

MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS**VOLUME 6****SUMÁRIO**

ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DIODO ZENER - Luiz Carlos Cavagnoli	558
DIODO SCHOTTKY - Larissa Andréia Wagner Machado	572
DIODOS SEMICONDUTORES - Rodrigo Alexssandre Budel.....	592
LED: DIODO EMISSOR DE LUZ - Daniel Motter	610
MENRISTOR, UM NOVO ELEMENTO PASSIVO - Érika Suek.....	633
APLICAÇÃO DA CIENCIA DOS MATERIAIS: DIODOS - Diogo Marujo	641

ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DIODO ZENER

Luiz Carlos Cavagnoli

1. INTRODUÇÃO

Os componentes semicondutores são utilizados na sua diversidade nos circuitos eletrônicos. Até o momento foram estudados teoricamente e realizadas montagens de circuitos envolvendo diodos semicondutores, resistores, capacitores e transformadores. Além destes componentes, também são intensamente utilizados os diodos zener e os diodos emissores de luz (LED).

De uma maneira geral, semicondutores são sólidos nos quais à temperatura de 0 K (zero Kelvin) seus elétrons preenchem todos os estados disponíveis na banda de energia mais alta, isto é a banda de valência.

Um fato conhecido na física do estado sólido é que a condutividade elétrica é devida somente aos elétrons em bandas parcialmente cheias. Portanto a condutividade dos semicondutores à temperatura ambiente é causada pela excitação de uns poucos elétrons da banda de valência para a banda de condução. A quantidade de energia necessária para tirar um elétron da banda de valência e 'libertá-lo' na banda de condução é que determina se um sólido será um condutor, semicondutor ou isolante. Para um semicondutor esta energia é em torno de 1eV (elétron-volt), para isolantes esta energia é dezenas de vezes maior. Nos condutores existem sempre bandas de energia semi-preenchidas, portanto não existe uma quantidade mínima de energia necessária para se 'libertar' seus elétrons.

Nos semicondutores a condutividade não é causada apenas pelos elétrons que conseguiram pular para a banda de condução. Os buracos também chamados de *lacunas* que eles deixaram na banda de condução também dão contribuição importante. Tão importante que estes buracos são tratados como partículas normais com carga positiva, oposta à do elétron. Dentro dos elementos que utilizam esta dopagem está o diodo.

Diodo semicondutor é um dispositivo ou componente eletrônico composto de cristal semicondutor de silício ou germânio numa película cristalina cujas faces opostas são *dopadas* por diferentes gases durante sua formação. É o tipo mais simples de componente eletrônico semicondutor, usado como retificador de corrente elétrica. Dentro dos vários tipos de diodos está o Zener.

Diodo Zener é um tipo de diodo especialmente projetado para trabalhar na região de avalanche, ou seja, na região de ruptura de tensão reversa da junção PN.

2. OS MATERIAIS COMUNS

Os materiais são constituídos por átomos, os quais são constituídos de núcleo e eletrosfera. No núcleo encontram-se os prótons e os nêutrons, enquanto que na eletrosfera encontram-se os elétrons, distribuídos em diversas camadas ou níveis.

O número de elétrons varia de material para material. Com isto existe uma variação no número de elétrons da última camada (camada de valência).

Para que um átomo esteja estável é necessário que a primeira camada possua dois elétrons e a última oito elétrons, para este ficar em condição estável, como um gás nobre. Isto se consegue na natureza, muitas vezes através de doação e recepção de elétrons, ou através do compartilhamento de elétrons entre dois átomos de dois materiais, (covalência).

3. OS SEMICONDUTORES

Os materiais semicondutores são materiais, os quais possuem uma resistência situada entre a dos materiais condutores e isolantes. Os principais materiais semicondutores utilizados na eletrônica são o Germânio (Ge) e o Silício (Si), sendo este último o mais utilizado. Recentemente está sendo investindo em pesquisas com materiais semicondutores para aplicação na eletrônica fabricado a partir do carbono, pesquisas estas que já obtiveram sucesso.

Nos materiais semicondutores, a camada de valência possui 4 elétrons, como o material tende a possuir oito elétrons na camada de valência, e o elemento semicondutor só possui quatro, este acomoda os seus átomos, simetricamente entre si, constituindo uma estrutura cristalina, através de ligações covalentes.

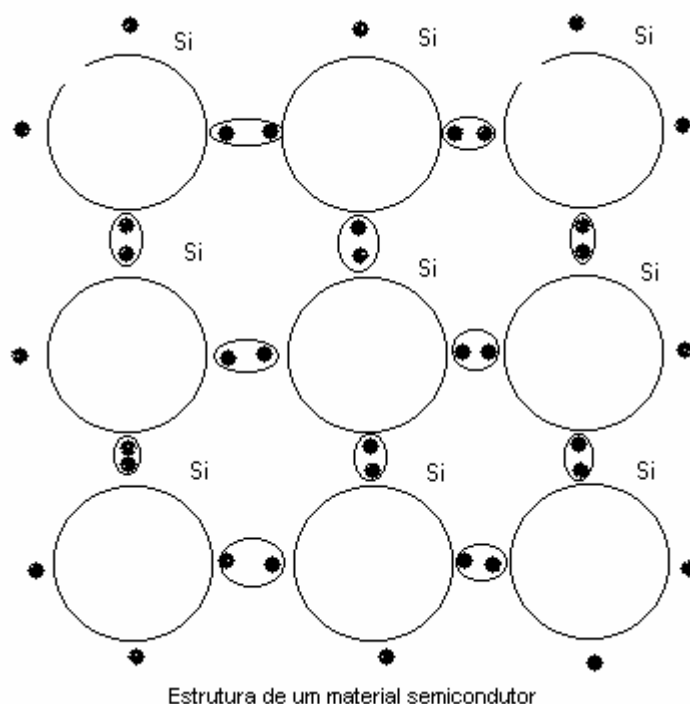


FIGURA 1 – Ligações entre átomos de silício.

3.1 FORMAÇÃO DOS ELEMENTOS TIPO P E N

Devido a tendência de transformar-se em uma estrutura simétrica, um material semicondutor quase não possui elétrons livres.

Para se utilizar efetivamente os materiais semicondutores, são introduzidos elementos adicionais, nas estruturas cristalinas denominadas “impurezas”, através de processos de injeção ou difusão.

Estas impurezas são elementos cujos átomos possuem três ou cinco elétrons na camada de valência. Estas impurezas são introduzidas dentro do material semicondutor em pequenas quantidades.

A tendência de formar uma estrutura simétrica faz com que os átomos de “impurezas” se acomodem de tal maneira que produzam elétrons livres, portanto que podem ser deslocados com facilidade (o quinto elétron de cada átomo da impureza). Ou a falta de elétrons no caso da adição de elementos com três elétrons na última camada.

3.2 FORMAÇÃO DO MATERIAL TIPO P

Ao realizar a dopagem do material semicondutor (Silício ou Germânio) através da introdução de impurezas com três elétrons na camada de valência como o

Alumínio, o Índio, o Boro ou o Gálio, temos a formação de ligação covalente entre o material semiconductor e a impureza. Ao introduzir-mos um elemento deste tipo, numa das ligações faltar um elétron, pois o elemento contribuiu com apenas três elétrons. Esta falta de elétrons comporta-se como um material apto a receber elétrons (material com carga positiva), sendo assim este pode receber um elétron de outra união.

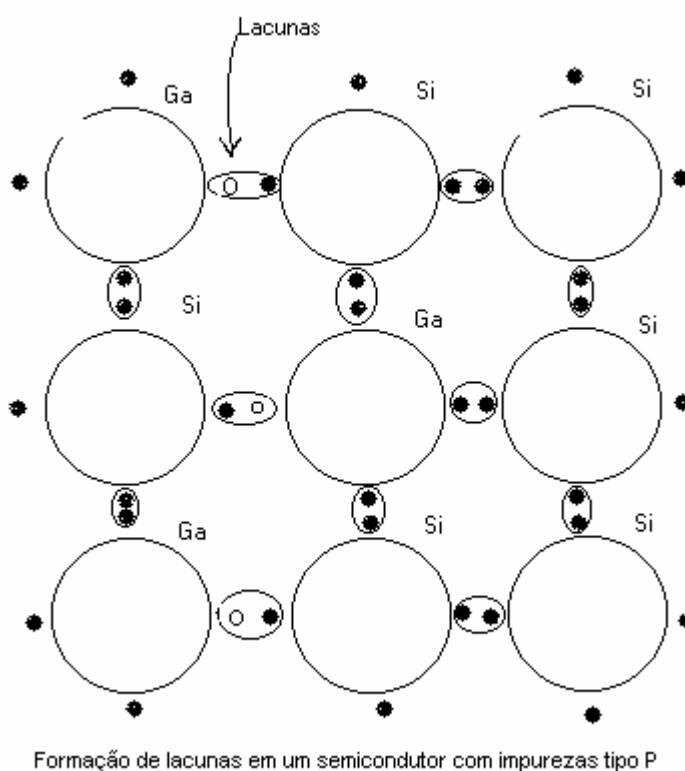


FIGURA 2 – Formação de lacunas em um semiconductor com impurezas tipo p

3.3 FORMAÇÃO DO ELEMENTO TIPO N

Ao associarmos um elemento com cinco elétrons na última camada como o Antimônio, o Fósforo, ou Arsênio, ao material semiconductor, os mesmos irão formar ligações covalentes, porém haverá um elétron, que poderá mover-se pela estrutura com maior facilidade, está formado o material com carga negativa.

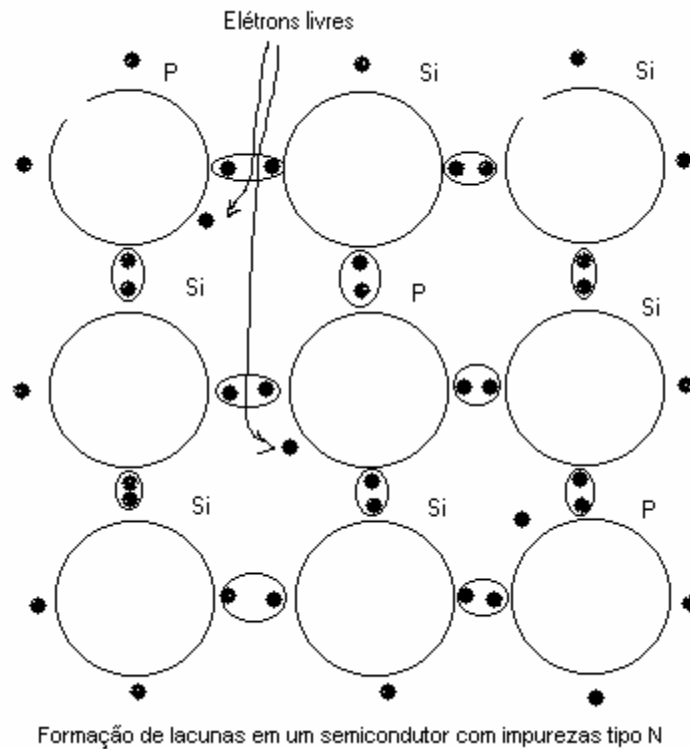


FIGURA 3 – Formação de lacunas em um semiconductor com impurezas tipo n

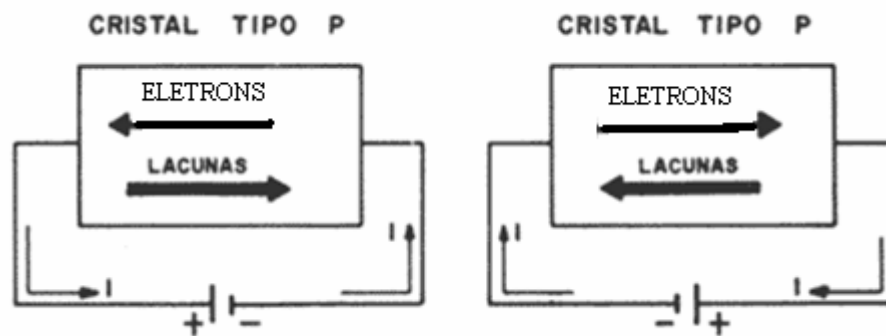


FIGURA 4 – condução por por elétrons na banda de condução e lacunas na banda de valência.

