétrons da banda de valência.
- O movimento para a direita dos elétrons de valência indica que as lacunas estão a se deslocar para a esquerda.
- Num semiconductor puro, a existência de cada elétron na banda de condução garante a existência de uma lacuna na órbita de valência de algum átomo.
- Pode-se dizer que a energia térmica produz pares elétrons-lacuna.
- As lacunas agem como se fossem cargas positivas e por esta razão são indicadas pelo sinal de mais na figura 2.8 (b).
- O Efeito Hall confirma o comportamento das lacunas como cargas positivas.



[Figura 2.8 Dois trajetos para a corrente.]

RECOMBINAÇÃO

- Na Figura 2.8 (b) ocasionalmente a órbita da banda de condução de um átomo pode interceptar a órbita da lacuna de um outro.
- É freqüente então que um elétron da banda de condução passe para uma lacuna.
- Este desaparecimento de um elétron livre e de uma lacuna é chamado recombinação.
- Quando ocorre a recombinação a lacuna desaparece.
- A recombinação ocorre constantemente num semicondutor.
- A energia térmica incidente mantém a produção de novas lacunas a elevar os elétrons de valência à banda de condução.
- O tempo médio entre a criação e o desaparecimento de um par elétron-lacuna é chamado *meia vida*, que varia de poucos nanosegundos até vários microsegundos, dependendo de quão perfeita é a estrutura do cristal, dentre outros fatores.

2.3. DOPAGEM

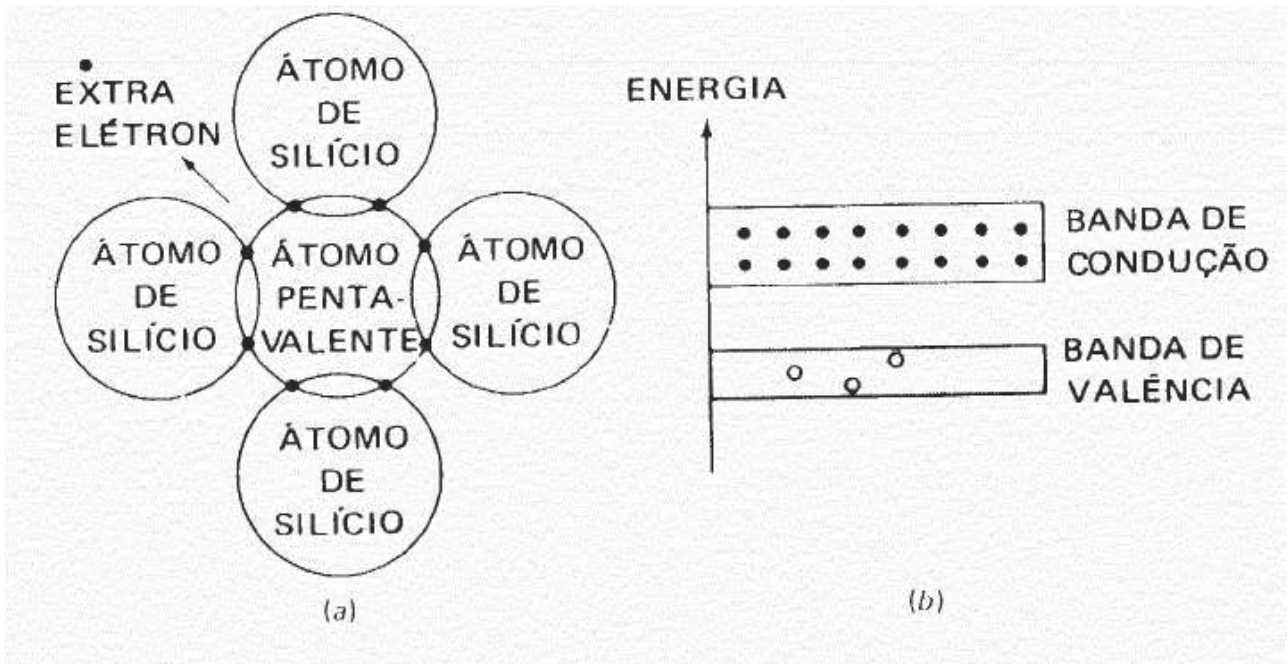
- Um cristal de silício puro é um semicondutor *intrínseco*.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Para a maioria das aplicações, não há elétrons livres nem causas suficiente num semicondutor intrínseco para produzir uma corrente utilizável.
- A *dopagem* significa introduzir átomos de *impurezas* num cristal de modo a aumentar tanto o número de elétrons livres quanto o número de lacunas.
- Com a dopagem, o cristal passa a se chamar semicondutor *extrínseco*.

