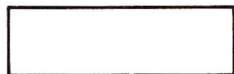


Teoria dos Diodos



O capítulo começa discutindo a teoria do semicondutor. O tratamento é simples, às vezes idealizado; caso contrário, cairíamos numa física e matemática altamente avançadas. A parte intermediária do capítulo refere-se a junções pn , a idéia chave que se esconde atrás de um diodo semicondutor. A palavra “diodo” é formada pela elisão de duas palavras “dois eletrodos”, onde o “di” refere-se a dois e “odo” vem de eletrodo. Esta discussão explica como um diodo funciona e o prepara para o transistor, que combina dois diodos num único componente. O capítulo termina com aproximações para o diodo. Estas aproximações simplificam a verificação de defeitos, a análise e o projeto de circuitos contendo diodos.

2-1 TEORIA DO SEMICONDUTOR

Você já sabe alguma coisa sobre átomos, elétrons e prótons. Esta seção ampliará o seu conhecimento. Você verá como os átomos de silício se combinam para formar cristais (o esqueleto dos dispositivos semicondutores).

ESTRUTURA ATÔMICA

Bohr imaginou um modelo para o átomo. Ele o visualizou como um núcleo rodeado por elétrons em órbita (Fig. 2-1a). O núcleo possui uma carga positiva que atrai os elétrons. Os elétrons cairiam dentro do núcleo se não existisse a força centrífuga do seu movimento. Quando um elétron descreve uma órbita estável, ele tem exatamente a velocidade certa para que a força centrífuga equilibre a atração nuclear.

Figuras tridimensionais como a Fig. 2-1a são muito difíceis de se desenhar para representar átomos complicados. Por causa disso, representaremos o átomo em duas dimensões. Por exemplo, um átomo isolado de silício (Fig. 2-1b) possui 14 prótons no núcleo. Dois elétrons percorrem a

primeira órbita, oito elétrons a segunda órbita e quatro deles encontram-se na órbita externa ou na órbita de *valência*. Os 14 elétrons em rotação neutralizam a carga dos 14 prótons de modo que a uma certa distância o átomo age como se fosse eletricamente neutro.

Realmente importante é o fato da órbita externa conter quatro elétrons. Por essa razão, o silício é chamado *tetravalente* (“tetra” em grego quer dizer “quatro”). Conseqüentemente, o núcleo e os elétrons internos são considerados a estrutura interna do átomo. Dentro dele, nada de interessante acontece. Nossa preocupação situa-se quase sempre na órbita de valência; é aí que se desenvolve toda a ação nos semicondutores.

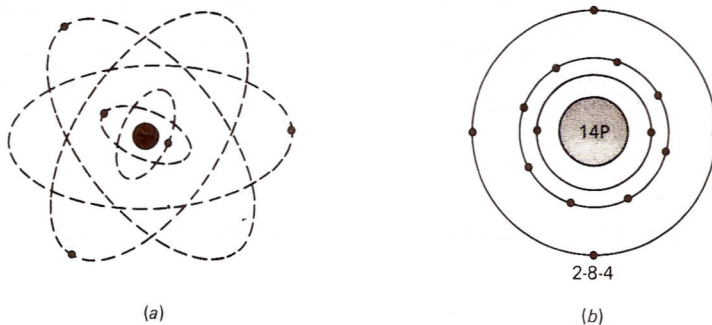


Fig. 2-1 (a) Modelo de Bohr. (b) Átomo de silício.

NÍVEIS DE ENERGIA

Você precisa imaginar que um elétron pode percorrer uma órbita de qualquer raio, desde que sua velocidade tenha o valor certo. Por outro lado a Física Moderna afirma que somente certas dimensões de órbitas são permitidas.

Por exemplo, na Fig. 2-2a, os elétrons podem se encontrar na primeira, na segunda e na terceira órbitas, mas não podem ser encontrados em órbitas intermediárias. Isto significa que todos os raios entre r_1 e r_2 são proibidos; analogamente, todos os raios entre r_2 e r_3 são proibidos. (Se você quiser saber por que, terá que estudar Mecânica Quântica.)

Na Fig. 2-2a é necessário energia para deslocar um elétron de uma órbita menor para outra maior, pois é necessário realizar trabalho para vencer a atração do núcleo. Portanto, quanto maior a órbita de um elétron, mais alto seu nível de energia ou sua energia potencial com relação ao núcleo.

Por conveniência de representação, substituiu-se as órbitas curvas por linhas horizontais como aparece na Fig. 2-2b. A primeira órbita representa o primeiro nível de energia, a segunda órbita representa o segundo nível de energia, e assim por diante. Quanto mais alto o nível de energia, maior a órbita do elétron. Em outras palavras, o nível de energia é um sinônimo de raio orbital.

Se o átomo for bombardeado com energia externa como calor, luz, ou outra radiação, pode haver um acúmulo dessa energia num dos elétrons e ele é, então, elevado a um nível de energia

mais alto (órbita maior). Diz-se, entretanto, que o átomo está num estado de *excitação*. Este estado não dura muito porque o elétron energizado logo volta ao seu nível de energia original. Quando ele cai, devolve a energia adquirida na forma de calor, luz ou outra radiação.

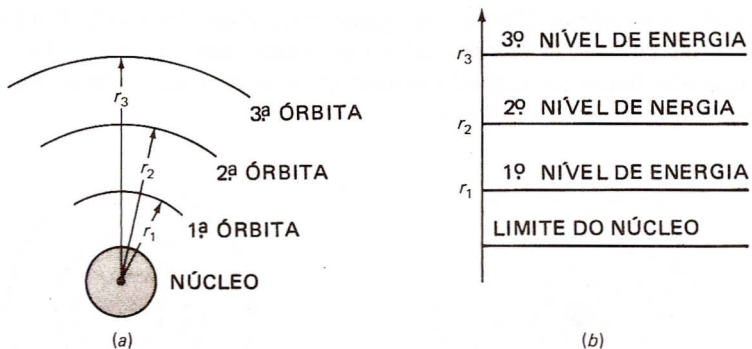


Fig. 2-2 (a) Vista ampliada de um átomo. (b) Níveis de energia.

CRISTAIS

Um átomo de silício isolado possui quatro elétrons na sua órbita de valência; porém para ser quimicamente estável, precisa de oito elétrons nesta órbita. Poderá, por isso, combinar-se com outros átomos, de forma a completar os oito elétrons da sua órbita de valência.

Quando os átomos de silício combinam-se para formar um sólido, eles se arranjam numa configuração ordenada chamada *crystal*. As forças que mantêm os átomos unidos são conhecidas como *ligações covalentes*. A Fig. 2-3a ilustra essa idéia. O átomo de silício posiciona-se entre outros quatro átomos de silício. Cada vizinho compartilha então um elétron com o átomo central. Dessa forma, o átomo central apanha quatro elétrons, o que lhe dá um total de oito elétrons na órbita de valência.

Os oito elétrons não pertencem exclusivamente ao átomo central; eles são compartilhados pelos quatro átomos de volta. Como as estruturas internas adjacentes possuem carga positiva líquida, eles atraem os elétrons em comum, criando forças iguais e opostas. Essa atração mútua em sentidos opostos é a *ligação covalente*, a cola que mantém os átomos unidos. (A situação é análoga aos grupos de crianças que brincam de cabo-de-guerra segurando nas extremidades de uma corda. Enquanto os grupos puxarem com forças iguais e opostas permanecerão imóveis e presos um ao outro.)

LACUNAS

Quando a energia externa eleva um elétron de valência para um nível mais alto (órbita maior), o elétron que sai deixa um vazio na órbita mais externa (veja a Fig. 2-3b). Chamamos esse vazio *lacuna*. Estas lacunas constituem uma das razões que fazem os diodos e os transistores trabalhar da forma como o fazem. As seções mais adiante lhe dirão mais a respeito das lacunas.

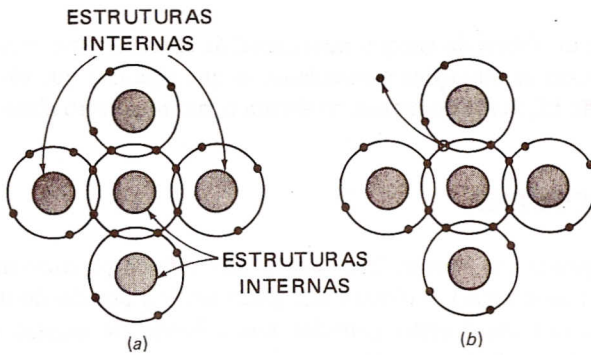


Fig. 2-3 (a) *Ligações covalentes.* (b) *Lacuna.*

BANDAS DE ENERGIA

Quando um átomo de silício estiver isolado, a órbita de um elétron é controlada pelas cargas do átomo isolado. Porém quando os átomos de silício combinam-se formando um cristal, a órbita de um elétron sofre a influência das cargas de vários átomos adjacentes. Como cada elétron tem uma posição diferente dentro do cristal, nenhum vê exatamente a mesma configuração de cargas vizinhas. Por isso, a órbita de cada elétron é diferente.

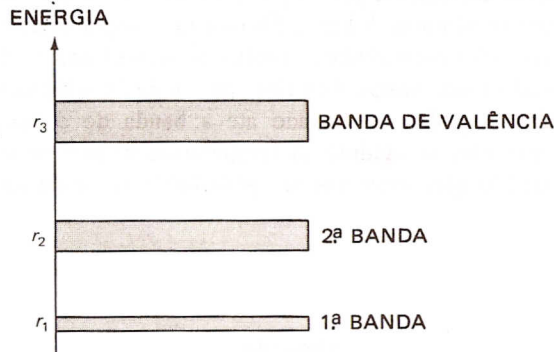


Fig. 2-4 *Bandas de energia.*

A Fig. 2-4 mostra o que ocorre aos níveis de energia. Todos os elétrons que se encontram nas primeiras órbitas têm níveis de energia ligeiramente diferentes, porque nenhum vê exatamente a mesma carga envolvente. Como há bilhões de elétrons na primeira órbita, os níveis de energia ligeiramente diferentes formam uma nuvem ou uma banda. Analogamente, os bilhões de elétrons da segunda órbita, todos com energias ligeiramente diferentes, formam a segunda banda de energia, e todos os elétrons da terceira órbita a terceira banda.