3.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS SEMICONDUTORES

Nos condutores, um aumento na temperatura, ocasiona um aumento da resistência oferecida a passagem da corrente elétrica. Já nos semicondutores, acontece o contrário, um aumento da temperatura ocasiona uma redução da resistência oferecida a passagem da corrente elétrica, devido a maior repulsão causada na união dos mesmos.

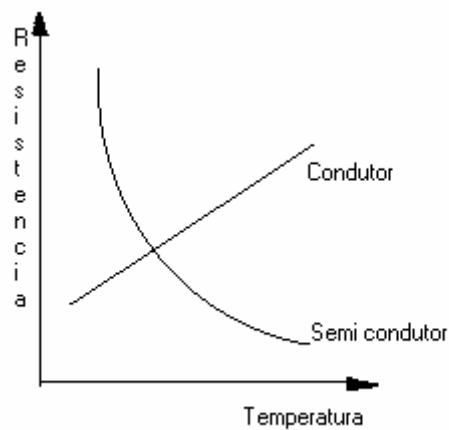


FIGURA 5 – Gráfico da variação da resistência em função da temperatura para condutores e semicondutores.

3.5 ESTRUTURA CRISTALINA DOS SEMICONDUTORES

Quando os átomos se unem para formarem as moléculas de uma substância, a distribuição e disposição desses átomos pode ser ordenada e organizada e designa-se por estrutura cristalina.

O Germânio e o Silício possuem uma estrutura cristalina cúbica como é mostrado na seguinte figura.

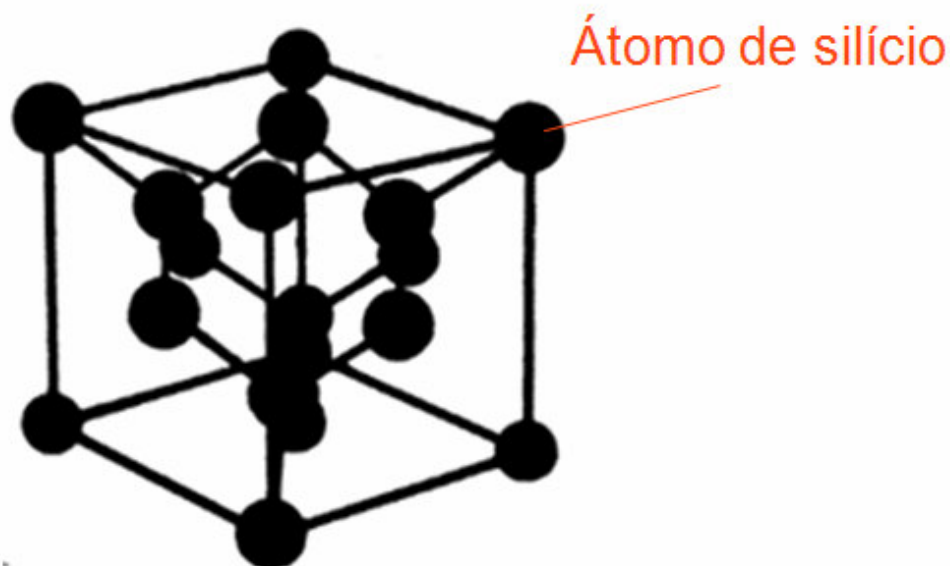


FIGURA 6 – Estrutura cristalina do silício.

Nessa estrutura cristalina, cada átomo (representado por Si) une-se a outros quatro átomos vizinhos, por meio de ligações covalentes, e cada um dos quatro

electrões de valência de um átomo é compartilhado com um eletrão do átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois electrões.

Na prática, a estrutura cristalina ilustrada na figura só é conseguida quando o cristal de silício é submetido à temperatura de zero graus absolutos (ou -273°C). Nessa temperatura, todas as ligações covalentes estão completas os átomos têm oito electrões de valência o que faz com que o átomo tenha estabilidade química e molecular, logo não há electrões livres e, conseqüentemente o material comporta-se como um isolante.

Um semiconductor intrínseco é um semiconductor no estado puro. À temperatura de zero graus absolutos (-273°C) comporta-se como um isolante, mas à temperatura ambiente (20°C) já se torna um condutor porque o calor fornece a energia térmica necessária para que alguns dos electrões de valência deixem a ligação covalente (deixando no seu lugar uma lacuna) passando a existir alguns eletrão livres no semiconductor.

Há diversas formas de se provocar o aparecimento de pares eletrão-lacuna livres no interior de um cristal semiconductor. Um deles é através da energia térmica (ou calor). Outra maneira, consiste em fazer com que um feixe de luz incida sobre o material semiconductor.

Na prática, contudo, necessitamos de um cristal semiconductor em que o número de electrões livres seja bem superior ao número de lacunas, ou de um cristal onde o número de lacunas seja bem superior ao número de electrões livres. Isto é conseguido tomando-se um cristal semiconductor puro (intrínseco) e adicionando-se a ele (dopagem), por meio de técnicas especiais, uma determinada quantidade de outros tipos de átomos, aos quais chamamos de impurezas.

Quando são adicionadas impurezas a um semiconductor puro (intrínseco) este passa a denominar-se por semiconductor extrínseco.

Quando são adicionadas impurezas a um semiconductor puro (intrínseco), este passa a ser um semiconductor extrínseco.

As impurezas usadas na dopagem de um semiconductor intrínseco podem ser de dois tipos: impurezas ou átomos dadores e impurezas ou átomos aceitadores.

Átomos dadores têm cinco eletrão de valência (são pentavalentes): Arsénio (As), Fósforo (P) ou Antimónio (Sb).

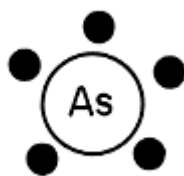


FIGURA 7 – Arsênio é pentavalente.

Átomos aceitadores têm três elétrons de valência (são trivalentes): Índio (I_n), Gálio (G_a), Boro (B) ou Alumínio (A_l).



FIGURA 8 – Índio é trivalente.

4. DIODOS

4.1 A DOPAGEM DO DIODO SEMICONDUTOR E OS CRISTAIS P E N

A dopagem no diodo é feita pela introdução de elementos dentro de cristais tetravalentes, normalmente feitos de silício e germânio. Dopando esses cristais com elementos trivalentes, obterá átomos com sete elétrons na camada de valência, que necessitam de mais um elétron para a neutralização (cristal P). Para a formação do cristal P, utiliza-se principalmente o elemento índio. Dopando os cristais tetravalentes com elementos pentavalentes, obter-se-á átomos neutralizados (com oito elétrons na camada de Valência) e um elétron excedente (cristal N).

Para a formação do cristal N, utiliza-se principalmente o elemento fósforo. Quanto maior a intensidade da dopagem, maior será a condutibilidade dos cristais, pois suas estruturas apresentarão um número maior de portadores livres (lacunas e elétrons livres) e poucas impurezas que impedem a condução da corrente elétrica. Outro fator que influencia na condução desses materiais é a temperatura. Quanto maior for sua temperatura, maior será a condutibilidade pelo fato de que a energia térmica tem a capacidade de quebrar algumas ligações covalentes da estrutura se

desfaçam, acarretando no aparecimento de mais portadores livres para a condução de veículo embriagado.

Após dopadas, cada face dos dois tipos de cristais (P e N) terá uma determinada característica diferente da oposta, gerando regiões de condução do cristal, uma com excesso de elétrons, outra com falta destes (lacunas), e entre ambas, haverá uma região de equilíbrio por recombinação de cargas positivas e negativas, chamada de região de depleção (à qual possui uma barreira de potencial).

4.2 JUNÇÃO P-N, OU BARREIRA DE POTENCIAL

Da mesma forma que os elétrons livres do cristal N se movimentam, as cargas positivas ou lacunas (buracos) conduzem corrente elétrica pelo fato de que uma lacuna é ocupada por um elétron proveniente de uma corrente elétrica que passa sobre o cristal e que força a criação de outra lacuna atrás de si. Entre as duas regiões, uma de maioria negativa, outra de maioria positiva, existe uma terceira, esta de maioria neutra, isto é, nem de carga negativa, nem de carga positiva, é a junção entre ambas, chamada de região neutra da junção **P-N**. Na *região neutra* não há excesso de elétrons nem lacunas porque alguns elétrons do material tipo N se difundem pela junção e entram em combinação com algumas lacunas (buracos) do material tipo P, reciprocamente, algumas lacunas (buracos) se difundem pela junção e entram em combinação com alguns elétrons do material do tipo N. Com a passagem de lacunas para a camada N, gera-se um pequeno potencial elétrico positivo e com a passagem de elétrons livres para a camada P, gera-se um pequeno potencial elétrico negativo, gerando uma pequena tensão interna, por isso do nome barreira de potencial, que pode chegar aproximadamente a 0,3 volts nos diodos de germânio e 0,7 volts nos diodos de silício. Essa barreira de potencial causa uma queda de tensão, interferindo na tensão sobre os outros componentes pertencentes ao mesmo circuito do diodo. Quando a tensão a que é submetido o diodo, alimentado por uma fonte geradora, é menor que sua barreira de potencial ($<0,3V$ ou $<0,7V$), a corrente elétrica é baixíssima pela oposição ao fluxo de portadores livres feita pela barreira de potencial, porém se a tensão a que for submetido o diodo for mais alta do que sua barreira de potencial, a corrente elétrica torna-se alta e a oposição dos portadores livres feita pela barreira de potencial é pequena em relação a tensão de alimentação, sendo quase desprezível.

