

Diodos Semicondutores

1



1.1 INTRODUÇÃO

Algumas décadas após a introdução do transistor em 1940, tem-se percebido uma mudança muito dramática na indústria eletrônica. A miniaturização crescente leva-nos a questionar sobre seus limites. Sistemas completos aparecem agora sobre um wafer milhares de vezes menor do que um simples elemento dos circuitos anteriores. As vantagens associadas com os sistemas atuais, quando comparados com circuitos a válvulas dos anos anteriores, são, para a maioria, imediatamente óbvias: menores e leves, nenhuma necessidade de aquecimento ou perda de calor (como necessário para válvulas), construção mais robusta, mais eficiente, e não requer período de aquecimento.

A miniaturização de anos recentes tem resultado em sistemas tão pequenos que o objetivo principal do encapsulamento é simplesmente fornecer algum meio de manusear o dispositivo e garantir que as conexões mantenham-se adequadamente fixas ao wafer semicondutor. Os limites da miniaturização parecem ser estabelecidos por três fatores: a qualidade do material semicondutor, a técnica de projeto do circuito e os limites de fabricação e equipamento de processamento.

1.2 DIODO IDEAL

O primeiro dispositivo eletrônico a ser introduzido é chamado *diodo*. Ele é o mais simples dos dispositivos semicondutores, mas exerce um papel vital em sistemas eletrônicos, com suas características assemelhando-se às de uma simples chave. Ele aparecerá em um conjunto de aplicações, estendendo-se do simples ao mais complexo. Além dos detalhes de sua construção e características, os dados essenciais e gráficos encontrados nas folhas de especificação também serão cobertos, para garantir um entendimento da terminologia empregada e para demonstrar a vasta informação tipicamente disponível pelos fabricantes.

Antes de examinarmos a construção e características de um dispositivo real, primeiro consideraremos o dispositivo ideal, para fornecer uma base de comparação. O *diodo ideal* é um dispositivo de *dois terminais*, tendo o símbolo e a curva característica mostrados na Fig. 1.1a e b, respectivamente.

Idealmente, um diodo irá conduzir corrente no sentido definido pela seta no símbolo, e age como um circuito aberto para

qualquer tentativa de estabelecer corrente no sentido oposto. Em resumo:

As características de um diodo ideal são aquelas de uma chave que pode conduzir corrente somente em um sentido.

Na descrição dos elementos a seguir, é importantíssimo que as diversas *letras dos símbolos, polaridades de tensão e sentidos de corrente* sejam definidos. Se a polaridade da tensão aplicada é consistente com aquela mostrada na Fig. 1.1a, a região da curva característica a ser considerada na Fig. 1.1b está à direita do eixo vertical. Se uma tensão reversa for aplicada, a região esquerda da curva é considerada. Se a corrente através do diodo tem a direção indicada na Fig. 1.1a, a região da curva característica a ser considerada está acima do eixo horizontal, enquanto uma inversão no sentido exigiria o uso da curva abaixo do eixo. Para a maioria das características do dispositivo mostradas neste livro, a *ordenada* (ou eixo “y”) será o eixo da *corrente*, enquanto a *abscissa* (ou eixo “x”) será o eixo da *tensão*.

Um dos parâmetros importantes para o diodo é a resistência no ponto ou região de operação. Se considerarmos a região de condução definida pelo sentido de I_D e polaridade V_D na Fig.

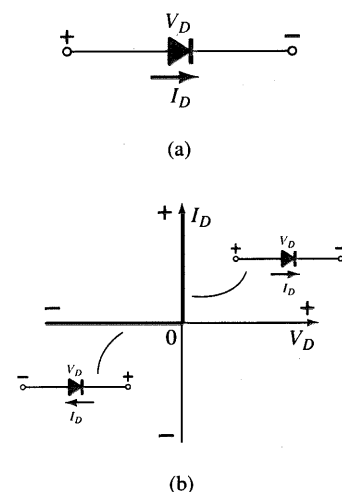


Fig. 1.1 Diodo ideal: (a) símbolo; (b) curva característica.

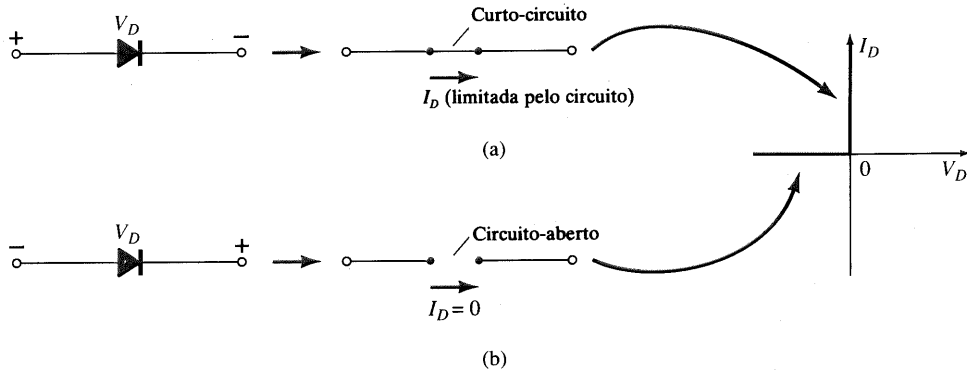


Fig. 1.2 Estados de (a) condução e (b) não-condução do diodo ideal determinados pela polarização aplicada.

1.1a (quadrante superior direito da Fig. 1.1b), concluiremos que o valor da resistência direta, R_F , conforme definida pela lei de Ohm, é

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} = \frac{0 \text{ V}}{2, 3, \text{ mA}, \dots, \text{ ou qualquer valor positivo}} = 0 \ \Omega \text{ (curto-circuito)}$$

onde V_F é a tensão direta através do diodo e I_F é a corrente direta através do diodo.

O diodo ideal é, portanto, um curto-circuito para a região de condução.

Se considerarmos agora a região de potencial negativo aplicado (terceiro quadrante), da Fig. 1.1b,

$$R_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{-5, -20, \text{ ou qualquer potencial de polarização reversa}}{0 \text{ mA}} = \infty \ \Omega \text{ (circuito-aberto)}$$

onde V_R é a tensão reversa através do diodo, e I_R é a corrente reversa do diodo.

O diodo ideal é, portanto, um circuito-aberto na região de não-condução.

Em resumo, as condições descritas na Fig. 1.2 são aplicáveis.

Em geral, é relativamente simples determinar se um diodo está na região de condução ou não-condução, observando-se simplesmente a direção da corrente I_D estabelecida por uma tensão aplicada. Para o fluxo convencional (oposto ao fluxo do elétron), se a corrente de diodo resultante tem o mesmo sentido que a seta do símbolo do diodo, o diodo está operando na região de condução conforme descrito na Fig. 1.3a. Se a corrente resultante tem a direção oposta, como mostrado na Fig. 1.3b, o circuito-aberto equivalente é apropriado.

Conforme indicado anteriormente, o propósito principal desta seção é introduzir as características de um dispositivo ideal, por comparação com as características da variedade comercial. À medida que avançamos nas próximas seções, devemos manter as seguintes questões em mente:

Quão próximo irá a resistência direta ou “ligada” de um diodo real equivaler ao nível 0-Ω desejado?

A resistência de polarização reversa é suficientemente grande para permitir uma aproximação de circuito-aberto?

1.3 MATERIAIS SEMICONDUTORES

A própria expressão *semicondutor* apresenta uma sugestão sobre sua característica. O prefixo *semi-* é normalmente aplicado a uma faixa de níveis situada entre dois limites.

O termo condutor é aplicado a qualquer material que sustenta um fluxo de uso de carga, quando uma fonte de tensão amplitude limitada é aplicada através de seus terminais.

Um isolante é o material que oferece um nível muito baixo de condutividade sob pressão de uma fonte de tensão aplicada.

Um semicondutor é, portanto, o material que possui um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor.

Inversamente relacionada à condutividade de um material está sua resistência ao fluxo de carga, ou corrente. Isto é, maior o nível de condutividade, menor o nível de resistência. Em tabelas, o termo *resistividade* (ρ , letra grega rho) é geralmente usado quando se compara aos níveis de resistência dos materiais. Em unidades métricas, a resistividade de um material é medida em $\Omega\text{-cm}$ ou $\Omega\text{-m}$. As unidades de $\Omega\text{-cm}$ são obtidas pela substituição das unidades para cada quantidade da Fig. 1.4 na seguinte equação (que se obtém da equação básica de resistência $R = \rho l/A$):

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{(\Omega)(\text{cm}^2)}{\text{cm}} \Rightarrow \Omega\text{-cm} \quad (1.1)$$

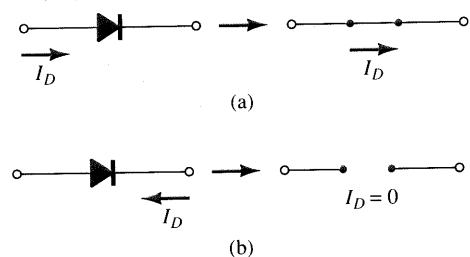


Fig. 1.3 Estados de (a) condução e (b) não-condução do diodo ideal, como determinado pelo sentido da corrente convencional estabelecida pelo circuito.

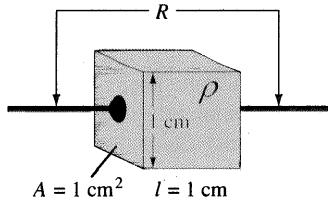


Fig. 1.4 Definindo as unidades métricas de resistividade.

De fato, se a área da Fig. 1.4 é 1 cm² e o comprimento 1 cm, o valor da resistência do cubo da Fig. 1.4 é igual à resistividade do material, conforme demonstrado abaixo:

$$|R| = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{(1 \text{ cm})}{(1 \text{ cm}^2)} = |\rho| \text{ohms}$$

Será útil lembrar deste fato ao compararmos os níveis de resistividade nas discussões a seguir.

No Quadro 1.1, os valores típicos de resistividade são fornecidos por três grandes categorias de materiais. Embora você possa estar familiarizado com as propriedades elétricas do cobre e mica de estudos passados, as características dos materiais semicondutores de germânio (Ge) e silício (Si) podem ser relativamente inéditas. Como você verificará nos capítulos a seguir, eles não são, com certeza, os dois únicos materiais semicondutores. Eles são, contudo, os dois materiais que têm recebido maior interesse no desenvolvimento de dispositivos semicondutores. Em anos recentes, a tendência é a adoção do silício em detrimento do germânio, mas o germânio ainda continua em modesta produção.

Observe no Quadro 1.1 a diferença extrema entre os materiais condutor e isolante para o comprimento de 1 cm (área de 1 cm²) do material. Dezoito posições separam o ponto decimal de um número para o outro. Justifica-se a atenção que Ge e Si recebem por várias razões. Uma consideração muito importante é o fato de eles poderem ser fabricados em um nível muito grande de pureza. De fato, avanços recentes têm reduzido níveis de impureza no material puro para uma parte por 10 bilhões (1:10.000.000.000). Alguém poderia perguntar se estes níveis reduzidos de impureza são mesmo necessários. Eles certamente são, se considerarmos que a adição de uma parte de impureza (do tipo adequado) por milhão em um wafer do material de silício pode mudar aquele material de um condutor relativamente pobre para um bom condutor de eletricidade. Estamos lidando, é claro, com um espectro totalmente novo de níveis de comparação, quando lidamos com o meio semiconductor. A capacidade de mudar significativamente as características do material através deste processo, conhecido como “dopagem”, já é uma razão do porquê o Ge e Si têm recebido toda esta atenção. Outras razões incluem o fato de suas características poderem ser muito alteradas pela aplicação de calor ou luz — uma consideração importante no desenvolvimento de dispositivos sensíveis ao calor e luz.

QUADRO 1.1 Valores de Resistividade Típicos

Condutor	Semicondutor	Isolante
$\rho \cong 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (cobre)	$\rho \cong 50 \Omega\text{-cm}$ (germânio) $\rho \cong 50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ (silício)	$\rho \cong 10^{12} \Omega\text{-cm}$ (mica)

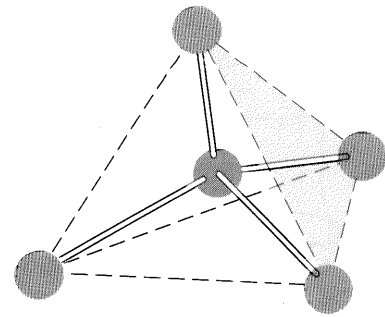


Fig. 1.5 Estrutura cristalina simples do Ge e Si.

Algumas das qualidades específicas do Ge e Si observadas acima são devidas a suas estruturas atômicas. Os átomos de ambos os materiais formam um modelo bem preciso, que é periódico por natureza (isto é, repetem-se continuamente). Um modelo completo é chamado *crystal*, e *treliça* é o arranjo periódico dos átomos. Para Ge e Si, o cristal tem a estrutura de diamante tridimensional da Fig. 1.5. Qualquer material composto apenas de estruturas cristalinas repetidas no mesmo tipo é chamado de uma estrutura de *crystal singular*. Para materiais semicondutores de aplicação prática no campo de eletrônica, esta característica de crystal singular existe e, além disso, a periodicidade da estrutura não muda significativamente com a adição de impurezas no processo de dopagem.

Vamos agora examinar a estrutura do átomo e observar como ele poderia afetar as características elétricas do material. Como se sabe, o átomo é composto de três partículas básicas; o *elétron*, o *próton* e o *nêutron*. Na estrutura atômica, os nêutrons formam o *núcleo*, enquanto que os elétrons giram em torno do núcleo em uma *órbita* fixa. Os modelos de Bohr dos dois semicondutores mais comumente usados, *germânio* e *silício*, são mostrados na Fig. 1.6.

Conforme indicado pela Fig. 1.6a, o átomo de germânio tem 32 elétrons orbitando, enquanto o silício tem 14. Em cada caso, existem quatro elétrons na camada mais externa (*valência*). O potencial (*potencial de ionização*) exigido para qualquer um

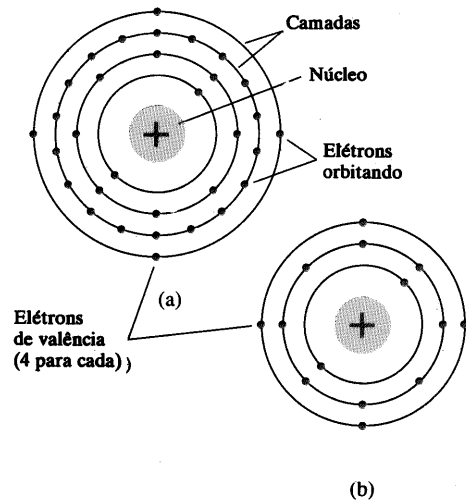


Fig. 1.6 Estrutura atômica (a) do germânio; (b) do silício.

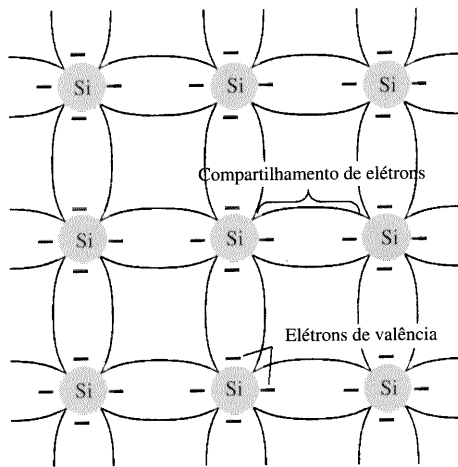
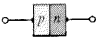


Fig. 1.7 Ligação covalente do átomo de silício.

destes quatro elétrons de valência é menor do que o necessário para qualquer outro na estrutura. Em um cristal puro de germânio ou silício, estes quatro elétrons de valência estão ligados a quatro átomos de ligação, conforme mostrado na Fig. 1.7 para o silício. Tanto Ge como Si são referidos como *átomos tetravalentes*, pois eles têm, cada um, quatro elétrons de valência.

Uma ligação de átomos, baseada no compartilhamento de elétrons, é chamada ligação covalente.

Embora a ligação covalente resulte em uma ligação mais forte entre os elétrons de valência e seus átomos da matriz, ainda é possível para os elétrons de valência absorverem energia cinética suficiente de fatores naturais, para quebrarem a ligação e assumirem o estado “livre”. O termo “livre” revela que seu movimento é bem sensível aos campos elétricos aplicados, como os estabelecidos pelas fontes de tensão, ou qualquer diferença de potencial. Estes fatores naturais incluem efeitos como a energia da luz na forma de fótons e a energia térmica do meio. À temperatura ambiente, existem aproximadamente $1,5 \times 10^{10}$ portadores livres em um centímetro cúbico de material de silício intrínseco.

Materiais intrínsecos são aqueles semicondutores que foram cuidadosamente refinados para reduzirem as impurezas a um nível muito baixo — essencialmente tão puro quanto possível através da tecnologia moderna.

Os elétrons livres no material, devido somente aos fatores naturais, são referidos como *portadores intrínsecos*. Na mesma temperatura, um material de germânio intrínseco terá aproximadamente $2,5 \times 10^{13}$ portadores livres por centímetro cúbico. A razão entre o número de portadores no germânio e o número no silício é maior do que 10^3 , e indica que o germânio é melhor condutor à temperatura ambiente. Isto pode ser verdade, mas ambos são ainda considerados maus condutores no estado intrínseco. Observe que no Quadro 1.1 a resistividade também difere por uma razão em torno de 1000:1, com o silício apresentando o maior valor. Obviamente, esse resultado está de acordo uma vez que a resistividade e a condutividade estão inversamente relacionadas.

Um aumento na temperatura de um semicondutor pode resultar em um aumento substancial no número de elétrons livres no material.

À medida que a temperatura aumenta a partir do zero absoluto (0 K), um número cada vez maior de elétrons de valência absorve energia térmica suficiente para quebrar a ligação covalente e contribuir para o número de portadores livres, conforme descrito acima. Este número maior de portadores irá aumentar o índice de condutividade e produzir um menor nível de resistência.

Materiais semicondutores, como o Ge e o Si, que apresentam uma redução da resistência com aumento da temperatura, são considerados possuidores de coeficiente de temperatura negativo.

Você provavelmente verificará que a resistência da maioria dos condutores aumenta com a temperatura. Isto se deve ao fato de que a quantidade de portadores em um condutor não irá aumentar significativamente com a temperatura, mas sua vibração em torno de uma posição relativamente fixa tornará cada vez mais difícil para elétrons atravessarem o material. Qualquer aumento na temperatura resulta, portanto, em um nível de resistência maior e um *coeficiente de temperatura positivo*.

1.4 NÍVEIS DE ENERGIA

Na estrutura atômica isolada existem níveis de energia discretos (individuais) associados com cada elétron em órbita, conforme mostrado na Fig. 1.8a. Cada material terá, de fato, seu próprio conjunto de níveis de energia permissíveis para os elétrons na sua estrutura atômica.

Quanto maior a distância do elétron ao núcleo, maior o estado de energia, e qualquer elétron que tenha deixado seu átomo de origem apresenta um estado de energia maior do que qualquer elétron na estrutura atômica.

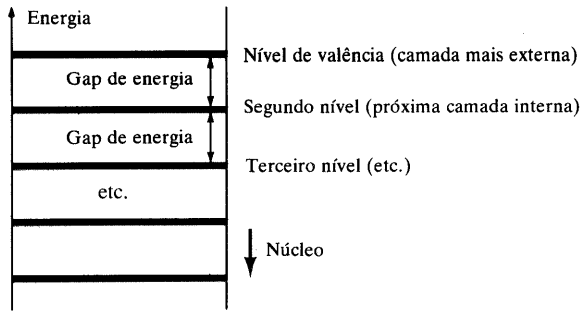
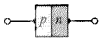
Entre os níveis discretos de energia estão os gaps, nos quais nenhum elétron na estrutura atômica isolada pode aparecer. À medida que os átomos de um material são unidos para formarem a estrutura da rede cristalina, existe uma interação entre os átomos, resultando em uma órbita particular para os elétrons de um átomo com níveis de energia ligeiramente distintos dos elétrons na mesma órbita de um átomo adicionado. O resultado é uma expansão dos níveis discretos dos estados de energia possíveis, para os elétrons de valência para aquelas bandas, conforme mostrado na Fig. 1.8b. Observe que existem níveis de ligação e estados de energia máxima, nos quais qualquer elétron na rede atômica pode estar na *região proibida*, entre a banda de valência e o nível de ionização, e lá permanecer. Lembre-se de que ionização é o mecanismo pelo qual um elétron pode absorver energia suficiente para desprender-se da estrutura atômica e entrar na banda de condução. Iremos notar que a energia associada com cada elétron é medida em *elétron volts* (eV). A unidade de medida é adequada, uma vez que

$$W = QV \quad \text{eV} \quad (1.2)$$

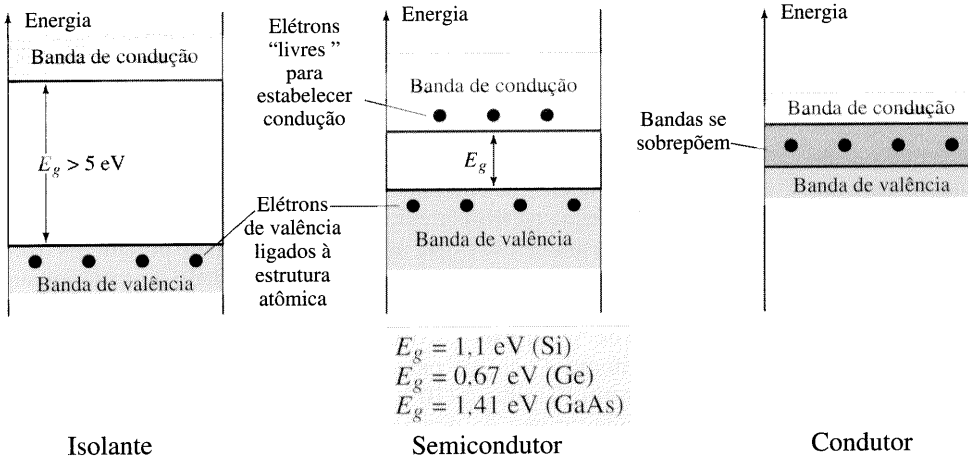
conforme obtido da equação definida para voltagem $V = W/Q$. A carga Q é a carga associada com um elétron simples.