Na Fig. 2-4 as bandas de energia são escuras. Esta será a nossa forma de representar bandas saturadas ou preenchidas, isto é, aquelas nas quais todas as órbitas disponíveis já estão ocupadas por elétrons. Por exemplo, a banda de valência está preenchida porque a órbita de valência de cada átomo possui oito elétrons.

A Fig. 2-4 mostra as faixas de energia num cristal de silício à temperatura de zero absoluto (-273°C); é aí que cessam as vibrações moleculares, o que significa que ele está na mais baixa temperatura possível. Não há, definitivamente, nenhuma corrente no zero absoluto.

2-2 CONDUÇÃO EM CRISTAIS

Cada átomo de cobre possui um elétron livre. Como este elétron percorre uma órbita extremamente grande (alto nível de energia), o elétron mal pode sentir a atração do núcleo. Num pedaço de fio de cobre os elétrons livres estão contidos numa banda de energia chamada *banda de condução*. Estes elétrons livres são capazes de produzir correntes altas.

Um pedaço de silício já é diferente. A Fig. 2-5a mostra uma barra de silício com extremidades metálicas. Uma tensão externa estabelece um campo elétrico entre as extremidades do cristal. Há passagem de corrente? Depende. De quê? Da existência de elétrons que possam deslocar-se dentro do cristal.

ZERO ABSOLUTO

Em temperaturas de zero absoluto, os elétrons não podem se mover dentro do cristal. Todos os elétrons de valência estão fortemente presos pelos átomos de silício porque eles fazem parte das ligações covalentes entre os átomos. A Fig. 2-5b mostra o diagrama de bandas de energia. Quando as três primeiras bandas estão preenchidas, os elétrons dessas bandas não podem deslocar-se com facilidade porque não há órbitas vazias. Mas além da banda de valência está a banda de condução. Se um elétron de valência puder ser elevado até a banda de condução, ele estará livre para deslocar-se de um átomo para o seguinte. À temperatura de zero absoluto, entretanto, a banda de condução está vazia; isto quer dizer que não pode haver nenhuma corrente no cristal de silício.

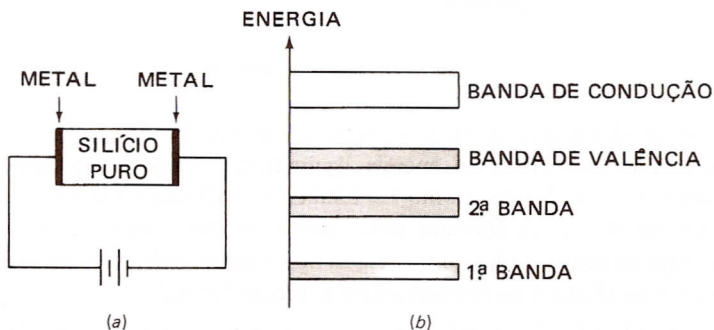


Fig. 2-5 (a) Circuito. (b) Banda de energia à temperatura de zero absoluto.

ACIMA DO ZERO ABSOLUTO

Aumente a temperatura acima do zero absoluto e as coisas mudarão. A energia térmica recebida quebra algumas ligações covalentes; isto é, ela desloca alguns elétrons de valência para a banda de condução. Desta forma, podemos conseguir um número limitado de elétrons de banda de condução, simbolizados pelos sinais menos da Fig. 2-6a. Sob a ação do campo elétrico, estes elétrons livres movem-se para a esquerda e estabelecem uma corrente.

Acima do zero absoluto, visualizamos as bandas de energia como a representação da Fig. 2-6b. A energia térmica elevou alguns elétrons até a banda de condução, onde percorrem órbitas muito grandes. Nestas órbitas de banda de condução, os elétrons estão fracamente presos pelos átomos e podem deslocar-se facilmente de um átomo para o seguinte.

Na Fig. 2-6b, cada vez que um elétron é bombeado para a banda de condução, cria-se uma lacuna na banda de valência. Portanto, a banda de valência já não está mais saturada ou preenchida; cada lacuna na banda de valência representa uma órbita de rotação disponível.

Quanto mais alta a temperatura, maior o número de elétrons de valência empurrados para a banda de condução e maior a corrente na Fig. 2-6a. À temperatura ambiente (cerca de 25°C), a corrente é pequena demais para ser utilizável. A esta temperatura, um pedaço de silício não é nem bom isolante nem bom condutor. Por esta razão, é chamado *semicondutor*.

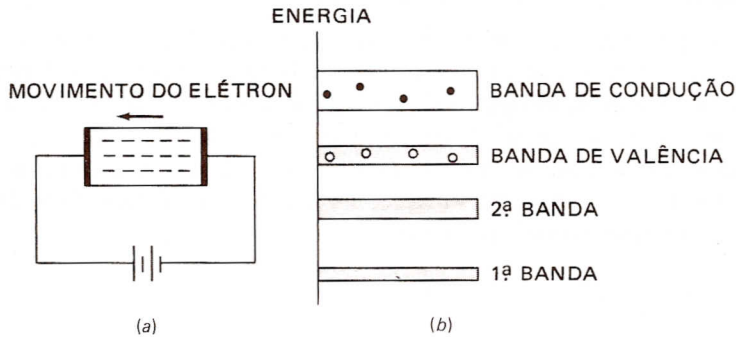


Fig. 2-6 (a) Fluxo de elétron. (b) Bandas de energia à temperatura ambiente.

SILÍCIO VERSUS GERMÂNIO

O germânio, um outro elemento tetravalente, foi amplamente usado no início do estudo dos semicondutores. Atualmente, porém, é raramente usado em projetos novos. À temperatura ambiente um cristal de silício não tem praticamente elétrons livres se comparado ao cristal de germânio. Esta é a razão principal que fez o silício tornar-se totalmente superior ao germânio na fabricação de diodos, transistores e de outros componentes semicondutores. Em seções posteriores será explicado o porquê desta falta de elétrons livres no silício puro constituir-se numa vantagem enorme.

CORRENTE DE LACUNAS

As lacunas num semiconductor também produzem uma corrente. Isto é o que faz os semicondutores serem sensivelmente diferentes de um fio de cobre. Em outras palavras, um semiconductor oferece dois trajetos para a corrente, um através da banda de condução (órbitas maiores) e outro da banda de valência (órbitas menores). Por analogia, podemos dizer que um fio de cobre assemelha-se a uma estrada com mão única, e um semiconductor se comporta como uma pista de duas mãos.

A corrente da banda de condução num semiconductor é semelhante à corrente no fio de cobre; porém a corrente da banda de valência é bem diferente. Observe a lacuna na extremidade direita da Fig. 2-7a. Esta lacuna atrai o elétron de valência em *A*. Apenas com uma pequena variação na energia, o elétron de valência em *A* pode se deslocar para a lacuna. Quando isto ocorre, a lacuna inicial desaparece e uma nova lacuna aparece no ponto *A*. A nova lacuna em *A* pode atrair e capturar o elétron de valência em *B*. Quando o elétron de valência se desloca de *B* para *A*, a lacuna desloca-se de *A* para *B*. Os elétrons de valência podem continuar a deslocar-se ao longo do trajeto mostrado através das setas; as lacunas deslocam-se no sentido oposto.

O que foi visto até aqui pode ser resumido na forma apresentada a seguir.

Pelo fato de haver lacunas nas órbitas de valência há um segundo percurso ao longo do qual os elétrons podem se deslocar dentro do cristal. (Não aparecem na figura as órbitas muito maiores da banda de condução onde os elétrons livres deslocam-se.)

Aqui está o que ocorre em termos de níveis de energia. Para começar, a energia térmica bombeia um elétron da banda de valência para a banda de condução, como mostra a Fig. 2-7b. Com uma pequena variação na energia, o elétron de valência em *A* pode se deslocar para a lacuna. Quanto isto ocorre a lacuna inicial desaparece e uma nova lacuna aparece em *A*. A seguir o elétron de valência em *B* pode se deslocar para a nova lacuna com uma pequena variação na energia. Desta forma, com pequenas variações na energia, os elétrons de valência podem se deslocar ao longo do trajeto indicado pelas setas.

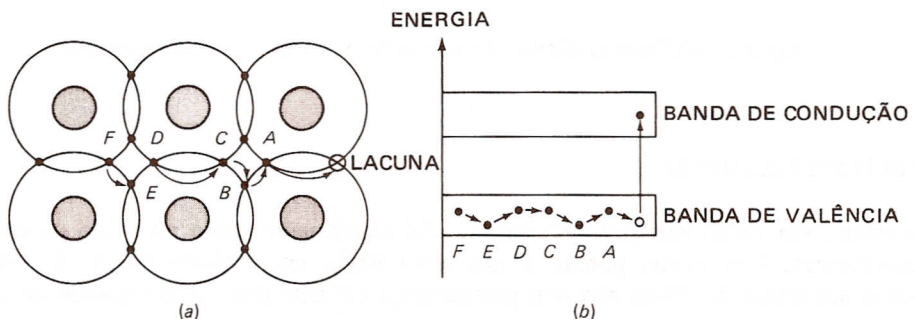


Fig. 2-7 (a) Corrente de lacunas. (b) Diagrama de energia da corrente de lacunas.

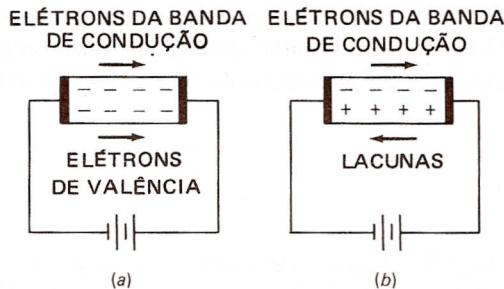


Fig. 2-8 Dois trajetos para a corrente.

Isto equivale a um movimento da lacuna através da banda de valência ao longo do trajeto ABCDEF.

PARES ELÉTRON-LACUNA

A aplicação de uma tensão externa a um cristal força os elétrons a deslocarem-se. Na Fig. 2-8a, existem dois tipos de elétrons móveis, os elétrons da banda de condução e os elétrons da banda de valência. O movimento para a direita dos elétrons de valência indica que as lacunas estão se deslocando para a esquerda.