4.3 POLARIZAÇÃO DO DIODO

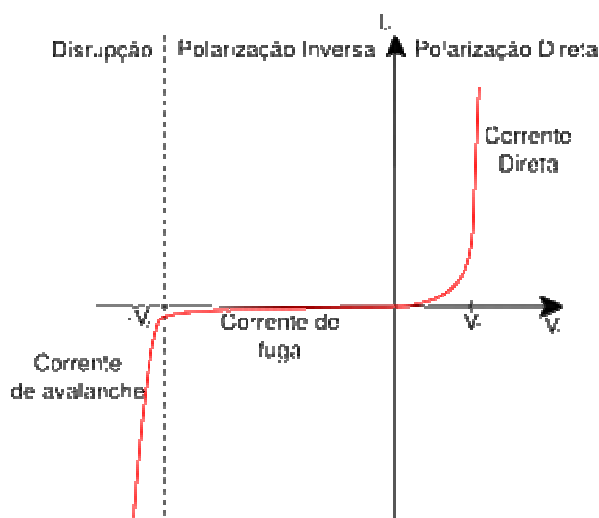


FIGURA 9 – Polarização direta e inversa do diodo.

Gráfico mostra a curva característica do comportamento do diodo em sua polarização direta e inversa

A polarização do diodo é dependente da polarização da fonte geradora. A polarização é direta quando o pólo positivo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal P(chamado de anodo) e o pólo negativo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal N(chamado de catodo). Assim, se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna do diodo, os portadores livres se repeliram por causa da polaridade da fonte geradora e conseguiram ultrapassar a junção P-N, movimentando-os e permitindo a passagem de corrente elétrica. A polarização é indireta quando o inverso ocorre. Assim, ocorrerá uma atração das lacunas do anodo(cristal P) pela polarização negativa da fonte geradora e uma atração dos elétrons livres do catodo(cristal N) pela polarização positiva da fonte geradora, sem existir um fluxo de portadores livres na junção P-N, ocasionando no bloqueio da corrente elétrica. Pelo fato de que os diodos fabricados não são ideais(contém impurezas), a condução de corrente elétrica no diodo(polarização direta) sofre uma resistência menor que 1 ohm, que é quase desprezível. O bloqueio de corrente elétrica no diodo(polarização inversa) não é total devido novamente pela presença de impurezas, tendo uma pequena corrente que é conduzida na ordem de microampéres, chamada de corrente de fuga, que também é quase desprezível.

4.4 TESTES COM O DIODO

Os diodos, assim como qualquer componente eletrônico, operam em determinadas correntes elétricas que são especificadas em seu invólucro ou são dadas pelo fabricante em folhetos técnicos. Além da corrente, a tensão inversa (quando o diodo está polarizado inversamente) também é um fator que deve ser analisado para a montagem de um circuito e que tem suas especificidades fornecidas pelo fabricante. Se ele for alimentado com uma corrente ou tensão inversa superior a que ele suporta, o diodo pode danificar, ficando em curto ou em aberto. Utilizando de um ohmímetro ou um multímetro com teste de diodo, pode-se verificar se ele está com defeito. Colocando-se as ponteiros de prova desses aparelhos nas extremidades do diodo (catodo e ânodo), verifica-se que existe condução quando se coloca a ponteira positiva no ânodo e a negativa no catodo, além de indicar isolamento quando ocorre o inverso. Assim o diodo está em perfeitas condições de operação e com isso é possível a localização do catodo e do ânodo, porém se os aparelhos de medição indicarem condução dos dois caminhos do diodo, ele está defeituoso e em curto. Se os aparelhos de medição indicarem isolamento nos dois caminhos, ele também está defeituoso e em aberto.

4.5 DIODOS ZENER

Quando a tensão inversa aplicada em um diodo atinge determinado valor, ocorre um efeito tipo ruptura. Nessa situação, o diodo passa a conduzir e pequenas variações de tensão produzem grandes variações de corrente, isto é, a curva se torna praticamente vertical.

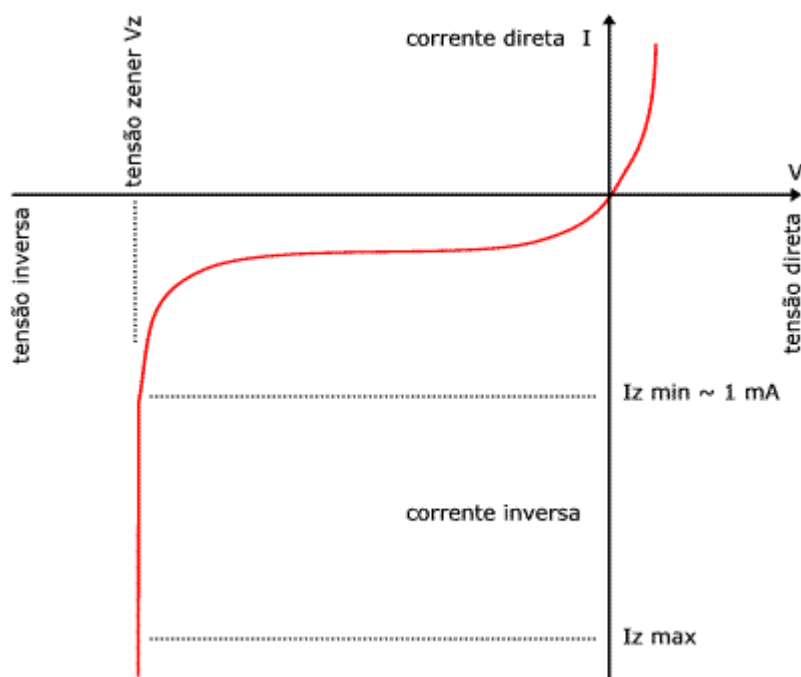


FIGURA 10 – Polarização direta e inversa do diodo zener.

Diodos comuns não devem operar nesse ponto sob pena de danificação. Mas é possível construir diodos que suportam essa condição, os chamados diodos zener.

Detalhes do mecanismo da ruptura não se encaixam no contexto desta página. Comenta-se apenas que ela pode ocorrer devido ao "efeito avalanche" ou ao "efeito zener". Na prática, ambos os efeitos estão presentes, mas o segundo é predominante nos diodos zener.

A tensão zener é a tensão inversa que se mantém quase constante em uma ampla faixa de corrente.

A Figura 10 deste tópico mostra o aspecto típico da curva de um diodo zener com destaque na área de polarização inversa.

Diodos zener comerciais são produzidos com tensões desde cerca de 4 volts até algumas centenas de volts. São amplamente utilizados para fornecer tensões de referência (constantes) em fontes estabilizadas e outros circuitos.

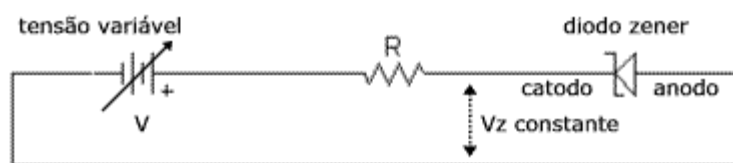


FIGURA 11 – Circuito com diodo zener.

O circuito da Figura 11 é uma configuração básica (notar o símbolo um pouco diferente do diodo de junção).

O diodo zener deve operar sempre na polarização inversa.

Supõe-se que a tensão zener do diodo seja por exemplo 5,6 V (um valor comercialmente disponível). Se a tensão variável da fonte (V) se mantém acima de 5,6 V, a tensão V_z do circuito será sempre 5,6 V para qualquer valor da tensão da fonte. É evidente que o valor de V não pode subir indefinidamente. Fica limitado pela corrente máxima ($I_z \text{ max}$ na Figura 01) que o diodo zener pode suportar.

4.5.1 EFEITO DE ZENER

Ao aplicar ao díodo uma tensão inversa de determinado valor (V_Z) é rompida a estrutura atômica do díodo e vencida a zona neutra, originando assim a corrente eléctrica inversa. Este efeito verifica-se geralmente para tensões inversas $V_R < 5$ Volt e o seu valor pode ser variado através do grau de dopagem (percentagem de impurezas) do silício ou do germânio.

4.5.2 EFEITO DE AVALANCHE

Para tensões inversas $V_R > 7$ Volt, a condução do díodo é explicada exclusivamente pelo efeito de avalanche. Quando se aumenta o valor da tensão inversa, aumenta também a velocidade das cargas eléctricas (electrões). A velocidade atingida pode ser suficiente para libertar electrões dos átomos semicondutores, através do choque. Estes novos electrões libertados e acelerados libertam outros, originando uma reacção em cadeia, à qual se dá o nome de efeito de avalanche.

Para tensões inversas V_R , entre 5V e 7V, a condução do díodo é explicada cumulativamente pelos dois efeitos (efeito de zener e efeito de avalanche).

5. CONCLUSÃO

Uma das principais aplicações do diodo zener é na implementação de reguladores de tensão. Conforme estudado, não se recomenda usar um regulador zener para regular diretamente a tensão da carga, pois a potência do zener e do resistor série seriam muito grandes.

6. REFERÊNCIAS

CALLISTER JR, [W. D.](#) Ciência de Engenharia de Materiais: uma Introdução. Boylestad, R. L.; Nashelsky, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.

http://www.mspc.eng.br/elettrn/semic_110.shtml

[http://www.mundofisico.joinville.udesc.b](http://www.mundofisico.joinville.udesc.br)

http://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo_zener

DIODO SCHOTTKY

Larissa Andréia Wagner Machado

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos semicondutores de potência desempenham um papel fundamental nos sistemas eletrônicos. Além de controlar valores elevados de potência é necessário que haja um bom rendimento destes dispositivos, aumentando a eficiência dos equipamentos para o melhor aproveitamento da energia elétrica, visto que esse também é um recurso limitado para os seres humanos. Estes dispositivos são aplicados em diversos tipos de sistemas, como ilustra a figura 1. que mostra os níveis de corrente e tensão para os diversos tipos de aplicações. Para tensões abaixo de 100V, as principais aplicações são: fontes de alimentação para computadores e telecomunicações, e eletrônica automotiva.

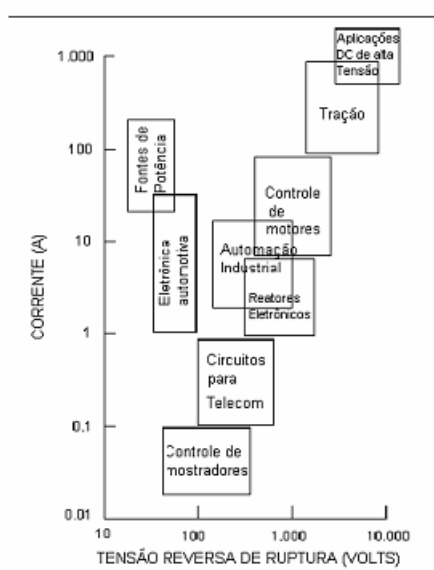


FIGURA 1 - Níveis de tensão e corrente para diversos tipos de aplicações de dispositivos de potência

O volume de dados processados pelos sistemas de informação, sistemas microprocessados, tem crescido muito nos últimos tempos, com estes sistemas operando em frequências cada vez maiores. Com o aumento da frequência mais e mais corrente é drenada, com os níveis de corrente crescendo quase na mesma

velocidade da frequência. Para diminuir a potência dissipada nos dispositivos, é necessário diminuir a tensão de operação destes dispositivos.