Substituindo-se a carga de um elétron e um potencial diferente de 1 volt na Eq. (1.2), resulta em um nível de energia referido como um *elétron volt*. Como a energia também é medida em joules, e a carga de um elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb,

$$W = QV = (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V})$$



(a)



(b)

Fig. 1.8 Níveis de energia: (a) níveis discretos nas estruturas atômicas isoladas; (b) bandas de condução e de valência de um isolante, semicondutor e condutor.

e

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.3)$$

Em 0 K, ou zero absoluto ($-273,15^\circ\text{C}$), todos os elétrons de valência de materiais semicondutores encontram-se ligados na camada mais externa do átomo, com níveis de energia associados com a banda de valência da Fig. 1.8b. Contudo, à temperatura ambiente (300 K, 25°C), um grande número de elétrons de valência adquire energia suficiente para deixar a banda de valência, atravessar o gap de energia definido por E_g , na Fig. 1.8b, e entrar na banda de condução. Para o silício, E_g é 1,1 eV, para o germânio é 0,67 eV, enquanto para o arseneto de gálio é 1,41 eV. O valor de E_g é obviamente menor para o germânio porque o número de portadores naquele material é maior do que no silício em temperatura ambiente. Observe que, para o isolante, o gap de energia é tipicamente 5 eV ou mais, que limita muito o número de elétrons que pode entrar na banda de condução à temperatura ambiente. O condutor tem elétrons na banda da condução mesmo em 0 K. Obviamente, então, existem à temperatura ambiente muito mais do que portadores livres suficientes para manter um fluxo intenso de carga, ou corrente.

Encontraremos na Seção 1.5 que, se certas impurezas são adicionadas aos materiais semicondutores intrínsecos, surgirão estados de energia nas bandas proibidas que causarão uma redução líquida em E_g para ambos os materiais semicondutores —

conseqüentemente, densidade de portadores maior na banda de condução à temperatura ambiente!

1.5 MATERIAIS EXTRÍNSECOS — TIPOS *n* E *p*

As características dos materiais semicondutores podem ser alteradas significativamente pela adição de certos átomos de impurezas no material semicondutor relativamente puro. Estas impurezas, embora adicionadas na razão de apenas uma parte em 10 milhões, podem alterar suficientemente a estrutura de banda e modificar totalmente as propriedades elétricas do material.

Um material semicondutor que sofreu o processo de dopagem é chamado material extrínseco.

Existem dois materiais extrínsecos de importância fundamental para a fabricação de um dispositivo semicondutor: tipo *n* e tipo *p*. Cada um deles será descrito detalhadamente nos parágrafos seguintes.

Material Tipo *n*

Tanto o material do tipo *n* quanto o do tipo *p* são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza em uma base de germânio ou silício. O tipo *n* é criado introduzindo-

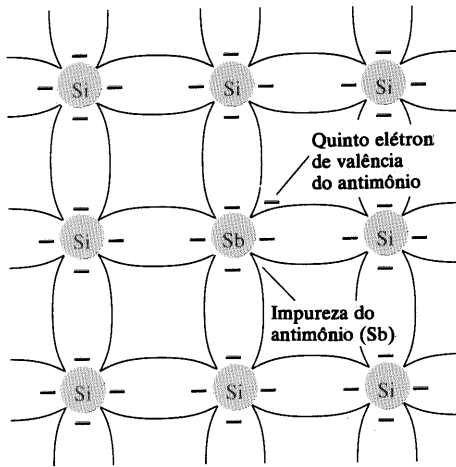


Fig. 1.9 Impureza de antimônio no material tipo *n*.

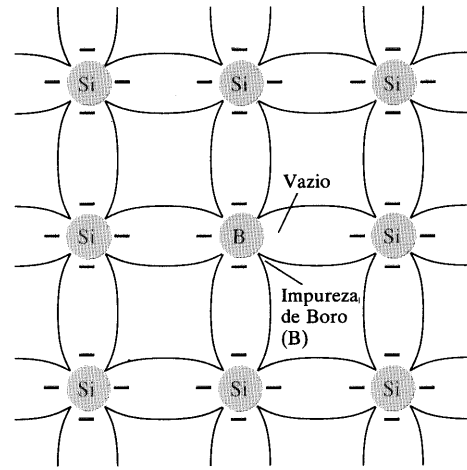


Fig. 1.11 Impureza de boro no material tipo *p*.

se os elementos de impureza que têm *cinco* elétrons de valência (*pentavalente*), como o *antimônio*, o *arsênio* e o *fósforo*. O efeito de tais elementos de impureza está indicado na Fig. 1.9 (usando antimônio como a impureza em uma base de silício). Observe que as quatro ligações covalentes ainda estão presentes. Existe, contudo, um quinto elétron adicional devido ao átomo de impureza, que está *desassociado* de qualquer ligação covalente em particular. Este elétron adicional, fracamente ligado a seu átomo de origem (antimônio), está relativamente livre para mover-se dentro do material tipo *n* recentemente formado. Uma vez que o átomo de impureza inserido contribuiu com um elétron relativamente “livre” para a estrutura:

Impurezas dispersas com cinco elétrons de valência são chamadas de átomos doadores.

É importante compreender que mesmo que um grande número de portadores “livres” tenha sido estabelecido no material tipo *n*, ele ainda é eletricamente *neutro*, pois o número de prótons carregados positivamente no núcleo ainda é igual ao número de elétrons “livres”, que orbitam carregados negativamente na estrutura.

O efeito deste processo de dopagem na condutividade relativa pode ser mais bem descrito pelo uso do diagrama de banda de energia da Fig. 1.10. Observe que um nível de energia discreto (chamado *nível doador*) aparece na banda proibida com um E_g significativamente menor do que o do material intrínseco. Os elétrons “livres” devido à impureza adicionada situam-se neste

nível de energia, e têm menos dificuldade de absorver uma medida suficiente de energia térmica a fim de mover-se para banda de condução na temperatura ambiente. O resultado é que, à temperatura ambiente, existe um grande número de portadores (elétrons) no nível de condução, e a condutividade do material aumenta significativamente. À temperatura ambiente, em um material de Si intrínseco, existe cerca de um elétron livre para cada 10^{12} átomos (1 em 10^9 para Ge). Se nosso nível de dosagem fosse um em 10 milhões (10^7), a razão ($10^{12}/10^7 = 10^5$) indicaria que a concentração de portadores aumentou por uma razão de 100.000:1.

Material Tipo *p*

O material tipo *p* é formado dopando-se um cristal de germânio ou silício puro com átomos de impureza apresentando *três* elétrons de valência. Os elementos mais freqüentemente usados para este propósito são o *boro*, o *gálio* e o *índio*. O efeito de um destes elementos, o boro, sobre uma base de silício, é indicado na Fig. 1.11.

Observe que existe agora um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes da rede recentemente formada. A lacuna resultante é chamada de *buraco*, e é representada por um pequeno círculo ou sinal positivo devido à ausência de uma carga negativa. Uma vez que a lacuna resultante irá *aceitar* rapidamente um elétron “livre”:

As impurezas dispersas com três elétrons de valência são chamadas átomos aceitadores.

O material tipo *p* resultante é eletricamente neutro, pelas mesmas razões descritas para o material tipo *n*.

Fluxo de Elétrons *versus* Buraco

O efeito do buraco na condução é mostrado na Fig. 1.12. Se um elétron de valência adquire energia cinética suficiente para quebrar sua ligação covalente e preencher o vazio criado por um buraco, então uma lacuna, ou buraco, será criada na ligação covalente que liberou o elétron. Existe, portanto, uma transferência de buracos para a esquerda, e de elétrons para a direita, conforme mostrado na Fig. 1.12. A direção a ser usada neste livro é

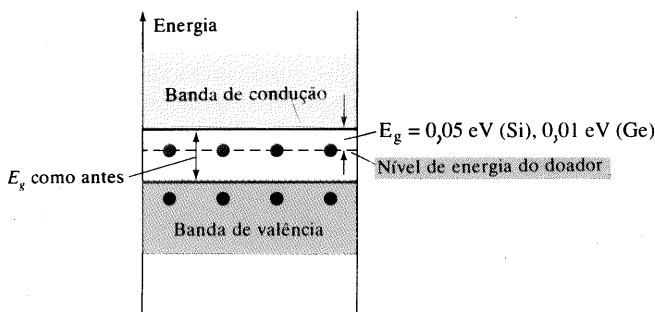


Fig. 1.10 Efeito das impurezas doadoras na estrutura da banda de energia.

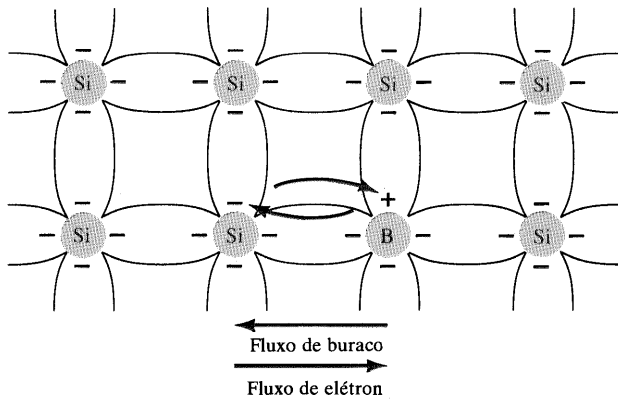
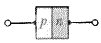


Fig. 1.12 Fluxo de elétron versus fluxo de buraco.

a do *fluxo convencional*, que está indicada pela direção do fluxo de buraco.

Portadores Majoritários e Minoritários

No estado intrínseco, o número de elétrons livres no Ge ou Si é devido somente àqueles poucos elétrons na banda de valência que adquiriram suficiente energia das fontes térmicas ou luminosas para quebrarem a ligação covalente, ou às poucas impurezas que não podem ser removidas. As lacunas deixadas para trás na estrutura de ligação covalente representam nossa fonte muito limitada de buracos. Em um material tipo *n*, o número de buracos não mudou muito em relação ao nível intrínseco. O resultado, então, é que o número de elétrons excede o número de buracos. Por isso:

Em um material tipo n (Fig. 1.13a), o elétron é chamado de portador majoritário, e o buraco, de portador minoritário.

Para o material tipo *p*, o número de buracos excede o número de elétrons, como mostrado na Fig. 1.13b. Então:

Em um material tipo p, o buraco é o portador majoritário, e o elétron é o portador minoritário.

Quando o quinto elétron de um átomo doador deixa o átomo de origem, este átomo adquire uma carga positiva: por consequência, o sinal positivo na representação de íon doador. Por motivos semelhantes, o sinal negativo aparece no íon aceitador.

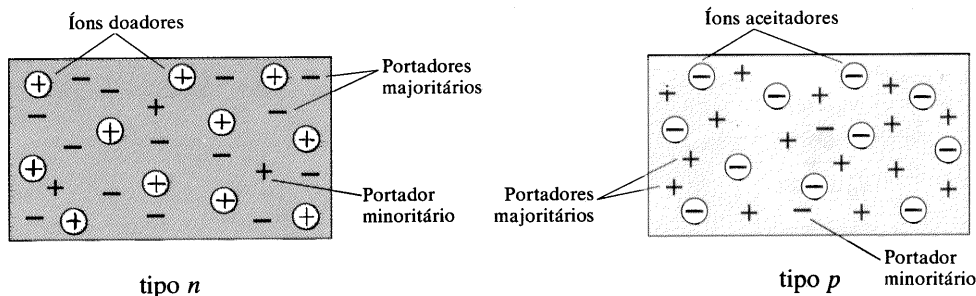


Fig. 1.13 (a) Material tipo *n*; (b) material tipo *p*.

Os materiais tipo *n* e tipo *p* representam os blocos básicos dos sistemas semicondutores. Encontraremos na próxima seção que a “união” de um material tipo *n* simples com um material tipo *p* irá resultar em um elemento semiconductor de considerável importância nos sistemas eletrônicos.

1.6 DIODO SEMICONDUTOR

Na Seção 1.5, ambos os materiais tipos *n* e *p* foram inseridos. O diodo semiconductor é formado juntando-se simplesmente estes materiais (construídos da mesma base — Ge ou Si), conforme mostrado na Fig. 1.14, usando-se técnicas a serem descritas no Cap. 20. No momento em que os materiais são “unidos”, os elétrons e buracos na região de junção se combinam, resultando em uma ausência de portadores na região próxima à junção.

Esta região de íons positivos e negativos não-combinados é chamada de região de depleção, devido à depleção de portadores nesta região.

Como o diodo é um dispositivo de dois terminais, a aplicação de uma tensão através de seus terminais conduz a três possibilidades: *nenhuma polarização* ($V_D = 0\text{ V}$), *polarização direta* ($V_D > 0\text{ V}$) e *polarização reversa* ($V_D < 0\text{ V}$). Cada condição resulta em uma resposta que o usuário deve entender claramente, para que o dispositivo seja aplicado de maneira correta.

Sem Polarização ($V_D = 0\text{ V}$)

Sob condições de não-polarização, quaisquer portadores minoritários (buracos) no material tipo *n* que se encontrarem dentro da região de depleção irão passar diretamente para o material tipo *p*. Quanto mais próximo o portador minoritário estiver da junção, maior é a atração para a camada de íons negativos, e menor a oposição dos íons positivos na região de depleção do material tipo *n*. Para futuras discussões, devemos assumir que todos os portadores minoritários tipo *n* que se encontram na região de depleção, devido a seus movimentos randômicos, irão passar diretamente para o material tipo *p*. Um argumento semelhante pode ser utilizado para os portadores minoritários (elétrons) do material tipo *p*. Este fluxo de portadores é indicado na Fig. 1.14 para os portadores minoritários de cada material.

Os portadores majoritários (elétrons) do material tipo *n* devem superar as forças atrativas da camada de íons positivos no material tipo *n* e o campo de íons negativos do material tipo *p*, a fim de migrarem para a área da região de depleção do material tipo *p*. Contudo o número de portadores majoritários é tão grande no

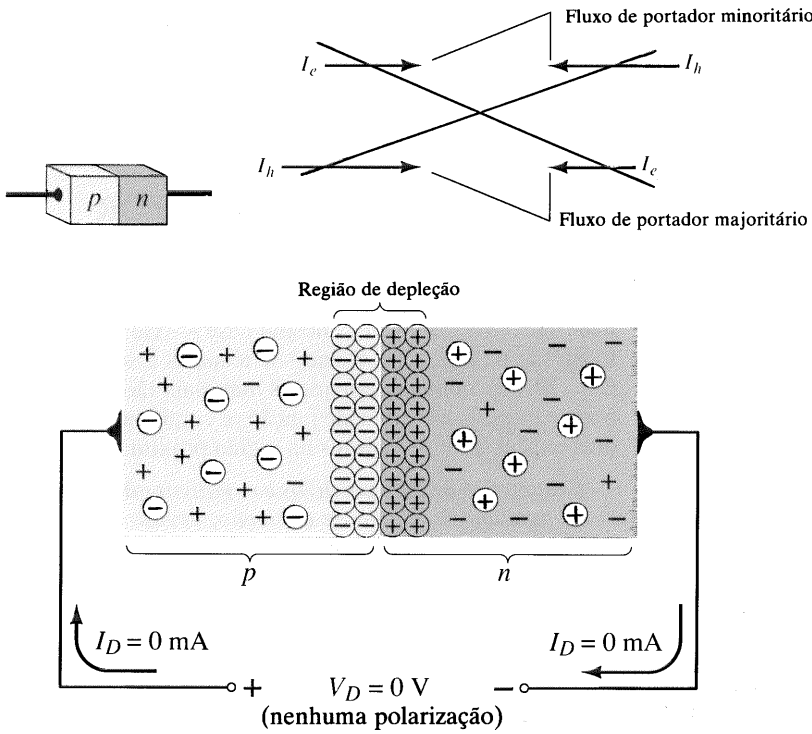


Fig. 1.14 Junção $p-n$ sem polarização externa.

material tipo n que existirá, invariavelmente, um número pequeno de portadores majoritários com energia suficiente para passar pela região de depleção para o material tipo p . Novamente, o mesmo tipo de argumento pode ser aplicado aos portadores majoritários (buracos) do material tipo p . O fluxo resultante devido aos portadores majoritários também é mostrado na Fig. 1.14.

Uma análise mais detalhada da Fig. 1.14 mostrará que as amplitudes relativas dos vetores do fluxo são tais que o fluxo resultante em cada direção é zero. Este cancelamento dos vetores foi indicado por linhas cruzadas. O comprimento do vetor representando o fluxo de buraco foi desenhado maior do que para o fluxo de elétrons, a fim de demonstrar que a amplitude de cada um não precisa ser a mesma para o cancelamento, e que os níveis de dopagem para cada material podem resultar em um fluxo desigual de portadores de buracos e elétrons. Em resumo, então:

Na ausência de uma tensão de polarização, o fluxo resultante de carga em qualquer direção para um diodo semicondutor é zero.

O símbolo para o diodo é repetido na Fig. 1.15 com as regiões tipo n e p associadas. Observe que a seta está associada com o componente tipo p , e a barra com a região tipo n . Como indicado, para $V_D = 0$ V, a corrente em qualquer direção é 0 mA.

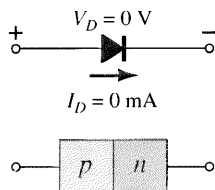


Fig. 1.15 Condições de não-polarização para um diodo semicondutor.

Polarização Reversa ($V_D < 0$ V)

Se um potencial externo de V volts é aplicado através da junção $p-n$ em que o terminal positivo é conectado ao material tipo n e o terminal negativo é ligado ao material tipo p , conforme mostrado na Fig. 1.16, o número de íons positivos não-combinados na região de depleção do material tipo n aumentará, devido ao grande número de elétrons “livres” arrastados para o potencial positivo da tensão aplicada. Por motivos semelhantes, o número de íons negativos não-combinados aumentará no material tipo p . O efeito é, portanto, um alargamento da região de depleção. Este alargamento da região de depleção estabelecerá uma barreira tão grande para os portadores majoritários superarem que, efetivamente, reduzirá o fluxo de portadores majoritários a zero, conforme mostrado na Fig. 1.16.

Contudo o número de portadores minoritários que penetra na região de depleção não será alterado, resultando em vetores de

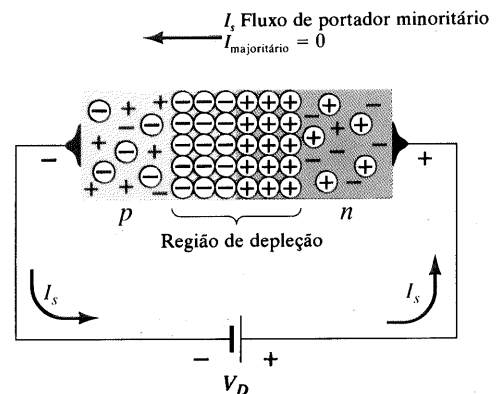


Fig. 1.16 Junção $p-n$ polarizada reversamente.

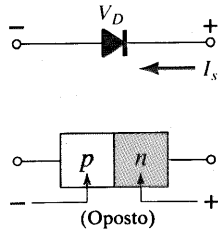
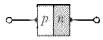


Fig. 1.17 Condições de polarização reversa para um diodo semicondutor.

fluxo de portadores minoritários da mesma amplitude indicados na Fig. 1.14, quando nenhuma tensão era aplicada.

A corrente que surge sob condições de polarização reversa é chamada de corrente de saturação reversa, e é representada por I_s .

A corrente de saturação reversa é raramente maior do que poucos microampères, exceto para dispositivos de alta potência. De fato, em anos recentes, seu nível tem-se situado normalmente na faixa de nanoampère para sistemas de silício, e na faixa de poucos microampères para o germânio. O termo *saturação* vem do fato de ela alcançar ser valor máximo rapidamente, e não mudar significativamente com o aumento do potencial de polarização reversa, como mostrado nas curvas características do diodo da Fig. 1.19, para $V_D < 0$ V. As condições da polarização reversa são descritas na Fig. 1.17 para o símbolo do diodo e junção p-n. Observe, sobretudo, que a direção de I_s é contrária à seta do símbolo. Observe também que o potencial negativo é conectado ao material tipo p, e o potencial positivo ao material tipo n — a diferença em letras grifadas para cada região revela uma condição de polarização reversa.

Polarização Direta ($V_D > 0$ V)

Uma condição de *polarização direta*, ou “ligada”, é estabelecida aplicando-se o potencial positivo ao material tipo p, e o potencial negativo ao material tipo n, conforme mostrado na Fig. 1.18. Para referência futura, portanto:

Um diodo semicondutor é polarizado diretamente quando a associação tipo p é positivo, e tipo n é negativo, for estabelecida.

A aplicação de um potencial de polarização direta V_D irá “forçar” elétrons no material tipo n e buracos no material tipo p a recombinarem-se com os íons próximos da fronteira, e reduzir a largura da região de depleção como mostrado na Fig. 1.18. O fluxo de portadores minoritários resultante de elétrons do material tipo p para o material tipo n (e buracos do material tipo n para o material tipo p) não muda em intensidade (pois o nível de condução é controlado essencialmente pelo número limitado de impurezas no material), mas a redução da região de depleção resultou em um fluxo denso de majoritários através da junção. Um elétron do material tipo n agora “vê” uma barreira reduzida na junção, devido à região de depleção reduzida e uma forte atração para o potencial positivo aplicado ao material tipo p. À medida que a polarização aplicada aumenta em amplitude, a região de depleção continua a diminuir em largura até que o fluxo de elétrons consiga atravessar a junção, resultando em um aumento exponencial da corrente conforme mostrado na região de polari-

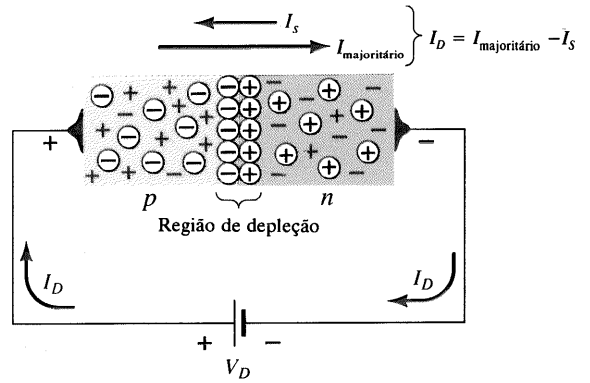


Fig. 1.18 Junção p-n polarizada diretamente.

zação direta da curva característica da Fig. 1.19. Observe que a escala vertical da Fig. 1.19 está em miliampères (embora alguns diodos semicondutores apresentem uma escala vertical medida em ampères) e a escala horizontal na região de polarização direta tem um máximo de 1 V. Tipicamente, portanto, a tensão através de um diodo polarizado diretamente será menor do que 1 V. Observe, também, como a corrente aumenta rapidamente além do joelho da curva.

