

Sumário

Introdução	5
Materiais semicondutores	6
Constituição química	7
Dopagem	9
Semicondutor tipo n	10
Semicondutor tipo p	12
Propriedades térmicas	14
O diodo semicondutor	15
Formação do diodo - junção pn	15
Aspecto e representação do diodo	17
Aplicação de tensão sobre o diodo	18
Polarização direta	18
Polarização inversa	20
Característica elétrica do diodo semicondutor	21
O diodo semicondutor ideal	21
Modelo semi-ideal do diodo semicondutor	22
Curva característica do diodo	24
Limites de operação do diodo	28
Teste de diodos semicondutores	30
Execução do teste	31
Apêndice	33
Questionário	33
Bibliografia	34



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A eletrônica se desenvolveu de forma espantosa nas últimas décadas. A cada dia novos componentes são colocados no mercado, simplificando o projeto e construção de novos equipamentos cada vez mais sofisticados.

Um dos fatos que contribuiu de forma marcante para essa evolução foi a descoberta e aplicação dos materiais semicondutores. O primeiro componente fabricado com esses materiais, que foi denominado de **diodo semicondutor**, é até hoje utilizado para a transformação de corrente alternada em corrente contínua.

Este fascículo trata dos materiais semicondutores e do diodo semicondutor com suas características e forma de teste, visando a fornecer os conhecimentos indispensáveis para o entendimento da transformação de *ca* em *cc*.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- * Corrente elétrica.
- * Materiais condutores e isolantes.

Materiais semicondutores

Alguns materiais apresentam propriedades de condução elétrica intermediárias entre aquelas inerentes aos isolantes e aos condutores. Tais materiais são denominados de **semicondutores**. A característica mais interessante do material semicondutor, e que o torna atrativo do ponto de vista da fabricação de componentes eletrônicos, é a possibilidade de se poder variar substancialmente sua condutividade elétrica pela alteração controlada de sua composição química ou estrutura cristalina.

Um exemplo típico de um elemento químico que pode formar materiais exibindo características elétricas distintas é o **carbono**. Dependendo da forma com que os átomos de carbono se interligam, o material formado pode tornar-se um isolante ou um semicondutor.

Uma das formas naturais de matéria formada por átomos de carbono arranjados ordenadamente em uma estrutura cristalina é o **diamante**, que é um material de grande dureza e **eletricamente isolante**.

Os átomos de carbono podem também arranjar-se naturalmente em uma estrutura **amorfa** ou **não cristalina**, dando origem ao **grafite** que é um material **semicondutor**.

Nas seções seguintes serão discutidas algumas das características principais associadas aos materiais semicondutores e a forma pela qual esses materiais podem ser utilizados na construção de dispositivos eletrônicos.

CONSTITUIÇÃO QUÍMICA

Os materiais semicondutores mais simples são constituídos de átomos de um único elemento químico com quatro elétrons na camada de valência. Átomos exibindo esta configuração eletrônica são denominados de **átomos tetravalentes**.

A **Fig.1** ilustra a configuração dos átomos tetravalentes de **germânio (Ge)** e **silício (Si)** que dão origem a materiais semicondutores.

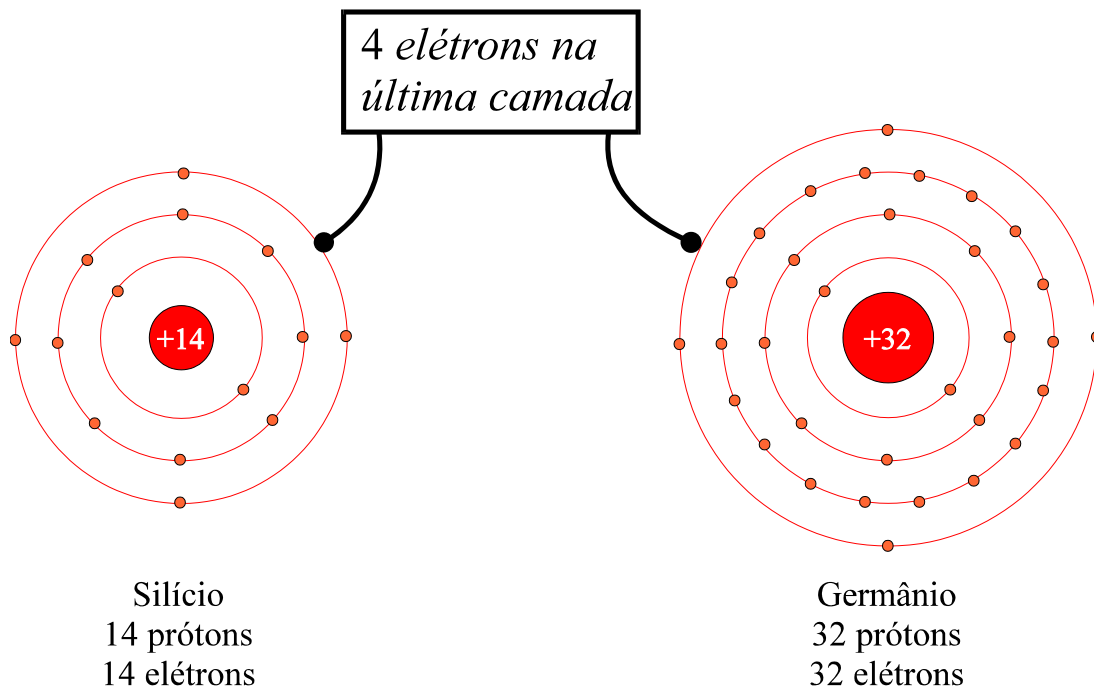


Fig.1 Configuração eletrônica dos átomos de silício e germânio.

Os átomos que têm quatro elétrons na camada de valência tendem a se arranjar ordenadamente na formação do material segundo uma estrutura cristalina com átomos vizinhos compartilhando seus elétrons de valência, conforme ilustrado na **Fig.2**.

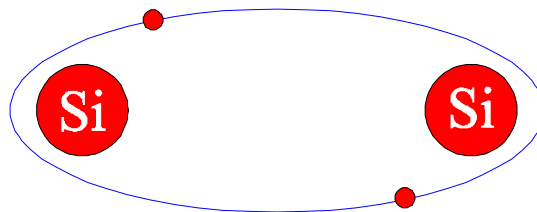


Fig.2 Compartilhamento de elétrons de valência entre dois átomos de silício.

O compartilhamento de elétrons entre átomos tetravalentes em uma estrutura cristalina é ilustrado na **Fig.3a**. Esse tipo de ligação química recebe a denominação de **ligação covalente**, sendo representada simbolicamente por dois traços interligando cada par de núcleos, como mostrado na **Fig.3b**.

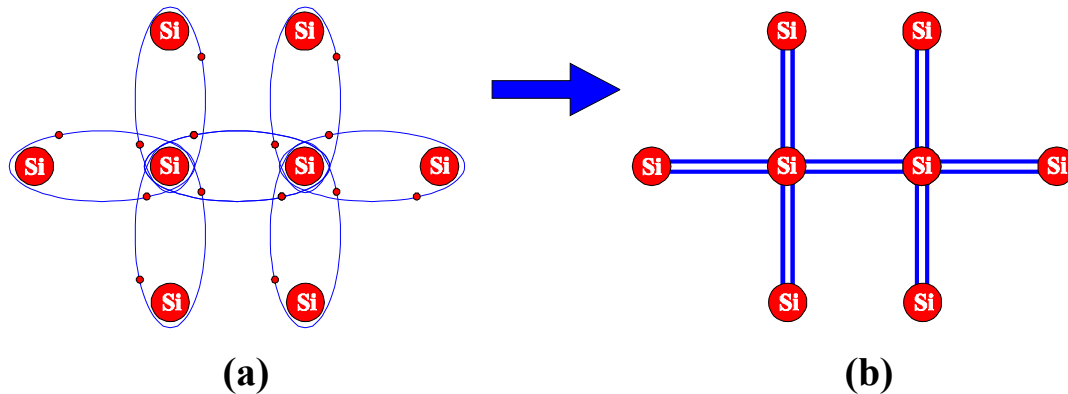


Fig.3 Compartilhamento de elétrons entre átomos ligados covalentemente em uma estrutura cristalina e a representação simbólica correspondente.

Nas ligações covalentes os elétrons permanecem fortemente ligados ao par de núcleos interligados. Por esta razão os materiais formados por estruturas cristalinas puras, compostas unicamente por ligações covalentes, adquirem características de boa isolamento elétrica.



Materiais com estruturas cristalinas puras formadas por elementos químicos tetravalentes são bons isolantes elétricos.

Na forma cristalina, o silício e o germânio puros são materiais semicondutores com propriedades elétricas próximas àquelas de um isolante perfeito.

A **Fig.4** mostra uma representação planar do arranjo de átomos tetravalentes em uma rede cristalina, onde cada átomo forma quatro ligações covalentes com seus vizinhos.

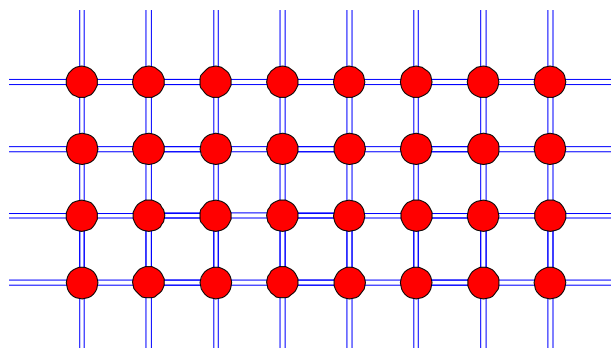


Fig.4 Representação planar de uma rede cristalina de átomos tetravalentes.