Muitos engenheiros referem-se ao movimento das lacunas e não ao movimento dos elétrons de valência. Num semiconductor puro, a existência de cada elétron da banda de condução garante a existência de uma lacuna na órbita de valência de algum átomo. Em outras palavras, a energia térmica produz pares elétron-lacuna. As lacunas agem como se fossem cargas positivas e por esta razão são indicadas com o sinal mais na Fig. 2-8b. (Um fenômeno conhecido como o efeito Hall confirma o comportamento das lacunas como cargas positivas.) Como foi feito anteriormente, imaginamos os elétrons da banda de condução deslocando-se para a direita. Mas agora, visualizamos as lacunas (cargas positivas) deslocando-se para a esquerda.

RECOMBINAÇÃO

Na Fig. 2-8b, cada sinal menos representa um elétron da banda de condução numa órbita maior, e cada sinal mais representa uma lacuna numa órbita menor. Ocasionalmente, a órbita da banda de condução de um átomo pode interceptar a órbita da lacuna de outro. Por isso é que é tão freqüente um elétron da banda de condução passar para uma lacuna. Este desaparecimento de um elétron livre e de uma lacuna é chamado *recombinação*. Quando ocorre a recombinação, a lacuna não se desloca mais para lugar algum, ela desaparece.

A recombinação está constantemente acontecendo num semiconductor. Isto poderia eventualmente preencher todas as lacunas e estas só não são preenchidas porque a energia térmica incidente mantém a produção de novas lacunas elevando os elétrons de valência até a banda de

condução. O tempo médio entre a criação e o desaparecimento de um par elétron-lacuna é chamado *tempo de vida*. O tempo de vida varia de uns poucos nanossegundos até vários microssegundos, dependendo de quão perfeita é a estrutura do cristal e de outros fatores.

2-3 DOPAGEM

Um cristal de silício puro (aquele no qual cada átomo é um átomo de silício) é conhecido como semicondutor *intrínseco*. Para a maioria das aplicações, não há elétrons livres nem causas suficientes num semicondutor intrínseco para produzir uma corrente utilizável. A *dopagem* significa introduzir átomos de impurezas num cristal de modo a aumentar tanto o número de elétrons livres quanto o número de lacunas. Quando um cristal foi dopado, ele passa a ser chamado semicondutor *extrínseco*.

SEMICONDUTOR TIPO-*n*

Para se conseguir mais elétrons na banda de valência a mais, podemos acrescentar átomos pentavalentes; estes átomos têm cinco elétrons na órbita de valência. Depois de acrescentarmos átomos pentavalentes a um cristal de silício puro, ainda teremos uma grande quantidade de átomos de silício. Mas de vez em quando encontramos um átomo pentavalente entre quatro vizinhos, como mostra a Fig. 2-9a. O átomo pentavalente tinha inicialmente cinco elétrons na sua órbita de valência. Depois de formar ligações covalentes com os quatro vizinhos, este átomo central tem um elétron a mais que sobra. Como a órbita de valência não pode conter mais de oito elétrons, o elétron que sobra precisa viajar numa órbita da banda de condução.

A Fig. 2-9b mostra as bandas de energia de um cristal que foi dopado com uma impureza pentavalente. Temos um grande número de elétrons da banda de condução produzido principalmente pela dopagem. Existem apenas algumas lacunas, criadas pela energia térmica. Chamamos os elétrons de portadores *majoritários* e as lacunas de portadores *minoritários*. O silício dopado dessa forma é conhecido como um semicondutor do *tipo-n*, onde o *n* significa negativo.

Para terminar, os átomos pentavalentes são chamados freqüentemente átomos *doadores* porque eles produzem elétrons de banda de condução. Exemplos de impurezas doadoras são o arsênio, o antimônio e o fósforo.

SEMICONDUTOR TIPO-*p*

Como podemos dopar um cristal para obter lacunas adicionais? Usando uma impureza trivalente (uma com três elétrons na órbita mais externa). Depois de adicionarmos a impureza, verificamos que cada átomo trivalente está cercado por quatro vizinhos como mostra a Fig. 2-10a. Como cada átomo trivalente traz com ele somente três elétrons na órbita de valência, apenas sete elétrons se viajarão na sua órbita de valência. Em outras palavras, aparece uma lacuna em cada átomo trivalente. Controlando-se a quantidade de impureza adicionada, pode-se controlar o número de lacunas no cristal dopado.

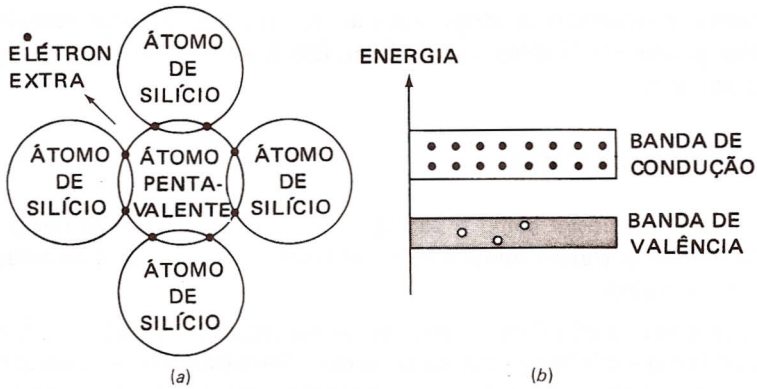


Fig. 2-9 Dopagem com impureza doadora.

Um semiconductor dopado com uma impureza trivalente é conhecido como um semiconductor do tipo-*p*; a letra *p* significa positivo. Como mostra a Fig. 2-10b, as lacunas de um semiconductor tipo-*p* excedem de longe os elétrons da banda de condução. Por esta razão, as lacunas são os portadores majoritários num semiconductor tipo-*p*, enquanto os elétrons de banda de condução constituem os portadores minoritários.

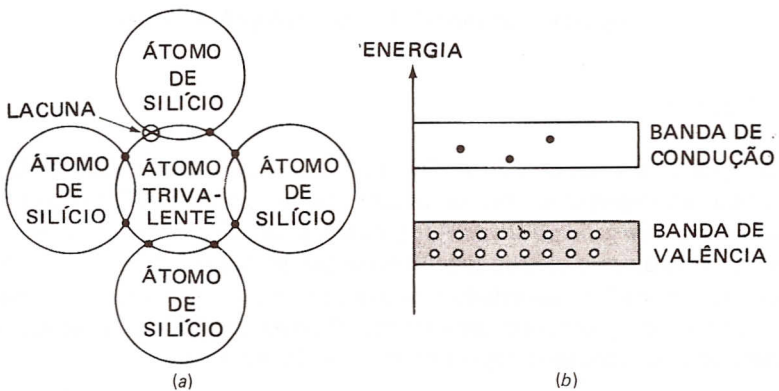


Fig. 2-10 Dopagem com impureza aceitadora.

Os átomos trivalentes também são conhecidos como átomos *aceitadores* porque cada lacuna que eles fornecem pode aceitar um elétron durante a recombinação. Exemplos de impurezas aceitadoras são o alumínio, o boro e o gálio.

RESISTÊNCIA DE CORPO

Um semiconductor dopado ainda possui resistência. Chamamos a esta resistência *resistência de corpo*. Um semiconductor levemente dopado possui uma resistência de corpo alta. À medida que

a dopagem aumenta, a resistência de corpo diminui. A resistência de corpo também é chamada resistência *ôhmica* porque ela obedece à lei de Ohm; isto é, a tensão através dela é proporcional à corrente que a percorre.

2-4 O DIODO NÃO POLARIZADO

É possível se produzir um cristal como o da Fig. 2-11a, isto é, metade do tipo-*p* e metade do tipo-*n*. A junção é onde as regiões tipo-*p* e tipo-*n* se encontram. Um cristal *pn* como este é comumente conhecido como *diodo*.

A Fig. 2-11a mostra o cristal *pn* no instante de sua formação. O lado *p* tem várias lacunas (portadores majoritários) e o lado *n* possui vários elétrons livres (também portadores majoritários). O diodo da Fig. 2-11a é não polarizado, o que quer dizer que não há nenhuma tensão externa aplicada a ele.

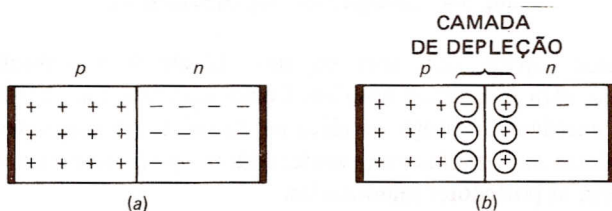


Fig. 2-11 (a) Antes da difusão. (b) Depois da difusão.

CAMADA DE DEPLEÇÃO

Devido a sua repulsão mútua, os elétrons livres no lado *n* difundem-se ou espalham-se em todas as direções; alguns difundem-se através da junção. Quando um elétron livre sai da região *n*, a sua saída cria um átomo carregado positivamente (um íon positivo) na região *n*. Além disso, à medida que ele penetra na região *p*, o elétron livre torna-se um portador minoritário. Com tantas lacunas em volta dele, este portador minoritário tem um curto tempo de vida; logo depois de entrar na região *p*, o elétron livre preencherá uma lacuna. Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).

Cada vez que um elétron difunde-se através da junção, ele cria um par de íons. A Fig. 2-11b mostra estes íons de cada lado da junção. Os círculos com sinal mais são os íons positivos, e os círculos com sinal menos são os íons negativos. Os íons estão fixos na estrutura do cristal por causa da ligação covalente e não podem se deslocar livremente como os elétrons livres e as lacunas. À medida que o número de íons aumenta, a região próxima à junção está totalmente deplecionada de elétrons livres e lacunas. Chamamos a esta região *camada de depleção*.

BARREIRA DE POTENCIAL

Além de um certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira impedindo a continuação da difusão de elétrons livres através da junção. Por exemplo, imagine um elétron livre na região *n* difundindo para a esquerda para o interior da camada de depleção (veja a Fig. 2-11b). Aqui

ele encontra uma parede negativa de íons que o repele de volta para a direita. Se o elétron livre tiver energia suficiente, ele pode romper a parede e penetrar na região p , onde encontra uma lacuna e cria um outro íon negativo.

A intensidade da camada de depleção continua aumentando com cada elétron que a atravessa até que se atinja um equilíbrio. Neste ponto a repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres através da junção.

A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada *barreira de potencial*. A 25°C, esta barreira de potencial é aproximadamente igual a 0,7 V para os diodos de silício. (O diodo de germânio tem uma barreira de potencial de 0,3 V.)