Com o auxílio da física do estado sólido, pode-se mostrar que as características gerais de um diodo semicondutor são definidas pela seguinte equação para as regiões de polarização direta e reversa:

$$I_D = I_s(e^{kV_D/T_k} - 1) \tag{1.4}$$

onde I_s = corrente de saturação reversa
 $k = 11.600/\eta$ com $\eta = 1$ para o Ge e $\eta = 2$ para o Si, em níveis relativamente baixos de corrente de diodo (ou abaixo do joelho da curva), e $\eta = 1$ para Ge e Si para níveis maiores de corrente de diodo (no trecho da curva em que a corrente aumenta de forma mais acentuada)

$$T_k = T_c + 273^\circ$$

Um gráfico da Eq. (1.4) é fornecido na Fig. 1.19. Se expandirmos a Eq. (1.4) na seguinte forma, o elemento de contribuição para cada região da Fig. 1.19 pode ser facilmente descrito:

$$I_D = I_s e^{kV_D/T_k} - I_s$$

Para valores positivos de V_D , o primeiro termo da equação acima irá crescer muito rapidamente, e o efeito do segundo termo será desprezível. O resultado é que para valores positivos de V_D , I_D será positivo e crescerá da forma $y = e^x$ mostrado na Fig. 1.20. Em $V_D = 0$ V, a Eq. (1.4) vem a ser $I_D = I_s(e^0 - 1) = I_s(1 - 1) = 0$ mA, como mostra a Fig. 1.19. Para valores negativos de V_D , o primeiro termo cairá rapidamente para abaixo de I_s , resultando em $I_D = -I_s$, que é simplesmente a linha horizontal da Fig. 1.19. A interrupção verificada na curva característica em $V_D = 0$ V é simplesmente devido à mudança brusca na escala de mA para μ A.

Observe na Fig. 1.19 que os dispositivos disponíveis comercialmente apresentam uma curva característica deslocada em poucas dezenas de volts para a direita. Isto se deve à resistência interna do “corpo” e à resistência externa dos “contatos” de um diodo. Ambas as resistências contribuem para o surgimento de uma tensão adicional para um mesmo nível de corrente, como determina a lei

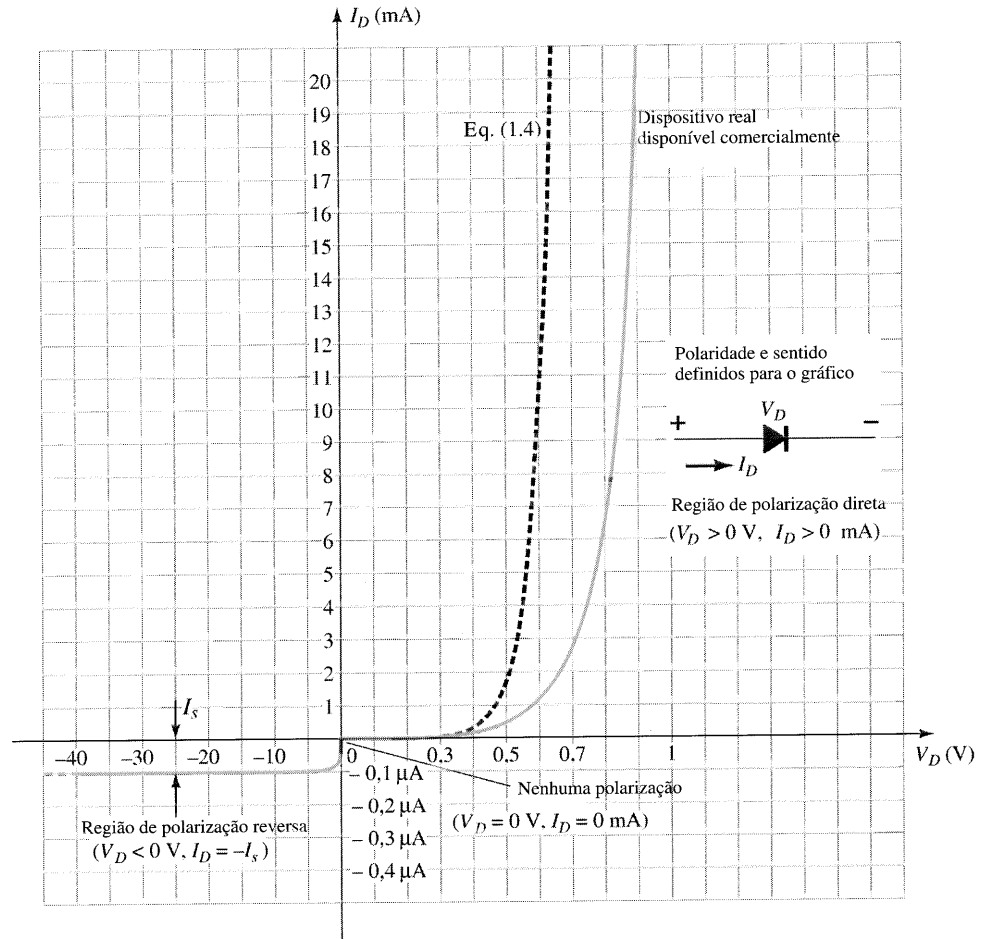
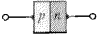


Fig. 1.19 Curva característica do diodo semicondutor de silício.

de Ohm ($V=IR$). Em tempo: à medida que os métodos de produção se aperfeiçoarem, esta diferença irá diminuir e a curva real do diodo irá se aproximar da prevista pela Eq. (1.4).

É importante observar a mudança em escala para os eixos vertical e horizontal. Para valores positivos de I_D , a escala é em miliampères, e a escala de corrente abaixo do eixo é em microampères (ou, possivelmente, nanoampères). Para V_D , a escala para valores positivos é em décimos de volts, e para valores negativos, a escala é em dezenas de volts.

Inicialmente, a Eq. (1.4) parece um tanto complexa, e pode originar um medo injustificado de sua utilização em todas as aplicações do diodo a seguir. Contudo, felizmente, serão feitas

aproximações em uma próxima seção, descartando a necessidade de aplicar a Eq. (1.4), fornecendo, assim, uma solução com um mínimo de dificuldade matemática.

Antes de deixar o assunto sobre o estado de polarização direta, as condições para condução (o estado “on”) são repetidas na Fig. 1.21 com as polaridades de polarização necessárias, e a direção resultante do fluxo de portadores majoritários. Observe sobretudo como a direção da condução combina com a seta do símbolo (conforme esclarecido para o diodo ideal).

Região Zener

Mesmo que a escala da Fig. 1.19 seja de dezenas de volts na região negativa, existe um ponto onde a aplicação de uma tensão

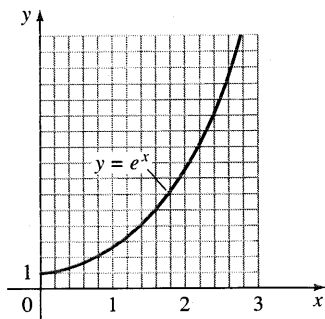


Fig. 1.20 Gráfico de e^x .

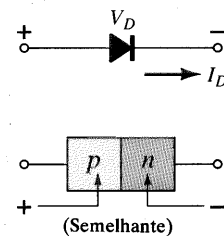


Fig. 1.21 Condições de polarização direta para um diodo semicondutor.

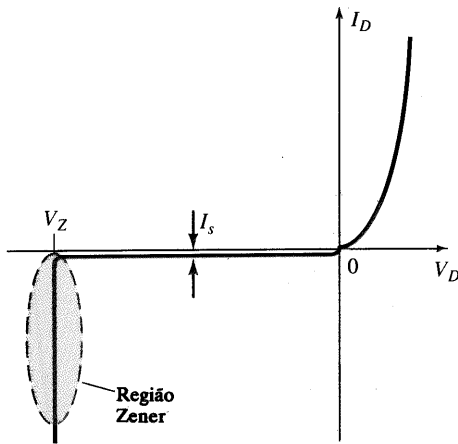


Fig. 1.22 Região Zener.

também negativa resulta em uma mudança brusca na curva característica, conforme mostrado na Fig. 1.22. A corrente aumenta a uma taxa muito rápida na direção oposta da região de tensão positiva. O potencial de polarização reverso que resulta desta brusca mudança na curva característica é chamado *potencial Zener*, e é dado pelo símbolo V_Z .

À medida que a tensão através do diodo aumenta na região de polarização reversa, a velocidade dos portadores minoritários responsáveis pela corrente de saturação reversa I_s , também aumenta. Eventualmente, suas velocidades e energia cinética associada ($W_k = \frac{1}{2} mv^2$), serão suficientes para liberarem portadores adicionais através das colisões com estruturas atômicas estáveis. Isto é, o resultado é um processo de *ionização*, pelo qual elétrons de valência absorvem energia suficiente para deixarem o átomo de origem. Estes portadores adicionais podem, então, ajudar no processo de ionização, até que uma alta corrente de *avalanche* seja estabelecida e a região de *ruptura em avalanche* determinada.

A região de avalanche (V_Z) pode ser aproximada do eixo vertical, aumentando-se os níveis de dopagem nos materiais *p* e *n*. Contudo, à medida que V_Z diminui para níveis muito baixos, tais como -5 V, um outro mecanismo, chamado *ruptura Zener*, contribuirá para a mudança brusca na curva característica. Isto ocorre porque existe um forte campo elétrico na região de junção que pode perturbar as forças de ligação dentro do átomo e “gerar” portadores. Embora o mecanismo de ruptura Zener seja um elemento considerável apenas em níveis menores de V_Z , esta mudança brusca na curva característica em qualquer nível é chamada *região Zener*, e os diodos que empregam apenas esta porção da curva de uma junção *p-n* são chamados *diodos Zener*. Eles são descritos em detalhe na Seção 1.14.

A região Zener do diodo semicondutor descrito deve ser evitada para que a resposta de um sistema não seja completamente alterada pela mudança brusca na curva característica nesta região de tensão reversa.

O potencial máximo de polarização reversa permitido, para que o diodo não entre na região Zener, é chamado de tensão de pico inversa (referida simplesmente como TPI nominal) ou tensão de pico reversa (denotada por TPR nominal).

Se uma aplicação exige uma TPI nominal maior do que a permitida para um único dispositivo, alguns diodos de mesmas características podem ser conectados em série. Diodos também

são conectados em paralelo para aumentarem a capacidade de fluxo de corrente.

Silício versus Germânio

Diodos de silício apresentam, em geral, TPI, correntes nominais e faixas de temperatura maiores do que os diodos de germânio. TPI nominais para o silício podem situar-se na faixa de 1.000 V, ao passo que o valor máximo para o germânio é de aproximadamente 400 V. O silício pode ser usado para aplicações em que a temperatura chega a aumentar em torno de 200°C (400°F), enquanto que o germânio apresenta um valor nominal muito menor (100°C). A desvantagem do silício, entretanto, comparado com germânio, conforme indicado na Fig. 1.23, é a maior tensão de polarização direta exigida para alcançar a região de condução. Este valor é da ordem de 0,7 V para diodos de silício disponíveis *comercialmente*, e de 0,3 V para diodos de germânio, quando arredondados os valores. O maior valor para o silício é devido, em primeiro lugar, ao fator η na Eq. (1.4). Este fator tem influência na determinação da forma da curva apenas em níveis de corrente muito baixos. Quando a curva inicia seu aumento vertical, o fator η cai para 1 (o valor contínuo para germânio). Isto é evidenciado pelas semelhanças nas curvas, uma vez alcançado o potencial de *offset*. O potencial em que este aumento ocorre é comumente chamado *potencial de offset*, *limiar* ou *de disparo*. Frequentemente, a primeira letra de um termo que descreve uma quantidade particular é usada na notação para aquela quantidade. Contudo, para assegurar que não haja muita confusão com outros termos, como tensão de saída (V_o) e tensão direta (V_f), a notação V_T foi adotada para este livro, da palavra “limiar” (*threshold*).

Em resumo:

$V_T = 0,7$ (Si) $V_T = 0,3$ (Ge)

Obviamente, quanto mais próxima a parte ascendente da curva está do eixo vertical, mais “ideal” o sistema. Contudo as outras características do silício, quando comparadas com o germânio, ainda o tornaram a melhor escolha para a maioria dos elementos disponíveis comercialmente.

Efeitos de Temperatura

A temperatura pode ter um efeito marcante sobre as características de um diodo semicondutor de silício, como verificado para o diodo de silício típico da Fig. 1.24. Concluiu-se, experimentalmente, que:

A corrente de saturação reversa I_s terá seu valor em amplitude aproximadamente dobrado para cada aumento de 10°C na temperatura.

Não é incomum para um diodo de germânio, com I_s na ordem de 1 ou 2 μA em 25°C , apresentar uma corrente de fuga de 100 $\mu\text{A} = 0,1$ mA, a uma temperatura de 100°C . Níveis de corrente desta magnitude na região de polarização reversa iriam certamente questionar nossa desejada condição de circuito-aberto na região de polarização reversa. Valores típicos de I_s para silício são muito menores do que os de germânio, para os mesmos níveis de corrente e potência, conforme Fig. 1.23. O resultado é

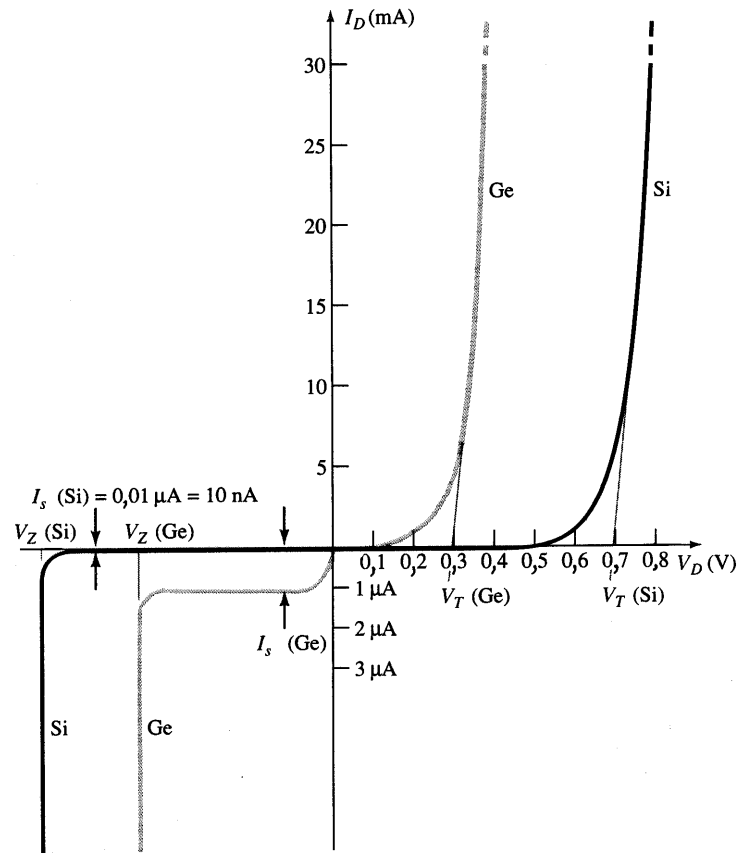
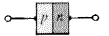


Fig. 1.23 Comparação dos diodos semicondutores de Si e Ge.

que, mesmo em altas temperaturas, os níveis de I_s para diodos de silício não alcançam os altos níveis obtidos para germânio — uma característica muito importante que explica por que os dispositivos de silício desfrutam um nível significativamente maior de

desenvolvimento e utilização em projetos. Fundamentalmente, um circuito-aberto equivalente na região de polarização reversa é mais bem caracterizado em qualquer temperatura com o silício do que com o germânio.

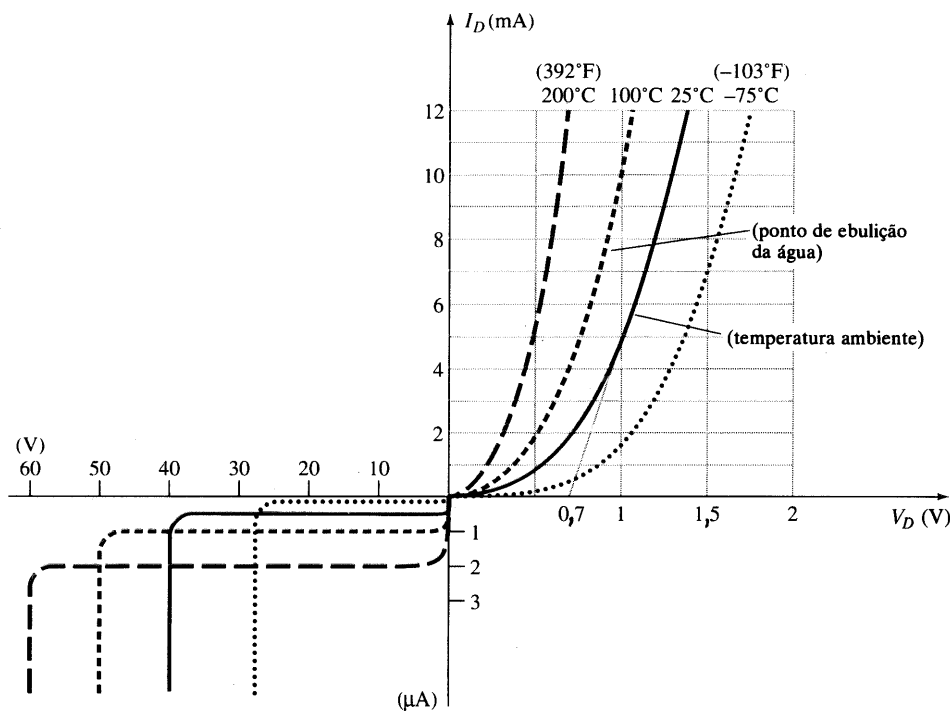


Fig. 1.24 Variação nas curvas características do diodo com a mudança na temperatura.

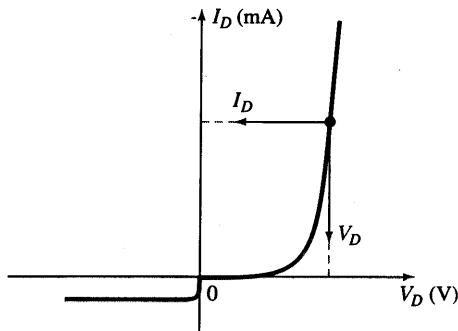


Fig. 1.25 Determinação da resistência dc de um diodo, em um ponto de operação particular.

Os crescentes níveis de I_s com a temperatura são responsáveis pelos diferentes níveis da tensão de limiar, conforme mostrado na Fig. 1.24. Aumente simplesmente o nível de I_s na Eq. (1.4), e observe que o aumento na corrente de diodo é antecipado. Naturalmente, o valor de T_k também aumentará na mesma equação, mas o aumento de I_s irá prevalecer sobre a menor mudança percentual de T_k . À medida que a temperatura aumenta, as curvas características estão, na verdade, se tornando mais “ideais”, mas concluiremos, quando analisarmos as folhas de especificações, que temperaturas além da faixa normal de operação podem ter um efeito muito prejudicial sobre a potência máxima e níveis de corrente do diodo. Na região de polarização reversa, a tensão de ruptura cresce com a temperatura, mas observe o aumento indesejável na corrente de saturação reversa.

1.7 NÍVEIS DE RESISTÊNCIA

À medida que o ponto de operação de um diodo move-se de uma região para outra, a resistência do diodo também será alterada devido à forma não-linear da curva característica. Será demonstrado nos próximos parágrafos que o tipo da tensão ou sinal aplicado irá definir o nível de resistência de interesse. Três níveis diferentes introduzidos nesta seção irão aparecer novamente, quando analisarmos outros dispositivos. É, portanto, essencial que a sua determinação seja claramente compreendida.

Resistência DC ou Estática

A aplicação de uma tensão dc num circuito contendo um diodo semiconductor resultará em um ponto de operação sobre a curva do diodo inalterado com o tempo. A resistência do diodo no ponto de operação pode ser encontrada simplesmente encontrando-se os valores correspondentes de V_D e I_D , conforme mostrado na Fig. 1.25, aplicando-se a seguinte equação:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} \quad (1.5)$$

Os níveis de resistência dc no joelho e abaixo deste serão maiores do que os níveis de resistência obtidos para a região de aumento vertical da curva. Os níveis de resistência na região de polarização reversa serão, naturalmente, bem maiores. Uma vez que, em geral, ohmímetros empregam uma fonte de corrente relativamente constante, a resistência determinada será

em um nível de corrente pré-ajustado (tipicamente, poucos miliampères).

EXEMPLO 1.1

Determine os níveis de resistência dc para o diodo da Fig. 1.26 em

- $I_D = 2 \text{ mA}$
- $I_D = 20 \text{ mA}$
- $V_D = -10 \text{ V}$

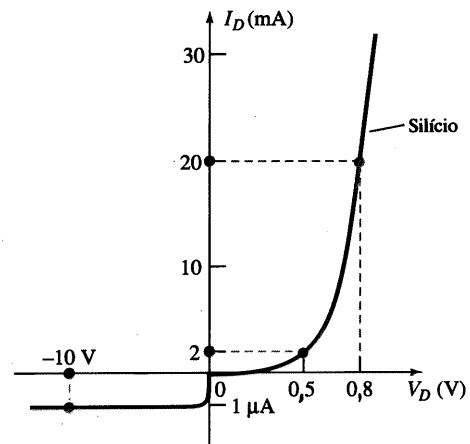


Fig. 1.26 Exemplo 1.1.

Solução

- (a) Em $I_D = 2 \text{ mA}$, $V_D = 0,5 \text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 250 \Omega$$

- (b) Em $I_D = 20 \text{ mA}$, $V_D = 0,8 \text{ V}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 40 \Omega$$

- (c) Em $V_D = -10 \text{ V}$, $I_D = -I_s = -1 \mu\text{A}$ (da curva) e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10 \text{ V}}{1 \mu\text{A}} = 10 \text{ M}\Omega$$

reforçando claramente alguns dos comentários anteriores, com respeito aos níveis de resistência dc de um diodo.

Resistência AC ou Dinâmica

É óbvio da Eq. 1.5 e do Exemplo 1.1 que a resistência dc de um diodo é independente da forma da curva característica na região que circunda o ponto de interesse. Se uma senóide, ao invés de uma entrada dc, for aplicada, a situação mudará completamente. A entrada variando moverá o ponto de operação instantâneo para cima e para baixo em uma região da curva, definindo, portanto, uma mudança específica na corrente e tensão, conforme mostrado na Fig. 1.27. Sem variações da tensão aplicada, o ponto de operação seria o ponto Q , que aparece na Fig. 1.27 determinado pelos níveis dc aplicados. A designação do *ponto Q* é obtida da palavra *quiescente*, que significa “nível invariável ou estacionário”.

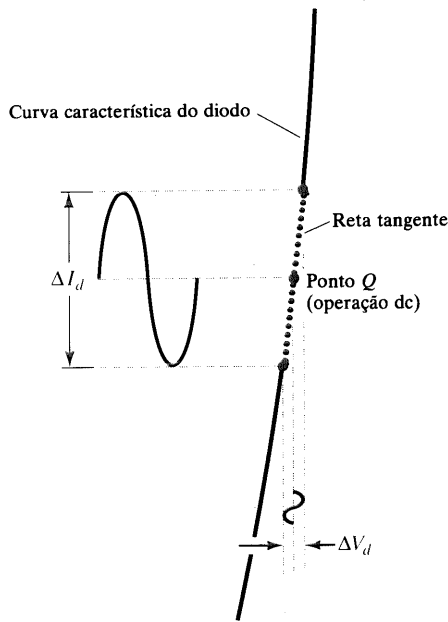
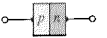


Fig. 1.27 Definição da resistência dinâmica ou ac.