A representação ilustrada na **Fig.4** é uma versão simplificada da situação real em que os átomos tetravalentes se arranjam em uma estrutura tridimensional. Essa estrutura tridimensional é ilustrada na **Fig.5**, com os átomos interligados em uma geometria tetraédrica. O tetraedro assim formado sempre contém um átomo central interligado aos seus quatro vizinhos posicionados nos vértices do tetraedro.

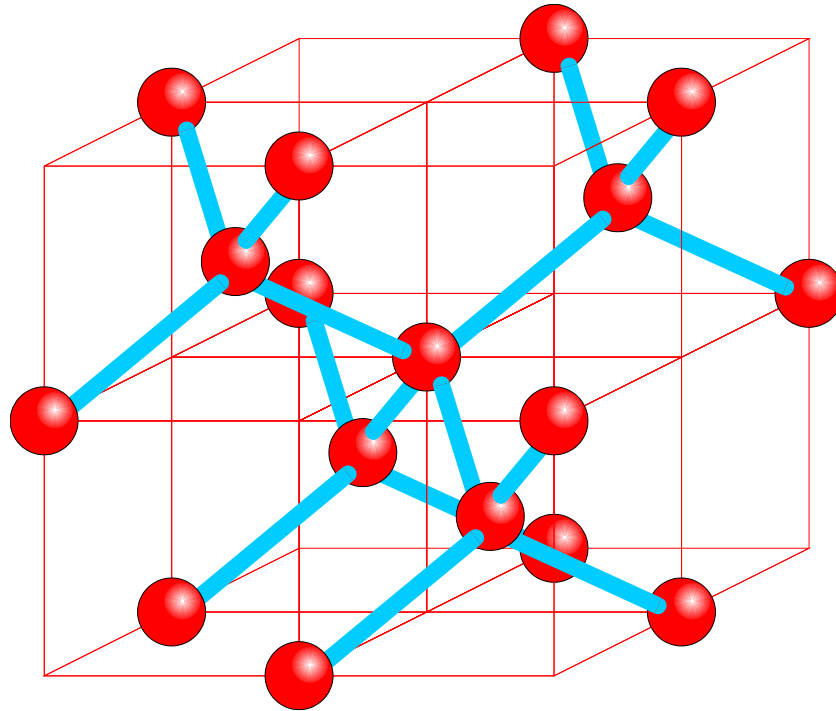


Fig.5 Estrutura tridimensional de uma rede cristalina de átomos tetravalentes.

DOPAGEM

A **dopagem** é um processo químico no qual átomos estranhos são introduzidos na estrutura cristalina de uma substância.

Os materiais encontrados em sua forma natural, geralmente contêm um certo grau de **impurezas** que se instalam durante o processo de formação desses materiais. Essa situação pode ser caracterizada como um processo de **dopagem natural**.

A dopagem pode também ser realizada em laboratório, com o objetivo de introduzir no cristal uma determinada quantidade de átomos de impurezas, de forma a alterar, de maneira controlada, as propriedades físicas naturais do material.

Em um cristal semicondutor a dopagem é geralmente realizada para alterar suas propriedades elétricas. O grau de condutividade bem como o mecanismo de condução do semicondutor dopado irá depender dos tipos de átomos de impureza introduzidos no cristal, como descrito a seguir.

SEMICONDUTOR TIPO n

Quando o processo de dopagem introduz na estrutura cristalina do semicondutor uma quantidade de átomos contendo excesso de um elétron de valência relativamente ao número de elétrons da camada mais externa de cada átomo do cristal, forma-se um **semicondutor tipo n** . Neste processo, uma pequena quantidade dos átomos dopantes introduz apenas ligeiras modificações na estrutura cristalina do semicondutor puro.

Um exemplo típico de formação de um semicondutor tipo n ocorre quando átomos de fósforo são introduzidos na estrutura cristalina do silício. Conforme ilustrado na **Fig.6**, apenas quatro dos cinco elétrons de valência do fósforo, podem participar das ligações covalentes com os átomos de silício.

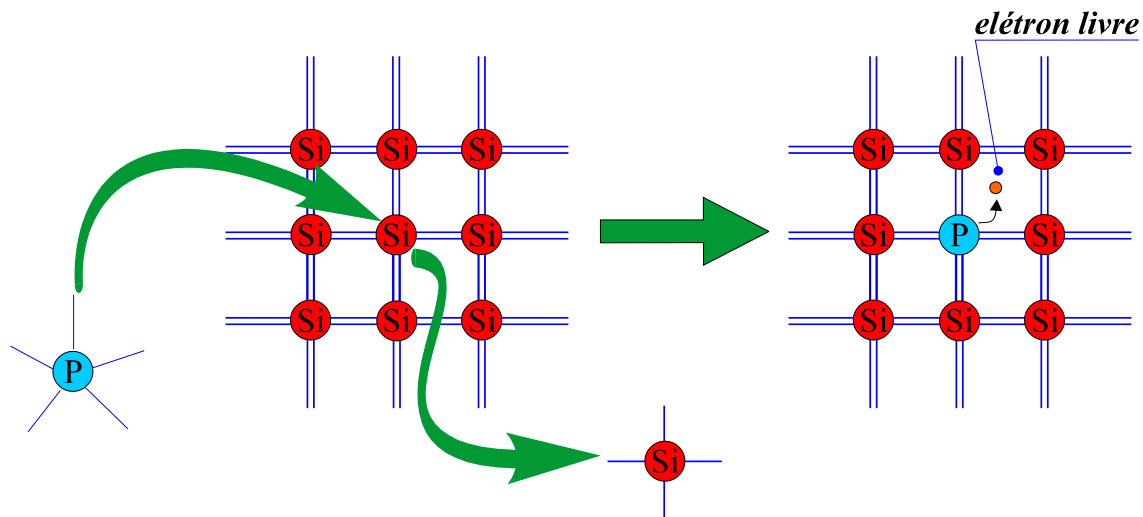


Fig.6 Dopagem de silício com átomo de fósforo.

Como mostrado na **Fig.6**, o quinto elétron de valência do átomo de fósforo não participa de nenhuma ligação covalente, pois não existe um segundo elétron de valência disponível nos átomos vizinhos que possibilite a formação dessa ligação. Esse elétron extra pode, portanto, ser facilmente liberado pelo átomo de fósforo, passando a transitar livremente através da estrutura do cristal semicondutor.

Com a adição de impurezas, e conseqüente aumento no número de elétrons livres, conforme ilustrado na **Fig.7**, o cristal que era puro e isolante passa a ser condutor de corrente elétrica. É importante observar que embora o material tenha sido dopado, o número total de elétrons permanece igual ao número total de prótons no cristal, de forma que **o material continua eletricamente neutro**.

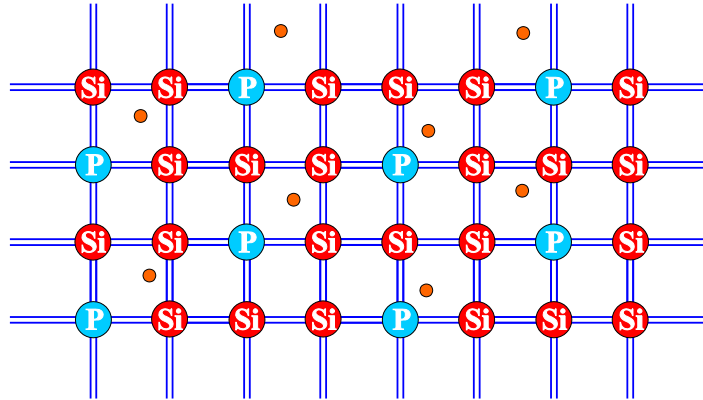


Fig.7 Elétrons livres no silício dopado com fósforo.

O semiconductor dopado com átomos contendo excesso de um ou mais elétrons na camada de valência recebe a denominação de **semiconductor tipo n** , pois nesses materiais a corrente elétrica é conduzida predominantemente por cargas **negativas**. Essa condução elétrica ocorre independentemente da polaridade da tensão aplicada entre as extremidades do material semiconductor, conforme ilustrado na **Fig.8**.

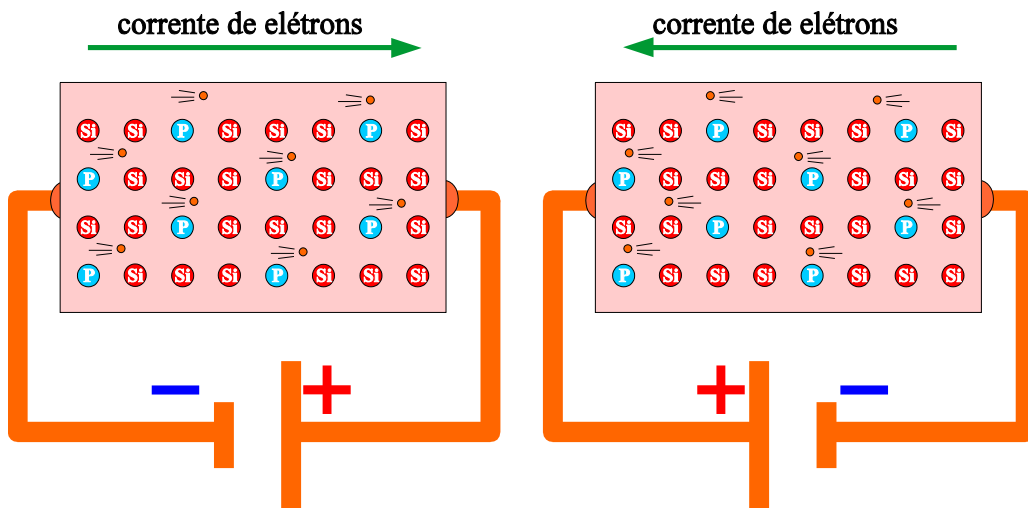


Fig.8 Corrente de elétrons em um semiconductor tipo n .