2-5 POLARIZAÇÃO DIRETA

A Fig. 2-12a mostra uma fonte cc aplicada através de um diodo. O terminal positivo da fonte está ligado ao material tipo- p , e o terminal negativo ao material tipo- n . Chamamos uma ligação desse tipo de *polarização direta*. Como um recurso de memória, observe que o + é ligado ao lado p e o - ao lado n .

CORRENTE DIRETA ALTA

A polarização direta pode produzir uma alta corrente direta. Por quê? O terminal negativo da fonte repele os elétrons livres da região n em direção à junção. Estes elétrons com energia adicional podem atravessar a junção e encontrar as lacunas. A recombinação ocorre em distâncias variáveis a partir da junção, dependendo de até onde um elétron livre pode evitar encontrar uma lacuna. As chances de que a recombinação ocorra perto da junção são altas.

À medida que os elétrons encontram as lacunas, eles se tornam elétrons de valência. Então, caminhando como elétrons de valência, continuam a se deslocar para a esquerda através das lacunas no material p . Quando os elétrons de valência atingem a extremidade esquerda do cristal, eles abandonam o cristal e escoam para o terminal positivo da fonte.

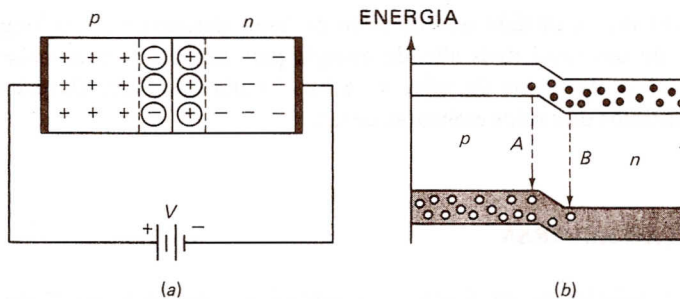


Fig. 2-12 (a) Polarização direta. (b) Bandas.

Aqui está a história da vida de um único elétron na Fig. 2-12a à medida que ele se desloca do terminal negativo da bateria para o terminal positivo:

1. Depois de sair do terminal negativo, ele entra pela extremidade direita do cristal.
2. Percorre a região n como um elétron livre.
3. Próximo à junção recombina-se e torna-se um elétron de valência.
4. Passa pela região p como um elétron de valência.
5. Depois de sair pela extremidade esquerda do cristal, ele segue para o terminal positivo da fonte.

BANDAS DE ENERGIA

A Fig. 2-12b mostra como visualizar o fluxo em termos de bandas de energia. Para começar, a barreira de potencial dá às bandas p um pouco mais de energia do que para as bandas n ; é por isso que as bandas p são mais altas do que as bandas n . A polarização direta empurra os elétrons da banda de condução na região n em direção à junção. Logo depois de entrar na região p , cada elétron encontra uma lacuna (percurso A). Ele continua a sua jornada em direção à extremidade esquerda do cristal como elétron de valência.

Às vezes um elétron da banda de condução pode encontrar uma lacuna antes de atravessar a junção. Na Fig. 2-12b um elétron de valência pode atravessar a junção da direita para a esquerda; isto deixa uma lacuna exatamente à direita da junção. Esta lacuna não dura muito, ela é logo preenchida por um elétron de banda de condução (trajeto B).

Independentemente de onde a recombinação ocorre, o resultado é o mesmo. Um fluxo estável de elétrons de banda de condução desloca-se em direção à junção e preenche as lacunas próximas à junção. Os elétrons capturados (agora elétrons de valência) movem-se para a esquerda formando um fluxo estável através das lacunas da região p . Desta forma, obtemos um fluxo contínuo de elétrons através do diodo.

Conseqüentemente, à medida que os elétrons livres desaparecem ao longo dos trajetos A e B , eles descem de um nível mais alto de energia para um outro mais baixo. À medida que caem, irradiam energia na forma de calor e de luz. Lembre-se disto. Deverá estar à mão mais tarde quando discutirmos os diodos emissores de luz.

2-6 POLARIZAÇÃO REVERSA

Se você reverter a polarização da fonte cc, *reverterá a polarização* do diodo, como mostra a Fig. 2-13a. Agora o + é ligado ao lado n e o - ao lado p . Qual o efeito produzido pela reversão da polarização?

CAMADA DE DEPLEÇÃO

A polarização reversa da Fig. 2-13a força os elétrons livres na região n a se afastarem da junção em direção ao terminal positivo da fonte; as lacunas da região p também se deslocam da junção para o terminal negativo. Os elétrons que saem deixam mais íons positivos próximos à junção, e as lacunas ao se afastarem deixam mais íons negativos. Portanto a camada de depleção fica mais larga. Quanto maior a polarização reversa, maior torna-se a camada de depleção. A camada de depleção pára de aumentar quando a sua diferença de potencial se iguala à tensão da fonte.

A Fig. 2-13b é uma forma alternativa de se visualizar a mesma idéia. Logo que se aplica a polarização reversa, os elétrons da banda de condução e as lacunas deslocam-se afastando-se da junção. A camada de depleção torna-se maior até que a sua diferença de potencial se iguale à tensão da fonte. Quando isto ocorre, os elétrons livres e as lacunas param os seus movimentos.

CORRENTE DE PORTADORES MINORITÁRIOS

Há alguma corrente depois da camada de depleção ter se ajustada à sua nova largura? Sim. Há uma corrente muito pequena. Aqui está o porquê. A energia térmica cria continuamente um número limitado de elétrons livres e de lacunas de ambos os lados da junção. Por causa dos portadores minoritários, aparece uma pequena corrente no circuito.

A corrente reversa produzida pelos portadores minoritários é chamada *corrente de saturação* e designada por I_S . O nome saturação nos lembra de que não podemos ter mais corrente do que a produzida pela energia térmica. Em outras palavras, aumentando-se a tensão reversa, não haverá aumento no número de portadores minoritários criados termicamente, somente um aumento de temperatura pode aumentar I_S . Com base na experiência, uma regra prática para todos os diodos de silício é a seguinte: I_S tem o seu valor aproximadamente dobrado para cada aumento de 10°C na temperatura. Por exemplo, se I_S for de 5 nA (nanoampères) a 25°C , será de aproximadamente 10 nA a 35°C , 20 nA a 45°C , 40 nA a 55°C , e assim por diante.

Um diodo de silício tem um valor de I_S muito menor do que um diodo de germânio. Esta é uma das razões pelas quais o silício domina o campo dos componentes semicondutores.

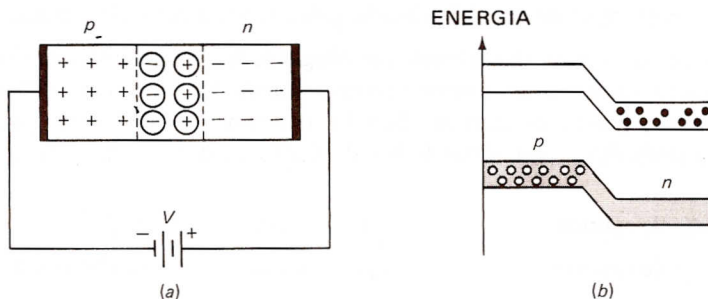


Fig. 2-13 (a) Substituído pela polarização reversa. (b) Substituído pelas bandas de energia.

CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL

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

CORRENTE REVERSA

As folhas de dados informativos sobre os diodos englobam I_S e I_{FS} numa única corrente chamada corrente reversa I_R ; geralmente ela é especificada para um dado valor de tensão reversa V_R e à temperatura ambiente T_A . Como I_S varia com a temperatura e I_{FS} com a tensão, I_R varia com a temperatura e com a tensão. Por exemplo, a I_R de um 1N914 (um diodo muito usado) é de 25 nA para uma tensão reversa V_R de 20 V e à temperatura ambiente de T_A de 25°C. Se aumentar ou a temperatura ou a tensão, a corrente reversa aumenta. Como norma, ao se projetar um circuito, escolhe-se o diodo cuja corrente reversa seja suficientemente pequena para ser desprezada numa aplicação particular.

TENSÃO DE RUPTURA

Se você aumentar a tensão reversa, positivamente atingirá um ponto de ruptura, chamado tensão de *ruptura* do diodo. Para diodos retificadores (aqueles otimizados para conduzir melhor num sentido do que no outro), a tensão de ruptura é geralmente maior do que 50 V. Uma vez atingida a tensão de ruptura, o diodo pode conduzir intensamente. De onde provêm subitamente os portadores? A Fig. 2-14a mostra um elétron livre produzido termicamente, e uma lacuna dentro da camada de depleção. Devido à polarização reversa, o elétron livre é empurrado para a direita. À medida que se desloca, ele ganha velocidade. Quanto maior a polarização reversa, mais rápido desloca-se o elétron (o que equivale a ele ganhar mais energia). Pouco depois o elétron livre pode colidir com um elétron de valência, como mostra a Fig. 2-14b. Se o elétron livre tiver energia suficiente, ele pode desalojar o elétron de valência, de modo a formar dois elétrons livres (veja a Fig. 12-14c). Agora os dois podem se acelerar e desalojar outros elétrons de valência até ocorrer a uma avalanche total. Por causa do grande número de elétrons livres, o diodo da Fig. 2-14a conduzirá intensamente e será danificado pela excessiva potência dissipada.

Não se permite na maioria dos diodos que cheguem ao rompimento. Em outras palavras, através de um projeto conveniente, a tensão reversa através de um diodo retificador é sempre mantida abaixo da sua tensão de ruptura. Não há nenhum símbolo padrão para a tensão de ruptura. Tem sido simbolizada em várias folhas de dados de especificação de componentes da seguinte forma:

$V_{(BR)}$:	tensão de ruptura	PIV:	tensão reversa de pico
BV:	tensão de ruptura	V_{RWM} :	tensão reversa máxima de trabalho
PRV:	tensão reversa de pico	V_{RM} :	tensão reversa máxima

e outras. Algumas delas são especificações cc e outras especificações ca. Você terá de consultar folhas de dados individuais para as condições fixadas nestas especificações de ruptura.