Uma linha reta desenhada tangente à curva através do ponto *Q*, conforme mostrado na Fig. 1.28, definirá uma variação particular da tensão e corrente, e pode ser usada para determinar a resistência *ac* ou *dinâmica* para esta região da curva característica do diodo. Um esforço deveria ser feito para manter a variação em tensão e corrente tão pequena quanto possível, e eqüidistante de cada lado do ponto *Q*. Na forma de equação,

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \quad \text{onde } \Delta \text{ significa uma variação finita do parâmetro.} \quad (1.6)$$

Quanto mais íngreme a inclinação, menor o valor de ΔV_d para a mesma variação em ΔI_d , e, conseqüentemente, menor a resistência. A resistência *ac* na região de aumento vertical da curva característica é, portanto, bem pequena, enquanto que a resistência *ac* é muito maior em níveis de corrente baixos.

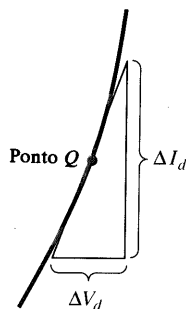


Fig. 1.28 Determinação da resistência *ac* no ponto *Q*.

EXEMPLO 1.2

Para a curva característica da Fig. 1.29:

(a) Determine a resistência *ac* em $I_D = 2 \text{ mA}$

- (b) Determine a resistência *ac* em $I_D = 25 \text{ mA}$
 (c) Compare os resultados das letras (a) e (b) com as resistências *dc* em cada nível de corrente.

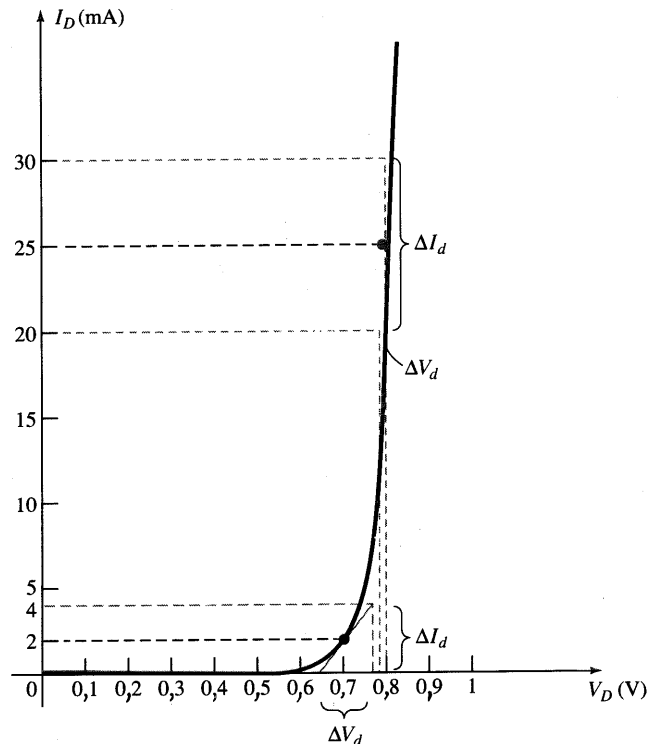


Fig. 1.29 Exemplo 1.2.

Solução

(a) Para $I_D = 2 \text{ mA}$; a linha tangente em $I_D = 2 \text{ mA}$ foi determinada como mostra a figura, e uma amplitude de 2 mA acima e abaixo da corrente de diodo especificada foi escolhida. Em $I_D = 4 \text{ mA}$, $V_D = 0,76 \text{ V}$ e em $I_D = 0 \text{ mA}$, $V_D = 0,65 \text{ V}$. As variações resultantes em corrente e tensão são

$$\Delta I_d = 4 \text{ mA} - 0 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$$

e
$$\Delta V_d = 0,76 \text{ V} - 0,65 \text{ V} = 0,11 \text{ V}$$

e a resistência *ac*:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,11 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 27,5 \Omega$$

(b) Para $I_D = 25 \text{ mA}$; a linha tangente em $I_D = 25 \text{ mA}$ foi desenhada sobre a figura, e uma amplitude específica de 5 mA acima e abaixo da corrente de diodo foi escolhida. Em $I_D = 30 \text{ mA}$, $V_D = 0,8 \text{ V}$ e em $I_D = 20 \text{ mA}$, $V_D = 0,78 \text{ V}$. As mudanças resultantes na corrente e tensão são

$$\Delta I_d = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

e
$$\Delta V_d = 0,8 \text{ V} - 0,78 \text{ V} = 0,02 \text{ V}$$

e a resistência *ac* é

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,02 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \Omega$$



(c) Para $I_D = 2 \text{ mA}$, $V_D = 0,7 \text{ V}$ e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \mathbf{350 \Omega}$$

muito maior do que o valor de r_d de $27,5 \Omega$.
Para $I_D = 25 \text{ mA}$, $V_D = 0,79 \text{ V}$ e

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0,79 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = \mathbf{31,62 \Omega}$$

muito maior do que o valor r_d de 2Ω .

Encontramos a resistência dinâmica graficamente, mas existe uma definição básica em cálculo diferencial que diz:

A derivada de uma função em um ponto é igual à inclinação da reta tangente traçada naquele ponto.

A Eq. (1.6) definida pela Fig. 1.28, é, desse modo, determinada essencialmente pela derivada da função no ponto Q de operação. Se encontrarmos a derivada da Equação geral (1.4) para o diodo semicondutor com respeito à polarização direta aplicada, e então invertermos o resultado, teremos uma equação para a resistência dinâmica ou ac naquela região. Isto é, tomando-se a derivada da Eq. (1.4) com respeito à polarização aplicada, resulta em

$$\frac{d}{dV_D}(I_D) = \frac{d}{dV}[I_s(e^{kV_D/T_K} - 1)]$$

e

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{k}{T_K}(I_D + I_s)$$

realizando algumas operações básicas do cálculo diferencial. Em geral, $I_D \gg I_s$ na região de inclinação vertical da curva e

$$\frac{dI_D}{dV_D} \cong \frac{k}{T_K}I_D$$

Substituindo-se $\eta = 1$ para Ge e Si na região de inclinação vertical da curva, obtemos

$$k = \frac{11.600}{\eta} = \frac{11.600}{1} = 11.600$$

e à temperatura ambiente

$$T_K = T_C + 273^\circ = 25^\circ + 273^\circ = 298^\circ$$

de modo que

$$\frac{k}{T_K} = \frac{11.600}{298} \cong 38,93$$

e

$$\frac{dI_D}{dV_D} = 38,93I_D$$

Considerando o resultado para definir uma relação de resistência ($R = V/I$) nos dá

$$\frac{dV_D}{dI_D} \cong \frac{0,026}{I_D}$$

ou

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} \quad \text{Ge, Si} \quad (1.7)$$

O significado da Eq. (1.7) deve ser muito bem compreendido. Ele indica que a resistência dinâmica pode ser encontrada simplesmente substituindo-se o valor quiescente da corrente de diodo na equação. Não há necessidade de as curvas estarem disponíveis, ou de nos preocuparmos em desenhar linhas tangentes, conforme definido pela Eq. (1.6). É importante ter em mente, contudo, que a Eq. (1.7) é precisa apenas para valores de I_D na região de aumento vertical da curva. Para valores menores de I_D , $\eta = 2$ (silício) e o valor de r_d obtido deve ser multiplicado por um fator de 2. Para valores pequenos de I_D abaixo do joelho da curva, a Eq. (1.7) torna-se inadequada.

Todos os níveis de resistência determinados até o momento foram determinados para a junção $p-n$, e não incluem a resistência do material semicondutor (chamada resistência de *corpo*) e a resistência introduzida pela conexão entre o material semicondutor e o condutor metálico externo (chamada resistência de *contato*). Estes níveis adicionais de resistência podem ser incluídos na Eq. (1.7), somando-se a resistência denotada por r_b , como aparece na Eq. (1.8). A resistência r_d inclui, portanto, a resistência dinâmica definida pela Eq. 1.7 e a resistência r_b introduzida.

$$r'_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} + r_b \quad \text{ohms} \quad (1.8)$$

O fator r_b pode variar tipicamente de $0,1 \Omega$, em sistemas de alta potência, para 2Ω , em alguns diodos de baixa potência de uso geral. Para o Exemplo 1.2, a resistência ac em 25 mA foi calculada como sendo de 2Ω . Usando a Eq. (1.7), temos

$$r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} = \frac{26 \text{ mV}}{25 \text{ mA}} = \mathbf{1,04 \Omega}$$

A diferença em torno de 1Ω pode ser considerada devido à contribuição de r_b .

Para o Exemplo 1.2, a resistência ac em 2 mA foi calculada como sendo de $27,5 \Omega$. Usando a Eq. (1.7), mas multiplicando-se por um fator de 2 para esta região (no joelho da curva $\eta = 2$),

$$r_d = 2\left(\frac{26 \text{ mV}}{I_D}\right) = 2\left(\frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}}\right) = 2(13 \Omega) = \mathbf{26 \Omega}$$

A diferença de $1,5 \Omega$ pode ser considerada devido à contribuição r_b .

Na verdade, a determinação de r_d com um elevado grau de precisão a partir da curva característica, usando-se a Eq. (1.6), é, na melhor das hipóteses, um processo difícil, e os resultados devem ser tratados com um pouco de desconfiança. Nos níveis baixos de corrente de diodo, o fator r_b é normalmente pequeno o suficiente comparado com r_d para permitir que se despreze o seu impacto sobre a resistência de diodo ac. Nos níveis altos de corrente, o nível de r_b pode aproximar-se de r_d , mas uma vez que existirão freqüentemente outros elementos resistivos de magnitude muito maior em série com o diodo, assumiremos neste livro que a resistência ac só é determinada por r_d e o impacto de r_b será ignorado, a menos que se especifique o contrário. Avanços tecnológicos de anos recentes sugerem que o nível de r_b continuará a diminuir de valor e tornar-se-á eventualmente um fator que, na certa, pode ser ignorado em comparação a r_d .



A discussão acima concentrou-se somente na região de polarização direta. Na região de polarização reversa, assumiremos que a variação de corrente ao longo da linha I_s , de 0 V à região Zener, é nula, e a resistência ac resultante usando-se a Eq. (1.6) é suficientemente alta para permitir a aproximação de circuito-aberto.

Resistência AC Média

Se o sinal de entrada for suficientemente grande para produzir a amplitude mostrada na Fig. 1.30, a resistência associada do dispositivo para esta região é chamada *resistência ac média*. A resistência ac média é, por definição, determinada pela linha reta desenhada entre as duas interseções estabelecidas pelos valores máximo e mínimo da tensão de entrada. Na forma de equação (observe Fig. 1.30).

$$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{pt. a pt.} \quad (1.9)$$

Para a situação indicada pela Fig. 1.30,

$$\Delta I_d = 17 \text{ mA} - 2 \text{ mA} = 15 \text{ mA}$$

e
$$\Delta V_d = 0,725 \text{ V} - 0,65 \text{ V} = 0,075 \text{ V}$$

com
$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0,075 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 5 \Omega$$

Se a resistência ac (r_d) fosse determinada em $I_D = 2 \text{ mA}$, seu valor seria maior do que 5Ω , e, se determinada em 17 mA , seria menor. Entre estes valores, a resistência ac realizaria a tran-

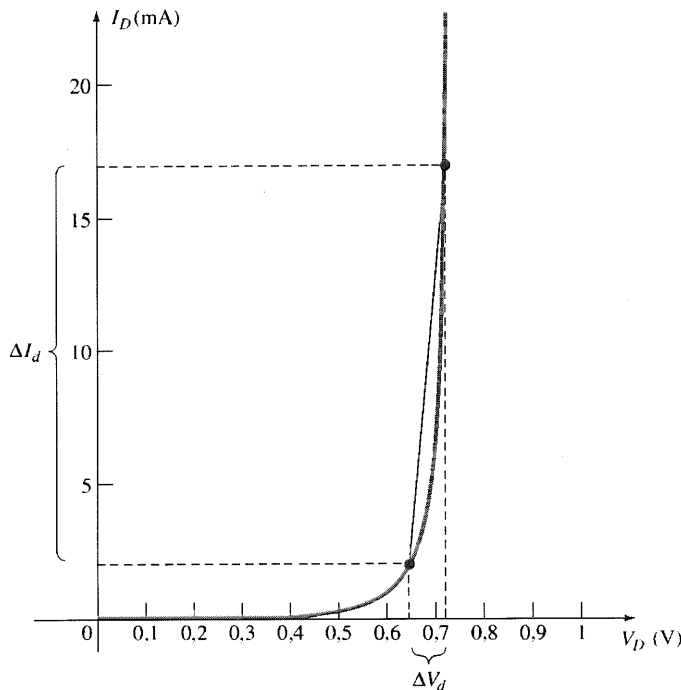


Fig. 1.30 Determinação da resistência ac média entre os limites indicados.

sição do alto valor em 2 mA para o baixo valor em 17 mA . A Eq. (1.9) define um valor que é considerado a média dos valores ac de 2 a 17 mA . O fato de um nível de resistência poder ser usado para esta ampla região da curva prova a utilidade da definição de circuitos equivalentes para um diodo em uma seção posterior.

Quadro Resumo

O Quadro 1.2 foi desenvolvido para reforçar as importantes conclusões das últimas páginas, e enfatizar a diferença entre os vários níveis de resistência. Conforme indicado anteriormente, o conteúdo desta seção é a base para os cálculos de resistência a serem realizados nas seções e capítulos posteriores.

1.8 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE DIODO

Um circuito equivalente é uma combinação de elementos adequadamente escolhidos para melhor representarem as características reais de um dispositivo, sistema ou região particular de operação.

Em outras palavras, uma vez definido o circuito equivalente, o símbolo do dispositivo pode ser removido do esquema, e o circuito equivalente inserido em seu lugar sem afetar severamente o comportamento real do sistema. Via de regra, o resultado é uma configuração que pode ser resolvida usando-se técnicas tradicionais de análise de circuito.

Circuito Equivalente Linear por Partes

Uma técnica para se obter um circuito equivalente para o diodo é aproximar as características do dispositivo por segmentos de reta, conforme mostrado na Fig. 1.31. O circuito equivalente resultante é naturalmente chamado *circuito equivalente linear por partes*. Seria óbvio da Fig. 1.31 que os segmentos de reta não resultam em uma reprodução exata das características reais, em especial na região do joelho. Contudo os segmentos resultantes estão suficientemente próximos da curva real para estabelecerem um circuito equivalente, fornecendo uma excelente primeira aproximação do comportamento real do sistema. Para a região de inclinação da curva equivalente, a resistência ac média, como introduzida na Seção 1.7, é o nível de resistência que aparece no circuito equivalente da Fig. 1.32 próximo ao dispositivo real. Em essência, ela define o nível de resistência do dispositivo quando ele está no estado “ligado”. O diodo ideal é incluído para estabelecer que só existe uma direção de condução através do dispositivo e que uma condição de polarização reversa resulta no estado de circuito-aberto para o circuito. Como o diodo semiconductor de silício não alcança o estado de condução até V_D atingir $0,7 \text{ V}$ para polarização direta (conforme mostrado na Fig. 1.31), uma bateria V_T opondo-se à direção de condução deve aparecer no circuito equivalente, conforme mostrado na Fig. 1.32. A bateria específica simplesmente que a tensão através do sistema deve ser maior do que a tensão limiar da bateria para que a condução através do dispositivo na direção imposta pelo diodo ideal possa ser estabelecida. Quando isso ocorre, a resistência do diodo terá o valor específico de r_{av} .

QUADRO 1.2 Níveis de Resistência			
Tipo	Equação	Características Especiais	Determinação Gráfica
Dc ou estática	$R_D = \frac{V_D}{I_D}$	Definido como um <i>ponto</i> sobre a curva característica	
Ac ou dinâmica	$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$	Definido por uma <i>reta tangente</i> no ponto Q	
ac médio	$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right _{\text{pt. a pt.}}$	Definido por uma <i>linha reta</i> entre os limites de operação	

Contudo tenha em mente que V_T no circuito equivalente não é uma fonte de tensão independente. Se um voltímetro for colocado nos terminais de um diodo isolado, sobre uma bancada de laboratório, não será obtida uma leitura de 0,7 V. A bateria representa apenas o nível horizontal da curva característica que deve ser atingido para estabelecer a condução.

Em geral, o nível aproximado de r_{av} pode ser determinado de um ponto de operação específico da folha de especificações (a

ser discutida na Seção 1.9). Por exemplo, para um diodo semicondutor de silício, se $I_f = 10 \text{ mA}$ (uma corrente de condução direta para o diodo) em $V_D = 0,8 \text{ V}$, sabemos que é necessário um deslocamento de 0,7 V antes que a curva característica do dispositivo se eleve e

$$r_{av} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{\text{pt. a pt.}} = \frac{0,8 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{10 \text{ mA} - 0 \text{ mA}} = \frac{0,1 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 10 \Omega$$

conforme obtido para Fig. 1.30.

Circuito Equivalente Simplificado

Para a maioria das aplicações, a resistência r_{av} é suficientemente pequena para ser desprezada em comparação aos outros elementos do circuito. A retirada de r_{av} do circuito equivalente é o mesmo que dizer que a curva característica do diodo apresenta a forma mostrada na Fig. 1.33. Na verdade, esta aproximação é empregada amiúde na análise de um circuito semicondutor, como demonstrado no

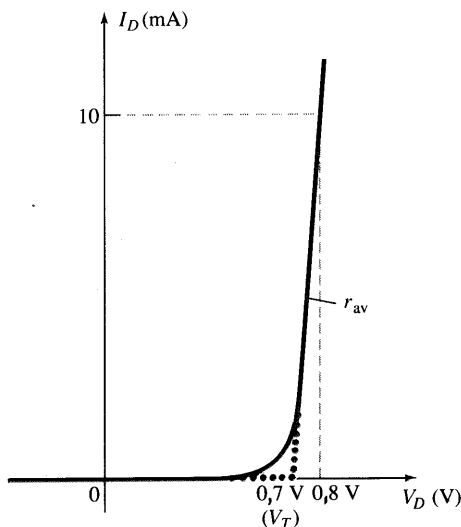


Fig. 1.31 Definição do circuito equivalente linear, usando-se segmentos de reta para aproximar a curva característica.

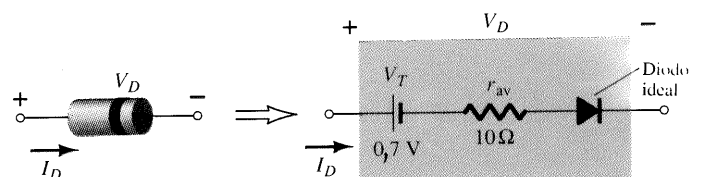


Fig. 1.32 Componentes do circuito equivalente linear.

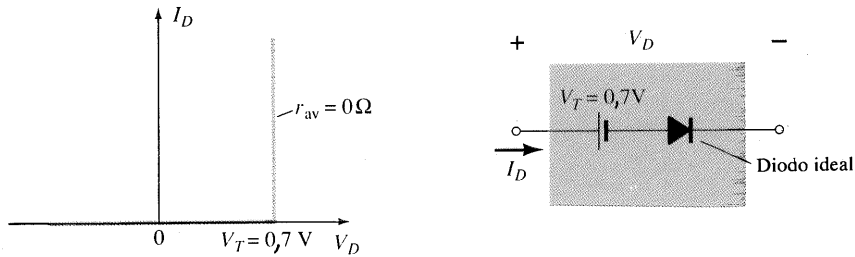


Fig. 1.33 Circuito equivalente simplificado para o diodo semicondutor de silício.

Cap. 2. O circuito equivalente reduzido aparece na mesma figura. Isto indica que um diodo de silício polarizado diretamente em um sistema eletrônico, sob condições dc, tem uma queda de 0,7 V através dele no estado de condução, em qualquer nível da corrente de diodo (para valores nominais, naturalmente).

Circuito Equivalente Ideal

Agora que r_{av} foi removido do circuito equivalente, vamos mais a frente e estabelecer que um nível de 0,7 V pode muitas vezes ser ignorado em comparação ao nível de tensão aplicada. Neste caso, o circuito equivalente será reduzido para um diodo ideal somente, conforme mostrado na Fig. 1.34, com sua curva característica. No Cap. 2, veremos que esta aproximação é muitas vezes feita sem perda considerável da precisão.

Na indústria, uma substituição popular para a expressão “circuito equivalente de diodo” é *modelo* de diodo — um modelo, por definição, é representação de um dispositivo, objeto, sistema existente e assim por diante. De fato, esta terminologia substituta será usada quase que exclusivamente nos capítulos seguintes.

Quadro Resumo

Para elucidar, os modelos de diodo empregados para uma faixa de parâmetros do circuito e aplicações são fornecidos no Quadro 1.3, com suas características lineares aproximadas. Cada modelo será mais bem analisado no Cap. 2. Existem sempre exceções às regras gerais, mas é completamente seguro dizer que o modelo equivalente simplificado será empregado com mais frequência na análise de sistemas eletrônicos, enquanto que o diodo ideal será aplicado amiúde na análise de sistemas de alimentação de potência, onde tensões maiores são encontradas.

1.9 FOLHAS DE ESPECIFICAÇÕES DO DIODO

Os dados sobre dispositivos semicondutores específicos são normalmente fornecidos pelo fabricante de duas formas. Mais frequentemente, trata-se de uma breve descrição, limitada talvez a uma página. O outro modo é uma análise completa das características, usando-se gráficos, desenhos, tabelas e assim por diante. Em todo caso, entretanto, existem dados específicos dos dados que devem ser incluídos para a utilização correta do dispositivo. São eles:

1. A tensão direta V_f (para uma corrente e temperatura específicas).
2. A corrente direta máxima I_f (para uma temperatura específica).
3. A corrente de saturação reversa I_r (para uma tensão e temperatura específicas).
4. A tensão reversa nominal [IPI ou TPR ou T(BR), onde BR vem do termo “ruptura” (*breakdown*) (a uma temperatura específica)].
5. O nível máximo de dissipação de potência para uma temperatura em particular.
6. Níveis de capacitância (conforme definido na Seção 1.10).
7. Tempo de recuperação reverso t_{rr} (conforme definido na Seção 1.11).
8. Faixa de operação de temperatura.