SEMICONDUTOR TIPO-N

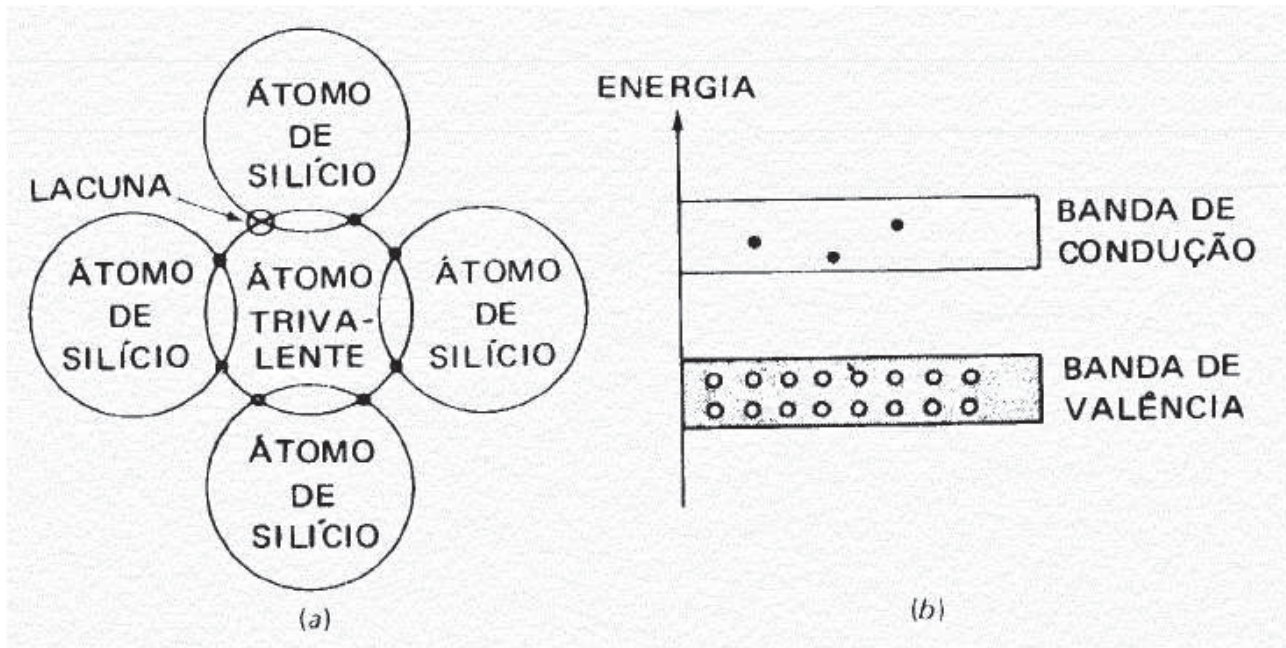
- Para se conseguir elétrons da banda de valência a mais, podem-se acrescentar átomos pentavalentes.
- O átomo pentavalente possui inicialmente 5 elétrons na órbita de valência.
- Depois de formar ligações covalentes com quatro átomos vizinhos, o átomo pentavalente central possui um elétron a mais que sobra.
- Como a órbita de valência não pode conter mais de oito elétrons, o elétron que sobra precisa percorrer uma órbita da banda de condução.
- Na figura 2.9 (b), há um grande número de elétrons da banda de condução produzido principalmente pela dopagem. Há também algumas lacunas criadas pela energia térmica.
- O silício dopado dessa forma é denominado semicondutor tipo-n, onde n significa negativo.
- Num semicondutor tipo-n, os elétrons são denominados portadores majoritários e as lacunas de portadores minoritários.
- Os átomos pentavalentes são denominados doadores, pois fornecem elétrons de banda de condução.
- Exemplos: arsênio, antimônio e fósforo.