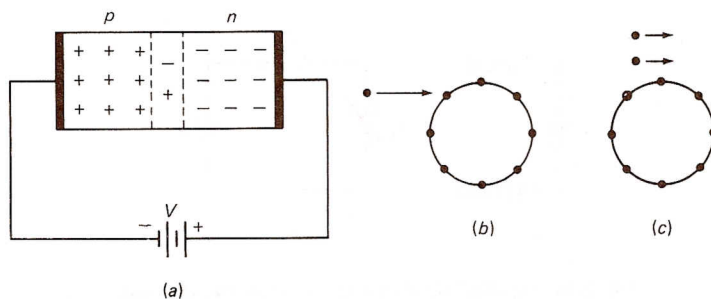


Fig. 2-14 Ruptura. (a) Portadores minoritários na camada de depleção. (b) O elétron livre atinge o elétron de valência. (c) Dois elétrons livres.

2-7 COMPONENTES LINEARES

A lei de Ohm nos diz que a corrente através de um resistor comum é proporcional à tensão aplicada ao resistor. Isto quer dizer que para um resistor, o gráfico da corrente *versus* tensão é linear. Por exemplo, dado um resistor de 500Ω , o seu gráfico $I - V$ se parecerá com o apresentado na Fig. 2-15. Observe os pontos de exemplo. A corrente é de 1 mA para uma tensão de 0,5 V e de 2 mA para 1 V. Em qualquer um dos casos, a razão da tensão pela corrente é igual a 500Ω . A reversão da tensão não produz nenhum efeito sobre a linearidade do gráfico. Haverá uma corrente reversa de -1 mA para uma tensão reversa de -0,5 V; a corrente aumenta para -2 mA para -1 V.

Um resistor comum é frequentemente chamado componente *linear* pelo fato da sua característica $I - V$ ser linear. Um resistor é apenas um exemplo de um componente linear. Você verá outros nos capítulos seguintes. Um resistor comum também é chamado componente *passivo* porque tudo o que ele faz é apenas dissipar potência; não é capaz de gerar potência. Uma bateria, por outro lado, é um componente *ativo* porque ela é capaz de gerar potência para um componente passivo como um resistor. O Capítulo 5 apresenta o transistor, um outro componente ativo.

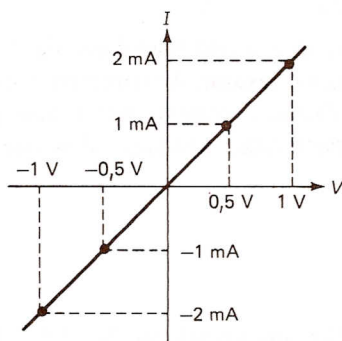


Fig. 2-15 Corrente versus tensão num resistor linear.

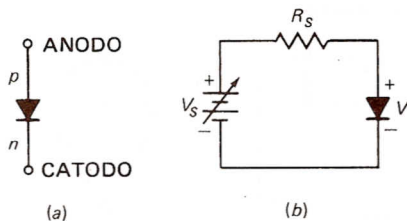


Fig. 2-16 (a) Símbolo do diodo. (b) Circuito do diodo.

2-8 O GRÁFICO DO DIODO

A Fig. 2-16a mostra o símbolo esquemático de um diodo retificador. O lado p é chamado *anodo*, e o lado n é o *catodo*. Como foi discutido anteriormente, a polarização direta pode produzir um grande fluxo de elétrons do lado n para o lado p ; isto equivale a ter um fluxo convencional grande do lado p para o lado n . Só como lembrete, a seta no símbolo do diodo indica o sentido mais fácil para corrente a convencional.

Se você preferir o fluxo de elétrons, terá que empregar um raciocínio inverso; o sentido mais fácil para o fluxo de elétrons é contrário ao da seta. Pode ser útil lembrar que a seta aponta no sentido de onde provêm os elétrons livres.

DADOS EXPERIMENTAIS

A Fig. 2-16b mostra um circuito que você pode montar no laboratório para medir a corrente e a tensão de um diodo. Com a polaridade da fonte como mostra a figura, o diodo está polarizado diretamente. Quanto maior a tensão da fonte, maior a corrente do diodo. Variando-se a tensão da fonte, pode-se medir a corrente do diodo (ligue um amperímetro em série) e a tensão do diodo (ligue um voltímetro em paralelo com o diodo). Fazendo-se o gráfico das correntes e das tensões correspondentes, obtém-se o gráfico da região direta mostrada na Fig. 2-17. Se invertermos a tensão da fonte, obteremos leituras para a região reversa. Estas leituras serão extremamente pequenas abaixo do ponto de ruptura.

A primeira coisa a se observar é a *não-linearidade* do diodo. Não teremos mais uma bela linha reta como a que se obtém para o resistor. Ao contrário, obteremos um gráfico $I - V$ altamente não-linear. Colocando de outra forma, a corrente não é mais proporcional à tensão. Como será discutido mais adiante, esta característica não-linear é o que torna o diodo um componente tão útil.

TENSÃO DE JOELHO

Que informações tiramos do gráfico apresentado na Fig. 2-17? Ao se aplicar a polarização direta, o diodo não conduz intensamente até que se ultrapasse a barreira de potencial. É por essa razão que a corrente é pequena para os primeiros décimos de volt iniciais. À medida que nos aproxi-

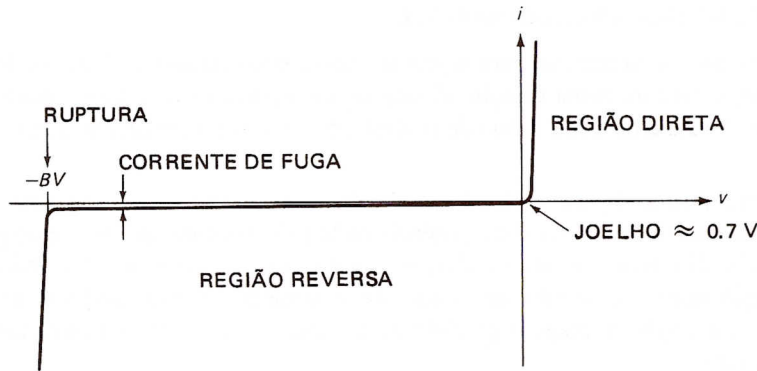


Fig. 2-17 Curva do diodo.

mos do potencial da barreira (por volta de 0,7 V para um diodo de silício), os elétrons livres e as lacunas começam a atravessar a junção em grandes quantidades. É por isso que a partir daí a corrente começa a subir rapidamente. Acima de 0,7 V, pequenos acréscimos na tensão produzem grandes aumentos na corrente.

A tensão para a qual a corrente começa a aumentar rapidamente é chamada tensão de *joelho* ou tensão de *limiar*. Para um diodo de silício, esta tensão é igual ao potencial da barreira, em torno de 0,7 V. (O diodo de germânio tem uma tensão de limiar de 0,3 V.)

RESISTÊNCIA DO CARREGAMENTO

Acima da tensão do joelho, a corrente do diodo aumenta rapidamente; pequenos aumentos na tensão do diodo produzem grandes acréscimos na corrente do diodo. A razão é a seguinte: depois de ultrapassado o potencial da barreira, tudo o que impede a corrente é a resistência de corpo ou a resistência ôhmica das regiões *p* e *n*. Esta resistência é linear. Em outras palavras, um diodo associa uma resistência altamente não-linear (a junção) a uma resistência de corpo que é linear (as regiões *p* e *n* fora da camada de depleção). Abaixo de 0,7 V predomina a não-linearidade da junção, acima de 0,7 V a linearidade da resistência de corpo.

REGIÃO REVERSA

Quando você reverte a polarização do diodo da Fig. 2-12, obtém uma corrente reversa extremamente pequena (às vezes chamada corrente de *fuga*). Se você aumentar a tensão reversa o suficiente, eventualmente atingirá a tensão de ruptura do diodo (alguns diodos têm uma tensão de ruptura de centenas de volts). Como já é de seu conhecimento, um diodo retificador deve funcionar sempre abaixo da tensão de ruptura. Para estar seguro disto, o projetista deliberadamente escolhe o tipo de diodo cuja tensão de ruptura seja maior do que a tensão reversa máxima esperada durante o funcionamento normal.

ESPECIFICAÇÕES DE POTÊNCIA E DE CORRENTE

Um diodo retificador é otimizado para o seu funcionamento unilateral. Você pode pensar num diodo como um condutor numa direção só porque ele apresenta uma baixa resistência direta e uma resistência reversa alta. Uma forma de se destruir um diodo é excedendo a sua tensão reversa de ruptura.

Uma outra forma de arruiná-lo é excedendo a sua *especificação máxima de potência*. Qualquer componente dissipa uma certa potência dada pelo produto da sua tensão pela corrente. Se essa potência dissipada for muito alta, o componente se queimará deixando-o em curto ou aberto. Tipicamente, a tensão no ponto de destruição de um diodo é bem acima da tensão de joelho, um volt ou mais. O produto dessa tensão pela corrente produz tanto calor que o diodo é destruído.

Os fabricantes às vezes especificam a potência do diodo nas folhas de dados. Por exemplo, o 1N914 tem uma especificação máxima de potência de 250 mW. Mais freqüentemente, as folhas de dados informam somente a *corrente máxima* que o diodo pode suportar. Isto é mais conveniente para se medir e para se trabalhar.

Como exemplo, a folha de dados do 1N4003 não inclui a especificação máxima de potência, mas ela especifica uma corrente cc direta máxima de 1 A. Na verdade, estamos sendo informados que se permitirmos uma corrente de regime maior do que 1 A através do 1N4003, ele poderá ser destruído ou terá a sua vida reduzida.

Geralmente as folhas de dados definem duas classes de diodos retificadores: diodos para *pequenos sinais* (aqueles com uma especificação de potência menor do que 0,5 W) e *retificadores* (aqueles com uma especificação de potência maior do que 0,5 W). O 1N914 é um diodo de pequeno sinal porque a sua especificação de potência é de 0,25 W; o 1N4003 é um retificador porque a sua potência especificada é de 1 W.

RESISTOR LIMITADOR DE CORRENTE

Isto nos leva a saber porque um resistor quase sempre é usado em série com um diodo. Voltando à Fig. 2-16b, R_S é chamado resistor *limitador de corrente*. Quanto maior for R_S , menor será a corrente do diodo. Em outros circuitos com diodos que serão discutidos, sempre haverá um resistor limitador de corrente em série com o diodo. O projetista escolhe um valor de R_S que mantenha a corrente direta máxima abaixo da especificação da corrente máxima do diodo.