Dependendo do tipo de diodo considerado, dados adicionais também podem ser fornecidos, tais como faixa de frequência, nível de ruído, tempo de chaveamento, níveis de resistência térmica e valores de pico repetitivos. Dependendo da aplicação, a importância do dado será muitas vezes aparente. Se a potência máxima ou dissipação nominal é também fornecida, ela é considerada igual ao seguinte produto:

$$P_{D_{max}} = V_D I_D \tag{1.10}$$

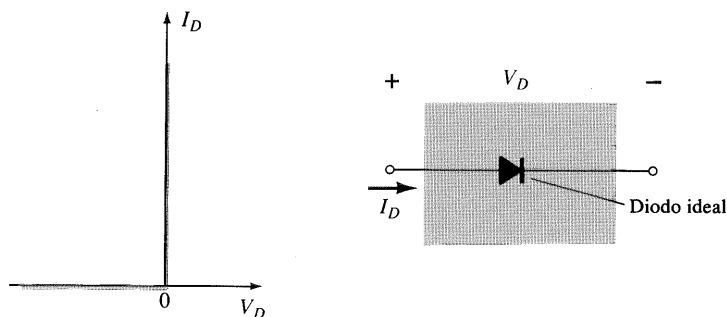


Fig. 1.34 Diodo ideal e sua curva característica.

QUADRO 1.3 Circuitos Equivalentes de Diodo (Modelos)

Tipo	Condições	Modelo	Características
Modelo linear			
Modelo simplificado	$R_{rede} \gg r_{av}$		
Sistema ideal	$R_{rede} \gg r_{av}$ $E_{rede} \gg V_T$		

onde I_D e V_D são a corrente e tensão do diodo em um ponto de operação particular.

Se utilizarmos o modelo simplificado para determinada aplicação (um exemplo comum), podemos substituir $V_D = V_T = 0,7$ V para o diodo de silício na Eq. (1.10), e determinar a dissipação de potência resultante, para uma comparação com a potência máxima nominal. Isto é,

$$P_{\text{dissipada}} \cong (0,7 \text{ V})I_D \quad (1.11)$$

Uma cópia exata dos dados fornecidos pela Fairchild Camera and Instrument Corporation para seus diodos de alta tensão/baixa fuga BAY73 e BA 129 aparece nas Figs. 1.35 e 1.36. Este exemplo representa a lista detalhada de dados e características. O termo *retificador* é aplicado a um diodo quando ele é usado em um processo de *retificação*, a ser descrito no Cap. 2.

Tópicos específicos da folha de especificações foram realçados, com uma letra de identificação correspondente à seguinte descrição:

- A: As tensões de polarização reversa (TPRs) *mínimas* para cada diodo em uma corrente de saturação reversa específica.
- B: Características de temperatura como indicado. Observe o uso da escala Celsius e a grande faixa de utilização [lembre-se de que $32^\circ\text{F} = 0^\circ\text{C} = \text{congelamento (H}_2\text{O)}$ e $212^\circ\text{F} = 100^\circ\text{C} = \text{ebulição (H}_2\text{O)}$].
- C: Nível máximo de dissipação de potência $P_D = V_D I_D = 500$ mW. A potência máxima nominal diminui a uma taxa de 3,33 mW por grau de aumento na temperatura, acima da temperatura ambiente (25°C), conforme claramente indicado pela *curva de redução de potência* da Fig. 1.36.

- D: Corrente direta contínua $I_{F\text{máx}} = 500$ mA (observe I_F versus a temperatura na Fig. 1.36).
- E: Faixa de valores de V_F para $I_F = 200$ mA. Observe que ele excede $V_T = 0,7$ V para ambos os dispositivos.
- F: Faixa de valores de V_F para $I_F = 1,0$ mA. Observe, neste caso, como os limites superiores giram em torno de 0,7 V.
- G: Em $V_R = 20$ V e para uma temperatura de operação típica $I_R = 500$ nA = $0,5 \mu\text{A}$, enquanto que para uma tensão reversa maior, I_R cai para 5 nA = $0,005 \mu\text{A}$.
- H: O nível de capacitância entre os terminais é em torno de 8 pF para o diodo BAY73, em $V_R = V_D = 0$ V (nenhuma polarização) e uma frequência de operação de 1 MHz.
- I: O tempo de recuperação reverso é $3 \mu\text{s}$ para a lista de condições de operação.

Algumas curvas da Fig. 1.36 empregam a escala log. Uma breve investigação da Seção 11.2 iria ajudar na leitura dos gráficos. Observe na figura da esquerda superior como V_F aumentou de 0,5 V para mais de 1 V, à medida que I_F aumenta de $10 \mu\text{A}$ para mais de 100 mA. Na figura abaixo, vemos que a corrente de saturação reversa varia consideravelmente com níveis crescentes de V_R , mas permanece abaixo de 1 nA à temperatura ambiente, acima de $V_R = 125$ V. Conforme observado na figura ao lado, entretanto, nota-se como a corrente de saturação reversa aumenta rapidamente com o aumento da temperatura (conforme previsto antes).

Na figura à direita, no alto, observe como a capacitância diminui com o aumento na tensão de polarização reversa, e, na figura abaixo, observe que a resistência ac (r_d) vale apenas cerca de 1 Ω em 100 mA, e aumenta para 100 Ω em correntes menores do que 1 mA (como esperado da discussão das seções anteriores).

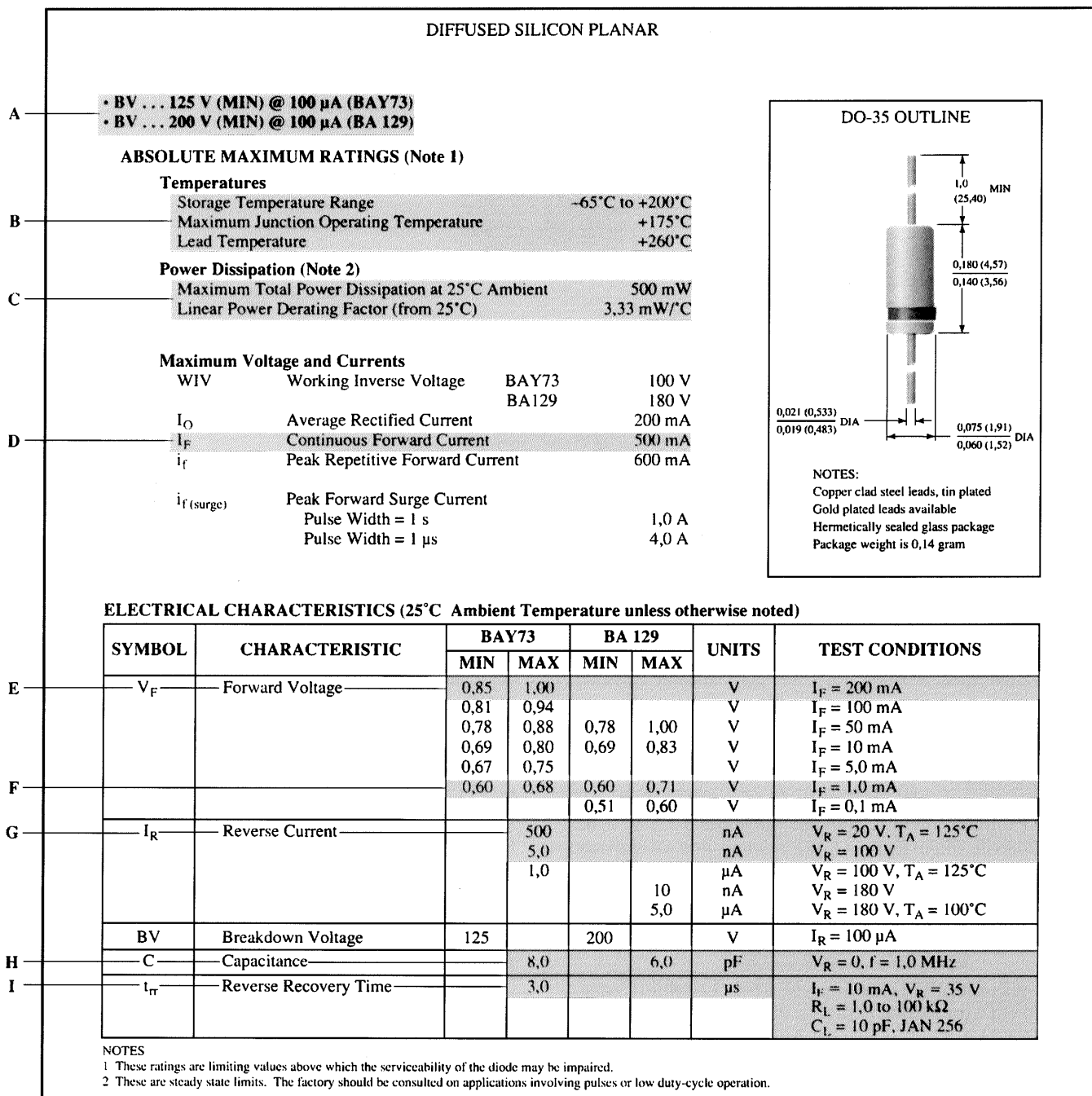


Fig. 1.35 Características elétricas dos diodos de alta tensão e baixa fuga, Fairchild BAY73-BA 129. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)*

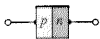
A corrente retificada média, corrente direta do pico repetitivo e a corrente direta de surto de pico, apresentadas na folha de especificações, são definidas a seguir:

1. **Corrente retificada média.** Um sinal retificado de meia onda (descrito na Seção 2.8) tem um valor definido por $I_{av} = 0,318 I_{pico}$. A corrente média nominal é menor do que as correntes contínuas ou direta de pico repetitiva, pois uma corrente de meia onda terá valores instantâneos muito maiores do que o valor médio.
2. **Corrente direta de pico repetitiva.** Este é o máximo valor instantâneo da corrente direta repetitiva. Observe que, uma vez

possuindo este nível por um breve período de tempo, seu valor pode ser maior do que o nível contínuo.

3. **Corrente direta de surto de pico.** Em períodos durante o chaveamento, mau funcionamento e assim por diante, existirão correntes muito altas através do dispositivo, para intervalos muito curtos de tempo (que não são repetitivos). Este pa-

*Os termos originais em inglês contidos nesta figura não foram traduzidos porque o que se encontra na prática, no laboratório, são especificações escritas em inglês, com raras exceções. Deseja-se, com isto, que o leitor se acostume aos termos técnicos que ele encontrará na sua vida profissional. (N. do T.)



CURVAS TÍPICAS DE CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS
à temperatura ambiente de 25°C, a menos que assinalado de outra forma

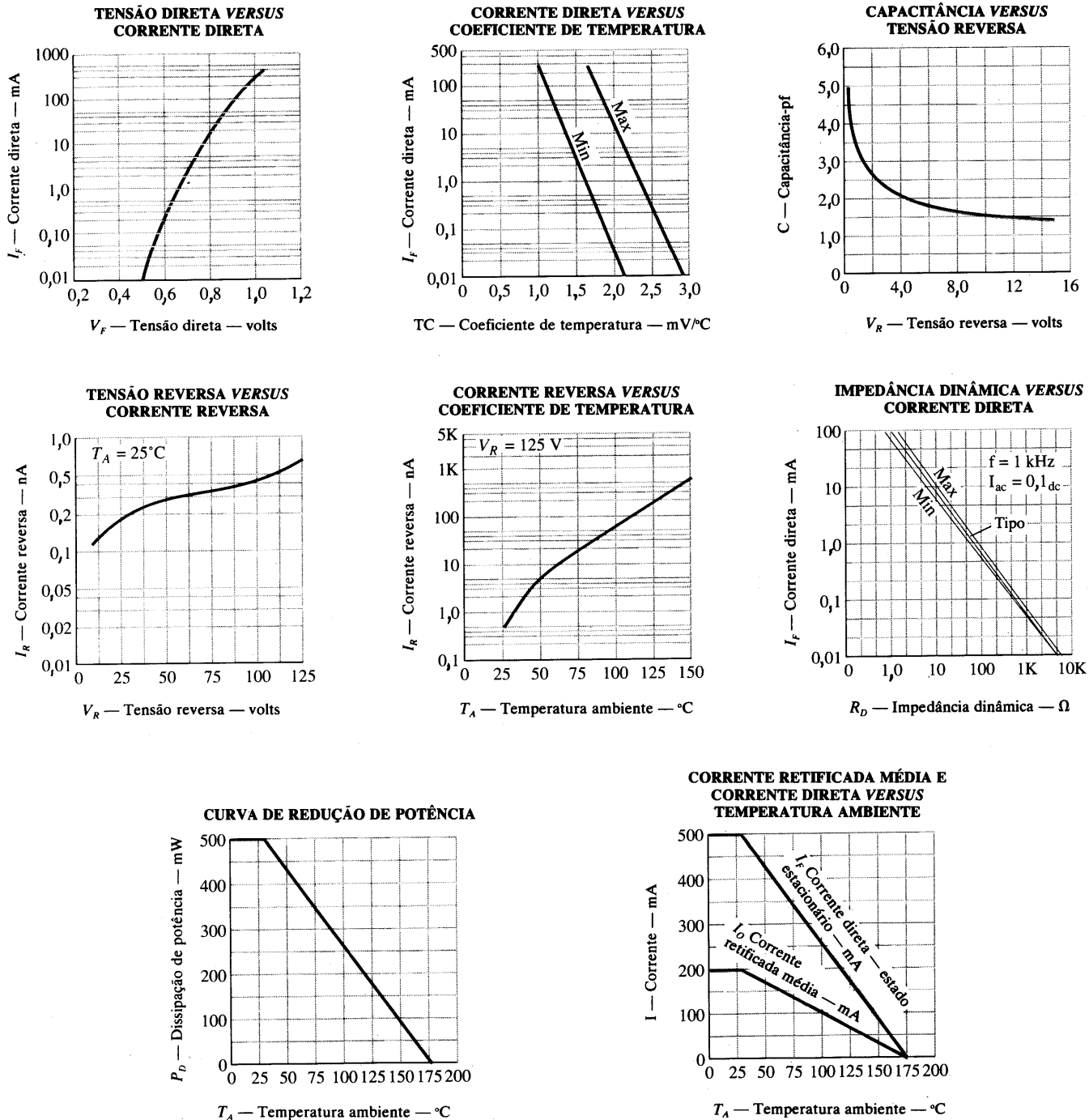


Fig. 1.36 Características dos diodos de alta tensão Fairchild BAY73-BA 129. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)

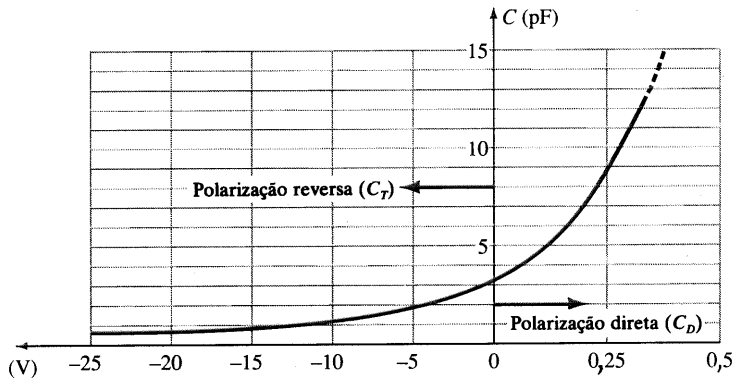


Fig. 1.37 Capacitância de transição e difusão versus polarização aplicada para um diodo de silício.

râmetro define o valor máximo e o intervalo de tempo permitido para estes surtos no nível de corrente.

Quanto mais se toma contato com as folhas de especificações, mais “amigáveis” elas se tornarão, especialmente quando o efeito de cada parâmetro é claramente compreendido para a aplicação sob análise.

1.10 CAPACITÂNCIA DE TRANSIÇÃO E DIFUSÃO

Dispositivos eletrônicos são inerentemente sensíveis a frequências elevadas. Muitos efeitos capacitivos de derivação podem ser ignorados para frequências menores, pois o valor da reatância $X_c = 1/2 \pi f C$ é muito grande (circuito-aberto equivalente). Este efeito, entretanto, não pode ser ignorado para frequências muito altas. X_c tornar-se-á suficientemente pequeno devido ao grande valor de f , que introduz um caminho de baixa reatância. No diodo semicondutor $p-n$, existem dois efeitos capacitivos a serem considerados. Ambos os tipos de capacitância estão presentes nas regiões de polarização direta e reversa, mas uma excede a outra dependendo da região de operação considerada.

Na região de polarização reversa, temos a capacitância da região de transição ou de depleção (C_T), enquanto que na região de polarização direta, temos a capacitância de difusão (C_D) ou de acumulação.

Lembre-se de que a equação básica para a capacitância de um capacitor de placas paralelas é definida por $C = \epsilon A/d$, onde ϵ é a permissividade do dielétrico (isolante) entre as placas de área A , separadas por uma distância d . Na região de polarização reversa existe uma região de depleção (livre de portadores) que se comporta essencialmente como um isolante entre as camadas de carga opostas. Uma vez que a largura de depleção (d) aumentará com a elevação do potencial de polarização reverso, a capacitância de transição resultante diminuirá, conforme a Fig. 1.37. O fato de a capacitância depender do potencial de polarização reverso empregado tem aplicação em alguns sistemas eletrônicos. De fato, no Cap. 20, um diodo será introduzido com operação totalmente dependente deste fenômeno.

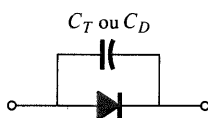


Fig. 1.38 Inclusão do efeito da capacitância de transição ou difusão no diodo semicondutor.

Embora o efeito descrito acima também esteja presente na região de polarização direta, ele é ofuscado pelo efeito da capacitância diretamente dependente da taxa em que a carga é injetada para as regiões fora da região de depleção. Em outras palavras, depende diretamente da corrente resultante do diodo. Níveis altos de corrente resultam em níveis altos de capacitância de difusão. Contudo níveis altos de corrente geram níveis reduzidos de resistência associada (a ser demonstrado brevemente), e a constante de tempo resultante ($\tau = RC$), que é muito importante em aplicações de alta velocidade, não se torna excessiva.

Os efeitos capacitivos descritos acima são representados por um capacitor em paralelo com o diodo ideal, conforme mostrado na Fig. 1.38. Para aplicações de baixa ou média frequência (exceto alta potência), entretanto, o capacitor não é normalmente incluído no símbolo que representa o diodo.

1.11 TEMPO DE REESTABELECIMENTO REVERSO

Existem certos tipos de dados normalmente apresentados nas folhas de especificações do diodo, fornecidas pelos fabricantes. Um parâmetro ainda não considerado é o tempo de reestabelecimento reverso, denotado por t_{rr} . No estado de polarização direta, foi mostrado anteriormente que existe grande quantidade de elétrons do material tipo n avançando em direção ao material tipo p e um grande número de buracos no tipo n — uma exigência para condução. Os elétrons no tipo p e buracos avançando em direção ao material tipo n estabelecem um grande número de portadores minoritários em cada material. Se a tensão aplicada fosse invertida para estabelecer uma situação de polarização reversa, gostaríamos de ver o diodo mudar instantaneamente do estado de condução para o estado de não-condução. Contudo, devido ao grande número de portadores minoritários em cada material, o comportamento do diodo será invertido conforme mostrado na Fig. 1.39, e ficará neste nível mensurável no período de tempo t_s (tempo de armazenamento) exigido para os portadores minoritários voltarem a seu estado de portador majoritário no material oposto. Em resumo, o diodo manter-se-á no estado de curto-circuito com uma corrente $I_{reversa}$ determinada pelos parâmetros do circuito. Eventualmente, quando esta fase de armazenamento tiver passado, a corrente será reduzida ao nível associado com o estado de não-condução. Este segundo período de tempo é denotado por t_t (intervalo de transição). O tempo de reestabelecimento reverso é a soma destes dois

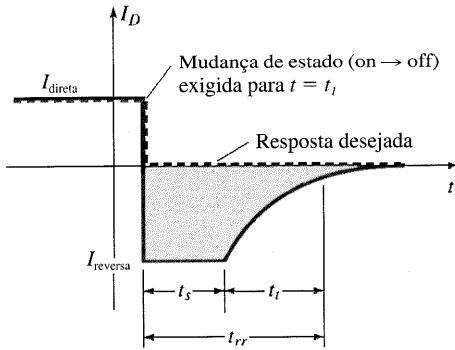


Fig. 1.39 Definição do tempo de reestabelecimento reverso.

intervalos: $t_{rr} = t_s + t_r$. Naturalmente, trata-se de uma importante consideração nas aplicações de chaveamento de alta velocidade. A maioria dos diodos de chaveamento disponíveis comercialmente tem um t_{rr} na faixa de poucos nanossegundos até $1 \mu s$. Entretanto há elementos disponíveis com um t_{rr} de apenas poucas centenas de picossegundos (10^{-12}).

1.12 NOTAÇÃO DO DIODO SEMICONDUTOR

A notação mais frequentemente utilizada para diodos semicondutores é fornecida na Fig. 1.40. Para grande parte dos diodos, a marcação de um ponto ou traço, conforme mostrado na Fig. 1.40, aparece na extremidade do catodo. A terminologia anodo e catodo é remanescente da notação do tubo de vácuo. O anodo refere-se ao potencial mais alto ou positivo, e o catodo refere-se ao terminal de potencial mais baixo ou negativo. Esta combinação de níveis de polarização resulta na condição de polarização direta ou “ligada” para o diodo. Alguns diodos semicondutores disponíveis comercialmente aparecem na Fig. 1.41. Alguns detalhes da construção dos dispositivos, tais como os mostrados na Fig. 1.41, são fornecidos nos Caps. 12 e 20.

1.13 VERIFICAÇÃO DO DIODO

A condição de um diodo semicondutor pode ser determinada rapidamente, utilizando-se (1) um medidor com display digital (MDD) com uma função de teste do diodo, (2) a função de ohmímetro de um multímetro, ou (3) um traçador de curva.

Função de Teste do Diodo

Um medidor com display digital, com a alternativa de teste do diodo, aparece na Fig. 1.42. Observe o pequeno símbolo de diodo como opção, abaixo do seletor de funções/escala. Quando o seletor é colocado nesta posição, e ligado como mostrado na Fig. 1.43a, o diodo deve estar no estado “ligado” e o display fornecerá uma indicação de tensão de polarização direta, tal como 0,67 V (para Si). O medidor tem uma fonte de corrente constante interna (em torno de 2 mA) que definirá o nível de tensão, como indicado na Fig. 1.43b. Uma indicação OL realizando as conexões mostradas na Fig. 1.43a revela um diodo defeituoso aberto. Se as pontas de teste do medidor forem invertidas, uma indicação OL deve resultar, devido à equivalência de circuito-aberto para o diodo. Em geral, portanto, uma indicação OL em ambas as direções constitui uma indicação de um diodo aberto ou defeituoso.

Verificação através do Ohmímetro

Na Seção 1.7 encontramos que a resistência de polarização direta de um diodo semicondutor é bem pequena comparada ao nível encontrado para a polarização reversa. Logo, se medirmos a resistência de um diodo usando as conexões indicadas na Fig. 1.44a, podemos esperar um valor relativamente baixo. A indicação resultante do ohmímetro será função da corrente estabelecida através do diodo, pela bateria interna (geralmente 1,5 V) do medidor. Quanto maior a corrente, menor o valor da resistência. Para a situação de polarização reversa, a leitura deve ser bem alta, exigindo uma escala para medida de alta resistência no medidor, conforme indicado na Fig. 1.44b. Uma leitura de resistência elevada em ambas as direções indica obviamente um comportamento de circuito aberto (dispositivo defeituoso), enquanto uma leitura de resistência muito baixa em ambas as direções irá indicar um dispositivo provavelmente em curto-circuito.