SEMICONDUTOR TIPO p

Quando os átomos introduzidos na estrutura cristalina do semicondutor exibem deficiência de um elétron de valência relativamente ao número de elétrons da camada mais externa de cada átomo do cristal, forma-se um **semicondutor tipo p** .

O átomo de índio, por exemplo, que tem três elétrons na camada de valência, quando utilizado no processo de dopagem do silício dá origem a um semicondutor tipo p , conforme ilustrado na **Fig.9**.

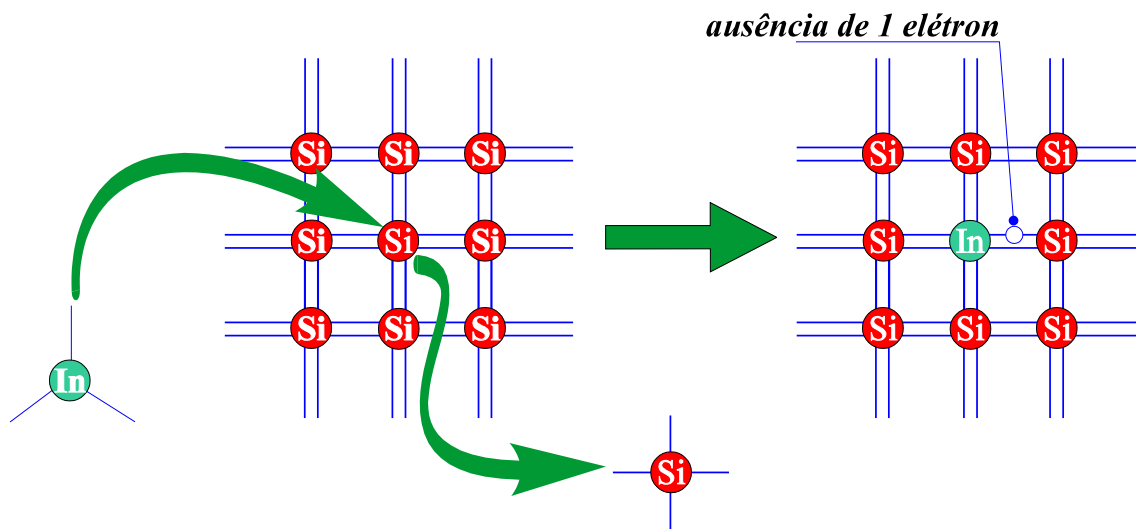


Fig.9 Dopagem de silício com átomo de índio.

Como se pode observar na **Fig.9**, o átomo de índio se acomoda na estrutura cristalina, formando três ligações covalentes com átomos vizinhos de silício. Com respeito à ligação com o quarto átomo de silício, verifica-se a ausência do segundo elétron que comporia o par necessário à formação daquela ligação com o átomo de índio. Essa ausência de elétron de ligação é denominada de **lacuna**.

A existência de lacunas no semicondutor permite que haja um mecanismo de condução distinto daquele observado em um semicondutor tipo n . No caso do semicondutor tipo n , os elétrons adicionais resultantes do processo de dopagem podem transitar livremente no interior do material. Por outro lado, quando a dopagem produz lacunas no semicondutor, um elétron proveniente de uma ligação covalente só poderá transitar para um ponto do cristal onde haja uma lacuna disponível.

Esse mecanismo de condução está ilustrado na **Fig.10**, onde se considera uma representação de um cristal de silício dopado com átomos de índio submetido a uma ddp.

O movimento de elétrons de valência se dá do pólo negativo para o pólo positivo, pela ocupação de lacunas disponíveis na rede cristalina. Nesse processo, cada elétron torna disponível uma nova lacuna em seu sítio de origem, como pode ser observado na representação da **Fig.10**.

Esse movimento de elétrons equivale portanto, a um movimento de lacunas do pólo positivo para o pólo negativo do material.

De acordo com esse ponto de vista, as lacunas em um semiconductor dopado se comportam efetivamente como cargas positivas que podem transitar em um cristal quando este está submetido a uma tensão externamente aplicada.

O semiconductor dopado com átomos contendo deficiência de um ou mais elétrons na camada de valência recebe a denominação de **semiconductor tipo p** , pois nesses materiais a corrente elétrica é conduzida predominantemente por lacunas que se comportam como portadores de carga **positiva** durante o processo de condução elétrica.

Como no processo de condução elétrica de um semiconductor tipo n , o movimento de lacunas em um semiconductor tipo p , submetido a uma ddp, ocorre independentemente da polaridade da tensão aplicada entre as extremidades do material.

Analisando-se as propriedades básicas de semicondutores dopados, nota-se que o número de elétrons em um semiconductor tipo n , ou lacunas em um

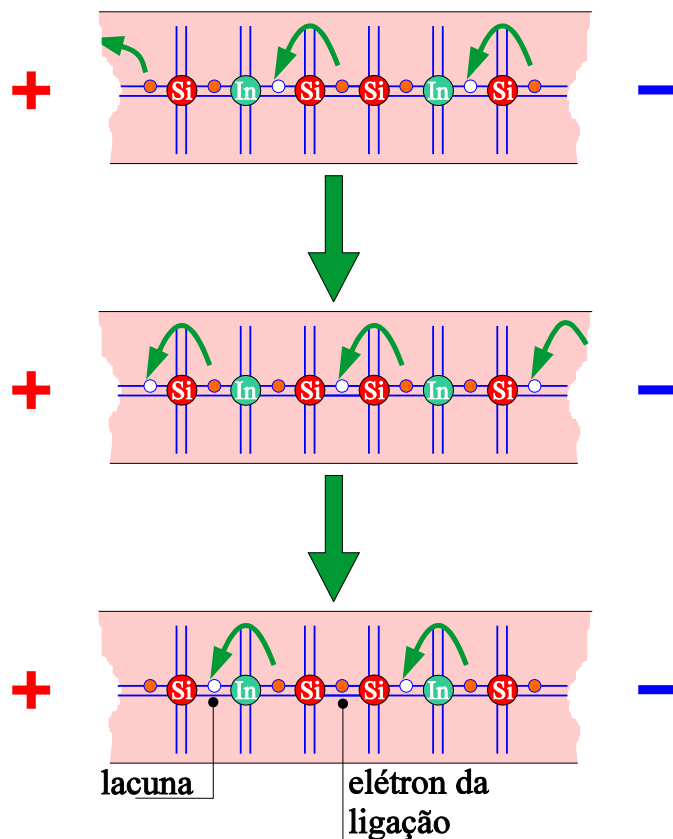


Fig.10 Movimento de lacunas em um semiconductor sujeito a uma ddp.

semicondutor tipo p , cresce com o aumento do número de átomos de impurezas introduzidas no cristal. Com o aumento do número de portadores de carga, aumenta a condutividade elétrica do material. Dessa forma, torna-se possível alterar de forma controlada a condutividade elétrica de um semicondutor, efetuando-se a dosagem adequada da quantidade de dopagem do cristal durante a etapa de fabricação.

Essa característica de controle externo de condutividade possibilita o uso de cristais semicondutores como matéria prima na fabricação de componentes eletrônicos, incluindo diodos, transistores, circuitos integrados etc., bem como na construção de dispositivos optoeletrônicos, tais como fotodetetores, diodos emissores de luz e lasers semicondutores.



A condutividade elétrica de um semicondutor pode ser controlada pela dosagem adequada da quantidade de dopagem do cristal, durante a etapa de fabricação.

PROPRIEDADES TÉRMICAS

A temperatura exerce influência direta sobre as propriedades elétricas de materiais semicondutores. Quando a temperatura de um material semicondutor aumenta, o aumento de energia térmica do elétron de valência facilita a sua liberação da ligação covalente de que participa. Cada ligação covalente que se desfaz por esse processo propicia, portanto, a geração de um par elétron/lacuna a mais na estrutura do cristal, conforme ilustrado na **Fig.11**.

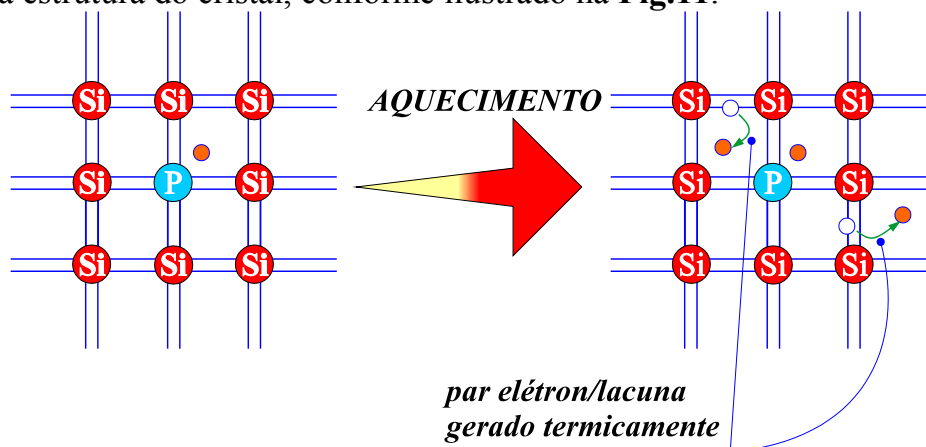


Fig.11 Geração por aquecimento de pares elétron/lacuna em um semicondutor.