Mesmo em circuitos onde você pode não ver um resistor (como uma caixa preta ligada ao diodo), a resistência Thevenin que se opõe ao diodo pode ser suficiente para manter a corrente abaixo da especificação de corrente máxima do diodo. O caso é que sempre deverá haver resistência suficiente em série com o diodo para limitar a sua corrente a um valor menor do que a corrente máxima especificada.

2-9 LINHAS DE CARGA*

Esta seção apresenta a *linha de carga*, uma ferramenta usada para se determinar o valor exato da corrente e da tensão do diodo. As seções seguintes lhe mostrarão como aplicar o método da linha de carga aos transistores e outros componentes semicondutores.

* N.R. A expressão inglesa "load-line", aqui traduzida por *linha de carga*, pode também ser traduzida por *reta de carga*.

EQUAÇÃO PARA A LINHA DE CARGA

Como podemos determinar a corrente e a tensão exatas do diodo da Fig. 2-18? Neste circuito série uma fonte de tensão V_S polariza diretamente o diodo através de um resistor limitador de corrente R_S . A tensão da extremidade esquerda do resistor ao terra é V_S , a tensão da fonte. A tensão da extremidade direita do resistor ao terra é V , a tensão do diodo. Portanto a diferença de potencial através do resistor é $V_S - V$, e a corrente é

$$I = \frac{V_S - V}{R_S} \quad (2-1)$$

Pelo fato de ser um circuito série, esta corrente é a mesma através de todo o circuito.

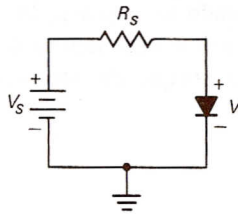


Fig. 2-18 Analisando um circuito com linha de carga.

UM EXEMPLO

Se forem dados a tensão da fonte e a resistência limitadora da corrente, então são desconhecidas somente a corrente e a tensão do diodo. Por exemplo, se a tensão da fonte for de 2 V e a resistência limitadora da corrente for de 100 Ω , então a Eq. (2-1) torna-se

$$I = \frac{2 - V}{100} \quad (2-2)$$

A Eq. (2-2) indica uma relação linear entre a corrente e a tensão. Se fizermos um gráfico desta equação, obteremos uma linha reta. Por exemplo, seja V igual a zero. Então

$$I = \frac{2 \text{ V} - 0 \text{ V}}{100 \Omega} = 20 \text{ mA}$$

A representação deste ponto ($I = 20 \text{ mA}$, $V = 0$) dá o ponto no eixo vertical da Fig. 2-19. Este ponto é chamado *saturação* porque ele representa a corrente máxima.

Como se calcula um outro ponto. Seja V igual a 2 V. Então a Eq. (2-2) dá

$$I = \frac{2 \text{ V} - 2 \text{ V}}{100 \Omega} = 0$$

Quando se representa este ponto no gráfico ($I = 0$, $V = 2$ V) obtemos o ponto mostrado no eixo horizontal da Fig. 2-19. Este ponto é chamado *corte* porque ele representa a corrente mínima.

Escolhendo-se outros valores de tensão, podemos calcular e localizar pontos adicionais. Pelo fato da Eq. (2-2) ser linear, todos os pontos se alinharão formando uma linha reta, a que aparece na Fig. 2-19. (Tente localizar outros pontos se você não acredita.) A linha reta é chamada *linha de carga*.

O PONTO Q

A Fig. 2-19 mostra o gráfico da linha de carga e a curva de um diodo. O ponto de interseção representa uma solução simultânea. Em outras palavras, as coordenadas do ponto Q são os valores da corrente e da tensão do diodo para uma fonte de tensão de 2 V e uma resistência limitadora da corrente de 100 Ω . Lendo as coordenadas do ponto Q, obtemos uma corrente do diodo de aproximadamente 12,5 mA e uma tensão do diodo de 0,75 V. Referimo-nos ao ponto Q como o *ponto de operação* porque ele representa a corrente através do resistor e do diodo.

OUTRAS LINHAS DE CARGA

A Eq. (2-1) é linear para qualquer fonte de tensão e qualquer resistência em série. Dois pontos determinam uma reta; portanto podemos sempre localizar a linha de carga traçando uma reta através das interseções vertical e horizontal (os pontos onde a linha intercepta os eixos vertical e horizontal).

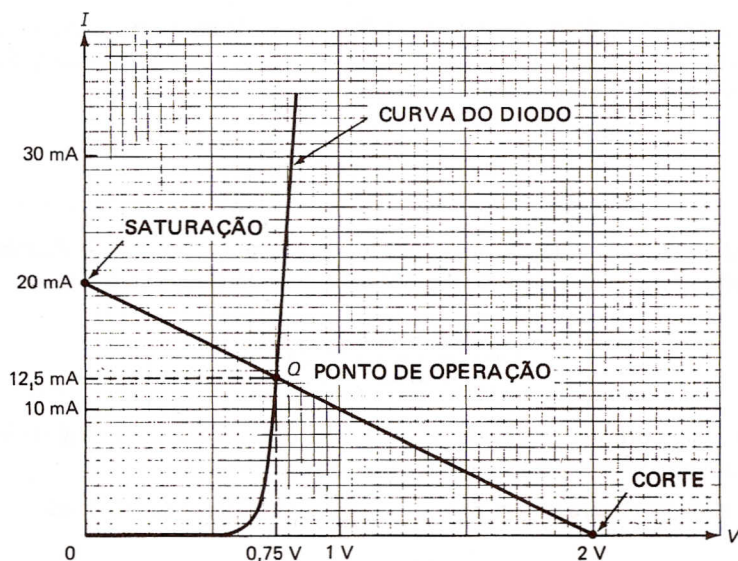


Fig. 2-19 A linha de carga intercepta a curva do diodo no ponto de operação.

Como a tensão é zero na extremidade superior da linha de carga, a Eq. (2-1) dá uma corrente de

$$I = \frac{V_S}{R_S} \quad (\text{saturação}) \quad (2-3)$$

Analogamente, pelo fato da corrente ser zero na extremidade inferior da linha de carga, a Eq. (2-1) leva a

$$V = V_S \quad (\text{corte}) \quad (2-4)$$

RELEMBRANDO AS EXTREMIDADES DA LINHA DE CARGA

Uma forma de se lembrar dos extremos da linha de carga é a apresentada a seguir. Voltemos à Fig. 2-18, onde tudo começou. Fazer V igual a zero equivale a colocar o diodo em curto e perguntar qual a corrente do circuito. Se você estiver raciocinando corretamente, a resposta é V_S/R_S ; esta é a corrente na saturação, o extremo superior da linha de carga. Da mesma forma, fazer I igual a zero equivale a abrir o diodo e perguntar qual a tensão através do diodo. A resposta é V_S ; esta é a tensão de corte, a extremidade inferior da linha de carga.

2-10 APROXIMAÇÕES DO DIODO

Os resistores têm uma tolerância típica de ± 5 por cento; as tensões de joelho do diodo podem ter tolerância de ± 10 por cento; outros componentes que discutiremos têm tolerância de ± 20 até ± 50 por cento, ou mais. Sejam razoáveis e consideremos que as respostas matematicamente exatas dos problemas com circuitos têm pouco valor se as tolerâncias dos componentes forem da ordem de 5, 10, 20 por cento ou mais. O que faz sentido no mundo real da eletrônica cotidiana são respostas aproximadas.

DIODO IDEAL

Façamos portanto, uma aproximação do comportamento do diodo. O que um diodo faz? Ele conduz muito bem no sentido direto e conduz precariamente no sentido reverso. Resuma isto até sua essência e você obterá: um *diodo ideal* age como um condutor perfeito (tensão zero) quando polarizado diretamente e como um isolante perfeito (corrente zero) quando polarizado reversamente como na Fig. 2-20a.

Em termos de circuito, um diodo ideal age como uma chave. Quando o diodo está polarizado diretamente, é como se fosse uma chave fechada (Fig. 2-20b). Se o diodo estiver polarizado reversamente, a chave estará aberta.

Por extrema que possa parecer de início a aproximação de um diodo ideal, ela o inicia na compreensão do funcionamento de circuitos contendo diodos; você não precisa se preocupar com os efeitos da tensão de corte ou com a resistência do corpo. Haverá momentos em que a aproximação se mostrará imprecisa demais; por esta razão, precisaremos de uma segunda e uma terceira aproximações.

SEGUNDA APROXIMAÇÃO

Precisamos de cerca de 0,7 V de tensão de limiar antes que o diodo de silício comece a conduzir realmente bem. Quando a tensão da fonte for grande, estes 0,7 V serão muito pouco para ter importância. Mas quando a fonte de tensão não é muito grande, é preciso levar em conta a tensão de joelho.

A Fig. 2-21a mostra o gráfico para a *segunda aproximação*. O gráfico indica que não flui nenhuma corrente até que apareçam os 0,7 V através do diodo. Neste ponto o diodo se liga. Não importa se a corrente direta é grande ou não, admitimos que a tensão do diodo seja de 0,7 V.

A Fig. 2-21b é o circuito equivalente para a segunda aproximação. A idéia é pensar no diodo como uma chave em série com uma bateria de 0,7 V. Se a tensão da fonte for maior do que 0,7 V, a chave se fechará e a tensão do diodo será de 0,7 V. Se a tensão da fonte for menor do que 0,7 V ou se a tensão da fonte for negativa, a chave se abrirá.

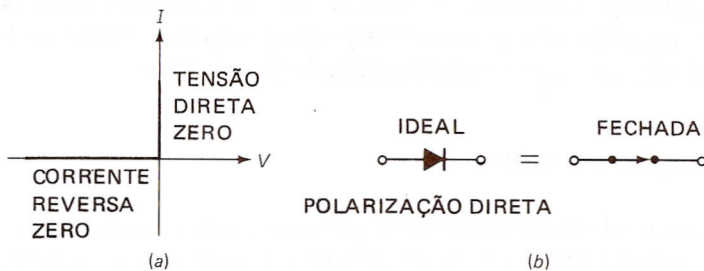


Fig. 2-20 (a) *Diodo ideal*. (b) *Uma chave é equivalente a um diodo ideal*.