Traçador de Curva

O traçador de curva da Fig. 1.45 pode apresentar as curvas características de um grande número de dispositivos, incluindo o diodo semicondutor. Conectando-se corretamente o diodo no painel de teste, no centro da base da unidade, e ajustando-se os controles, o display da Fig. 1.46 pode ser obtido. Observe que a escala vertical é 1 mA/div, resultando nos níveis indicados. Para o eixo horizontal, a escala é 100 mV/div, resultando nos níveis de tensão indicados. Para um nível de 2 mA, como foi definido para um MDD, a tensão resultante seria em torno de

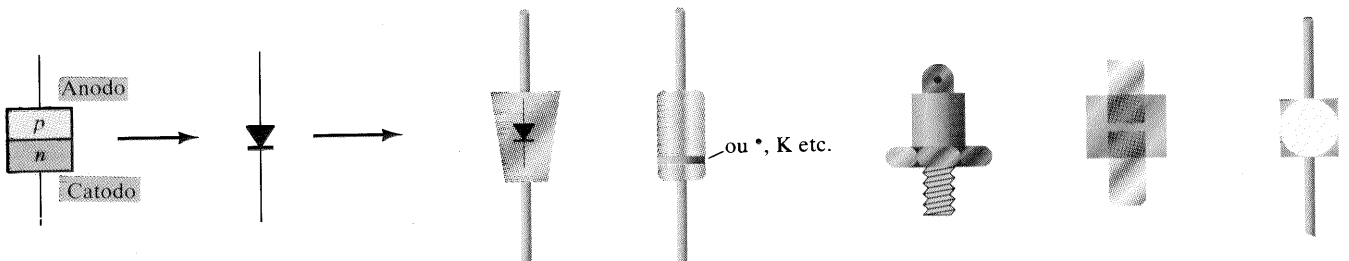
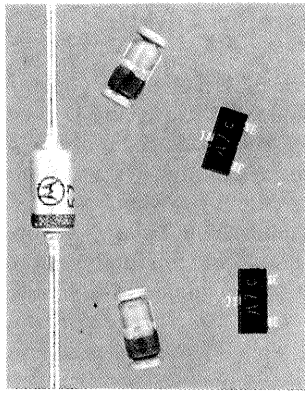
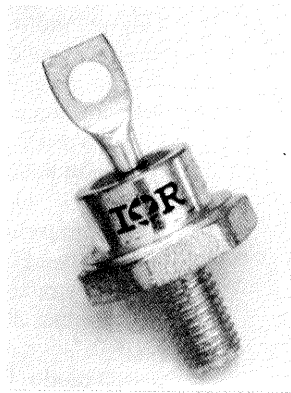


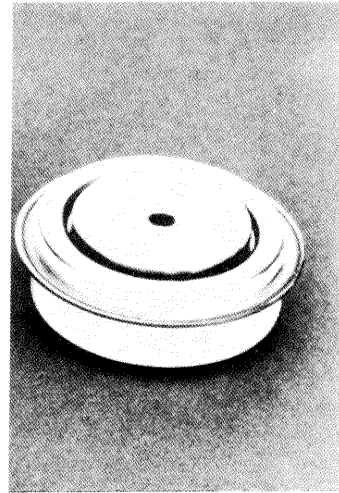
Fig. 1.40 Notação de diodo semicondutor.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.41 Vários tipos de diodos de junção. [(a) Cortesia da Motorola Inc.; e (b) e (c) Cortesia da International Rectifier Corporation.]

625 mV = 0,625 V. Embora o instrumento pareça inicialmente bem complexo, o manual de instrução e algum manuseio revelarão que os resultados desejados podem muitas vezes ser

obtidos sem uma quantidade excessiva de esforço e tempo. O mesmo instrumento aparecerá em mais de uma ocasião nos capítulos a seguir, à medida que investigarmos as características dos vários dispositivos.

1.14 DIODOS ZENER

A região Zener da Fig. 1.47 foi discutida com alguns detalhes na Seção 1.6. A curva cai de uma forma quase vertical para um potencial de polarização reverso denotado por V_z . O fato de a curva cair abaixo e se distanciar do eixo horizontal, em vez de para cima para a região V_D positiva, revela que a corrente na região Zener tem uma direção oposta àquela de um diodo polarizado diretamente.

Esta região de característica única é empregada no projeto de diodo Zener cujo símbolo gráfico aparece na Fig. 1.48a. Ambos os diodos, semicondutor e Zener, são apresentados lado a lado na Fig. 1.48, para garantir que o sentido de condução de cada

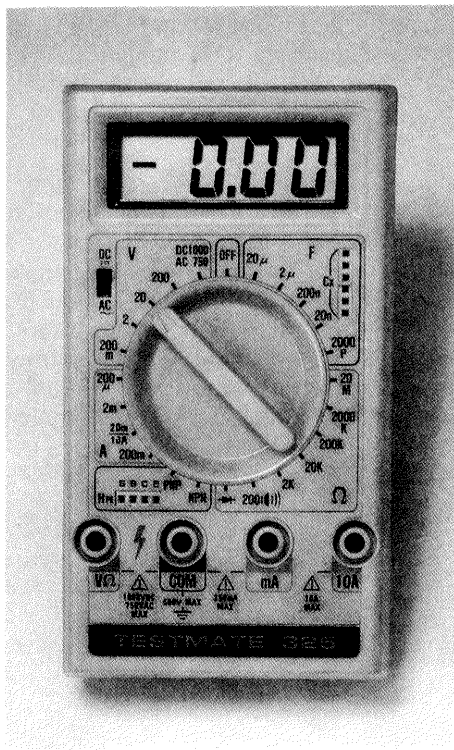


Fig. 1.42 Medidor de display digital com capacidade de verificar o estado do diodo. (Cortesia da Computronics Technology, Inc.)

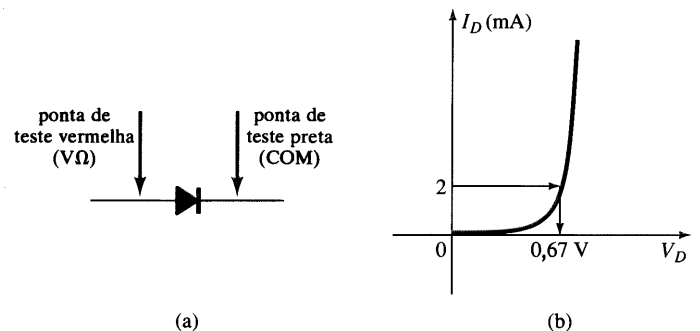


Fig. 1.43 Verificação do diodo no estado de polarização direta.

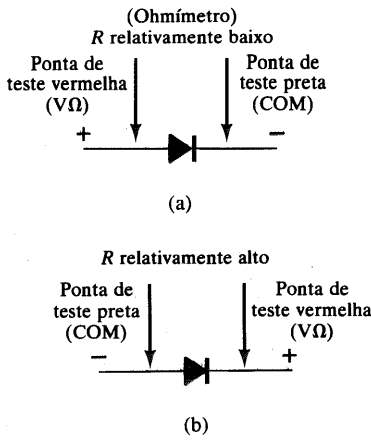
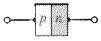


Fig. 1.44 Teste do diodo com um ohmímetro.

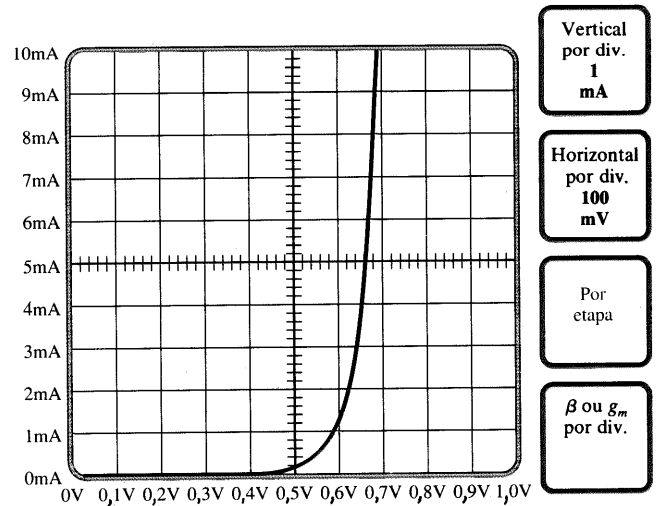


Fig. 1.46 Resposta do traçador de curva para o diodo de silício 1N4007.

um foi muito bem compreendido, juntamente com a polaridade exigida da tensão aplicada. Para o diodo semiconductor, no estado “ligado” irá fluir uma corrente no sentido da seta. Para o diodo Zener, o sentido de condução é oposto ao da seta do símbolo, como salientado na introdução desta seção. Observe ainda que as polaridades de V_D e V_Z são as mesmas, e obtidas considerando-se que cada elemento é um elemento resistivo.

A localização da região Zener pode ser controlada variando-se os níveis de dopagem. Um aumento na dopagem, produzindo um aumento no número de impurezas adicionais, diminuirá o potencial Zener. Diodos Zener são disponíveis, apresentando potenciais Zener de 1,8 a 200 V, com potência máxima de $\frac{1}{4}$ a 50 W. Devido a suas características de temperatura e de corrente, o silício é geralmente utilizado na fabricação de diodos Zener.

O circuito completo equivalente do diodo Zener na região Zener inclui uma pequena resistência dinâmica, e uma bateria de valor igual ao potencial Zener, como mostrado na Fig. 1.49. Para todas as aplicações a seguir, contudo, devemos assumir como

primeira aproximação que os resistores externos são muito maiores em valor do que o resistor Zener equivalente, e que o circuito equivalente é apenas aquele indicado na Fig. 1.49b.

Uma ampliação da região Zener é dada na Fig. 1.50, permitindo a descrição dos dados do diodo Zener que aparecem no Quadro 1.4 para um diodo 1N961, Fairchild, 500-mW, 20%. O termo “nominal” associado com V_Z indica que ele é um valor médio típico. Uma vez que este é um diodo 20%, aceita-se que o potencial Zener varie da maneira $10\text{ V} \pm 20\%$, ou de 8 a 12 V, para esta faixa de aplicação. Também disponíveis são os diodos de 10 a 5%, com as mesmas especificações. A corrente de teste I_{ZT} é a corrente definida pelo nível de potência de $\frac{1}{4}$, e Z_{ZT} é a impedância dinâmica para este nível de corrente. A impedância máxima ocorre para a corrente de joelho I_{ZK} . A corrente de saturação reversa é fornecida para um nível de potencial particular e I_{ZM} é a corrente máxima para as unidades cuja tolerância é de 20%.

O coeficiente de temperatura reflete a variação percentual de V_Z com a temperatura. Ele é definido pela equação

$$T_C = \frac{\Delta V_Z}{V_Z(T_1 - T_0)} \times 100\% \quad \%/^{\circ}\text{C} \quad (1.12)$$

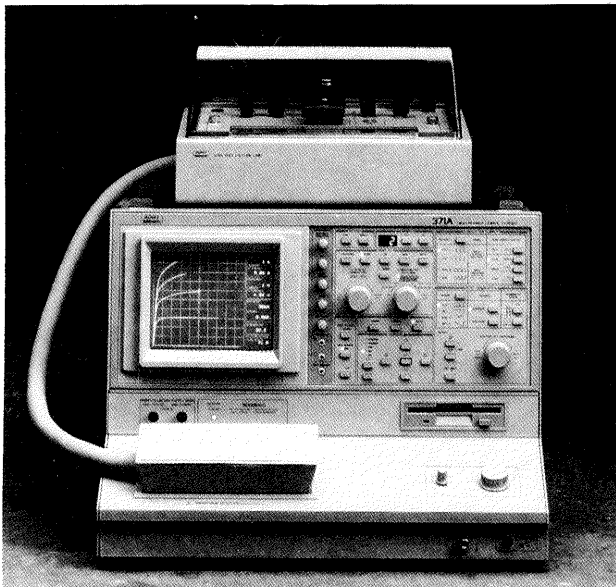


Fig. 1.45 Traçador de curva. (Cortesia da Tektronix, Inc.)

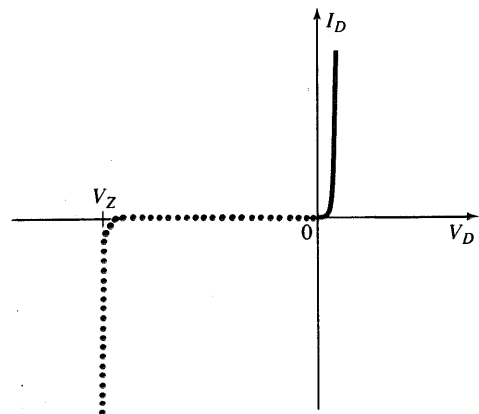


Fig. 1.47 Análise da região Zener.

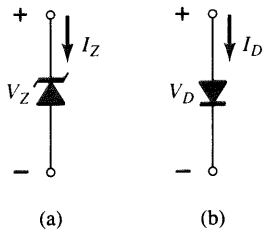


Fig. 1.48 Sentido de condução: (a) diodo Zener; (b) diodo semiconductor.

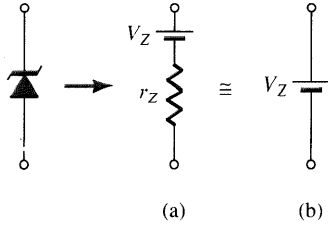


Fig. 1.49 Circuito equivalente Zener: (a) completo; (b) aproximado.

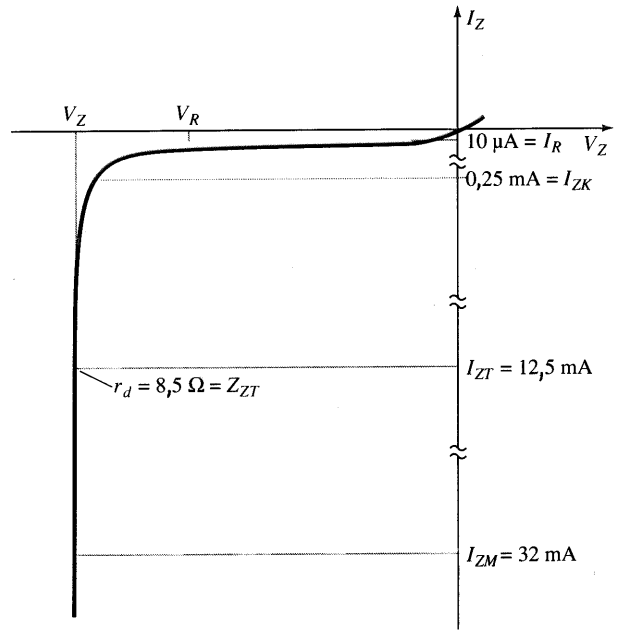


Fig. 1.50 Características de teste do Zener (Fairchild 1N961).

QUADRO 1.4 Características Elétricas (temperatura ambiente 25°C, a menos que outra seja observada)

Tipo Jedec	Voltagem Zener Nominal V_Z (V)	Corrente de Teste, I_{ZT} (mA)	Impedância Dinâmica Máxima Z_{ZT} em I_{ZT} (Ω)	Impedância da Curva Máxima Z_{ZK} em I_{ZK} (Ω)	Corrente Reversa Máxima I_R em V_R (μ A)	Tensão de Teste V_R (V)	Corrente Reguladora Máxima I_{ZM} (mA)	Coefficiente de Temperatura Típico (%/°C)	
1N961	10	12,5	8,5	700	0,25	10	7,2	32	+0,072

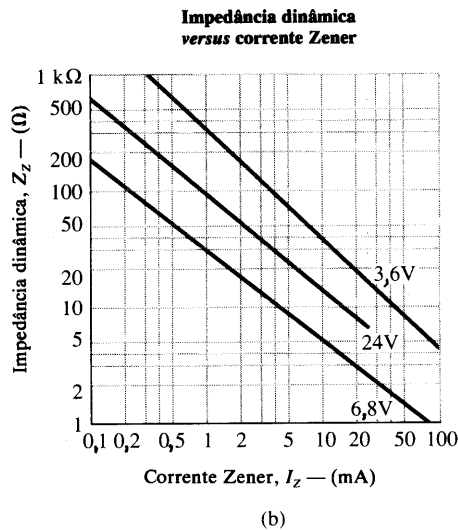
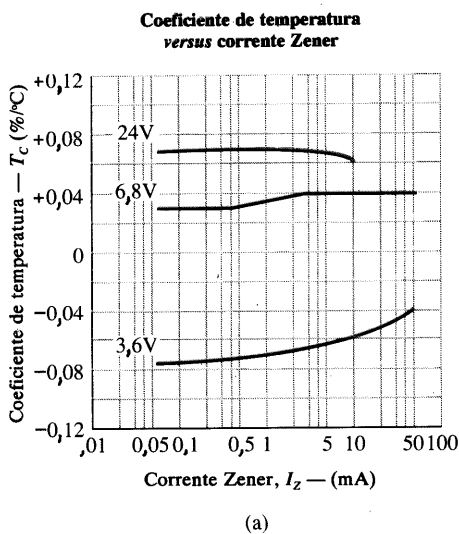


Fig. 1.51 Características elétricas de um diodo Zener Fairchild 500 mW. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)



onde ΔV_Z é a variação resultante no potencial Zener devido à variação na temperatura. Observe na Fig. 1.51a que o coeficiente de temperatura pode ser positivo, negativo, ou até mesmo zero para diferentes níveis de tensão Zener. Um valor positivo significa aumento V_Z com um aumento na temperatura, enquanto um valor negativo resulta em decréscimo no valor de V_Z com aumento na temperatura. Os níveis 24-V, 6,8-V e 3,6-V referem-se aos três diodos Zener que apresentam estes valores nominais dentro da família de Zeners do 1N961. A curva para o Zener 1N961 10 V situa-se obviamente entre as curvas dos dispositivos 6,8 V e 24 V. Voltando à Eq. (1.12), T_0 é a temperatura na qual V_Z é obtido (normalmente temperatura ambiente — 25°C) e T_1 é o novo valor. O Exemplo 1.3 demonstrará o uso da Eq. (1.12).

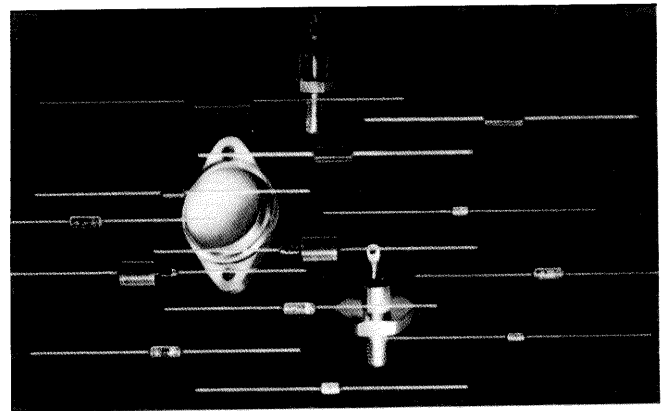


Fig. 1.53 Diodos Zener. (Cortesia da Siemens Corporation.)

EXEMPLO 1.3

Determine a tensão nominal de um diodo Zener Fairchild 1N961 do Quadro 1.4, em uma temperatura de 100°C.

Solução

Da Eq. 1.12,

$$\Delta V_Z = \frac{T_C V_Z}{100} (T_1 - T_0)$$

A substituição dos valores no Quadro 1.4 leva a

$$\begin{aligned} \Delta V_Z &= \frac{(0,072)(10 \text{ V})}{100} (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \\ &= (0,0072)(75) \\ &= 0,54 \text{ V} \end{aligned}$$

e devido ao coeficiente de temperatura positivo, o novo potencial Zener, definido por V'_Z , é

$$\begin{aligned} V'_Z &= V_Z + 0,54 \text{ V} \\ &= \mathbf{10,54 \text{ V}} \end{aligned}$$

A variação da impedância dinâmica (fundamentalmente, sua resistência em série) com a corrente aparece na Fig. 1.15b. Novamente, o Zener 10 V aparece entre os Zeners 6,8 V e 24 V. Observe que quanto mais intensa a corrente (ou quanto mais vertical a elevação na Fig. 1.47), menor o valor da resistência. Observe também que à medida que você se desloca para abaixo do joelho da curva, a resistência aumenta a níveis significativos.

A identificação dos terminais e o encapsulamento para alguns diodos Zener aparecem na Fig. 1.52. A Fig. 1.53 é uma fotografia real de vários dispositivos Zener. Observe que seu aspecto é

muito semelhante ao diodo semiconductor. Algumas áreas de aplicação para o diodo Zener serão examinadas no Cap. 2.

1.15 DIODOS EMISSORES DE LUZ

O uso crescente de displays digitais em calculadoras, relógios e todas as formas de instrumentação contribuiu para o grande interesse atual em estruturas que emitem luz quando devidamente polarizadas. Os dois tipos de uso comum, hoje em dia, que realizam esta função são os *diodos emissores de luz* (LED) e o *display de cristal líquido* (LCD). Uma vez que o LED faz parte da família dos dispositivos de junção *p-n*, e estará em alguns dos circuitos dos próximos capítulos, ele será introduzido neste capítulo. O display LCD é descrito no Cap. 20.

Como o nome indica, o diodo emissor de luz (LED) é um diodo que emite luz visível quando energizado. Em qualquer junção *p-n* polarizada diretamente, existe, dentro da estrutura e próximo principalmente da junção, uma recombinação de buracos e elétrons. Esta recombinação exige que a energia do elétron livre não ligado seja transferida para um outro estado. Em todas as junções *p-n* do semiconductor, parte desta energia será emitida na forma de calor e parte na forma de fótons. No silício e germânio, a maior parte é na forma de calor, e a luz emitida é insignificante. Em outros materiais, como fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) ou fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons da energia luminosa é suficiente para criar uma fonte de luz bem visível.

O processo de emissão de luz, aplicando-se uma fonte elétrica de energia, é chamado de eletroluminescência.

Conforme mostrado na Fig. 1.54 com seu símbolo gráfico, a superfície de condução conectada ao material *p* é muito menor, permitindo desta forma a emersão de um grande número de fótons de energia luminosa. Observe na figura que a recombinação dos portadores injetados devido à junção polarizada diretamente resulta em uma luz emitida do local de recombinação. Pode existir, naturalmente, alguma absorção dos pacotes de energia do fóton na própria estrutura, mas uma percentagem muito grande consegue ser emitida, como mostrado na figura.