O aumento do número de portadores devido ao aquecimento do cristal aumenta sua condutividade, permitindo assim que se obtenha um maior fluxo de corrente no material.

O diodo semicondutor

O diodo semicondutor é um componente que pode comportar-se como condutor ou isolante elétrico, dependendo da forma como a tensão é aplicada aos seus terminais. Essa característica permite que o diodo semicondutor possa ser utilizado em diversas aplicações, como, por exemplo, na transformação de corrente alternada em corrente contínua.

FORMAÇÃO DO DIODO - JUNÇÃO pn

Um diodo semicondutor é formado a partir da junção entre um semicondutor tipo p e um semicondutor tipo n , conforme ilustrado na **Fig.12**. Existem vários processos que permitem a fabricação desse tipo de estrutura e que utilizam técnicas altamente sofisticadas para o controle de crescimento dos cristais semicondutores com os graus de dopagens desejados. A estrutura formada recebe a denominação de **junção pn** .

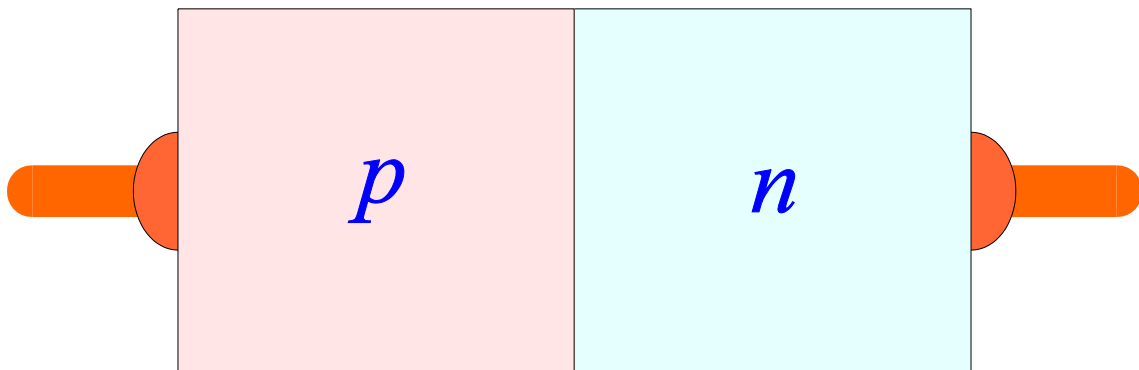


Fig.12 Diodo semicondutor.

Conforme ilustrado na **Fig.13**, logo após a formação da junção pn , alguns elétrons livres se difundem do semicondutor tipo n para o semicondutor tipo p . O mesmo processo ocorre com algumas lacunas existentes no semicondutor tipo p que difundem para o semicondutor tipo n .

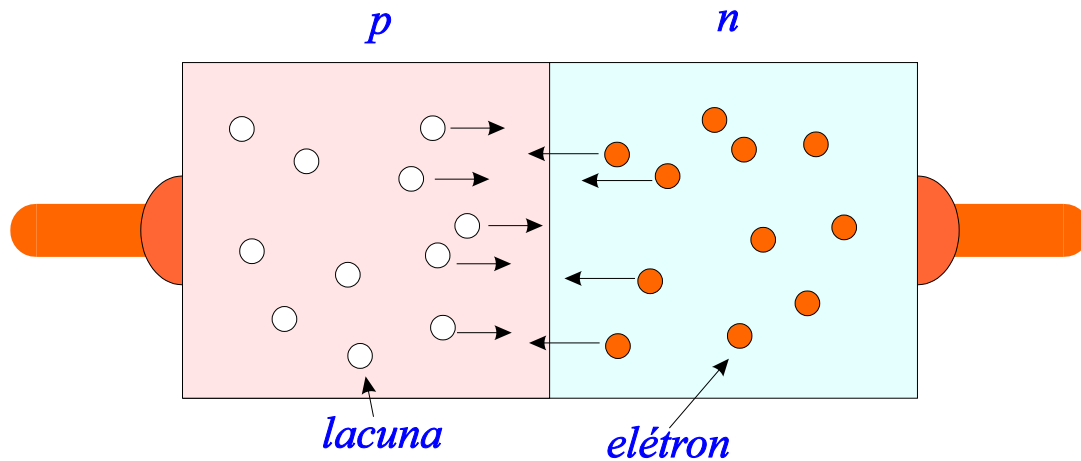


Fig.13 Difusão de elétrons e lacunas logo após a formação da junção pn .

Durante o processo de difusão, parte dos elétrons livres se recombinam com lacunas na região próxima à junção. A diminuição do número de elétrons livres existentes inicialmente do lado n que conseguiram se difundir e recombinar com as lacunas no lado p , produz uma região de cargas positivas do lado n e negativas do lado p da junção.

Conforme ilustrado na **Fig.14**, as cargas produzidas nas proximidades da junção são cargas fixas à rede cristalina. Essa região de cargas próxima à junção é denominada **região de cargas descobertas** ou **região de depleção**.

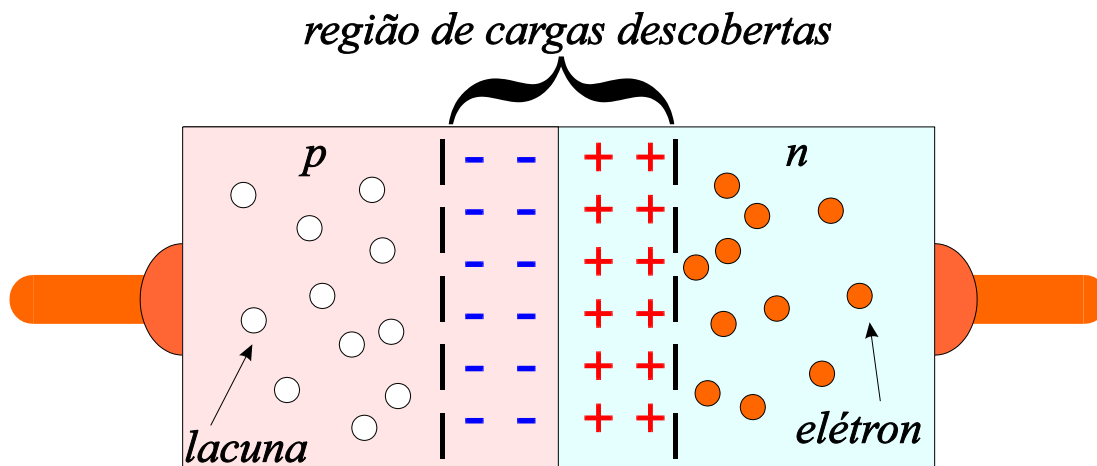



Fig.14 Região de cargas descobertas nas proximidades da junção pn .

Com o aparecimento da região de depleção, o transporte de elétrons para o lado p é bloqueado, pois estes são repelidos da região negativamente carregada do lado p . O mesmo efeito se aplica para lacunas cujo transporte para o lado n é repellido pelas cargas positivas existentes no lado n da junção.

Portanto, imediatamente após a formação da junção, uma diferença de potencial positiva é gerada entre os lados n e p . Essa **barreira de potencial** previne a continuação do transporte de portadores através da junção pn não polarizada.

 **Imediatamente após a formação da junção pn , aparece uma barreira de potencial que é positiva do lado n e negativa do lado p da junção.**

A tensão V_B proporcionada pela barreira de potencial no interior do diodo, depende do material utilizado na sua fabricação. Valores aproximados para os diodos de germânio e silício são $V_B = 0,3 \text{ V}$ e $V_B = 0,7 \text{ V}$, respectivamente.

Não é possível medir diretamente o valor de V_B aplicando um voltímetro conectado aos terminais do diodo, porque essa tensão existe apenas em uma pequena região próxima à junção. No todo, o componente é eletricamente neutro, uma vez que não foram acrescentados nem retirados portadores do cristal.

ASPECTO E REPRESENTAÇÃO DO DIODO

O diodo semicondutor é representado em diagramas de circuitos eletrônicos pelo símbolo ilustrado na **Fig.15**. O terminal da seta representa o material p , denominado de **ânodo** do diodo, enquanto o terminal da barra representa o material n , denominado de **cátodo** do diodo.

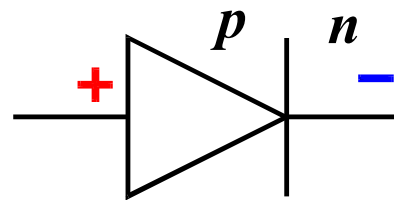


Fig.15 Representação do diodo.

A identificação dos terminais do componente real pode aparecer na forma de um símbolo impresso sobre o corpo do componente ou alternativamente, o cátodo do diodo pode ser identificado através de um anel impresso na superfície do componente, conforme ilustrado na **Fig. 16**.