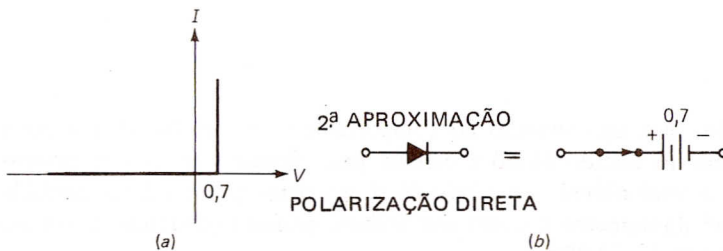


Fig. 2-21 (a) *Segunda aproximação*. (b) *A chave e a bateria formam o circuito equivalente*.

TERCEIRA APROXIMAÇÃO

Na *terceira aproximação* de um diodo, incluímos a resistência do corpo r_B . Como foi feito anteriormente, o diodo é ligado em 0,7 V. A seguir aparece uma tensão adicional através da resistência do corpo, de modo que a tensão total do diodo é maior do que 0,7 V. A Fig. 2-22a

mostra os efeitos de r_B . Depois do diodo de silício estar ligado, a corrente produz uma tensão através de r_B . Quanto maior a corrente, maior a tensão. Pelo fato de r_B ser linear, a tensão aumenta linearmente com o incremento da corrente.

O circuito equivalente para a terceira aproximação é constituído por uma chave em série com uma bateria de 0,7 V e uma resistência de r_B (veja a Fig. 2-22b). Depois do circuito externo ter ultrapassado a barreira de potencial, a corrente do diodo produz uma queda I_R através da resistência do corpo. Portanto a tensão total através do diodo de silício é igual a

$$V_F = 0,7 + I_F r_B \quad (2-5)$$

QUAL DELAS USAR

Na maioria dos trabalhos práticos, a segunda aproximação é a mais recomendada; é esta que utilizaremos ao longo de todo este livro, a menos que seja feita alguma indicação em contrário. Além disso, quando você fizer os problemas do fim de cada capítulo, use a segunda aproximação, a menos que seja feita alguma recomendação em contrário.

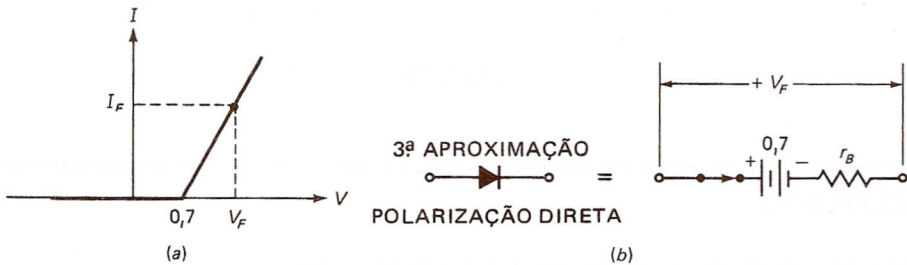


Fig. 2-22 (a) Terceira aproximação. (b) Circuito equivalente.

EXEMPLO 2-1

Utilize a segunda aproximação para determinar a corrente do diodo na Fig. 2-23a.

SOLUÇÃO

O diodo está polarizado diretamente; portanto, há uma queda de 0,7 V. A tensão através do resistor é a diferença entre a tensão da fonte e a tensão do diodo (10 V – 0,7 V), que é igual a 9,3 V. Portanto, a corrente do diodo é

$$I = \frac{9,3 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 1,86 \text{ mA}$$

A propósito, os esquemas industriais geralmente não mostram os circuitos completos como o da Fig. 2-23a. Ao contrário, você dispõe de um desenho resumido como o da Fig. 2-23b. Como a fonte está aterrada de um lado, na prática se mostra somente o potencial do outro lado com relação ao terra. Na Fig. 2-23a, o potencial do lado positivo com relação ao terra é de +10 V. Quando você vir um esquema industrial como o da Fig. 2-23b com tensão num ponto, lembre-se sempre de que o potencial é com relação ao terra.

A Fig. 2-23c mostra um circuito equivalente que enfatiza a segunda aproximação e os seus efeitos. Como está indicado, 9,3 V é a queda de tensão através do resistor e 0,7 V a queda através do diodo.

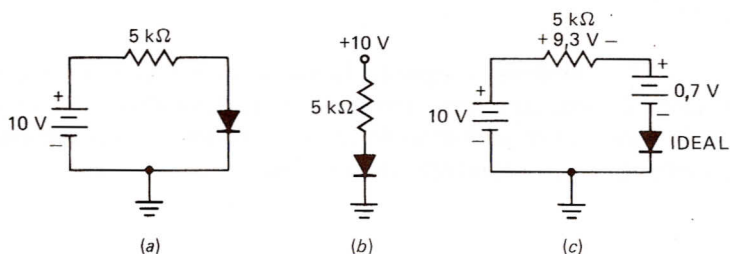


Fig. 2-23

EXEMPLO 2-2

Calcule a corrente através do resistor de 1 k Ω da Fig. 2-24a.

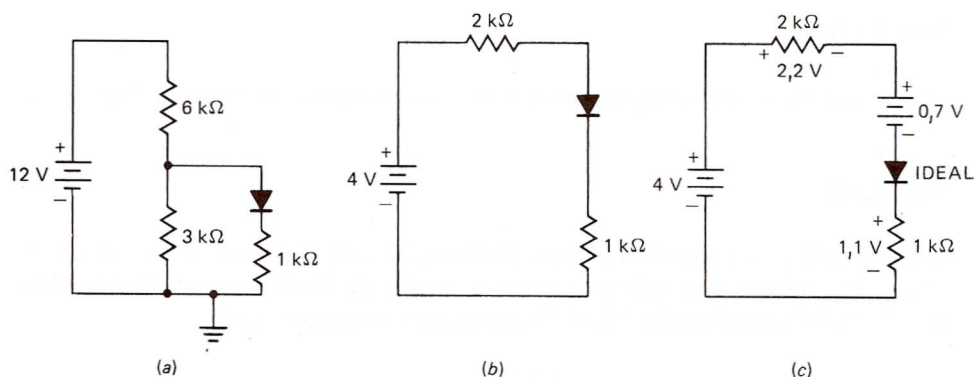


Fig. 2-24

SOLUÇÃO

O que se espera que você faça quando encontrar mais de uma malha? Certo! Pense no Thevenin, ou pelo menos pense na possibilidade de utilizar o teorema de Thevenin. A forma mais fácil de se resolver este problema é thevenizar o divisor de tensão para obter o circuito equivalente da Fig. 2-24b. Como o diodo está polarizado diretamente, há uma queda de 0,7 V. O resto da fonte de tensão aparece através da resistência total de 3 k Ω . Portanto, a corrente no circuito em série é

$$I = \frac{4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 1,1 \text{ mA}$$

Se você não entender a lógica precedente, escreva a equação de Kirchhoff para a tensão na Fig. 2-24b de modo a obter

$$-4 + 2000I + 0,7 + 1000I = 0$$

Se você resolver esta equação para I , obterá 1,1 mA.

A Fig. 2-24c mostra um circuito equivalente. O resistor de cima tem uma queda de tensão de 2,2 V, o diodo uma queda de 0,7 V, e o resistor de baixo uma queda de 1,1 V.

2-11 RESISTÊNCIA CC DE UM DIODO

Se você considerar a razão entre a tensão total do diodo e a corrente total do diodo, terá a *resistência cc* do diodo. No sentido direto esta resistência cc é simbolizada por R_D ; no sentido reverso, ela é designada por R_R .

RESISTÊNCIA DIRETA

Pelo fato do diodo ser uma resistência não-linear, a sua resistência cc varia com a corrente que passa através dele. Por exemplo, aqui estão alguns pares de corrente direta e tensão para um 1N914 típico; 10 mA em 0,65 V; 30 mA em 0,75 V; e 50 mA em 0,85 V. No primeiro ponto a resistência cc é

$$R_D = \frac{0,65 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 65 \Omega$$

No segundo ponto,

$$R_D = \frac{0,75 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

No terceiro ponto,

$$R_D = \frac{0,85 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = 17 \Omega$$

Observe como a resistência cc diminui à medida que a corrente aumenta. De qualquer modo a resistência direta é baixa.

RESISTÊNCIA REVERSA

Analogamente, aqui estão dois conjuntos de corrente reversa e tensão para um 1N914: 25 nA em 20 V; 5 μ A em 75 V. No primeiro ponto, a resistência cc é

$$R_R = \frac{20 \text{ V}}{25 \text{ nA}} = 800 \text{ M}\Omega$$

No segundo ponto,

$$R_R = \frac{75 \text{ V}}{5 \mu\text{A}} = 15 \text{ M}\Omega$$

Observe como a resistência cc diminui à medida que nos aproximamos da tensão de ruptura (75 V). Apesar disso, a resistência reversa do diodo ainda é alta, bem na faixa dos megohms.

VERIFICAÇÃO DE DEFEITOS

Você pode rapidamente testar a condição de um diodo com um ohmímetro. Meça a resistência cc do diodo em qualquer sentido, a seguir inverta os terminais e meça novamente a resistência cc. A corrente direta dependerá do alcance do ohmímetro que está sendo usado, o que quer dizer que você terá leituras diferentes em escalas diferentes. Entretanto, o principal que se deve procurar é uma razão alta para a resistência reversa com relação à direta. Que valor é considerado alto? Para diodos de silício típicos, usados em trabalhos de eletrônica, a razão deverá ser mais alta do que 1000: 1.

Usar um ohmímetro para testar diodos é um exemplo de teste siga/não siga. Você não está realmente interessado no valor exato da resistência cc do diodo; tudo o que você quer saber é se o diodo está funcionando aproximadamente como um condutor num sentido ou não — isto é, se ele tem uma resistência baixa no sentido direto e uma resistência alta no sentido reverso. As seguintes características são indicativas de que o diodo está com problemas: resistência extremamente baixa em ambos os sentidos (diodo em curto); resistência alta em ambos os sentidos (diodo aberto); resistência um pouco mais baixa no sentido reverso (chamado diodo com fuga).

Geralmente o teste é feito com o diodo fora do circuito. Mas mesmo quando o diodo está no circuito, um teste com o ohmímetro (desligue o circuito antes) pode indicar resistência mais baixa num sentido do que no outro.

Para terminar, alguns ohmímetros podem produzir corrente suficiente em escalas baixas para destruir um diodo de pequeno sinal. Por esta razão, você deve testar diodos de pequeno sinal em escalas maiores do que $R \times 10$. Nestas escalas mais altas, a resistência interna do ohmímetro evita corrente excessiva no diodo.