[Figura 2.9 – Dopagem com impureza doadora.]

SEMICONDUTOR TIPO-P

- Ao se utilizar uma impureza trivalente (3 elétrons na camada de valência), apenas 7 elétrons se encontrarão nas suas órbitas de valência, e aparece uma lacuna em cada átomo trivalente.
- Um semicondutor dopado com uma impureza trivalente é conhecido como semicondutor do tipo-p, onde a letra p significa positivo.
- Na figura 2.10 (b), as lacunas de um semicondutor tipo-p excedem de longe os elétrons da banda de condução.
- Num semicondutor do tipo-p, as lacunas são os portadores majoritários enquanto que os elétrons da banda de condução são os portadores minoritários.
- Átomos trivalentes são também conhecidos como átomos aceitadores porque cada lacuna que eles fornecem pode aceitar um elétron durante a recombinação.
- Exemplos: Alumínio, boro e gálio.



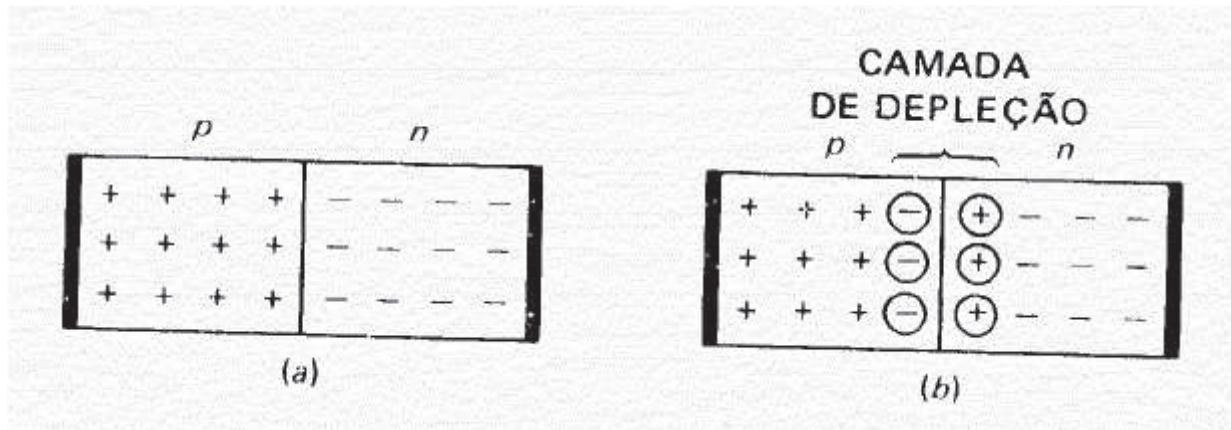
[Figura 2.10 Dopagem com impureza aceitadora]

RESISTÊNCIA DE CORPO

- Um semiconductor dopado ainda possui resistência elétrica, denominada resistência de corpo.
- Quando é levemente dopado, possui resistência de corpo alta, a medida que a dopagem aumenta, a resistência de corpo diminui.
- A resistência de corpo também é chamada resistência ôhmica, uma vez que obedece a lei de Ohm.