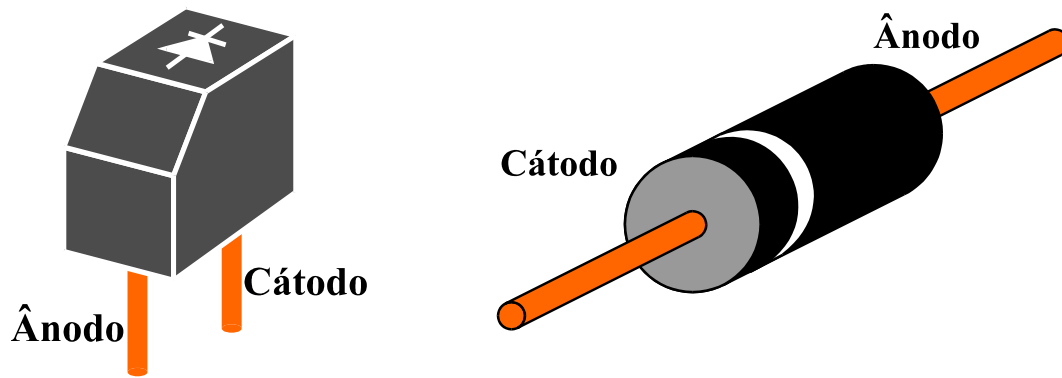


Fig.16 Formas de identificação dos terminais do diodo semicondutor para dois tipos comuns de encapsulamento.

Observa-se que o comportamento de qualquer componente eletrônico depende diretamente da sua temperatura de trabalho. Essa **dependência térmica** é um fator importante que deve ser considerado quando se projeta ou se montam circuitos com esses componentes.

APLICAÇÃO DE TENSÃO SOBRE O DIODO

A aplicação de tensão sobre o diodo estabelece a forma como o componente se comporta eletricamente. A tensão pode ser aplicada ao diodo pela **polarização direta** ou pela **polarização inversa** do componente, conforme examinado a seguir.

POLARIZAÇÃO DIRETA

Polarização direta é uma condição que ocorre quando o lado p é submetido a um potencial positivo relativo ao lado n do diodo, conforme ilustrado na **Fig. 17**.

Nessa situação, o pólo positivo da fonte repele as lacunas do material p em direção ao pólo negativo, enquanto os elétrons livres do lado n são repelidos do pólo negativo em direção ao pólo positivo.

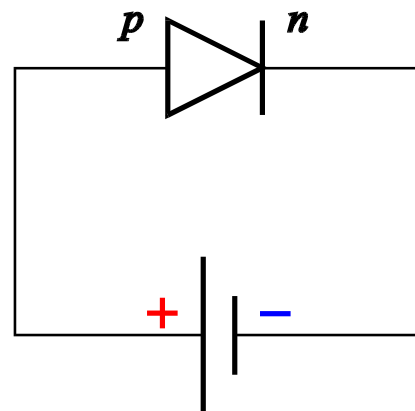


Fig.17 Diodo submetido à polarização direta.

Na situação ilustrada na **Fig.18**, o valor da tensão aplicada ao diodo é inferior ao valor V_B da barreira de potencial. Nessa condição, a maior parte dos elétrons e lacunas não têm energia suficiente para atravessar a junção.

Como resultado, apenas alguns elétrons e lacunas têm energia suficiente para penetrar a barreira de potencial, produzindo uma pequena corrente elétrica através do diodo.

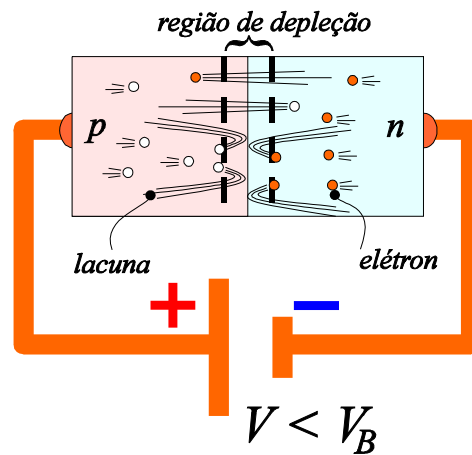


Fig.18 Diodo sob polarização direta para $V < V_B$.

Se a tensão aplicada aos terminais do diodo excede o valor da barreira de potencial, lacunas do lado p e elétrons do lado n adquirem energia superior àquela necessária para superar a barreira de potencial, produzindo como resultado um grande aumento da corrente elétrica através do diodo, como mostrado na **Fig. 19**.

Quando o diodo está polarizado diretamente, conduzindo corrente elétrica sob a condição $V > V_B$, diz-se que **o diodo está em condução**.

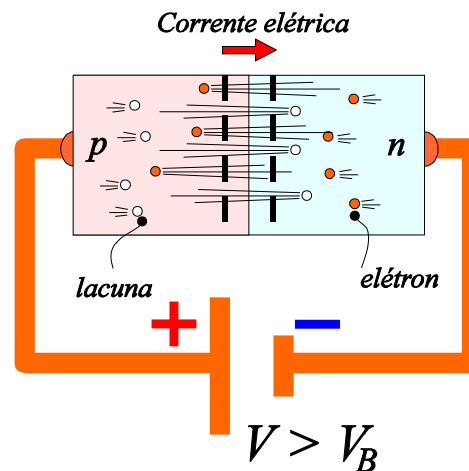


Fig.19 Diodo sob polarização direta para $V > V_B$.



Um diodo está em condução quando polarizado diretamente sob a condição $V > V_B$.

POLARIZAÇÃO INVERSA

A polarização inversa de um diodo ocorre quando o lado n fica submetido a um potencial positivo relativo ao lado p do componente, como mostrado na **Fig.20**.

Nessa situação, os pólos da fonte externa atraem os portadores livres majoritários em cada lado da junção; ou seja, elétrons do lado n e lacunas do lado p são afastados das proximidades da junção, conforme ilustrado na **Fig.21**.

Com o afastamento dos portadores majoritários, aumenta não só, a extensão da região de cargas descobertas, como também o valor da barreira de potencial através da junção.

Com o aumento da barreira de potencial, torna-se mais difícil o fluxo, através da junção, de elétrons injetados pela fonte no lado p e de lacunas no lado n . Como resultado, a corrente através do diodo tende praticamente a um valor nulo.

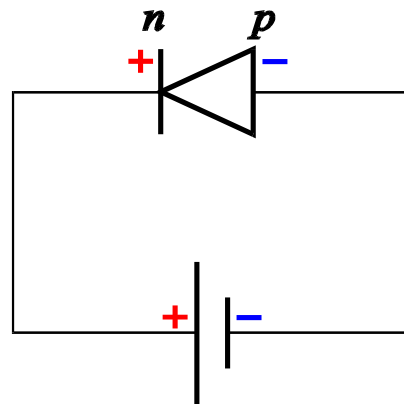


Fig.20 Diodo sob polarização inversa.

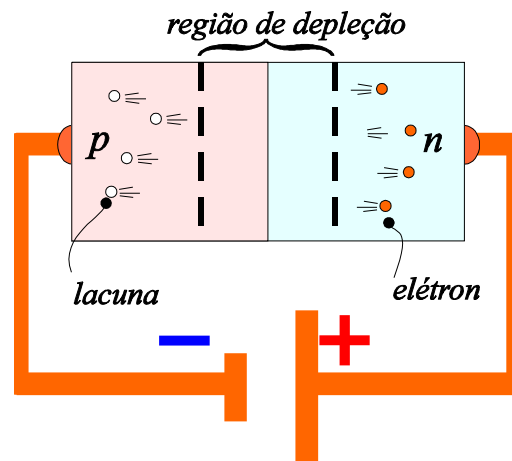


Fig.21 Região de depleção de um diodo sob polarização inversa.

Quando o diodo está sob polarização inversa, impedindo o fluxo de corrente através de seus terminais, diz-se que **o diodo está em bloqueio ou na condição de corte**.



Um diodo inversamente polarizado bloqueia o fluxo de corrente elétrica.

CARACTERÍSTICA ELÉTRICA DO DIODO SEMICONDUTOR

É sempre conveniente modelar um determinado componente eletrônico através de seu **circuito equivalente**. O circuito equivalente é uma ferramenta largamente utilizada em eletrônica para representar um componente com características não comuns, por um circuito consistindo de componentes mais simples, tais como interruptores, resistores, capacitores etc.

No caso do diodo semicondutor, o circuito equivalente se torna bastante simplificado quando o diodo é considerado ideal, conforme descrito a seguir.

O DIODO SEMICONDUTOR IDEAL

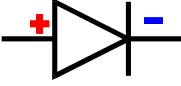

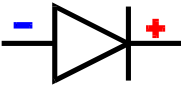

Por diodo ideal entende-se um dispositivo que apresenta características ideais de condução e bloqueio.

Um diodo ideal, polarizado diretamente, deve conduzir corrente elétrica sem apresentar resistência, comportando-se como um interruptor fechado, como ilustrado na segunda linha da **Tabela 1**. O interruptor fechado é, portanto, o circuito equivalente para o diodo ideal em condução.

Polarizado inversamente, o diodo semicondutor ideal deve comportar-se como um isolante perfeito, impedindo completamente o fluxo de corrente. O interruptor aberto ilustrado na terceira linha da **Tabela 1** é, portanto, o circuito equivalente para o diodo ideal na condição de corte.

Em resumo, o diodo ideal comporta-se como um interruptor, cujo estado é controlado pela tensão aplicada aos seus terminais.

Tabela 1 Circuitos equivalentes para o diodo ideal.

Estado	Polarização	Circuito equivalente
Condução		
Bloqueio		

MODELO SEMI-IDEAL DO DIODO SEMICONDUTOR

O diodo ideal é um modelo simplificado do diodo real, pois naquele modelo alguns parâmetros relacionados à fabricação e às propriedades de materiais semicondutores são desprezados. Modelos mais realísticos do diodo operando em condução ou em bloqueio são descritos a seguir.

Diodo em condução

Com respeito às características de condução do diodo semicondutor, deve-se levar em conta que o diodo entra em condução efetiva apenas a partir do momento em que a tensão da fonte externa atinge um valor ligeiramente superior ao valor V_B da barreira de potencial.