PROBLEMAS

Imediatos

- 2-1 Um diodo de silício tem uma corrente de saturação de 2 nA em 25°C. Qual o valor de I_S em 75°C? E em 125°C?
- 2-2 A 25°C, um diodo de silício tem uma corrente reversa de 25 nA. A componente de fuga pela superfície é igual a 20 nA. Se a corrente de superfície ainda for de 20 nA a 75°C, qual o valor da corrente reversa total?
- 2-3 Num dado circuito, quando um diodo está polarizado diretamente, sua corrente é de 50 mA. Quando polarizado reversamente, a corrente cai para 20 nA. Qual a razão entre a corrente direta e a reversa?
- 2-4 Qual a potência dissipada num diodo de silício com polarização direta se a tensão do diodo for de 0,7 V e a corrente de 100 mA?
- 2-5 Faça o gráfico $I - V$ de um resistor de 2 k Ω . Marque o ponto onde a corrente é de 4 mA.
- 2-6 Esboce o gráfico $I - V$ de um diodo de silício com uma compensação de 0,7 V e uma PIV de 50 V. Explique com suas próprias palavras cada parte do gráfico.
- 2-7 Na Fig. 2-25, qual é a dissipação de potência aproximada do diodo se a corrente for de 50 mA? Qual a potência dissipada quando a corrente for de 100 mA?
- 2-8 Uma fonte de tensão de 8 V leva o diodo a ter um resistor limitador de corrente de 100 Ω . Se o diodo tiver a característica $I - V$ da Fig. 2-25, qual a corrente na extremidade superior da linha de carga? A tensão na extremidade mais baixa da linha de carga? Quais os valores aproximados da tensão e da corrente no ponto Q ? Qual a potência dissipada pelo diodo?
- 2-9 Repita o Probl. 2-8 para uma resistência de 200 Ω . Descreva o que acontece com a linha de carga.
- 2-10 Repita o Probl. 2-8 para uma fonte de tensão de 2 V. O que acontece com a linha de carga?

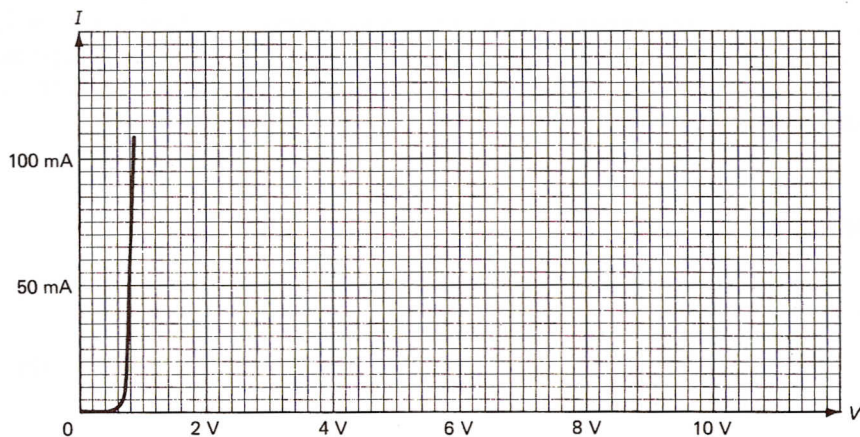


Fig. 2-25

- 2-11 A tensão da fonte é de 9 V e a da resistência da fonte de 1 k Ω na Fig. 2-26a. Calcule a corrente através do diodo.
- 2-12 V_S é 12 V e R_S é 47 k Ω na Fig. 2-26b. Qual a corrente do diodo?
- 2-13 Na Fig. 2-26c, $V_S = 15$ V, $R_1 = 68$ k Ω , $R_2 = 15$ k Ω e $R_3 = 33$ k Ω . Calcule a corrente do diodo. O divisor de tensão é estabilizado? (A palavra “estabilizado” foi definida na Seção 1-2).

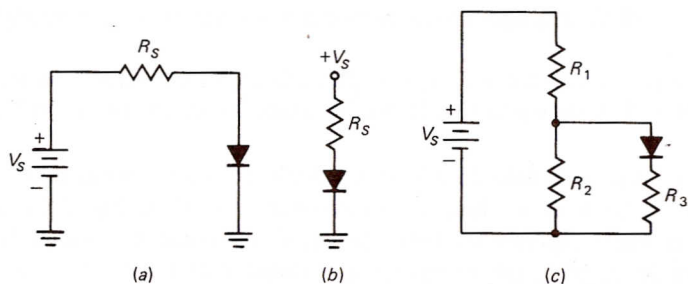


Fig. 2-26

- 2-14 Suponha que a fonte de tensão seja invertida na Fig. 2-26c. Se $V_S = 100$ V, qual o valor da tensão reversa através do diodo? (Utilize os valores de resistência dados no Prob. 2-13.)

2-15 Aqui estão alguns diodos, suas especificações de tensão de ruptura e de corrente:

Diodo	Especificação PRV	$I_{max.}$
1N914	75 V	200 mA
1N4001	50 V	1 A
1N1185	120 V	35 A

Na Fig. 2-26c a polaridade da fonte é invertida. Se $V_S = 200$ V, $R_1 = 10$ k Ω e $R_2 = 10$ k Ω , qual dos diodos anteriores se rompe quando usado no circuito?

2-16 A tensão da fonte é de 100 V e a resistência da fonte de 220 Ω na Fig. 2-26b. Quais dos diodos relacionados no Prob. 2-15 podem ser usados no circuito?

2-17 Calcule a resistência direta aproximada na Fig. 2-25 para cada uma das seguintes correntes: 10 mA, 50 mA, e 100 mA.

2-18 Aqui estão alguns diodos e as especificações de pior caso:

Diodo	I_D	I_I
1N914	10 mA para 1 V	25 nA para 20 V
1N4001	1 A para 1,1 V	10 μ A para 50 V
1N1185	10 A para 0,95 V	4,6 mA para 100 V

Calcule a razão de resistências reversa/direta para cada um desses diodos.

Verificação de defeitos

2-19 Suponha que a tensão através do diodo da Fig. 2-27a seja de 5 V. O diodo está aberto ou em curto?

2-20 Alguma coisa faz com que R fique em curto na Fig. 2-27a. Qual será a tensão do diodo? O que acontecerá ao diodo?

2-21 Você mede 0V através do diodo da Fig. 2-27a. A seguir você testa a tensão da fonte, e ela indica uma leitura de + 5 V com relação ao terra. O que há de errado com o circuito?

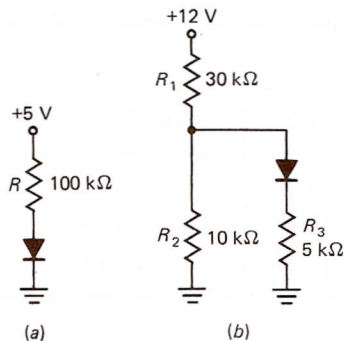


Fig. 2-27

- 2-22 Na Fig. 2-27b, você mede um potencial de +3 V na junção de R_1 e R_2 . (Lembre-se de que os potenciais são sempre com relação ao terra.) A seguir você mede 0 V na junção do diodo e do resistor de 5 k Ω . Enumere alguns dos possíveis problemas.
- 2-23 Você mede 0 V na junção entre R_1 e R_2 na Fig. 2-27b. Quais são algumas das coisas que podem estar erradas no circuito.

Projeto

- 2-24 Na Fig. 2-27a, qual deverá ser o valor de R para se obter uma corrente do diodo de 10 mA?
- 2-25 Qual deverá ser o valor de R_2 na Fig. 2-27b para surgir uma corrente de 0,25 mA?
- 2-26 Desenhe novamente o circuito da Fig. 2-27b de modo a chegar às seguintes especificações: $V_{TH} = 4$ V, $R_3 = 100$ k Ω e um divisor de tensão estabilizado. (Veja a Seção 1-12 se você não souber o que significa “estabilizado”.)
- 2-27 Desenhe um circuito como o da Fig. 2-27b com as seguintes especificações: $V_S = 25$ V, R_3 pode variar de 50 a 250 k Ω , $V_{TH} = 5$ V, e um divisor de tensão estabilizado.

Desafio

- 2-28 Um diodo de silício tem uma corrente direta de 50 mA em 1 V. Utilize a terceira aproximação para calcular a sua resistência de corpo.
- 2-29 Dado um diodo de silício com uma corrente reversa de 5 μ A em 25 $^{\circ}$ C e 100 μ A em 100 $^{\circ}$ C, calcule a corrente de saturação e a corrente de fuga superficial.

2-30 Na Fig. 2-27b, a alimentação é desligada e a extremidade superior de R_1 é aterrada. A seguir você usa um ohmímetro para ler as resistências direta e reversa do diodo. As duas leituras são idênticas. Que valor o ohmímetro indica?

2-31 Alguns sistemas como alarme contra roubo, computadores etc. utilizam uma bateria auxiliar no caso da fonte de alimentação principal falhar. Descreva como funciona o circuito da Fig. 2-28.

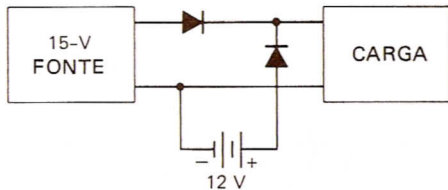


Fig. 2-28

Capítulo 2

2-1. 64 nA, 2,05 μ A 2-3. $2,6(10^6)$ 2-5. Desenhe uma linha reta passando pela origem e (4 mA, 8 V) 2-7. 40 mW, 85 mW 2-9. 40 mA, 8 V, 36 mA, 08, V, 32 mW, a linha de carga desloca-se para baixo por um fator 2 2-11. 8,3 mA 2-13. 44,4 μ A, não 2-15. 1N914, 1N4001 2-17. 70 Ω , 15,6 Ω , 8,2 Ω 2-19. Aberto 2-21. Diodo em curto, 100 k Ω aberto 2-23. Sem tensão de alimentação, R_1 aberto, ou R_2 em curto 2-25. 23,4 k Ω 2-27. Dimensões padrão mais próximas: $R_1 = 2,4$ k Ω , $R_2 = 620$ Ω 2-29. $I_S = 0,528$ μ A, $I_{SL} = 4,47$ μ A 2-33. Imprime 11500