Outra área que tem expandido muito nos últimos tempos é o uso de dispositivos de potência em eletrônica automotiva, impulsionado pela introdução de sistemas de controle de potência nas cargas que fazem parte do automóvel (lâmpadas, motores etc.). Estes sistemas operam em altas frequências devido ao ganho de eficiência e redução do tamanho de certos componentes, como indutores e transformadores para fontes chaveadas. Com isso há a necessidade de dispositivos semicondutores que operem em alta frequência, que sejam capazes de conduzir elevadas correntes e suportar tensões relativamente altas.

Assim, nos últimos anos, tem havido um crescente interesse pelo dispositivo de dois terminais chamado de diodo de *barreira Schottky*, *barreira de superfície* ou de *portadores quentes*. Cujas áreas de operação estão bastante relacionadas com faixas de alta frequência devido ao seu tempo de resposta rápido e à sua figura de ruído reduzida.

2. O DIODO SCHOTTKY – CONCEPÇÕES GERAIS

O diodo Schottky, nos anos 70, foi desenvolvido para suprir os problemas associados com o diodo Pin, apresenta alta quantidade de carga armazenada na transição da polarização direta para a reversa resultando numa alta corrente de transitório, da mesma ordem que a corrente na polarização direta, este transitório resulta numa dissipação de potência que limita a frequência de chaveamento deste dispositivo. Já o diodo Schottky dispositivo apresenta uma queda de tensão em polarização direta da ordem de 0,55V, reduzindo a potência dissipada no estado de condução direta do dispositivo, quando comparado com o diodo Pin, o qual apresenta uma queda de tensão da ordem de 1V nestas condições. Assim não há a necessidade de sistemas sofisticados de refrigeração, para que o componente não seja danificado. Além disso, o diodo Schottky tem a vantagem de trabalhar em alta frequência por não apresentar corrente de transitório no chaveamento.

Suas áreas de atuação limitavam-se inicialmente a faixas de altas frequências, devido ao seu tempo de resposta rápido e à sua figura de ruído reduzida. Mais recentemente, no entanto, esse dispositivo tem sido cada vez mais empregado em fontes de potência de baixa tensão/alta corrente e em conversores ac/dc. Outras áreas de aplicação de dispositivo incluem sistemas de radar e lógica

TTL Schottky para computadores, misturadores e detectores em equipamentos de comunicações, instrumentação e conversores analógico-digitais.

2.1 CARACTERÍSTICAS

A montagem dele é bem diferente da junção p-n, convencional, pois uma junção de metal semicondutor é criada, como mostra a Figura 2.

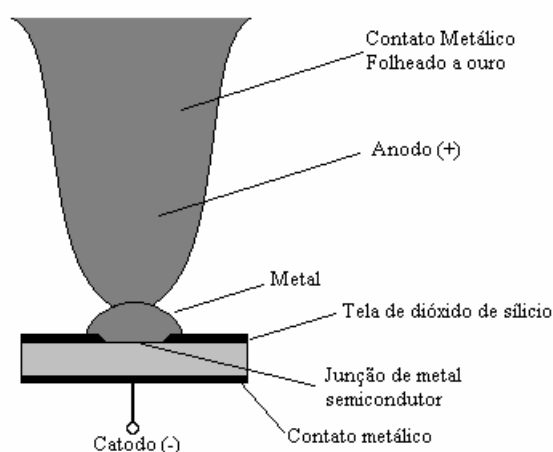


FIGURA 2 - Diodo de portadores quentes

O semicondutor é geralmente de silício tipo *n* (embora, às vezes, o silício tipo *p* seja utilizado), e são usados vários tipos de metal, como molibdênio, platina, cromo ou tungstênio. O substrato é altamente dopado para minimizar a resistência série do dispositivo e estabelecer um bom contato ôhmico no cátodo do diodo. Técnicas de fabricação diferentes resultam em conjuntos diferentes de características para o dispositivo, como faixas ampliadas de frequência de operação, níveis baixos de polarização direta etc. Geralmente, a montagem do diodo Schottky resulta em uma região de junção mais uniforme e com um nível elevado de robustez. O contato metal semicondutor apresenta algumas características importantes como baixa queda de tensão quando em condução, alta velocidade de comutação e carga de portadores minoritários armazenada quase nula na comutação, o que proporciona sua utilização em aplicações de alta frequência e sistemas que trabalham com baixo nível de tensão.

Em ambos os materiais (o metal e o semicondutor), o *elétron* é o portador majoritário. No metal, o nível de portadores minoritários (buracos ou vacâncias) é

insignificante. Quando os materiais são unidos, os elétrons no material semicondutor de silício do tipo n fluem de imediato para o metal agregado, estabelecendo um fluxo intenso de portadores majoritários. Como os portadores injetados têm um nível de energia cinética muito alta em comparação aos elétrons do metal, eles são geralmente chamados de “portadores quentes”. Na junção $p-n$ convencional, existia a injeção de portadores minoritários na região de junção, mas agora, os elétrons são injetados em uma região com a mesma pluralidade de elétrons. Os diodos Schottky são únicos, pois a condução é totalmente realizada pelos portadores majoritários. O fluxo intenso de elétrons para o metal cria uma região próxima à superfície de junção com depleção de portadores, no material de silício, semelhante à região de depleção no diodo de junção $p-n$. Os portadores adicionais no metal estabelecem neste uma “parede negativa”, na fronteira entre os dois materiais. O resultado disso é uma “barreira na superfície” entre os dois materiais, impedindo qualquer fluxo de corrente. Ou seja, qualquer elétron (carga negativa) no material de silício enfrenta uma região de portadores livres e uma parede negativa na superfície do metal.

A aplicação de uma polarização direta reduz a força da barreira negativa através de atração dos elétrons nessa região pelo potencial negativo aplicado. O resultado é o retorno do fluxo intenso de elétrons através da junção e o seu valor é controlado pelo valor do potencial aplicado. A barreira na junção de um diodo Schottky é menor que a dos dispositivos de junção $p-n$ tanto na região diretamente polarizada quanto na inversamente polarizada. Portanto, o resultado é uma corrente mais alta para a mesma polarização aplicada em ambas as regiões. Esse efeito é desejável na região diretamente polarizada, mas muito indesejável na região inversamente polarizada.

Essa é uma limitação nas características do diodo Schottky, a alta corrente reversa, resultando em baixos valores de tensão reversa de ruptura. Algumas técnicas são utilizadas para aumentar o valor da tensão de ruptura, como a implementação de anel de guarda, tratamento da superfície do silício, ajuste nas características do processo de deposição do metal de contato Schottky, entre outras.

Diodos com elevado valor de tensão de ruptura podem ser obtidos utilizando outros materiais semicondutores como o arseneto de gálio (GaAs), carbeto de silício (SiC), e outros, devido ao valor maior da banda de energia proibida. Porém para aplicações de baixa tensão, menor que 100V, o diodo Schottky com substrato de

silício é o mais adequado, devido ao menor custo do processo de fabricação e facilidade de trabalhar com o silício em relação com esses outros materiais.

Alguma característica importante deste dispositivo é a altura da barreira de potencial e corrente de condução reversa. A altura da barreira de potencial (depleção), também chamada de barreira Schottky, determinam a queda de tensão direta no diodo para determinado valor de corrente de condução. As figuras 3 e 4 mostram a influência da altura da barreira nas características $I \times V$ direta e reversa do diodo.

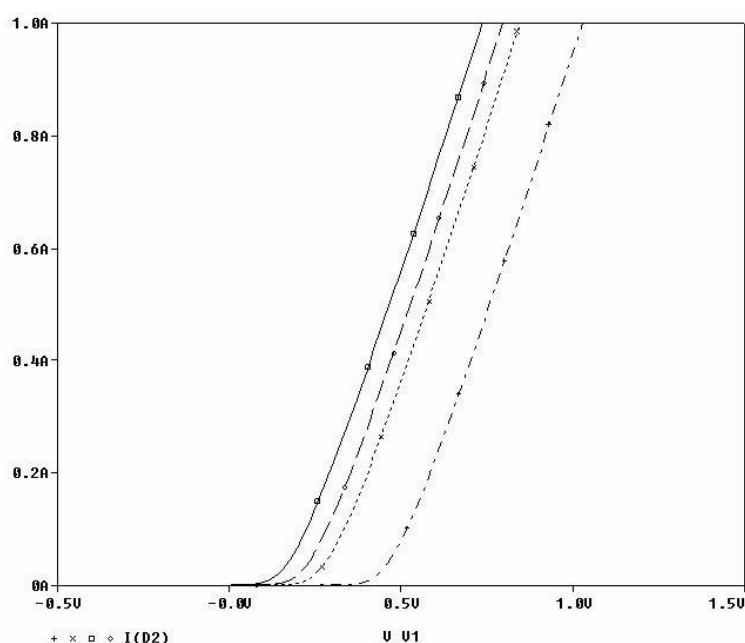


FIGURA 3 - Curvas $I \times V$ de diodo Schottky para diferentes valores de altura de barreira Schottky

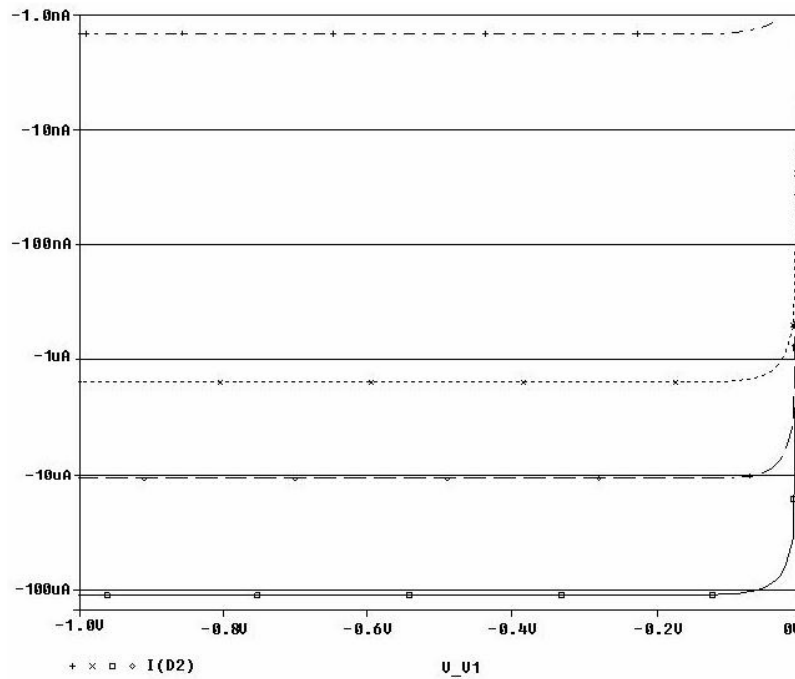


FIGURA 4 - Curvas $\text{Log}(I) \times V$ reversa de diodo Schottky para diferentes valores de altura de barreira Schottky

Outra característica importante do diodo Schottky é a possibilidade de operar em altas frequências, já que a corrente neste dispositivo é principalmente resultante do fluxo de portadores majoritários. A figura 5 compara um diodo $p-n$ e um diodo Schottky no chaveamento com uma onda quadrada de 5kHz.