O aspecto e características de uma miniatura de lâmpada de estado sólido de alta eficiência fabricada pela Hewlett-Packard aparece na Fig. 1.55. Observe que na Fig. 1.55 (b) a corrente direta máxima é de 60 mA, e 20 mA um nível típico de operação. No entanto, nas condições de teste indicadas na Fig. 1.55 (c), a corrente di-

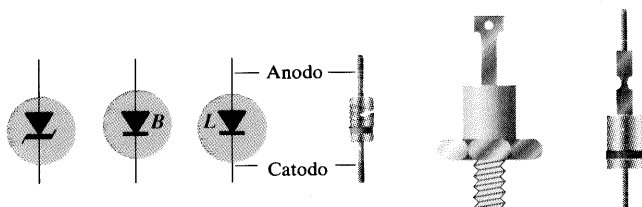


Fig. 1.52 Identificação dos terminais do Zener e símbolos.

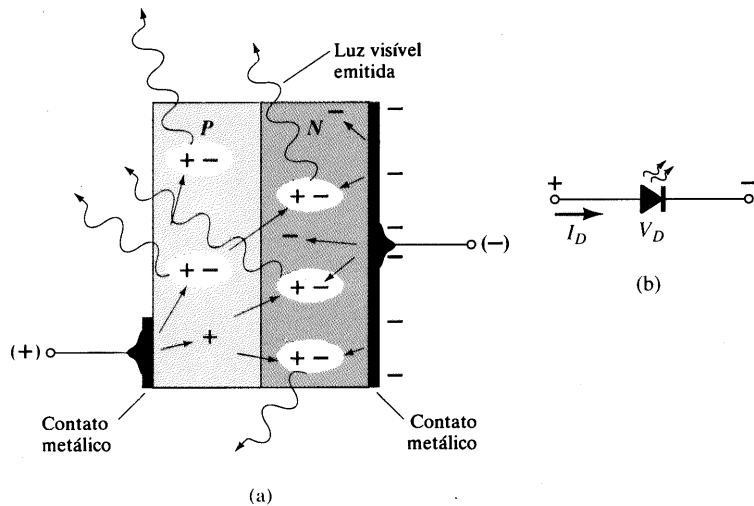
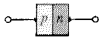


Fig. 1.54 (a) Processo de eletroluminescência no LED; (b) símbolo gráfico.



(a)

Taxas Máximas Absolutas em $T_A = 25^\circ\text{C}$		
Parâmetro	Vermelho Eff. Alto 4160	Unidades
Dissipação de potência	120	mW
Corrente direta média	20 ⁽¹⁾	mA
Corrente direta de pico	60	mA
Faixa de temperatura de operação e armazenamento	-55°C a 100°C	
Temperatura de soldagem [1,6 mm (0,063 in) do corpo]	230°C para 3 segundos	

⁽¹⁾Acima de 50°C, reduzir 0,2 mA/°C.

(b)

Características Elétricas/Ópticas em $T_A = 25^\circ\text{C}$

Símbolo	Descrição	Vermelho Eff. Alto 4160			Unidades	Condições de Teste
		Min	Tip	Máx		
I_V	Intensidade luminosa axial	1,0	3,0		mcd	$I_F = 10 \text{ mA}$
$2\theta_{1/2}$	Ângulo incluído entre pontos de meia intensidade luminosa		80		deg	Observação 1
λ_{pico}	Comprimento de onda de pico		635		nm	Medida no pico
λ_d	Comprimento de onda dominante		628		nm	Observação 2
τ_r	Velocidade de resposta		90		ns	
C	Capacitância		11		pF	$V_F = 0; f = 1 \text{ MHz}$
Θ_{jc}	Resistência térmica		120		°C/W	Junção ao catodo em 0,79 mm (0,031 in) do corpo
V_F	Voltagem direta		2,2	3,0	V	$I_F = 10 \text{ mA}$
BV_R	Voltagem de ruptura reversa	5,0			V	$I_R = 100 \mu\text{A}$
η_v	Eficácia luminosa		147		lm/W	Observação 3

OBSERVAÇÕES:

- $\theta_{1/2}$ é o ângulo do eixo-off no qual a intensidade luminosa é a metade da intensidade luminosa axial.
- O comprimento de onda λ_d é obtido do diagrama de cromaticidade CIE e representa o comprimento de onda singular que define a cor do sistema.
- Intensidade radiante, I_v , em watts/steradian, pode ser encontrada da equação $I_v = I_v/\eta_v$, onde I_v é a intensidade luminosa em candelas e η_v é a eficácia luminosa em lúmens/watt.

(c)

Fig. 1.55 Lâmpada miniatura vermelha de estado sólido de alta eficiência da Hewlett-Packard: (a) aspecto; (b) valores máximos absolutos; (c) características elétricas/ópticas; (d) intensidade relativa versus comprimento de onda; (e) corrente direta versus tensão direta; (f) intensidade luminosa relativa versus corrente direta; (g) eficiência relativa versus corrente de pico; (h) corrente de pico máximo versus duração do pulso; (i) intensidade luminosa relativa versus deslocamento angular. (Cortesia da Hewlett-Packard Corporation.)

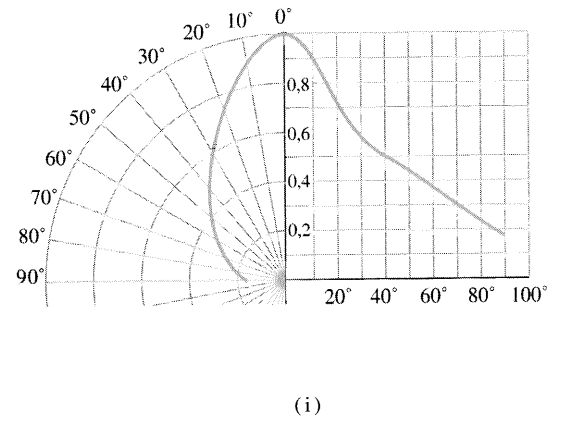
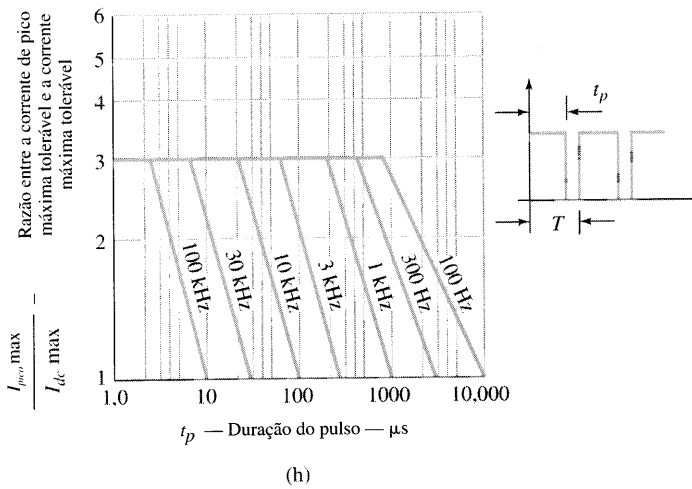
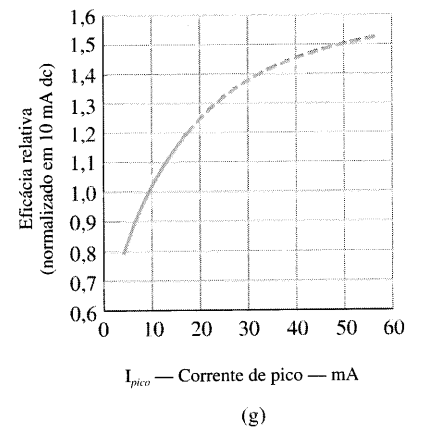
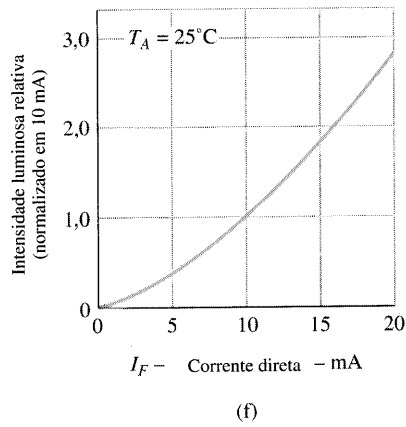
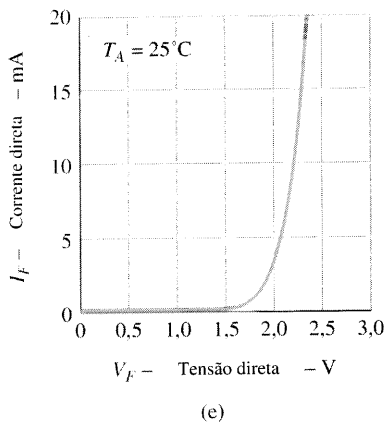
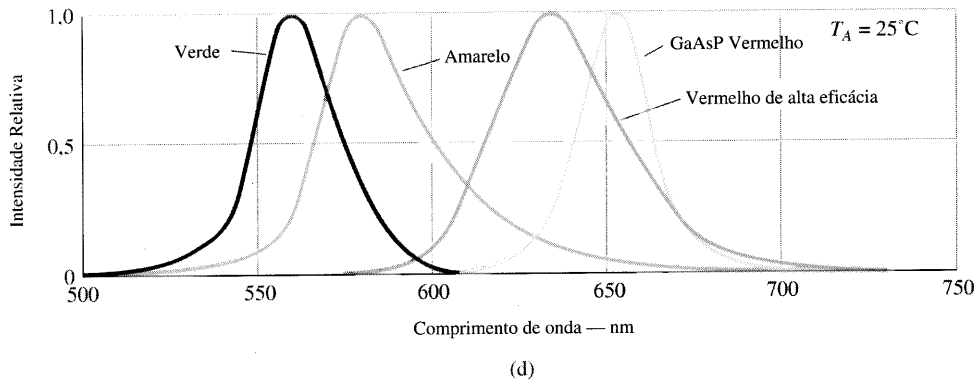


Fig. 1.55 Continuação.

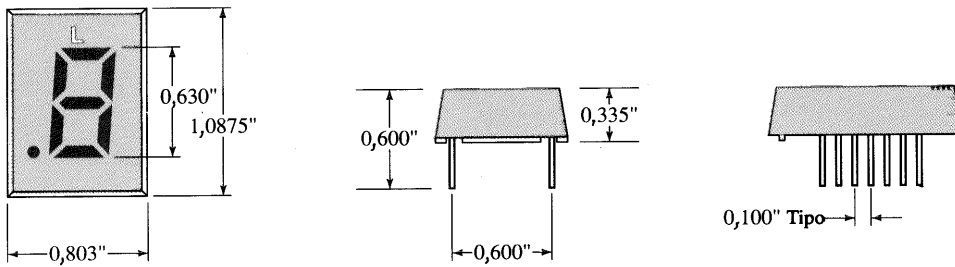
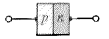


Fig. 1.56 Display do segmento Litronix.

reta é de 10 mA. O nível de V_D sob condições de polarização direta está listado como V_F e estende-se de 2,2 até 3 V. Em outras palavras, pode-se esperar uma corrente de operação típica em torno de 10 mA em 2,5 V para uma boa emissão de luz.

Duas quantidades ainda não definidas aparecem listadas nas características elétrica/ótica em $T_A = 25^\circ\text{C}$. Elas são a intensidade luminosa axial (I_a) e a eficiência luminosa (η_v). A intensidade da luz é medida em *candela*. Uma candela emite um fluxo de luz de 4π lúmens e estabelece uma iluminação de 1 ft-cd em 1 ft² de área e a 1 ft da fonte de luz. Mesmo que esta definição não forneça um claro entendimento de candela como unidade de medida, seu nível pode certamente ser comparado entre dispositivos semelhantes. O termo *eficácia* é, por definição, uma medida da capacidade de um sistema produzir um certo efeito. Para o LED, esta é a razão do número de lúmens gerados por watt aplicado de energia elétrica. A eficiência relativa é definida pela intensidade luminosa por unidade de corrente, como mostrado na Fig. 1.55g. A intensidade relativa de cada cor *versus* o comprimento de onda aparece na Fig. 1.55d.

Como o LED é um dispositivo de junção *p-n*, ele apresentará uma curva característica polarizada diretamente (Fig. 1.55e) semelhante às curvas de resposta do diodo. Observe o aumento quase linear da intensidade luminosa relativa com a corrente direta (Fig. 1.55f). A Fig. 1.55h revela que quanto mais longa a duração de um pulso em uma frequência particular, menor o pico de corrente permitido (após passar o valor de corte t_p). A Fig. 1.55i revela simplesmente que a intensidade é maior para 0° (ou visão frontal) e mínima em 90° (quando se vê o dispositivo de lado).

Displays com LED estão hoje disponíveis em muitos tamanhos e formas diferentes. A região emissora de luz é encontrada com comprimentos de 0,1 até 1 in. Números podem ser criados por segmentos, tais como os mostrados na Fig. 1.56. Aplicando-se uma polarização direta ao segmento do material do tipo *p*, qualquer número de 0 a 9 pode ser apresentado.

O display da Fig. 1.57 é utilizado em calculadoras e fornece oito dígitos. Existem também lâmpadas de LED de dois fios que

contêm dois LEDs, de modo que uma inversão na polarização muda a cor de verde para vermelho, ou vice-versa. LEDs estão disponíveis atualmente em vermelho, verde, amarelo, laranja e branco. A introdução da cor azul parece ser uma possibilidade em um futuro bem próximo. Em geral, LEDs operam em níveis de tensão de 1,7 até 3,3 V, que os tornam completamente compatíveis com circuitos de estado sólido. Eles apresentam um tempo rápido de resposta (nanossegundos) e oferecem bons níveis de contraste para visibilidade. A especificação de potência é tipicamente de 10 a 150 mW com um tempo de vida de 100.000 + horas. A construção do semiconductor acrescenta um fator de robustez significativo.

1.16 ARRANJO DE DIODOS — CIRCUITOS INTEGRADOS

As características dos circuitos integrados serão introduzidas no Cap. 12. Contudo alcançamos um estágio na nossa introdução de circuitos eletrônicos que nos permite no mínimo uma análise superficial dos arranjos de diodo em pastilhas de circuito integrado. Verificar-se-á que o circuito integrado não é um dispositivo único, com características totalmente diversas daquelas que analisamos nos capítulos introdutórios. Ele representa apenas uma redução significativa do tamanho dos sistemas eletrônicos. Em outras palavras, internamente ao circuito integrado estão os sistemas e dispositivos discretos, que estavam disponíveis muito antes da existência do circuito integrado, que, como sabemos, tornou-se uma realidade hoje em dia.

Um arranjo possível aparece na Fig. 1.58. Observe que oito diodos compõem internamente ao arranjo de diodos 1410 M Fairchild FSA. Isto é, no encapsulamento mostrado na Fig. 1.59 existem conjuntos de diodos em um wafer de silício simples, que apresentam todos os anodos conectados ao pino 1 e os catodos aos pinos de 2 a 9. Observe na mesma figura que o pino 1 é de-

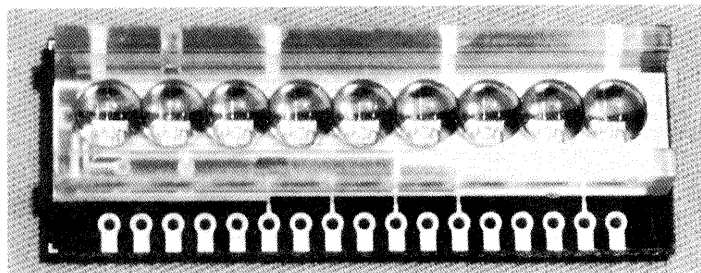


Fig. 1.57 Display de calculadora de oito dígitos e sinal. (Cortesia de Hewlett-Packard Corporation.)

FSA1410M

PLANAR AIR-ISOLATED MONOLITHIC DIODE ARRAY

- C ... 5.0 pF (MAX)
- ΔV_F ... 15 mv (MAX) @ 10 mA

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Temperatures

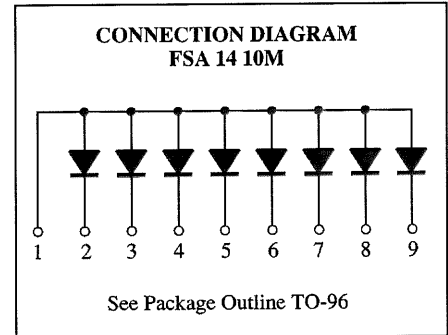
Storage Temperature Range	-55°C to +200°C
Maximum Junction Operating Temperature	+150°C
Lead Temperature	+260°C

Power Dissipation (Note 2)

Maximum Dissipation per Junction at 25°C Ambient	400 mW
per Package at 25°C Ambient	600 mW
Linear Derating Factor (from 25°C) Junction	3,2 mW/°C
Package	4.8 mW/°C

Maximum Voltage and Currents

WIV	Working Inverse Voltage	55 V
I_F	Continuous Forward Current	350 mA
$i_{f(surge)}$	Peak Forward Surge Current	
	Pulse Width = 1,0 s	1,0 A
	Pulse Width = 1,0 μ s	2,0 A



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C Ambient Temperature unless otherwise noted)

SYMBOL	CHARACTERISTIC	MIN	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
B_V	Breakdown Voltage	60		V	$I_R = 10 \mu A$
V_F	Forward Voltage (Note 3)		1.5	V	$I_F = 500 \text{ mA}$
			1.1	V	$I_F = 200 \text{ mA}$
			1.0	V	$I_F = 100 \text{ mA}$
I_R	Reverse Current		100	nA	$V_R = 40 \text{ V}$
	Reverse Current ($T_A = 150^\circ C$)		100	μA	$V_R = 40 \text{ V}$
C	Capacitance		5.0	pF	$V_R = 0, f = 1 \text{ MHz}$
V_{FM}	Peak Forward Voltage		4.0	V	$I_F = 500 \text{ mA}, t_r \leq 10 \text{ ns}$
t_{fr}	Forward Recovery Time		40	ns	$I_F = 500 \text{ mA}, t_r < 10 \text{ ns}$
t_{rr}	Reverse Recovery Time		10	ns	$I_f = I_r = 10 - 200 \text{ mA}$
			50	ns	$R_L = 100 \Omega, \text{ Rec. to } 0.1 I_r$ $I_f = 500 \text{ mA}, I_r = 50 \text{ mA}$ $R_L = 100 \Omega, \text{ Rec. to } 5 \text{ mA}$
ΔV_F	Forward Voltage Match		15	mV	$I_F = 10 \text{ mA}$

NOTES

- 1 These ratings are limiting values above which life or satisfactory performance may be impaired.
- 2 These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operation.
- 3 V_F is measured using an 8 ms pulse.

Fig. 1.58 Arranjo de diodo monolítico. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)*

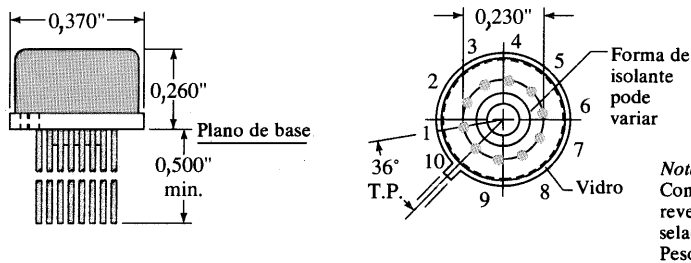


Fig. 1.59 Esquema do encapsulamento TO-96 para o arranjo de diodo FSA 1410M. Todas as dimensões estão em polegadas. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)

*N.T.: Os termos originais em inglês contidos nesta figura não foram traduzidos porque o que se encontra na prática, no laboratório, são especificações escritas em inglês, com raras exceções. Deseja-se, com isto, que o leitor se acostume aos termos técnicos que ele encontrará na sua vida profissional.

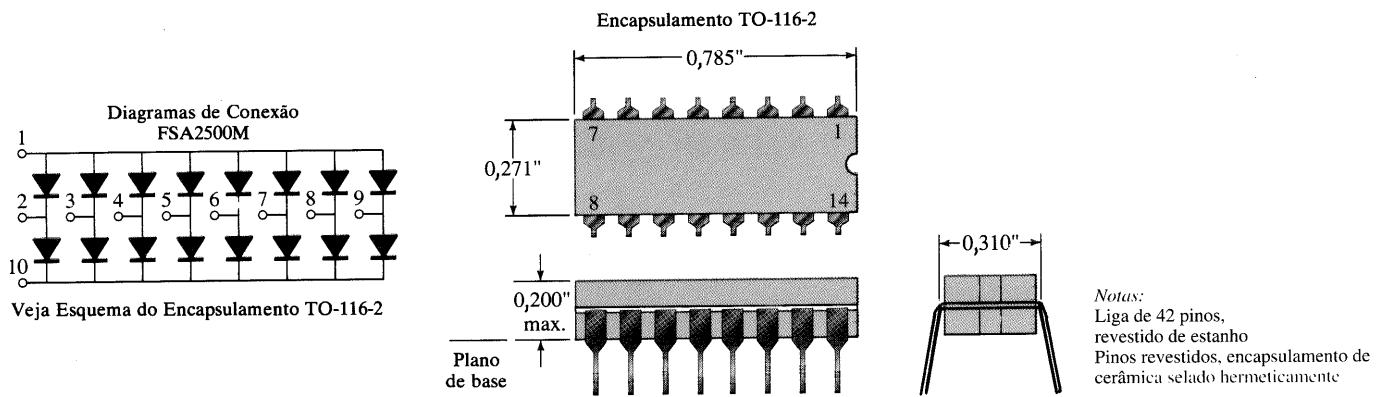


Fig. 1.60 Arranjo de diodo monolítico. Todas as dimensões estão em polegadas. (Cortesia da Fairchild Camera and Instrument Corporation.)

terminado como sendo aquele localizado à esquerda de uma pequena saliência existente no encapsulamento, observando de baixo para o CI. Os outros números seguem, então, em seqüência. Se apenas um diodo for usado, então somente os pinos 1 e 2 (ou qualquer número de 3 a 9) seriam usados. Os diodos restantes seriam deixados em aberto, não afetando o circuito no qual os pinos 1 e 2 estão conectados.

Um arranjo de diodo aparece na Fig. 1.60. Neste caso, a pastilha é diferente, mas a numeração em seqüência aparece no esquema. O pino 1 é o pino diretamente acima do pequeno entalhe, como se pode observar no dispositivo acima.

1.17 ANÁLISE POR COMPUTADOR

O computador vem-se tornando parte integrante da indústria eletrônica, de modo que as utilidades desta “ferramenta” de trabalho devem ser introduzidas na primeira oportunidade. Para os estudantes sem nenhuma experiência com computador há um receio inicial normal em relação a este sistema poderoso, aparentemente complicado. Com isto em mente, a análise por computador deste livro foi preparada para oferecer um sistema computacional mais “amigável”, revelando a facilidade relativa com a qual ele pode ser aplicado para realizar algumas tarefas úteis e especiais, em um tempo mínimo e com um alto grau de precisão. O assunto foi escrito com a suposição de que o leitor não tem qualquer experiência computacional anterior, ou contato prévio com a terminologia a ser utilizada. Não existe também nenhuma indicação de que o teor deste livro seja suficiente para permitir um completo entendimento dos “comos” e “porquês” que certamente surgirão. O propósito aqui é somente introduzir alguma terminologia, discutir um pouco de suas capacidades, revelar as possibilidades disponíveis, mencionar algumas de suas limitações e demonstrar sua versatilidade com alguns exemplos cuidadosamente escolhidos.