Deve-se também considerar a existência de uma resistência elétrica através da junção quando o diodo está sob polarização direta. Essa resistência existe em qualquer semicondutor, devido a colisões dos portadores com a rede cristalina do material. O valor da resistência interna dos diodos em estado de condução é normalmente inferior a 1Ω .

Assim, um modelo mais aprimorado para o circuito equivalente do diodo em condução pode ser obtido pela associação série de um resistor R_c , representativo da resistência direta de condução, com uma fonte de tensão V_B correspondente ao valor da barreira de potencial na junção, como mostrado na Fig.22.

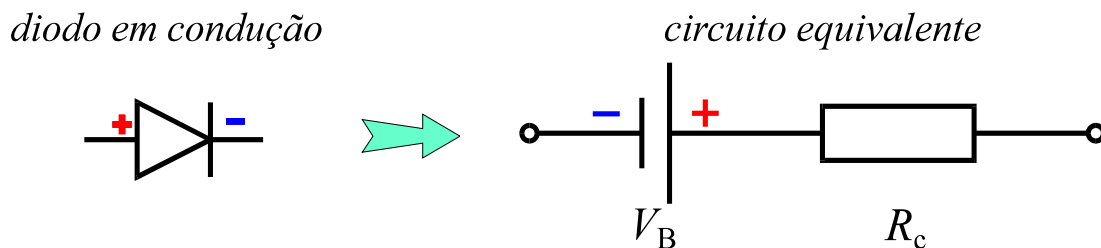
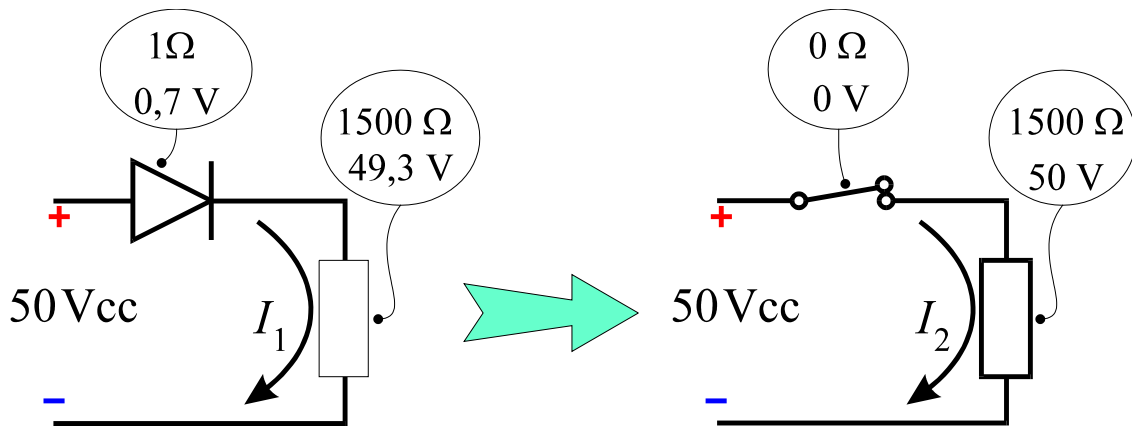


Fig.22 Modelo semi-ideal do diodo semicondutor em condução.

Em situações em que o diodo é utilizado em série com componentes que exibem resistências muito superiores à sua resistência de condução, esta pode ser desprezada e o diodo pode ser considerado como ideal, sem que se incorra em um erro significativo.

No circuito da Fig.23, por exemplo, o valor da resistência externa é 1.500 vezes superior à resistência de condução do diodo, e o erro relativo cometido no

cálculo da corrente do circuito ao se considerar o diodo como ideal é de apenas 1,5%.



$$I_1 = \frac{49,3}{1501} \text{ A} = 0,0328 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{50}{1500} \text{ A} = 0,0333 \text{ A}$$

$$\text{Erro relativo(\%)} = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \times 100 = \frac{0,0333 - 0,0328}{0,0328} \times 100 = \frac{0,0005}{0,0328} \times 100 = 1,5\%$$

Fig.23 Circuito com diodo submetido a condução e cálculo do erro cometido ao se utilizar o diodo ideal como modelo.

Diodo em bloqueio

Efeitos associados à **temperatura** e a **absorção de fótons** nas proximidades da junção de um diodo, possibilitam a geração de uma pequena quantidade de **portadores minoritários**, ou mais precisamente, lacunas no lado *n* e elétrons livres no lado *p*. Conseqüentemente, sempre existe uma **corrente de fuga**, quando o diodo é inversamente polarizado, correspondendo à passagem de portadores minoritários através da junção. Essa corrente de fuga é geralmente da ordem de alguns microampères, o que indica que a resistência da junção inversamente polarizada pode chegar a vários megahoms.

O diodo em bloqueio pode, portanto, ser modelado a partir do circuito equivalente mostrado na Fig.24.

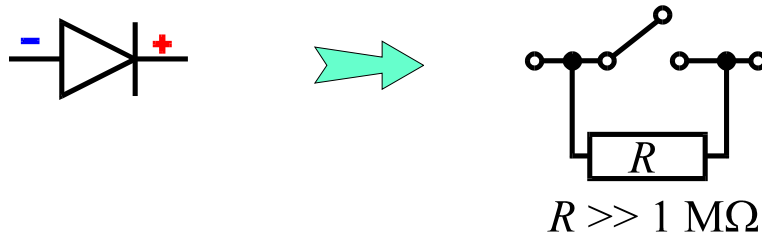


Fig.24 Circuito equivalente para o diodo em bloqueio.

CURVA CARACTERÍSTICA DO DIODO

O comportamento de qualquer componente eletrônico pode ser expresso através de uma **curva característica** ou **curva VI** que representa a relação entre tensão e corrente através dos terminais do componente. Dessa forma, para cada valor da tensão aplicada, pode-se, a partir dos dados da curva característica, obter o valor da corrente que flui no dispositivo e vice-versa. A curva característica do diodo serve para determinar seu comportamento real qualquer que seja o seu estado de polarização, conforme examinado a seguir.

Região de condução

Durante a condução, uma corrente I_d flui através do diodo, conforme ilustrado na Fig.25. A medida que aumenta a corrente injetada I_d , a queda de tensão V_d , observada através dos terminais do diodo, aumenta muito pouco em relação ao valor V_B , como consequência do baixíssimo valor da resistência de condução do diodo.

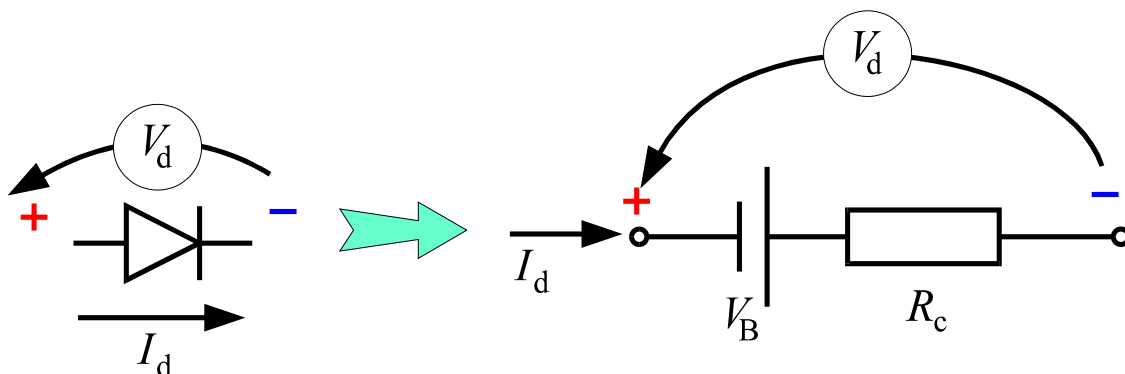


Fig.25 Modelo do diodo no regime de condução e parâmetros utilizados na definição da curva característica.

Uma representação gráfica dessa relação tensão×corrente para o caso do diodo de silício é mostrada na **Fig.26**. Nessa representação, a curva característica do diodo é obtida simplesmente pela união de todos os pontos representativos dos pares de valores possíveis de corrente I_d e tensão V_d , através do diodo no regime de condução.

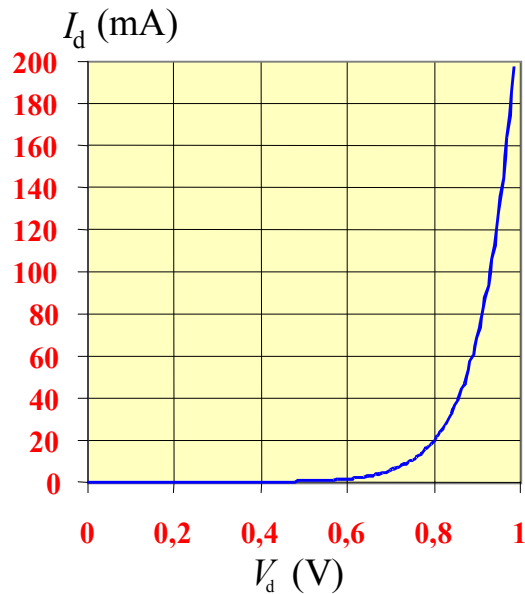


Fig.26 Curva característica do diodo de silício no regime de condução.