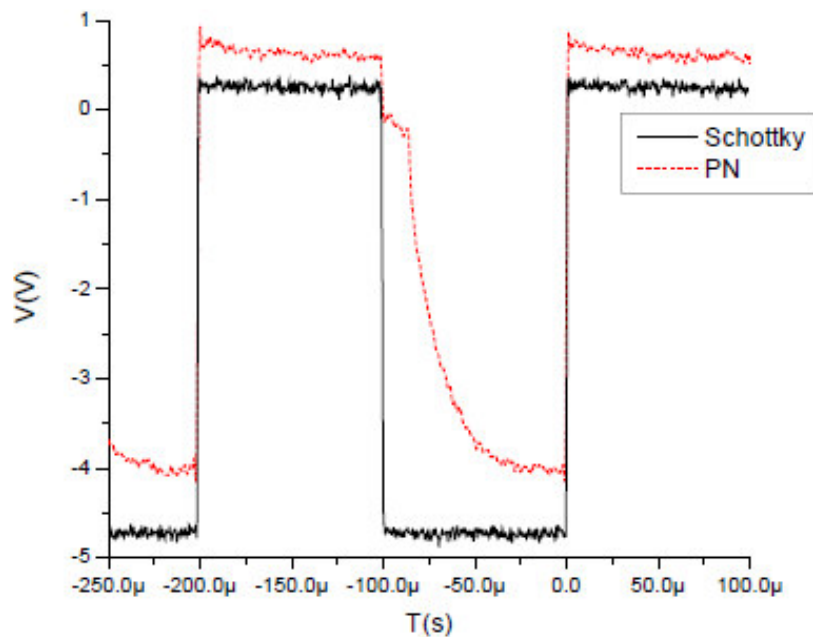


FIGURA 5 - Curvas de transitório dos diodos *p-n* e schottky para onda quadrada de frequência de 5khz.

3. CONTATO METAL-SEMICONDUTOR

3.1 ANÁLISE AO NÍVEL ATÔMICO

O estudo das características do contato metal semicondutor pode ser feito através do diagrama de bandas de energia dos sólidos. A figura 6 mostra o aspecto do diagrama de bandas do contato metal semicondutor ideal. A figura mostra que a função trabalho do metal ϕ_M é maior que a função trabalho do semicondutor $\phi_S = (\chi + E_c)$ ou ainda, o nível de Fermi do semicondutor está em um nível mais alto de energia que o nível de Fermi do metal. Neste caso, antes do contato físico ser estabelecido, os elétrons do semicondutor estão em um nível de energia mais alto que os elétrons do metal. Quando os materiais são ligados através de um fio condutor, o sistema busca a situação de equilíbrio, onde os elétrons do semicondutor e do metal ficam num mesmo nível de energia, igualando os níveis de Fermi dos materiais. Assim, elétrons da superfície do semicondutor são transportados para o metal, deixando íons positivos para manter a neutralidade do sistema, formando uma região de depleção. Nesta região há uma concentração menor de elétrons do que no substrato, resultando numa inclinação das bandas de energia, de valência e de condução, na região de depleção. No caso de um

semicondutor tipo n, as bandas de energia próxima à superfície, inclinam no sentido de que a banda de condução se afaste do nível de Fermi, indicando que a concentração de elétrons nesta região é menor. Se a distância entre os materiais for menor, mais elétrons são transportados para o metal. O aumento da concentração de elétrons que vieram do semicondutor faz com que a carga negativa da superfície do metal aumente, e ao mesmo tempo os elétrons que deixaram o semicondutor aumentam a carga positiva da região de depleção, aumentando a largura dessa região. Com isso, o encurvamento das bandas de energia aumenta. A situação limite ocorre quando a distância entre os materiais for nula e então a quantidade máxima de elétrons foi transportada para o metal, resultando numa inclinação máxima das bandas de energia.

Assim, pode-se observar a formação de uma barreira de potencial que os elétrons devem vencer para passar do semicondutor para o metal. Observe que quanto maior for a função trabalho do metal, maior será a altura da barreira de potencial do metal para o semicondutor, pois neste caso os níveis de Fermi dos materiais ficam mais afastados.

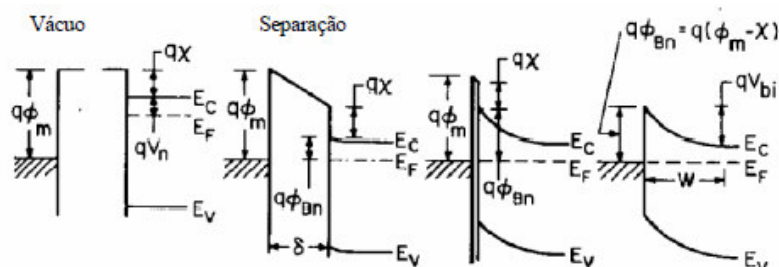


FIGURA 6 - Diagrama de bandas da junção metal semicondutor em diferentes estados de superfície, para semicondutor tipo n e metal com função trabalho maior que do semicondutor.

No caso da junção metal-semicondutor real, existem estados na superfície do semicondutor, provenientes de defeitos cristalográficos, incluindo a descontinuidade da rede, ou impurezas absorvidas na superfície. A figura 7 mostra o diagrama de bandas da junção metal semicondutor com estados na superfície. Pode-se observar que estes estados estão espalhados na superfície do semicondutor e possui um nível neutro, ϕ_0 , ou seja, a posição que o nível de Fermi deve ocupar para que a carga efetiva dos estados de interface seja nula. Se ϕ_0 estiver acima do nível de

Fermi, os estados da superfície apresentam uma carga efetiva (QSS) positiva. No balanço de cargas do sistema, carga no metal(QM), carga na região de depleção(QD) e carga na superfície(QSS), temos que: $Q_M + Q_D + Q_{SS} = 0$. Portanto se QSS tem valor positivo, QD tem valor menor para balancear a carga negativa na superfície do metal. Com isso a largura da região de depleção é menor e conseqüentemente o encurvamento das bandas de energia é menor. Como a altura da barreira de potencial é proporcional ao encurvamento das bandas, ela também é menor. Essa redução na barreira de potencial equivale ao nível ϕ_0 ser “puxado” para baixo para se igualar ao nível de Fermi. Se em outro caso ϕ_0 estiver abaixo do nível de Fermi, os estados da superfície apresentam uma carga efetiva negativa. Neste caso é necessário uma carga positiva, QD, maior para balancear a carga negativa. Dessa forma a região de depleção e o encurvamento das bandas é maior, resultando no aumento da altura da barreira de potencial. Se a densidade de estados na superfície for muito alta, QSS será suficiente para compensar a carga negativa do metal. Assim, para o caso em que nível de Fermi é fixo no nível ϕ_0 , a altura da barreira de potencial é independente da função trabalho do metal, sendo função das características da superfície do semiconductor. Este caso é conhecido como o limite de Bardeen.

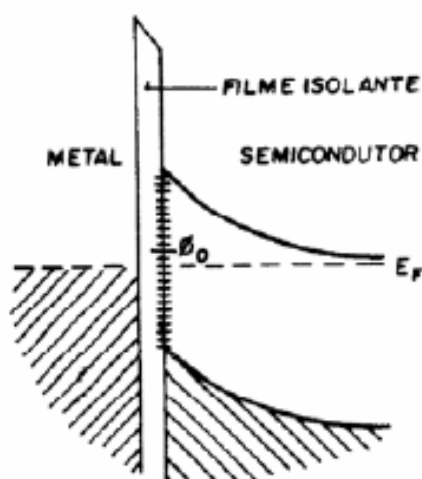


FIGURA 7 - Nível neutro (ϕ_0) dos estados de superfície

A tabela 1 mostra a função trabalho (ϕ_M) de alguns metais e a altura da barreira de potencial medida em barreiras Schottky formadas com Silício (Si), Germânio (Ge) e Arseneto de Gálio (GaAs).

TABELA 1 - Função de trabalho dos metais e a altura de barreira Schottky para alguns semicondutores

	Ag	Al	Au	Cr	Ni	Pt	W	WSi2
Φ_M (V)	4,30	4,25	4,80	4,50	4,50	5,30	4,60	-
n-Ge	0,54	0,48	0,59	-	0,49	-	0,48	-
p-Ge	0,50	-	0,30	-	-	-	-	-
n-Si	0,78	0,72	0,80	0,61	0,61	0,90	0,67	0,65
p-Si	0,54	0,58	0,34	0,50	0,51	-	0,45	-
n-GaAs	0,88	0,80	0,90	-	-	0,84	0,80	-
p-GaAs	0,63		0,42	-	-	-	-	-

3.2 TRANSPORTE DA CORRENTE ELÉTRICA ATRAVÉS DA JUNÇÃO

Os principais agentes responsáveis pelo transporte da corrente elétrica na junção - metal/semicondutor - são os portadores majoritários, elétrons para semicondutores tipo n e lacunas para os semicondutores tipo p. O fluxo de corrente na junção é resultado de vários fenômenos de transporte de portadores: 1) emissão termiônica, ou seja, transporte de portadores do semicondutor para o metal sobre a barreira de potencial; 2) tunelamento (efeito da mecânica quântica); 3) recombinação de portadores na região de carga espacial; 4) injeção de portadores minoritários do metal para o semicondutor, o que equivale ao movimento de elétrons do semicondutor para o metal, deixando uma lacuna no semicondutor que se recombina com um elétron na região neutra.

Para o caso de semicondutor moderadamente dopado operando em temperaturas moderadas (próximas da ambiente) a corrente elétrica na junção é predominantemente dos elétrons que atravessam a junção sobre a barreira de potencial. Este fenômeno é descrito pela teoria de emissão termiônica e pela teoria da difusão.

Uma síntese dessas duas teorias, emissão termiônica e difusão, foi proposta por Crowell e Sze, denominada teoria difusão-termiônica. Se os efeitos de espalhamento dos fônons, reflexão e tunelamento quântico forem incluídos na análise da corrente na junção metal semicondutor, a expressão completa das características J-V é dada pela equação 1.

$$J_n = J_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde a corrente de saturação J_s é dada pela expressão 2.

$$J_s = A^{**} \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right) \quad (2)$$

O termo A^{**} é a constante de Richardson para uma junção metal semicondutor real, ou seja, considera os efeitos quânticos e de espalhamento dos fônons. Esta constante é calculada pela equação 3.

$$A^{**} = \frac{f_P \cdot f_Q \cdot A^*}{1 + f_P \cdot f_Q \cdot \frac{v_R}{v_D}} \quad (3)$$

Onde f_P e f_Q são respectivamente a probabilidade de um elétron ser emitido por cima da barreira de potencial e a razão entre a corrente que flui considerando os efeitos quânticos e a corrente que flui sem considerar tais efeitos. Para campos elétricos na faixa de 10^4 a $2 \cdot 10^5$ V/cm e o semicondutor com concentração ND (dopagem do substrato) de 10^{16} cm^{-3} , operando em temperatura ambiente ($T=300\text{K}$), $A^{**} \approx 110 \text{ A/cm}^2/\text{K}^2$ para semicondutor tipo n e $A^{**} \approx 30 \text{ A/cm}^2/\text{K}^2$ para semicondutor tipo p.