2.4. O DIODO NÃO POLARIZADO

- É possível produzir um cristal com dopagem parte tipo-p e parte tipo-n, denominado cristal pn ou diodo (Figuras 11 (a) e (b)).
- A figura 11 (a) mostra o cristal pn no instante de sua formação. O lado p possui várias lacunas (portadores majoritários) e o lado n possui vários elétrons livres (também portadores majoritários).



[Figura 11 (a) Antes da difusão (b) Depois da difusão]

CAMADA DE DEPLEÇÃO

- Devido à repulsão mútua, os elétrons livres no lado n difundem-se (espalham-se) em todas as direções, sendo que alguns atravessam a junção.
- Quando um elétron livre sai da região n, a sua saída cria um átomo carregado positivamente (um íon positivo) na região n.
- O elétron, como um portador minoritário na região p, possui uma vida média curta. Logo após penetrar na região preenche uma lacuna.
- Quando isso acontece, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).
- Cada vez que um elétron difunde-se através da junção, ele cria um par de íons (Figura 11 (b)).
- Os íons estão fixos na estrutura do cristal por causa da ligação covalente e não podem se deslocar livremente como os elétrons livres e as lacunas.
- À medida que o número de íons aumenta, a região próxima a junção fica totalmente esgotada de elétrons livres ou lacunas.
- A região criada na junção chama-se *camada de depleção*.

BARREIRA DE POTENCIAL

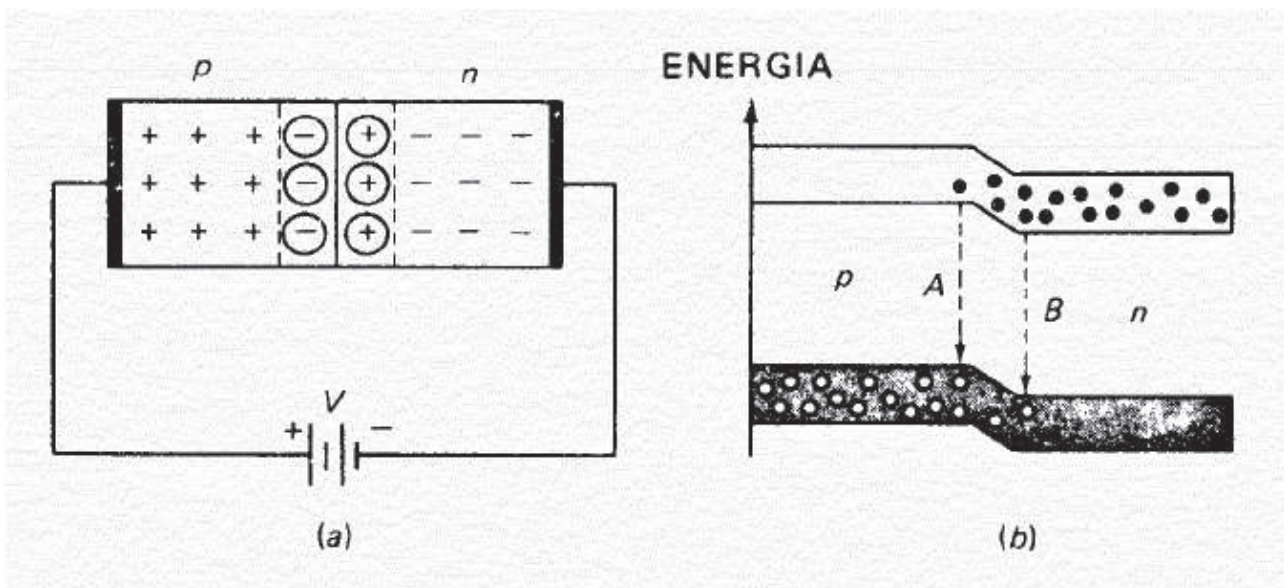
- Além de certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira a impedir o prosseguimento da difusão de elétrons livres através da junção.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- A intensidade da camada de depleção continua a aumentar com cada elétron que atravessa a junção até que se atinja um equilíbrio.
- Nesse ponto, a repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres através da junção.
- A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial.
- A 25°C, esta barreira de potencial é aproximadamente igual a 0,7V para os diodos de silício (0,3V para os diodos de germânio).