A obtenção do valor de tensão V_0 que corresponde a um dado valor de corrente I_0 , é feita conforme ilustrado na **Fig.27**. Deve-se traçar inicialmente uma linha horizontal a partir do ponto sobre o eixo vertical correspondente ao valor I_0 . Essa linha intercepta a curva no ponto P indicado na **Fig.27**. Traçando-se a partir de P uma linha vertical, obtém-se a interseção com o eixo horizontal no ponto V_0 que é o valor desejado da queda de tensão nos terminais do diodo.

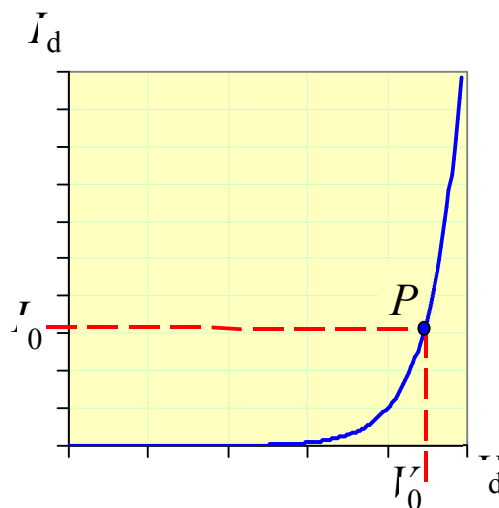


Fig.27 Representação de um par de valores de tensão e de corrente na curva característica.

Através da curva verifica-se também que, enquanto a tensão sobre o diodo não ultrapassa um valor limite, que corresponde ao potencial da barreira V_B , a corrente através do diodo permanece muito pequena. Essa condição está indicada na **Fig.28**, para um tipo de diodo de silício, onde $I_d < 6$ mA para $V_d < 0,7$ V. A partir do valor limite $V_B = 0,7$ V, a corrente através do diodo pode aumentar substancialmente sem que isso cause um aumento significativo na queda de tensão através do diodo. Verifica-se, portanto, que na faixa de valores $V_d > 0,7$ V, o diodo comporta-se praticamente como um resistor de baixíssima resistência.

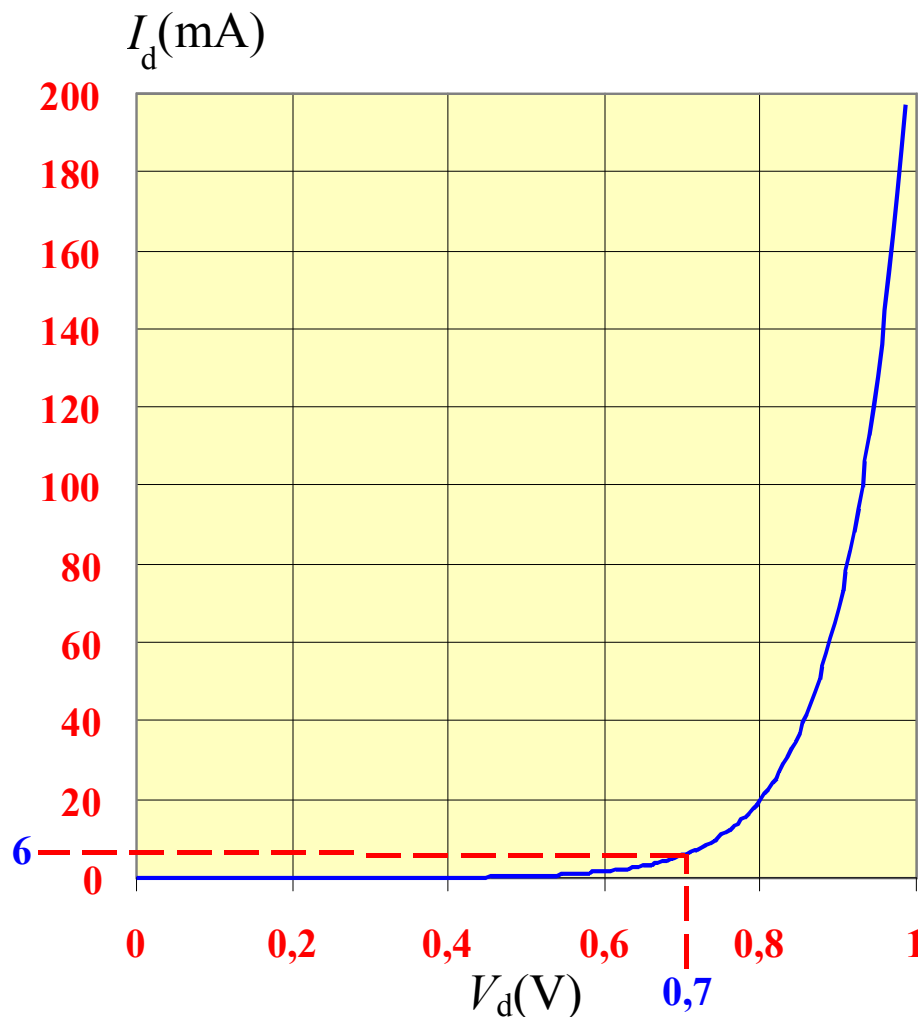


Fig.28 Curva característica para um tipo comum de diodo de silício.

Região de bloqueio

Como discutido anteriormente, existe uma corrente de fuga quando o diodo é inversamente polarizado. Essa corrente de fuga aumenta gradativamente com o aumento da tensão inversa nos terminais do diodo. Esse comportamento pode ser observado na região de tensões e correntes negativas do gráfico da curva característica mostrado na **Fig.29**. Note-se que, para este tipo de diodo de silício, a corrente de fuga **satura** no valor de 1 microampère negativo.

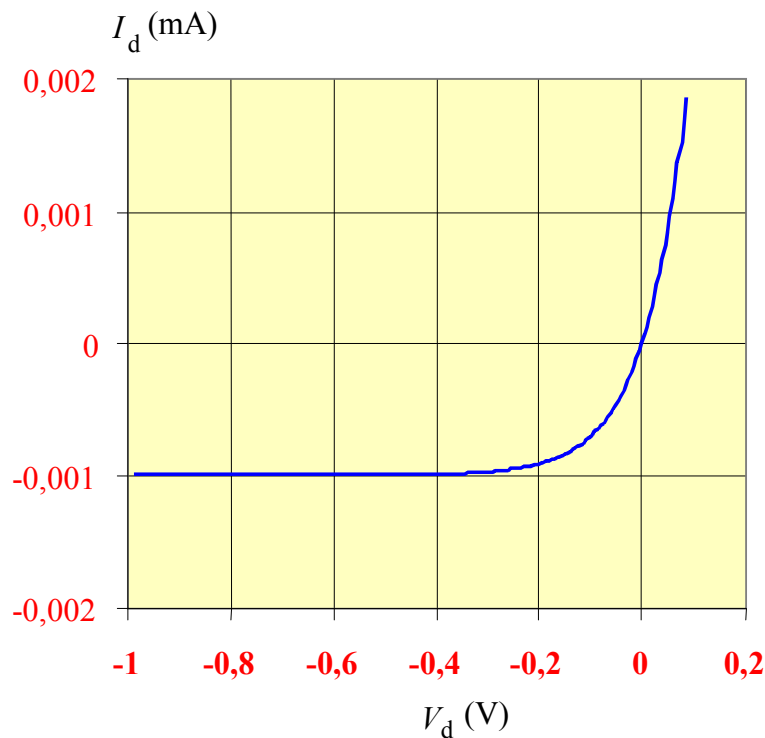


Fig.29 Gráfico exibindo a porção da curva característica em que o diodo é inversamente polarizado.

Como em polarização direta a corrente é tipicamente mais de 1.000 vezes superior ao valor da corrente de polarização inversa, a representação das duas regiões de operação em um mesmo gráfico é geralmente feita utilizando-se a escala de mA na região de tensões positivas, e a escala de μ A na região de tensões negativas. Essa forma de representação está ilustrada na **Fig.30**, para um tipo comum de diodo de silício, onde se pode visualizar detalhadamente o comportamento da curva característica em ambos os regimes de operação.

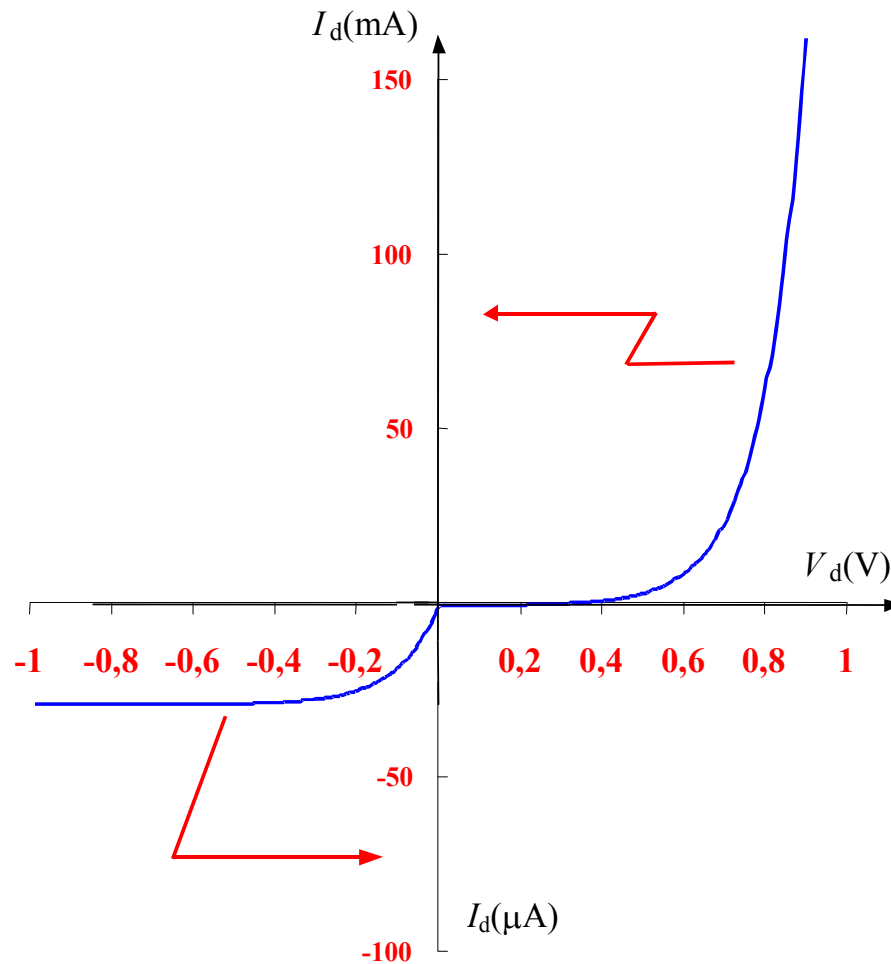


Fig.30 Curva característica de um diodo de silício com escala vertical dupla para detalhar os regimes de polarização direta e inversa.