Em geral, a análise por computador de sistemas eletrônicos pode adotar um dos dois métodos: usando uma *linguagem* como BASIC, Fortran, Pascal, ou C; ou utilizando um *software* aplicado tal como, por exemplo, PSpice, MicroCap II, Breadboard ou Circuit Master. Uma linguagem, através de sua notação simbólica, forma a ponte entre o usuário e o computador que permite um diálogo entre os dois para o estabelecimento das operações a serem realizadas.

A linguagem empregada neste livro é o BASIC, escolhida porque utiliza várias palavras e frases familiares da língua inglesa que resumem as operações a serem executadas. Quando uma lingua-

gem é empregada para analisar um sistema, desenvolve-se um *programa* que define seqüencialmente as operações a serem executadas — na maioria das vezes na mesma ordem em que realizamos a mesma análise feita a mão. Neste tipo de análise, um passo errado fará o resultado obtido perder completamente o sentido. Com o tempo e a prática, as alternativas mais eficientes visando uma solução tornar-se-ão óbvias. Uma vez montados da “melhor” forma, os programas podem ser catalogados para uso futuro. A vantagem importante da linguagem é que um programa pode ser adaptado para satisfazer todas as necessidades especiais do usuário. Ela permite caminhos inovadores pelo usuário, que podem resultar em impressões de dados de maneira mais informativa e interessante.

A abordagem alternativa referida acima utiliza um software aplicativo para executar a análise desejada. Um software aplicativo é um programa escrito e testado durante certo tempo, projetado para executar um determinado tipo de análise ou síntese, de uma forma eficiente e com um nível elevado de precisão.

O aplicativo não pode ser alterado pelo usuário, e sua aplicação é limitada às operações estabelecidas no sistema. O usuário deve ajustar suas necessidades ao conjunto de opções oferecidas pelo aplicativo. Além disso, ele deve entrar com a informação da maneira solicitada pelo aplicativo, ou os dados correm o risco de serem mal interpretados. O software aplicativo selecionado para este livro é o PSpice,* disponível em dois formatos: DOS e Windows. O formato DOS foi o primeiro a ser oferecido e, hoje em dia, é o mais popular. Contudo, a versão para Windows está ganhando terreno, uma vez que os usuários começaram a descobrir suas reais possibilidades. Isto comumente ocorre: quando nos sentimos satisfeitos com determinado método que atende às nossas necessidades, ficamos pouco motivados a utilizar parte do nosso tempo para aprender uma outra técnica cujos resultados são similares. Os autores, entretanto, podem afirmar que quando conhecemos melhor a versão para Windows, descobrimos que há algumas características interessantes e que valem a pena serem investigadas. A versão para DOS empregada neste texto é a versão 6.0, e, para Windows, a versão 6.1. O programa foi desenvolvido pela MicroSim de Irvine, Califórnia. A Fig. 1.61 apresenta uma fotografia da versão 6.2 completa em CD-ROM. Uma versão mais sofisticada, identificada simplesmente como SPICE, tem grande aplicação na indústria.

*PSpice é marca registrada da MicroSim Corporation.

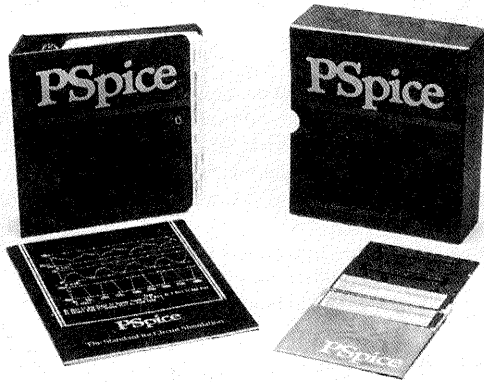


Fig. 1.61 Software aplicativo PSpice. (Copyright 1990, MicroSim Corporation.)

Em resumo, portanto, um software é desenvolvido para realizar uma série de cálculos e operações específicas, fornecer os resultados em um formato definido. Uma linguagem permite maior flexibilidade, mas também deixa de favorecer-se da extensa análise e pesquisa normalmente dedicadas ao desenvolvimento de um software “confiável”. O usuário deve definir que melhor aproximação se adapta às necessidades do momento. Obviamente, se um software existe para a análise ou síntese desejada, ele deverá ser considerado antes de se optar pelas muitas horas necessárias para desenvolver um programa confiável e eficiente. Além disso, pode-se adquirir os dados necessários para uma análise em particular baseada em um software, e então voltar para a linguagem e definir o formato de saída. De muitas maneiras, os dois métodos se completam. Se dependermos da análise computacional continuamente, o conhecimento do uso e limite de ambos, linguagem e software, torna-se uma necessidade. A escolha de qual linguagem ou software a serem utilizados é antes de tudo uma função do tipo de aplicação. Felizmente, entretanto, um conhecimento fluente de uma linguagem ou um pacote aplicativo em particular geralmente ajudará o usuário a adaptar-se a outras linguagens e softwares. Os objetivos e procedimentos são semelhantes, facilitando a transição de um método para outro.

Em cada capítulo será feito algum comentário a respeito da análise por computador. Em alguns casos, um programa BASIC e uma aplicação do PSpice aparecerão, enquanto que, em outras situações, somente um dos dois será utilizado. À medida que forem necessários maiores detalhes, um *background* suficiente será fornecido para permitir, no mínimo, um entendimento superficial da análise.

PSpice (Versão DOS)

Este capítulo lida especificamente com as características do diodo semicondutor. No Cap. 2 o diodo é investigado utilizando-se o aplicativo PSpice. Como um primeiro passo em direção a esta análise, o “modelo” para o diodo semicondutor será agora introduzido. A descrição do diodo no manual do PSpice exige um total de 14 parâmetros para definir suas características. Ela inclui a corrente de saturação, resistência em série, capacitância de terminal, tensão de ruptura reversa, corrente de ruptura reversa e vários outros fatores que podem ser especificados, se necessário, para o esboço ou análise a serem realizados.

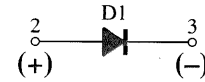


Fig. 1.62 Denominações do PSpice para a entrada do diodo no programa, na análise de um circuito.

A especificação de um diodo em um circuito apresenta duas componentes. A primeira determina a localização e o nome do modelo, e a outra inclui os parâmetros referidos acima. O formato para definir a localização e o nome do modelo do diodo, para o diodo da Fig. 1.62 é o seguinte:

<u>D1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>D1</u>
nome	nó	nó	nome do modelo

Observe que um diodo é especificado pela letra maiúscula D no começo da linha, seguido pelo rótulo aplicado ao diodo no esquema. A seqüência de nós (pontos de conexão para o diodo) define o potencial em cada nó e a direção de condução do diodo da Fig. 1.62. Em outras palavras, a condução é do nó positivo para o nó negativo. O *nome do modelo* é o nome atribuído à descrição do parâmetro a seguir. O mesmo nome pode ser aplicado a outros diodos no circuito, tais como D2, D3, e assim por diante.

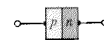
Os parâmetros são especificados usando-se uma *expressão MODEL*, que apresenta o seguinte formato para o diodo:

.MODEL	<u>D1</u>	D(<u>IS = 2E-15</u>)
modelo	nome do modelo	especificações do parâmetro

A especificação começa com a entrada, .MODEL, seguida pelo nome do modelo, como mostrado na descrição da localização, e a letra maiúscula D para indicar que se trata de um diodo. As especificações do parâmetro aparecem dentro de parênteses e devem usar a notação recomendada pelo manual do PSpice. A corrente de saturação reversa é listada como IS e tem o valor de 2×10^{-15} A. Este valor foi escolhido porque resulta em uma tensão de diodo em torno de 0,7 V, para níveis de corrente de diodo tipicamente encontrados nas aplicações discutidas do Cap. 2. Desta maneira, o computador e a análise feita a mão apresentarão resultados relativamente próximos. Embora só um parâmetro tenha sido especificado na listagem acima, a lista pode incluir todos os 10 mencionados no manual. Para todas as declarações introduzidas acima, é muito importante seguir o formato como foi mostrado. A ausência de um ponto antes de MODEL, ou a ausência da letra D na mesma linha, invalidará completamente a entrada.

PSpice para Windows

Quando se utiliza a versão do PSpice para Windows, o usuário desenha o esquema do circuito na tela, em vez de defini-lo linha por linha usando nós de referência. Uma fonte para cada elemento deve, portanto, estar disponível para permitir colocá-los na tela. Primeiro, deve-se criar uma tela **esquemática** (segundo um procedimento que o usuário deve conhecer), na qual seleciona-se a opção **Draw** a partir da barra de menu. Uma vez selecionada, aparecerá uma lista de opções onde se escolhe **Get New Part**.



Uma caixa de diálogo aparecerá; selecione **Browse** que resultará na caixa de diálogo **Get Part**. Escolha a biblioteca **eval.slb** a partir da lista de bibliotecas, e então role a lista **Part** até achar **DIN4148**. Quando clicado, **Description** revelará que se trata de um diodo. Clique **OK** e o símbolo do diodo irá aparecer na tela esquemática. Depois de mover o diodo para a posição desejada, um clique adicional irá fixar o diodo e adicionar as designações **D1** e **DIN4148**. Clicando-se o botão direito do mouse, completamos a seqüência de entrada do diodo. Se os parâmetros do diodo tiverem que ser modificados, basta clicar uma vez (e somente uma) no símbolo do diodo e então clicar na opção **Edit** da barra de menu. Selecione **Model** e depois **Edit Instance Model** (uma vez que desejamos ajustar parâmetros apenas para uma única aplicação), aparecendo então a caixa de diálogo **Model Editor** com os parâmetros do diodo. Na caixa de diálogo podem ser feitas alterações no modelo do diodo para a aplicação corrente. Sem a tela para visualizar, pode ser um tanto difícil acompanhar e compreender o procedimento descrito acima. O melhor seria estabelecer o modelo a ser analisado, montar a tela e realizar as operações na ordem indicada. Será apresentado no próximo capítulo um circuito real, que nos auxiliará no processo de revisão.

PROBLEMAS

§ 1.2 Diodo Ideal

1. Descreva com suas próprias palavras o significado da palavra *ideal* aplicada a um dispositivo ou sistema.
2. Descreva com suas próprias palavras as características do diodo *ideal* e como elas determinam os estados ligado e desligado do dispositivo. Isto é, descreva por que o curto-circuito e circuito-aberto equivalente são adequados.
3. Qual é a diferença importante entre as características de uma chave simples e as de um diodo ideal?

§ 1.3 Materiais Semicondutores

4. Com suas palavras, defina *semicondutor*, *resistividade*, *resistência bulk* e *resistência ôhmica de contato*.
5. (a) Usando o Quadro 1.1, determine a resistência de uma amostra de silício apresentando uma área de 1 cm^2 e um comprimento de 3 cm .
(b) Repita a letra (a) se o comprimento for de 1 cm e a área 4 cm^2 .
(c) Repita a letra (a) se o comprimento for de 8 cm e a área $0,5 \text{ cm}^2$.
(d) Repita a letra (a) para o cobre e compare os resultados.
6. Esboce a estrutura atômica do cobre e discuta por que ele é um bom condutor e de que forma sua estrutura é diferente da do germânio e do silício.
7. Defina, com suas palavras, um material intrínseco, um coeficiente de temperatura negativo e ligação covalente.
8. Pesquise e liste três materiais que apresentem um coeficiente de temperatura negativo e três que possuam um coeficiente de temperatura positivo.

§ 1.4 Níveis de Energia

9. Qual é a energia em joules necessária para mover uma curva de 6 C através de uma diferença de potencial de 3 V ?
10. Se 48 eV de energia é necessário para mover uma carga através de uma diferença de potencial de 12 V , determine a carga envolvida.
11. Pesquise e determine o nível de E_g para GaP e ZnS, dois materiais semicondutores utilizados na prática. Além disso, determine o nome de cada material.

§ 1.5 Materiais Extrínsecos — Tipos *n* e *p*

12. Descreva a diferença entre os materiais semicondutores tipo *n* e tipo *p*.
13. Descreva a diferença entre as impurezas doadoras e aceitadoras.
14. Descreva a diferença entre portadores majoritário e minoritário.
15. Esboce a estrutura atômica do silício e insira uma impureza composta de arsênio, como demonstrado para o silício na Fig. 1.9.
16. Repita o Problema 15, mas insira agora uma impureza composta de índio.
17. Pesquise e encontre uma outra explicação para o fluxo de lacuna *versus* elétron. Usando ambas as descrições, apresente com suas palavras o processo da condução de buraco.

§ 1.6 Diodo Semicondutor

18. Descreva com suas palavras as condições estabelecidas pelas situações de polarização direta e reversa em um diodo de junção *p-n*, e como afetam a corrente resultante.
19. Descreva o que você sabe dos estados de polarização direta e reversa do diodo de junção *p-n*. Isto é, tente lembrar-se de qual potencial (positivo ou negativo) é aplicado a um determinado terminal.
20. Usando a Eq. (1.4), determine a corrente de diodo a 20°C para um diodo de silício com $I_s = 50 \text{ nA}$ e uma polarização direta aplicada de $0,6 \text{ V}$.
21. Repita o Problema 20 para $T = 100^\circ\text{C}$ (ponto de ebulição da água). Assuma que I_s aumentou para $5,0 \mu\text{A}$.
22. (a) Usando a Eq. (1.4), determine a corrente de diodo a 20°C para um diodo de silício com $I_s = 0,1 \mu\text{A}$ em um potencial de polarização reversa de -10 V .
(b) O resultado é esperado? Por quê?
23. (a) Trace a função $y = e^x$, com x de 0 a 5 .
(b) Qual é o valor de $y = e^x$ em $x = 0$?
(c) Baseado nos resultados da letra (b), por que o fator -1 é importante na Eq. (1.4)?
24. Na região de polarização reversa, a corrente de saturação de um diodo de silício gira em torno de $0,1 \mu\text{A}$ ($T = 20^\circ\text{C}$). Determine seu valor aproximado se a temperatura for aumentada para 40°C .
25. Compare as características de um diodo de silício e de germânio, e determine qual você prefere para a maioria das aplicações práticas. Forneça detalhes. Consulte uma lista do fabricante, e compare as características de um diodo de germânio e de silício e que apresentem especificações semelhantes.
26. Determine a queda de tensão direta através do diodo cujas características aparecem na Fig. 1.24, em temperaturas de -75°C , 25°C , 100°C e 200°C , e uma corrente de 10 mA . Para cada temperatura, determine o nível da corrente de saturação. Compare as situações extremas, e comente baseado na razão dos resultados obtidos para as duas situações.

§ 1.7 Níveis de Resistência

27. Determine a resistência estática ou dc do diodo da Fig. 1.19 para uma corrente direta de 2 mA .
28. Repita o Problema 26 para uma corrente direta de 15 mA e compare os resultados.
29. Determine a resistência estática ou dc do diodo da Fig. 1.19 para uma tensão reversa de -10 V . Seu valor é próximo ao resultado determinado para uma tensão reversa de -30 V ?
30. (a) Determine a resistência dinâmica (ac) do diodo da Fig. 1.29 para uma corrente direta de 10 mA , usando a Eq. (1.6).
(b) Determine a resistência dinâmica (ac) do diodo da Fig. 1.29 para uma corrente direta de 10 mA , usando a Eq. (1.7).
(c) Compare as soluções das letras (a) e (b).
31. Calcule a resistência dc e ac para o diodo da Fig. 1.29 em uma corrente de 10 mA , e compare os resultados.
32. Usando a Eq. (1.6), determine a resistência ac para as correntes de 1 mA e 15 mA , do diodo da Fig. 1.29. Compare as soluções e de-

envolva uma conclusão geral que relacione a resistência ac e os níveis crescentes de corrente de diodo.

33. Usando a Eq. (1.7), determine a resistência ac para as correntes 1 mA e 15 mA, do diodo da Fig. 1.19. Modifique a equação, se necessário, para níveis reduzidos da corrente de diodo. Compare com os resultados obtidos no Problema 32.
34. Determine a resistência ac média para o diodo da Fig. 1.19, para a região entre 0,6 e 0,9 V.
35. Determine a resistência ac para o diodo da Fig. 1.19 em 0,75 V e compare com a resistência ac média obtida no Problema 34.

§ 1.8 Circuitos Equivalentes de Diodo

36. Encontre o circuito equivalente linear para o diodo da Fig. 1.19. Use um segmento de reta que intercepte o eixo horizontal em 0,7 V, e que melhor aproxime a curva para a região acima de 0,7 V.
37. Repita o Problema 36 para o diodo da Fig. 1.29.

§ 1.9 Folhas de Especificação do Diodo

- *38. Trace I_f versus V_r usando escalas lineares para o diodo Fairchild da Fig. 1.36. Observe que o gráfico apresentado emprega log para o eixo vertical (escalas log são abordadas nas Seções 11.2 e 11.3).
39. Comente sobre a variação no nível de capacitância com aumento no potencial de polarização reverso para o diodo BAY73.
40. A corrente de saturação reversa do diodo BAY73 varia significativamente em amplitude para potenciais de polarização reversos na faixa de -25 V a -100 V?
- *41. Para o diodo da Fig. 1.36, determine o nível de I_r à temperatura ambiente (25°C) e para o ponto de ebulição da água (100°C). A mudança é significativa? O nível quase dobra para cada 10°C de aumento na temperatura?
42. Para o diodo da Fig. 1.36, determine a resistência ac (dinâmica) máxima para uma corrente direta de 0,1 mA, 1,5 mA e 20 mA. Compare os níveis e comente se os resultados confirmam as conclusões obtidas nas seções anteriores deste capítulo.
43. Usando as características apresentadas na Fig. 1.36, determine os níveis de dissipação de potência máxima para o diodo à temperatura ambiente (25°C) e a 100°C . Assumindo que V_f permanece fixo em 0,7 V, como o valor máximo de I_f variou entre os dois níveis de temperatura?
44. Usando as curvas características apresentadas na Fig. 1.36, determine a temperatura na qual a corrente de diodo terá 50% do seu valor à temperatura ambiente (25°C).

§ 1.10 Capacitância de Transição e Difusão

- *45. (a) Referindo-se à Fig. 1.37, determine a capacitância de transição para potências de polarização reversas de -25 V e -10 V. Determine a razão entre a variação do valor de capacitância e a variação na tensão.
- (b) Repita a letra (a) para potências de polarização reversas de -10 V e -1 V. Determine a razão entre a variação do valor da capacitância e a variação no valor da tensão.
- (c) Compare as razões determinadas nas letras (a) e (b). Baseado nisso, conclua qual faixa de operação permite maior aplicação na prática?
46. Referindo-se à Fig. 1.37, determine a capacitância de difusão para 0 V e 0,25 V.
47. Descreva com suas próprias palavras qual a diferença entre as capacitâncias de difusão e transição.
48. Determine a reatância apresentada por um diodo, descrito pela curva característica da Fig. 1.37, para um potencial direto de 0,2 V e para um potencial reverso de -20 V, se a frequência aplicada for de 6 MHz.

§ 1.11 Tempo de Reestabelecimento Reverso

49. Esboce a forma de onda para a corrente i do circuito da Fig. 1.63 se $t_1 = 2t_2$ e o tempo de reestabelecimento reverso total é de 9 ns.

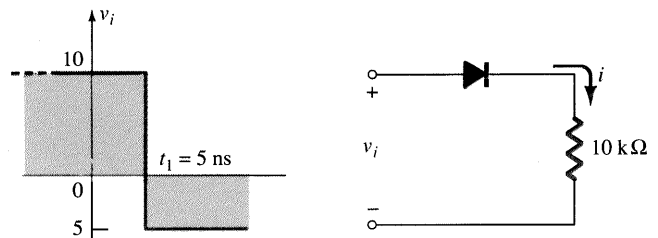


Fig. 1.63 Problema 49.

§ 1.14 Diodos Zener

50. As seguintes características são especificadas para um diodo Zener em particular: $V_z = 29$ V, $V_r = 16,8$ V, $I_{zr} = 10$ mA, $I_r = 20$ μA e $I_{zm} = 40$ mA. Esboce a curva característica da maneira exposta na Fig. 1.50.
- *51. Em que temperatura o diodo Zener Fairchild 1N961 10-V apresentará uma tensão nominal de 10,75 V? (Sugestão: Observe o dado no Quadro 1.4.)
52. Determine o coeficiente de temperatura de um diodo Zener de 5 V (estimado em 25°C), se a tensão nominal cai para 4,8 V em uma temperatura de 100°C .
53. Usando as curvas da Fig. 1.51a, que valor para o coeficiente de temperatura você esperaria para um diodo de 20 V? Repita para um diodo de 5 V. Assuma uma escala linear entre os níveis de tensão nominal e um nível de corrente de 0,1 mA.
54. Determine a impedância dinâmica para o diodo de 24 V com $I_z = 10$ mA da Fig. 1.51b. Observe que é uma escala log.
- *55. Compare os níveis de impedância dinâmica para o diodo 24 V da Fig. 1.51b com os níveis de corrente de 0,2 mA, 1 mA e 10 mA. Como os resultados influem no aspecto da curva característica nesta região?

§ 1.15 Diodos Emissores de Luz

56. Referindo-se à Fig. 1.55e, o que parece ser um valor apropriado de V_f para este dispositivo? Compare ao valor obtido de V_f para o silício e germânio.
57. Usando a informação fornecida na Fig. 1.55, determine a tensão direta através do diodo se a intensidade luminosa relativa for de 1,5.
- *58. (a) Qual é o aumento percentual na eficiência relativa do dispositivo da Fig. 1.55, se a corrente de pico for aumentada de 5 para 10 mA?
- (b) Repita a letra (a) quando varia de 30 para 35 mA (o mesmo aumento na corrente).
- (c) Compare o aumento percentual das letras (a) e (b). Em que ponto da curva você apontaria um pequeno ganho devido a um aumento na corrente de pico?
- *59. (a) Referindo-se à Fig. 1.55h, determine a corrente de pico máxima tolerável se o período de duração do pulso for de 1 ms, a frequência de 300 Hz e a corrente dc máxima tolerável de 20 mA.
- (b) Repita a letra (a) para uma frequência de 100 Hz.
60. (a) Se a intensidade luminosa em um deslocamento angular de 0° for de 3,0 mcd para o dispositivo da Fig. 1.55, em que ângulo será 0,75 mcd?
- (b) Para que ângulo a redução da intensidade luminosa é maior do que 50%?
- *61. Esboce a curva de redução de corrente para a corrente direta média do LED vermelho de alta eficiência da Fig. 1.55 versus a temperatura. (Observe os valores máximos absolutos.)