2.5. POLARIZAÇÃO DIRETA

- A figura 12 (a) mostra um diodo ligado a uma fonte de tensão cc em polarização direta, isto é, com o terminal positivo da fonte ligado à região p e o lado negativo da fonte ligado à região n.



[Figura 12 (a) Polarização direta (b) Bandas]

CORRENTE DIRETA ALTA

- A polarização direta produz uma alta corrente direta.
- O terminal negativo da fonte repele elétrons livres da região n em direção à junção.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Estes elétrons, com energia adicional, podem atravessar a junção e encontrar as lacunas.
- A recombinação ocorre em distâncias variáveis a partir da junção, dependendo de até onde um elétron livre possa evitar o encontro com uma lacuna.
- As chances de recombinação são maiores perto da junção.
- À medida que os elétrons encontram as lacunas, eles se tornam elétrons de valência, e continuam a se deslocar para a esquerda através das lacunas do material p.
- Quando os elétrons de valência atingem a extremidade esquerda do cristal, eles abandonam o cristal e escoam para o terminal positivo da fonte.
- A história de vida de um único elétron que se desloca do terminal negativo para o terminal positivo da fonte é então:
 - Depois de deixar o terminal negativo, entra pela extremidade direita do cristal.
 - Atravessa a região n como um elétron livre.
 - Próximo à junção, recombina-se e torna-se um elétron de valência.
 - Atravessa a região p com um elétron de valência.
 - Depois de sair pela extremidade esquerda do cristal, segue para o terminal positivo da fonte.

BANDAS DE ENERGIA

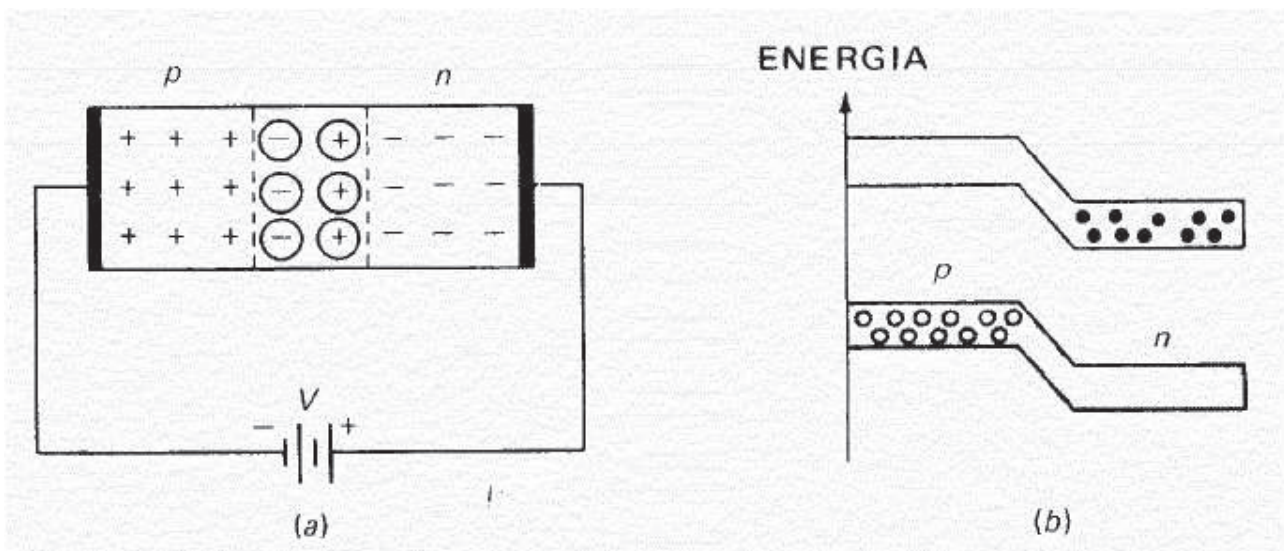
- A Figura 12 (b) mostra como visualizar o fluxo em termos de bandas de energia.
- A barreira de potencial dá às bandas p um pouco mais de energia do que para as bandas n.
- Um fluxo estável de elétrons de banda de condução desloca-se em direção à junção e preenche as lacunas próximas à junção.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Os elétrons capturados, agora elétrons de valência, movem-se para a esquerda a formar um fluxo estável através das lacunas na região p.
- Dessa forma obtém-se um fluxo contínuo de elétrons através do diodo.
- À medida que os elétrons livres desaparecem ao longo dos trajetos A e B, eles descem de um nível mais alto de energia para um outro mais baixo, a irradiar energia na forma de calor ou luz.