Para semicondutores muito dopados ou para dispositivos operando em baixas temperaturas, a corrente de tunelamento torna-se o processo dominante no transporte da corrente elétrica na junção metal semicondutor. A alta dopagem faz com que o semicondutor seja degenerado e assim a largura da região de depleção se torna muito pequena, ficando fácil o elétron tunelar através da barreira de potencial. Assim a expressão que calcula a corrente elétrica na junção metal semicondutor, considerando outros fenômenos de transporte de corrente, além da emissão termiônica, recebe o coeficiente n no denominador da exponencial da equação 1, chamado de fator de idealidade.

$$J_n = J_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

E para $V > (k \cdot T/q)$ a exponencial fica muito maior do que 1 e assim a equação 4 pode ser aproximada para a equação 5

$$J_n = J_s \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}\right) \quad (5)$$

O fator de idealidade é dado pela equação 6

$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \quad (6)$$

O fator de idealidade é um indicativo de quais processos atuam no valor total da corrente na junção. Para $n=1$, a corrente é devido ao processo de emissão termiônica e para $n \neq 1$, outros processos contribuem no valor da corrente na junção. Quanto mais próximo de 1 for o fator de idealidade melhor é o desempenho do dispositivo, pois os outros processos de transporte de corrente na junção, além da emissão termiônica, não são bem controlados, levando o dispositivo a apresentar características não desejáveis, como por exemplo, alta corrente de fuga.

O diodo de barreira Schottky é um dispositivo cujo transporte de corrente é devido aos portadores majoritários. Porém para valores de tensão direta suficientemente alto aplicado na junção, ocorre um aumento na taxa de injeção de portadores minoritários devido ao crescimento da componente de deriva que se torna muito maior que a componente de difusão da corrente na junção. Em dispositivos que operam com tensões baixas, este fenômeno não é muito relevante, mas para dispositivos de potência, a corrente devido à injeção de portadores minoritários pode representar uma significativa parcela do valor total da corrente que atravessa a junção Schottky.

4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS DIODOS SCHOTTKY

4.1 OTIMIZAÇÃO

As principais vantagens do diodo Schottky em relação a outros tipos de diodos são: operação em aplicações de alta frequência, devido ao não armazenamento de cargas minoritárias na comutação, e o baixo valor de tensão de joelho (V_f) proporcionando uma baixa queda de tensão direta. Porém este tipo de dispositivo fabricado em substrato de silício apresenta alta corrente reversa e baixa tensão de ruptura. Mas existem algumas técnicas utilizadas no projeto deste diodo para melhorar seu desempenho, obtendo valores maiores de tensão de ruptura e diminuindo a corrente reversa, aumentando assim seu campo de aplicação. Algumas técnicas utilizadas são: construção do dispositivo utilizando lâminas com camada epitaxial de baixa dopagem, técnicas de passivação de estados na superfície da lâmina de silício onde é feito o contato Schottky, utilização de sobreposição de metal e anel de guarda, otimização da relação área/perímetro do dispositivo e utilização de grade de difusão p.

A sobreposição de metal é utilizada para suavizar a região de depleção nas bordas do diodo Schottky, acabando com a terminação abrupta dessa região que pode ser observada no diodo Schottky convencional (figura 8).

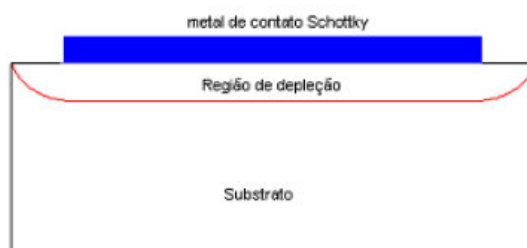


FIGURA 8 - Região de depleção nas bordas do diodo Schottky

Desta maneira a sobreposição de metal diminui a concentração de linhas de campo elétrico nas bordas do dispositivo (figura 9). À medida que a tensão de polarização reversa aumenta, a região sob a sobreposição de metal pode inverter, ou seja, ocorre um acúmulo de lacunas nesta região, fazendo com que a região de depleção termine abruptamente nas bordas do dispositivo, como ocorre no diodo Schottky convencional. Desta forma o campo elétrico nesta região sofre um aumento considerável, resultando na ruptura do diodo.



FIGURA 9 – Diminuição da concentração das linhas de campo nas bordas

Outro mecanismo utilizado para resolver este problema é a utilização de anel de guarda formado por uma difusão p (Boro) em substrato tipo n. Neste caso o anel de guarda elimina a terminação abrupta nas bordas da região do contato Schottky (figura 10), através da formação da região de depleção da junção p/n. Além disso, com o diodo polarizado diretamente há uma injeção de portadores minoritários, lacunas da região do anel de guarda, na região de baixa dopagem da camada epitaxial, diminuindo a resistividade nesta região, pois com o aumento da concentração de lacunas na região epitaxial, a concentração de elétrons também deve aumentar mantendo a neutralidade de cargas na região neutra. Porém esta

estrutura apresenta a desvantagem de possuir tempo de recuperação reversa, na mudança de estado (conduzindo/cortado) do diodo e capacitância parasita nas junções p/n.



FIGURA 10 – Eliminação da terminação abrupta das bordas do contato

A corrente de fuga do diodo Schottky está relacionada com o perímetro do dispositivo, pois a quantidade de defeitos existentes nas limitações do dispositivo (resultantes do corte da lâmina para encapsulamento dos dispositivos, tratamentos químicos, geração de portadores pelos estados de superfície na lateral, etc) é diretamente proporcional ao perímetro do dispositivo construído. Assim, quando estabelecida a área do dispositivo, é necessário projetá-lo para que ele possua o menor perímetro possível. A figura geométrica que possui a menor relação perímetro/área é o círculo, porém dispositivos de área circular não são viáveis economicamente devido à grande perda da área da lâmina de silício. Assim, a figura geométrica que apresenta o melhor resultado é o quadrado, já que para um mesmo valor de área ele apresenta o menor perímetro, comparado com outras figuras retangulares possíveis de serem formadas. Além de projetar dispositivos com o menor perímetro possível, o arredondamento dos cantos elimina o efeito das pontas, ou seja, a alta concentração de campo elétrico nesta região pode resultar em correntes de fuga. Assim arredondando os cantos do contato metálico, diminuimos este efeito de degradação do dispositivo.

Uma das causas da ruptura precoce do diodo Schottky é o efeito da diminuição da barreira de potencial quando uma tensão reversa é aplicada na junção Schottky. Para suprimir este efeito, pode ser utilizada uma grade de linhas paralelas de difusão tipo p ao longo do dispositivo conforme a figura 11.

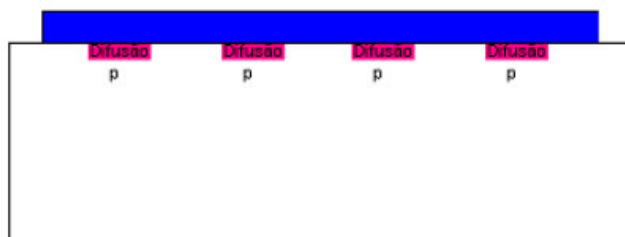


FIGURA 11 – Utilização de linhas paralelas de difusão do tipo p

5. ESTRUTURAS

Existem várias estruturas de diodo Schottky, desde o diodo Schottky convencional formado apenas por um contato metálico na superfície do silício, até estruturas mais complexas que possuem anel de guarda e sobreposição de metal para melhorar as características elétricas do dispositivo. O objetivo do projeto é obter o processo de fabricação do diodo Schottky com níveis de corrente e tensão para aplicações de potência, baixa dissipação de energia e com estabilidade física em função das etapas de recozimento durante o processo de fabricação.

5.1 DIODO SCHOTTKY CONVENCIONAL

Nesta estrutura o diodo é formado apenas por um contato metálico no semicondutor. Este tipo de dispositivo geralmente possui características I-V direta e reversa não muito boas, apresentando alta corrente de fuga e baixa tensão de ruptura.



FIGURA 12 – Diodo schottky convencional

5.2 DIODO SCHOTTKY COM SOBREPOSIÇÃO DE METAL

A sobreposição de metal é utilizado nesta estrutura para eliminar os efeitos de borda para baixas tensões de polarização reversa do diodo Schottky. Esta estrutura

pode ser formada utilizando-se óxido de silício nas bordas do diodo para formar sobreposição de metal.



FIGURA 13 – Diodo Schottky com sobreposição de metal

5.3 DIODO SCHOTTKY COM ANEL DE GUARDA

Este diodo Schottky possui anel de guarda em sua estrutura para eliminar os efeitos de borda do dispositivo. O anel de guarda é formado por uma difusão do tipo p no substrato tipo n. A junção p/n formada pelo anel de guarda e o substrato resolve o problema da terminação abrupta da região de depleção na borda do diodo convencional, podendo assim o dispositivo trabalhar com tensões mais elevadas. Como este dispositivo possui alto valor de tensão de ruptura, ele é o mais adequado para aplicações de potência.

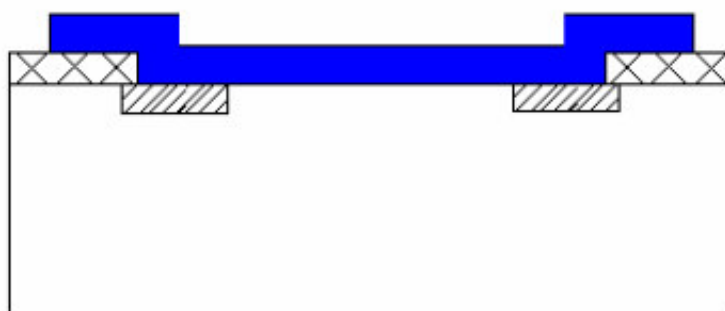


Figura 14 – Diodo Schottky com anel de guarda

5.4 DIODO SCHOTTKY COM GRADE DE LINHAS DE DIFUSÃO.

Neste dispositivo, a grade é formada por linhas paralelas de difusão do tipo p, ao invés de ter um anel de guarda na periferia do dispositivo como no caso anterior.