LIMITES DE OPERAÇÃO DO DIODO

Os limites de operação do diodo em *cc* estabelecem os valores máximos de tensão e corrente que podem ser aplicados ao componente em circuitos de corrente contínua, sem provocar danos a sua estrutura.

Analisando o comportamento do diodo no regime de condução, verifica-se que a corrente de condução é o fator diretamente influenciado pelo circuito de alimentação do diodo. A queda de tensão nos terminais do diodo no regime de condução é praticamente independente do circuito, mantendo-se em um valor próximo ao valor do potencial da barreira do dispositivo, ou seja, $0,7 \text{ V}$ para o silício e $0,3 \text{ V}$ para o germânio.

No regime de polarização inversa, a tensão através do diodo é o parâmetro diretamente influenciado pelo circuito de alimentação. A corrente de fuga não é muito influenciada pelo circuito externo pois depende apenas das propriedades materiais do diodo.

Dessa forma, os limites de operação do diodo são definidos pela **corrente de condução máxima** e **tensão inversa máxima** descritas a seguir.

Corrente de condução máxima

A corrente máxima de condução de um diodo é fornecida pelo fabricante em um folheto de especificações técnicas. Nesses folhetos, a corrente máxima de condução aparece designada pela sigla I_F , com a abreviação F simbolizando a palavra inglesa *forward* que significa *para a frente, direto(a)* etc. Na **Tabela 2** são especificados valores de I_F para dois tipos comerciais de diodos.

Tabela 2 Valores de I_F para dois diodos.

TIPO	I_F
SKE 1/12	1,0 A
1n4004	1,0 A

Tensão inversa máxima

Sob polarização inversa, o diodo opera no regime de bloqueio. Nessa condição, praticamente toda tensão externamente aplicada atua diretamente entre os terminais do diodo, conforme ilustrado na **Fig.31**.

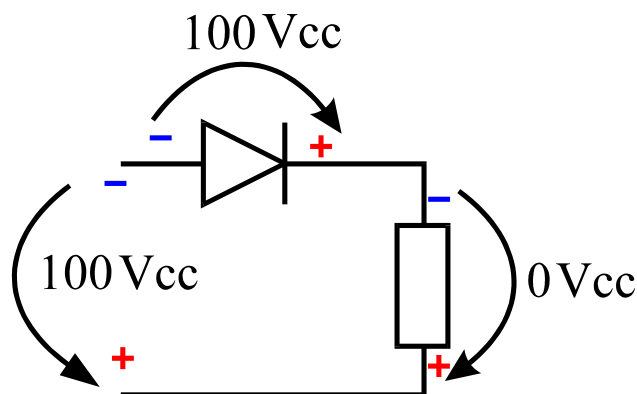


Fig.31 Circuito alimentando diodo sob polarização inversa.

Cada diodo tem a estrutura preparada para suportar um determinado valor máximo da tensão inversa. A aplicação de um valor de tensão inversa **superior** àquele especificado pelo fabricante, provoca um aumento significativo da corrente de fuga suficiente para danificar o componente.

Os fabricantes de diodos fornecem nos folhetos de especificação o valor da tensão inversa máxima que o diodo suporta sem sofrer ruptura. Esse valor é designado por V_R . Na **Tabela 3** estão listadas as especificações de alguns diodos comerciais com os respectivos valores do parâmetro V_R .

Tabela 3 Especificações de diodos e tensões inversas máximas correspondentes.

TIPO	V_R
1N4001	50 V
BY127	800 V
BYX13	50 V
SKE1/12	1.200 V

TESTE DE DIODOS SEMICONDUTORES

As condições de funcionamento de um diodo podem ser verificadas pela medição da resistência através de um multímetro.

Os testes realizados para determinar as condições de um diodo resumem-se a uma verificação da resistência do componente nos sentidos de condução e bloqueio, utilizando a tensão fornecida pelas baterias do ohmímetro. Entretanto, existe um aspecto importante com relação ao multímetro que deve ser considerado ao se testarem componentes semicondutores:



Existem alguns multímetros que, quando usados como ohmímetros, têm polaridade real invertida com relação à polaridade indicada pelas cores das pontas de prova.

Isso implica que, para estes multímetros:

Ponta de prova preta	\Rightarrow	Terminal positivo
Ponta de prova vermelha	\Rightarrow	Terminal negativo

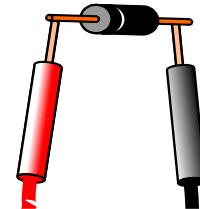
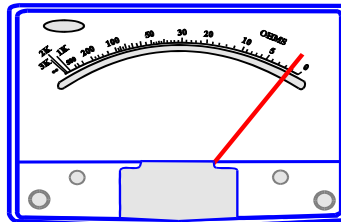
Para realizar o teste com segurança deve-se utilizar um multímetro cuja polaridade real das pontas de prova seja conhecida ou consultar o esquema do multímetro para determinar as polaridades reais.

EXECUÇÃO DO TESTE

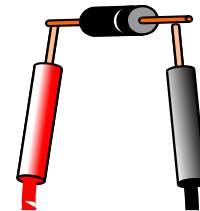
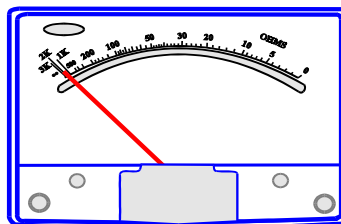
Para determinar se o diodo está defeituoso, não é necessário identificar os terminais do ânodo e do cátodo. Basta apenas conectar as pontas de prova do multímetro aos terminais do diodo e alterná-las para verificar o comportamento do diodo quanto às duas polaridades possíveis.

A seguir são descritos possíveis testes de diodos que podem ser realizados com o multímetro.

Diodo em boas condições: O ohmímetro deve indicar baixa resistência para um sentido de polarização e alta resistência ao se inverterm as pontas de prova nos terminais do diodo, conforme ilustrado na **Fig.32**.



Diodo em curto: Se as duas leituras indicarem baixa resistência, o diodo está em curto, conduzindo corrente elétrica nos dois sentidos.



Diodo aberto (interrompido eletricamente): Se as duas leituras indicarem alta resistência o diodo está em aberto, bloqueando a passagem de corrente elétrica nos dois sentidos.

Fig.32 Teste das condições do diodo com um multímetro. Neste exemplo, o diodo está em boas condições e a cor vermelha corresponde à polaridade positiva.

Identificação do ânodo e cátodo de um diodo: Em muitas ocasiões, a barra de identificação do cátodo no corpo de um diodo pode estar apagada. Nessas situações, os terminais do diodo poderão ser identificados com auxílio do

multímetro. O diodo exibe baixa resistência quando a ponta de prova com a polaridade real positiva é conectada ao ânodo. Basta, portanto, testar o diodo conectando-se as pontas de prova nas duas posições possíveis. Quando o multímetro indicar baixa resistência, o seu ânodo estará conectado à ponta de prova com polaridade real positiva.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a característica elétrica de um material semicondutor?
2. Quais são as duas formas naturais do carbono puro e quais as suas características?
3. Quantos elétrons de valência possuem os seguintes compostos: (a) germânio, (b) silício, (c) arsênio e (d) fósforo.
4. Qual a característica elétrica de cristais puros formados por átomos tetravalentes?
5. O que é a dopagem de um semicondutor?
6. O que são um semicondutores tipo n e tipo p ?
7. Que átomos de impureza são utilizados na dopagem do silício para formar um semicondutor tipo p ? E para formar um semicondutor tipo n ?
8. O que são lacunas em um semicondutor?
9. De que forma a temperatura altera a condutividade elétrica de um semicondutor?
10. O que ocorre imediatamente após a formação de uma junção pn ?
11. Sob que condições um diodo entra em condução ou em bloqueio?
12. Quais os circuitos equivalentes referentes ao diodo ideal e semi-ideal?
13. Qual o valor típico de tensão que deve ser aplicada a um diodo de germânio para que ele conduza? E para o diodo de silício?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Roberts & BRANDT, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo, E. P. U., 1975, 49p. il. (Eletrônica Industrial, 1).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 8.^a ed., São Paulo, Érica, 1984, 580p. il.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento , 1979 (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

TRAINING PUBLICATIONS DIVISION OF PERSONEL PROGRAM SUPPORT ACTIVITY. Curso de eletrônica. São Paulo, Hemus, c1975, 178p.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.