2.6. POLARIZAÇÃO REVERSA

- Na polarização reversa o terminal positivo da fonte é ligado à região n e o terminal negativo é ligado à região p (Figura 13 (a)).



[Figura 13 (a) Polarização reversa (b) Bandas de energia]

CAMADA DE DEPLEÇÃO

- A polarização reversa força que os elétrons livres da região n se afastem da junção em direção ao terminal positivo da fonte, as lacunas da região p também se deslocam da junção para o terminal negativo.
- O afastamento dos elétrons e das lacunas deixam mais íons positivos e negativos próximos à junção, respectivamente. Portanto, a camada de depleção fica mais larga.
- Quanto maior a polarização reversa, maior torna-se a camada de depleção.

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- A camada de depleção pára de aumentar quando sua diferença de potencial se iguala à tensão da fonte.

CORRENTE DE PORTADORES MINORITÁRIOS

- A energia térmica cria continuamente um número limitado de elétrons livres e de lacunas de ambos os lados da junção. Por causa dos portadores minoritários aparece uma pequena corrente no circuito.
- A corrente reversa produzida pelos portadores minoritários é chamada *corrente de saturação* e designada por I_S . O nome saturação relaciona-se ao fato de que não há mais corrente que a produzida pela energia térmica.
- Somente um aumento de temperatura pode aumentar I_S . Possui o seu valor dobrado para cada aumento de 10°C na temperatura.
- Um diodo de silício possui um valor de I_S muito maior que um diodo de germânio. É uma das razões pelas quais o silício domina o campo dos componentes semicondutores.

CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL

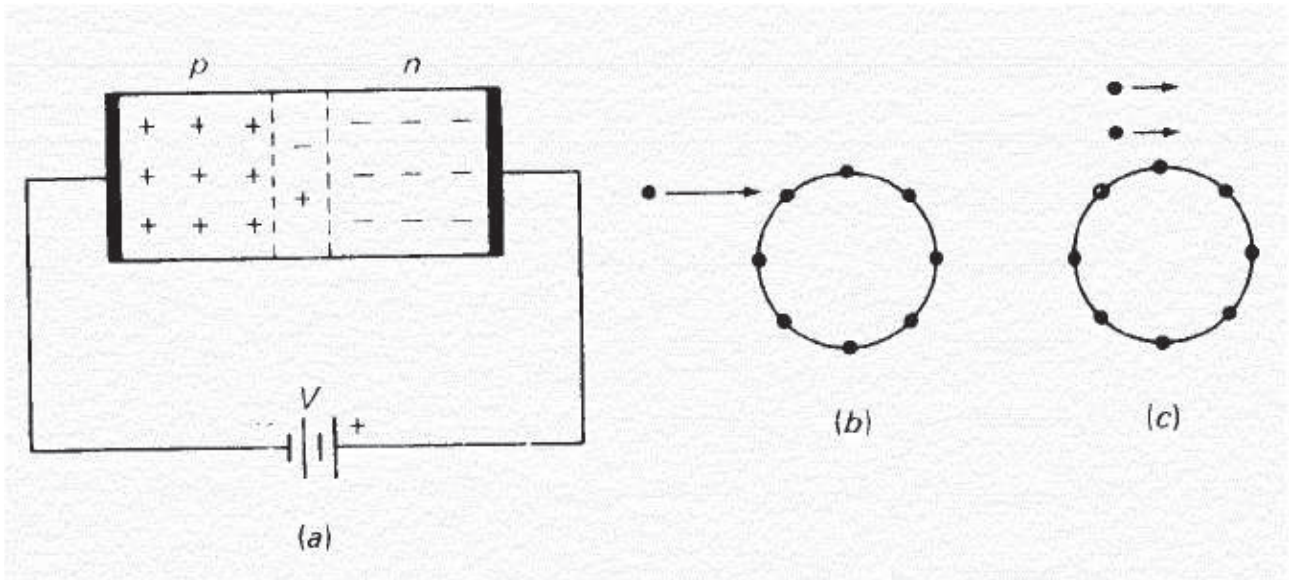
- Além da corrente reversa há uma pequena corrente na superfície do cristal.
- Esta outra componente da corrente reversa é denominada corrente de fuga superficial, simbolizada por I_{FS} . É produzida por impurezas na superfície do cristal que criam trajetos ôhmicos para a corrente.
- Da mesma forma que a corrente produzida termicamente, a corrente de fuga superficial é extremamente pequena.

CORRENTE REVERSA

- Os *datasheets* dos fabricantes de diodos costumam englobar I_S e I_{FS} numa única corrente reversa I_R , geralmente especificada para um dado valor de tensão reversa V_R e de temperatura ambiente T_A .
- Exemplo: para o Diodo 1N914 $I_R = 25\text{nA}$ para $V_R = 20\text{V}$ e $T_A = 25^\circ\text{C}$.

TENSÃO DE RUPTURA

- Se a tensão reversa for aumentada até certo ponto, atinge-se a tensão de ruptura do diodo.
- Para diodos retificadores, a tensão de ruptura é geralmente maior que 50V.
- Atingida a tensão de ruptura, o diodo passa a conduzir intensamente.
 - A Figura 14 (a) mostra um elétron produzido termicamente, e uma lacuna na camada de depleção.
 - Devido à polarização reversa, o elétron livre é empurrado para a direita, ganhando velocidade.
 - Quanto maior a polarização reversa, mais rápido desloca-se o elétron.
 - O elétron pode colidir com um elétron de valência, e se estiver com energia o suficiente, formam-se dois elétrons livres.
 - Os dois elétrons livres podem se acelerar e desalojar outros elétrons de valência até ocorrer a maior avalanche possível.
 - Por causa do grande número de elétrons livres, o diodo conduz intensamente.



[Figura 14 Ruptura (a) portadores minoritários na camada de depleção (b) elétron livre atinge elétron de valência (c) Dois elétrons livres]

INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

- Não se permite na maioria dos diodos que se chegue ao rompimento. Um projeto conveniente mantém a tensão reversa do diodo sempre abaixo da tensão de ruptura.
- Não há nenhum símbolo padrão para a tensão de ruptura reversa, podendo haver diversas versões:
 - V(BR): tensão de ruptura.
 - BV: tensão de ruptura.
 - PRV: tensão reversa de pico.
 - PIV: tensão inversa de pico.
 - VRWM: tensão reversa máxima de trabalho.
 - VRM: tensão reversa máxima.
 - entre outras.
- Alguns fabricantes informam especificações da tensão reversa para cc e ca.

REFERÊNCIAS

Malvino, P. Eletrônica, volume 1, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.