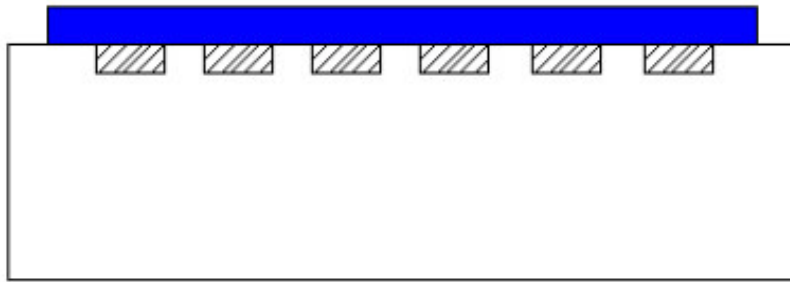


Figura 15 - – Diodo Schottky com linhas de difusão

6. ALGUNS PROCESSOS ENVOLVIDOS

6.1 LIMPEZA

A limpeza das lâminas de silício é fundamental num processo de microfabricação, pois nesta etapa são reduzidos, ao menor número possível, a quantidade de impurezas e os contaminantes na superfície do substrato de silício onde ocorrerão os processos subseqüentes. As principais impurezas removidas por esta limpeza são: Gorduras, óxido nativo, metais, íons alcalinos partículas.

A qualidade e desempenho dos dispositivos dependem fortemente desta etapa no processo de fabricação.

6.2 OXIDAÇÃO TÉRMICA PARA OBTENÇÃO DE ÓXIDO DE CAMPO

O processo de oxidação do silício é uma das etapas fundamentais no processo de fabricação de dispositivos. O óxido de silício (SiO_2) tem diversas funções como:

- máscara contra difusão ou implantação de impurezas
- isolamento entre dispositivos (óxido de campo)
- dielétrico para estruturas MOS
- isolamento entre multiníveis de metal

As principais técnicas para a obtenção do óxido são:

- oxidação térmica (oxidação úmida, oxidação seca e RTP - Rapid Thermal Process)
- anodização úmida
- deposição química em fase vapor (CVD)
- oxidação por plasma

O processo de oxidação térmica ocorre com a superfície do silício exposta em ambiente oxidante, formando uma camada de óxido de Silício, devido à reação do oxigênio com o silício. Há dois tipos de oxidação térmica: oxidação térmica úmida e seca. O processo de oxidação úmida é realizado utilizando vapor d'água como espécie oxidante. Este processo de oxidação é mais rápido que o processo de oxidação seca, porém o óxido produzido é poroso devido à presença de hidrogênio. Contudo o óxido obtido atende as necessidades de aplicações como óxido de campo e óxido de mascaramento. O processo de oxidação seca utiliza oxigênio seco como espécie oxidante. Este processo de oxidação é mais lento que o anterior, porém o óxido obtido é de melhor qualidade, mais denso, proporcionando uma densidade de cargas efetivas menor, necessário em certas aplicações. Junto com o oxigênio pode ser utilizado o gás TCE (Tricloroetileno), ou outra fonte de cloro, que reage com certas impurezas como os íons alcalinos, principalmente o sódio que é uma partícula móvel no óxido.

6.3 OBTENÇÃO DA REGIÃO TIPO P E DOPAGEM NAS COSTAS DA LÂMINA PARA FORMAÇÃO DO CONTATO ÔHMICO

Regiões dopadas no silício podem ser obtidas através de processos de difusão ou de implantação iônica das espécies dopantes. A técnica de implantação iônica proporciona melhor controle da profundidade de junção e da concentração de dopantes, em comparação com a técnica de difusão. Porém, o implantador de íons é um aparelho de custo elevado e sua aplicação se torna primordial em aplicações que necessitam de um alto grau de controle sobre estas variáveis. Para a fabricação do diodo Schottky, a técnica de difusão é a mais apropriada, pela simplicidade do processo e baixo custo.

Esta técnica consiste basicamente na formação de um feixe de íons do elemento a ser implantado sendo manipulado, através de campos eletrostáticos horizontais e verticais, para fazer uma varredura xy na lâmina a ser implantada, obtendo assim uma concentração uniforme de impurezas após a implantação. A lâmina fica dentro de um copo de Faraday conectado a um integrador de corrente elétrica. Desta forma cada íon que entra dentro do copo de Faraday é contado e assim podemos obter uma precisão muito grande do número de íons implantados na lâmina. Dividindo o número de íons implantados pela área da abertura do copo, podemos obter a concentração de dopantes por unidade de área.

Os íons ao incidirem na superfície da lâmina irão penetrar na rede cristalina e se chocar com os núcleos dos átomos dessa rede, perdendo velocidade até atingir a posição de repouso. Em adição, ocorre freiamento pela interação entre os elétrons do íon implantado e do material. Os choques nucleares resultam em defeitos na rede cristalina e dependendo da quantidade de defeitos resultantes da implantação, a matriz originalmente cristalina pode tornar-se amorfa. Além disso, os íons implantados estão na forma intersticial na rede cristalina, e, portanto, precisam receber energia térmica para se tornarem substitucionais para se comportarem como dopantes no cristal. Assim, para eliminar os defeitos e ativar os dopantes implantados, após a implantação iônica é feito um recozimento térmico em ambiente com gás inerte (N₂).

6.4 OBTENÇÃO DA REGIÃO DE CONTATO METÁLICO

O processo de *liftoff* pode ser utilizado para definir as regiões de contato metálico no diodo Schottky. Esta técnica consiste na deposição do fotorresiste sobre a superfície da lâmina e por processo fotolitográfico, expor as regiões da lâmina onde serão estabelecidos os contatos metálicos. É muito importante que o fotorresiste revelado tenha um perfil negativo, para que ao depositar o filme metálico, este apresente descontinuidade entre a superfície da lâmina e a superfície do resiste. Desta maneira, ao removermos o fotorresiste, o metal sobre o fotorresiste é removido junto, ficando somente o metal em contato com a superfície da lâmina.

Na construção do diodo Schottky, a técnica de *liftoff* é utilizada para definir as regiões de contato Schottky do diodo. Mas, além da técnica de *liftoff*, as regiões de contato metálico podem ser definidas pelo processo de fotogravação convencional, assim como o usado para obter as regiões de anel de guarda e contato Schottky.

7. CONCLUSÃO

Através desse trabalho pode-se comprovar aplicações da teoria estudada em sala de aula, para engenharia elétrica em específico. A análise dos princípios de funcionamento do diodo Schottky a um nível subatômico deixou clara a importância dos estudos sobre teoria de bandas em Matérias Elétricas.

Não fossem os estudos realizados nesta área, não estaríamos experimentando tanta evolução na microeletrônica, e para sistemas de alta frequência. Afinal, a velocidade dos computadores, por exemplo, depende da

rapidez com que os seus diodos e transistores podem chavear, é neste contexto que se encaixa o diodo Schottky. Pelo fato de não ter armazenamento de carga, o diodo Schottky se tornou peça fundamental da TTL Schottky, família de dispositivos digitais amplamente utilizados. Apesar de todas as limitações que o dispositivo pode ter, o estudo dos materiais, processos de dopagem, obtenção do contato metálico, entre outros, são importantíssimos e podem muitas vezes corrigir os problemas.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, Robert L. NASHELSKY, Louis. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 8.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

MALVINO, Albert Paul. *Eletrônica: volume 1*. 4.ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1997.

SOUZA, Pablo Rodrigo. *Estudos de processos de fabricação de diodo Schottky de potencia*. Campinas, SP: [s.n.], 2003.

COMPONENTES SEMICONDUTORES RÁPIDOS DE POTÊNCIA. Disponível em <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap3/cap3.html>>. Acesso em 8 jul. 2008.

DIODOS SEMICONDUTORES

Rodrigo Alexssandre Budel

1. DIODOS SEMICONDUTORES

1.1 INTRODUÇÃO AOS SEMICONDUTORES

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

1.2 BANDAS DE ENERGIA

Quando os átomos de silício se combinam para formar um cristal, a órbita de um elétron sofre a influência das cargas dos átomos adjacentes, cada elétron tem uma posição diferente dentro do cristal, nenhum vê exatamente a mesma configuração de cargas vizinhas, assim a órbita de cada elétron é modificada. Os níveis de energia associados às órbitas formam nuvens ou bandas (Figura 1).

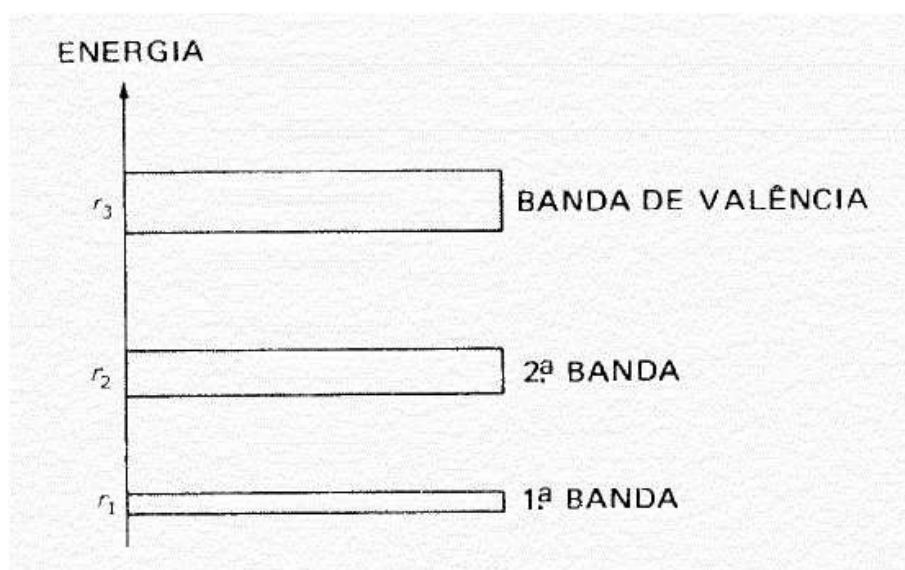


FIGURA 1 – Bandas de energia de um condutor

1.3 CONDUÇÃO EM CRISTAIS

1.3.1 A CONDUÇÃO NUM FIO DE COBRE

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

1.3.2 A CONDUÇÃO NUM CRISTAL DE SILÍCIO

A Figura (a) mostra uma barra de silício com extremidades metálicas e uma tensão externa estabelece um campo elétrico entre as extremidades dos cristais.

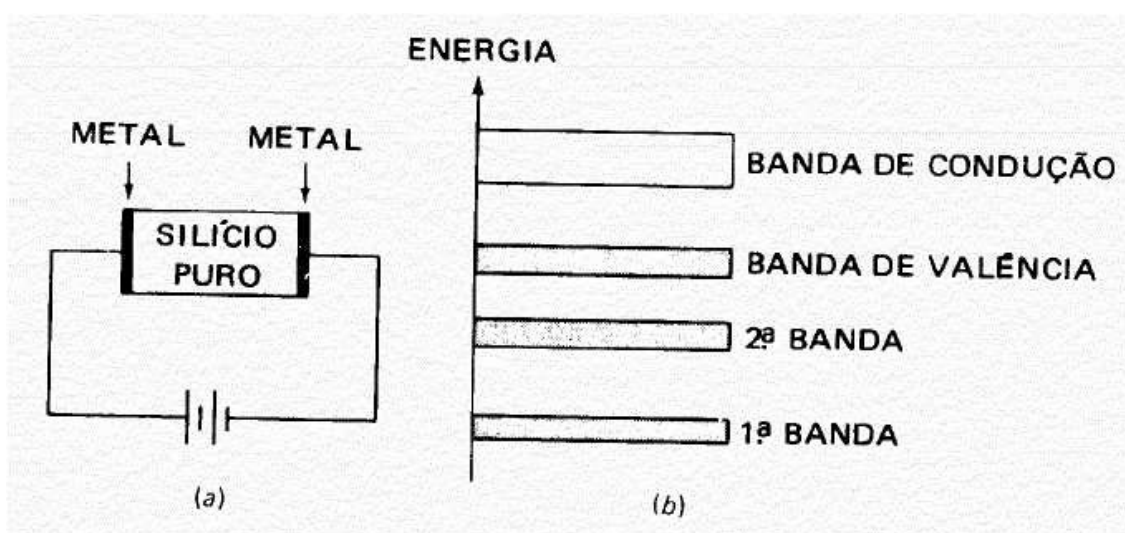


FIGURA 2 - (a) Circuito (b) Bandas de energia à temperatura de zero absoluto.

1.4 ZERO ABSOLUTO

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

1.5 ACIMA DO ZERO ABSOLUTO

A energia térmica quebra algumas ligações covalentes, isto é, envia alguns elétrons da banda de valência para a banda de condução, sob ação do campo

elétrico, estes elétrons livres movem-se para a esquerda e estabelecem uma corrente (Figura 2 (a)).

Cada vez que um elétron é bombeado para a banda de condução, cria-se uma lacuna na banda de valência.

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

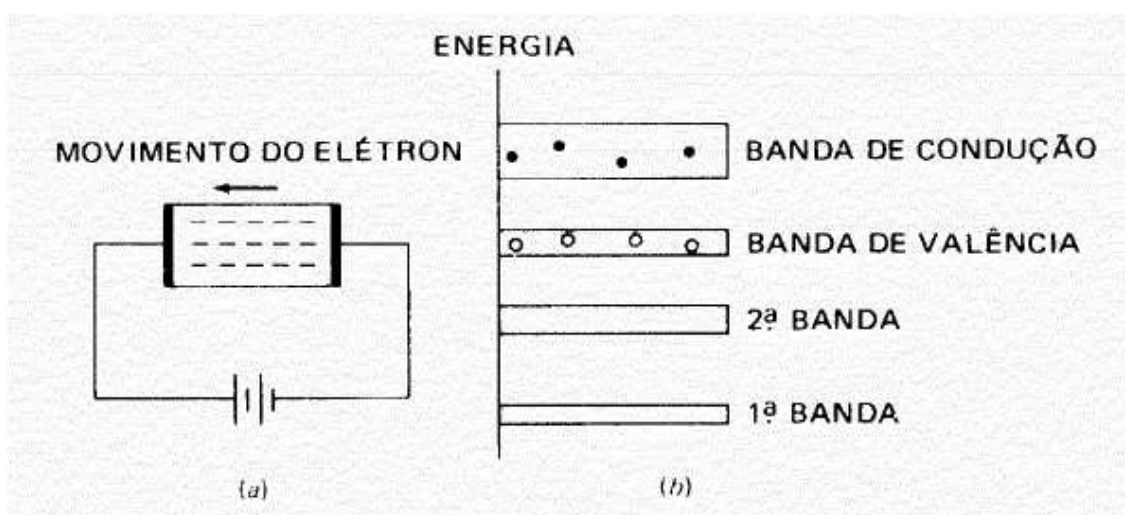


FIGURA 3 - (a) Fluxo de elétrons (b) Faixas de energia à temperatura ambiente

1.6 SILÍCIO VERSUS GERMÂNIO

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

1.7 CORRENTE DE LACUNAS

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

A lacuna na extremidade direita da figura (a) atrai o elétron em A. Apenas com uma pequena variação de energia o elétron de valência em A pode se deslocar para a lacuna, sendo que a inicial desaparece e uma nova lacuna aparece no ponto A. A nova lacuna em A atrai o elétron de valência em B, e quando o elétron desloca-se para A, a lacuna desloca-se para B. Os elétrons de valência podem continuar a deslocar-se ao longo do trajeto mostrado pelas setas, enquanto as lacunas deslocam-se no sentido oposto.

Pelo fato de haver lacunas nas órbitas de valência, há um segundo percurso ao longo do qual os elétrons podem se deslocar dentro do cristal. Na Figura 4 (b) ilustra-se a condução de lacunas em termos de nível de energia.

A energia térmica bombeia um elétron da banda de valência para a banda de condução, abrindo-se uma lacuna. Com uma pequena variação de energia, o elétron de valência em A pode se deslocar para a lacuna. Quando isto ocorre, a lacuna inicial desaparece e uma nova lacuna aparece em A. A seguir, um elétron de valência em B pode se deslocar para a nova lacuna com uma pequena variação de energia.

Com pequenas variações de energia os elétrons de valência podem se deslocar ao longo do trajeto indicado pelas setas. Isso equivale a um movimento da lacuna através da banda de valência ao longo do trajeto ABCDEF.

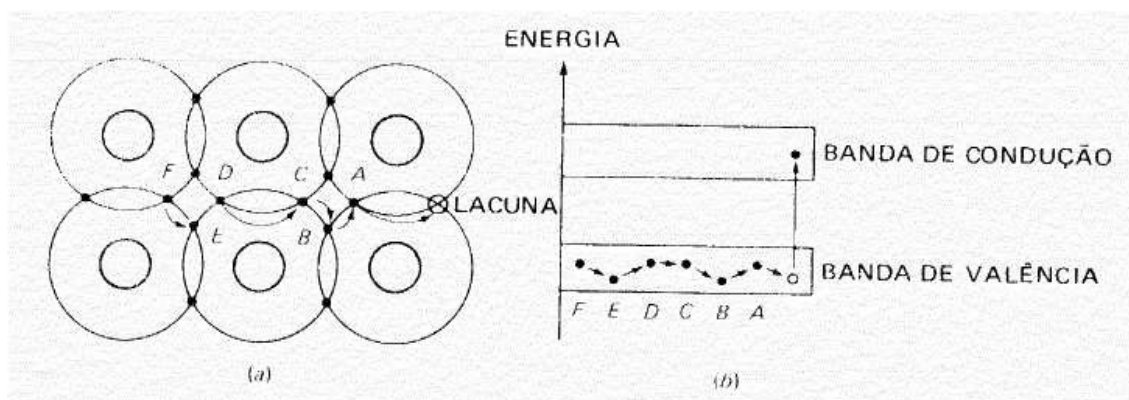


FIGURA 4 - (a) Corrente de lacunas (b) Diagrama de energia para a corrente de lacunas.

1.8 PARES ELÉTRON-LACUNA

A aplicação de uma tensão externa ao cristal força os elétrons a deslocarem-se.

Na figura 5 (a) há dois tipos de elétrons móveis, os elétrons da banda de condução e os elétrons da banda de valência, sendo que o movimento para a direita dos elétrons de valência indica que as lacunas estão a se deslocar para a esquerda, em um semiconductor puro, as existências de cada elétron na banda de condução garante a existência de uma lacuna na órbita de valência de algum átomo, pode-se dizer então que a energia térmica produz pares elétrons-lacunas.

As lacunas agem como se fossem cargas positivas e por esta razão são indicadas pelo sinal de mais na figura 5 (b).

O Efeito Hall confirma o comportamento das lacunas como cargas positivas.

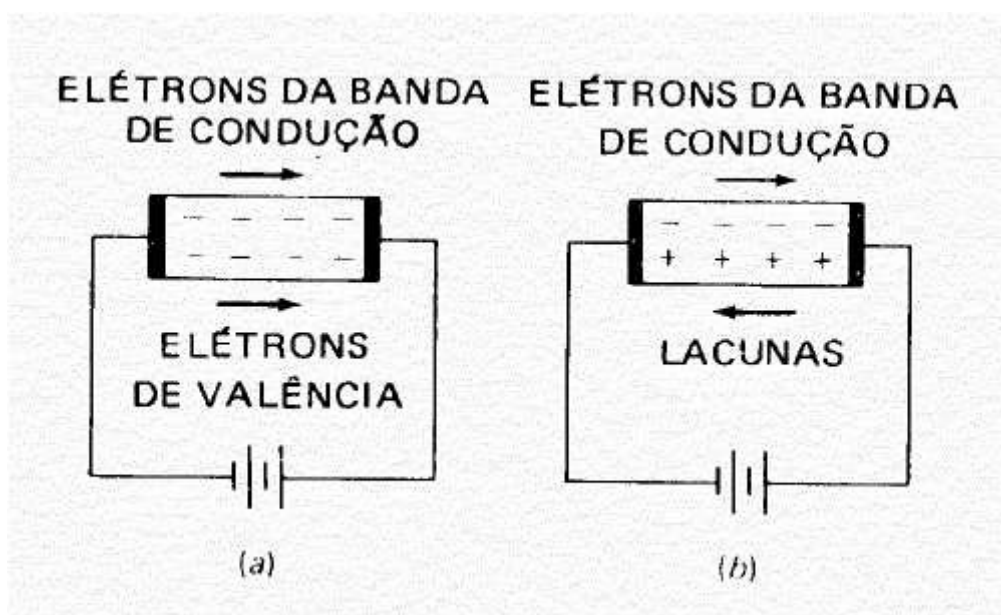


FIGURA 5 - Dois trajetos para a corrente.

1.9 RECOMBINAÇÃO

Na Figura 5 (b) ocasionalmente a órbita da banda de condução de um átomo pode interceptar a órbita da lacuna de um outro, é freqüente então que um elétron da banda de condução passe para uma lacuna, este desaparecimento de um elétron livre e de uma lacuna é chamado recombinação, e quando ocorre a recombinação a lacuna desaparece, ocorrendo constantemente num semiconductor. A energia térmica

incidente mantém a produção de novas lacunas a elevar os elétrons de valência à banda de condução. O tempo médio entre a criação e o desaparecimento de um par elétron-lacuna é chamado meia vida, que varia de poucos nanossegundos até vários microssegundos, dependendo de quão perfeita é a estrutura do cristal, dentre outros fatores.

1.10 DOPAGEM

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

1.11 SEMICONDUTOR TIPO-N

Para se conseguir elétrons da banda de valência a mais, podem-se acrescentar átomos pentavalentes, que possui inicialmente 5 elétrons na órbita de valência depois de formar ligações covalentes com quatro átomos vizinhos, o átomo pentavalente central possui um elétron a mais que sobra e como a órbita de valência não pode conter mais de oito elétrons, o elétron que sobra precisa percorrer uma órbita da banda de condução, na figura 6 (b), há um grande número de elétrons da banda de condução produzido principalmente pela dopagem. Há também algumas lacunas criadas pela energia térmica, o silício dopado dessa forma é denominado semicondutor tipo-n, onde n significa negativo, em um semicondutor tipo-n, os elétrons são denominados portadores majoritários e as lacunas de portadores minoritários. Os átomos pentavalentes são denominados doadores, pois fornecem elétrons de banda de condução. Exemplos: arsênio, antimônio e fósforo.

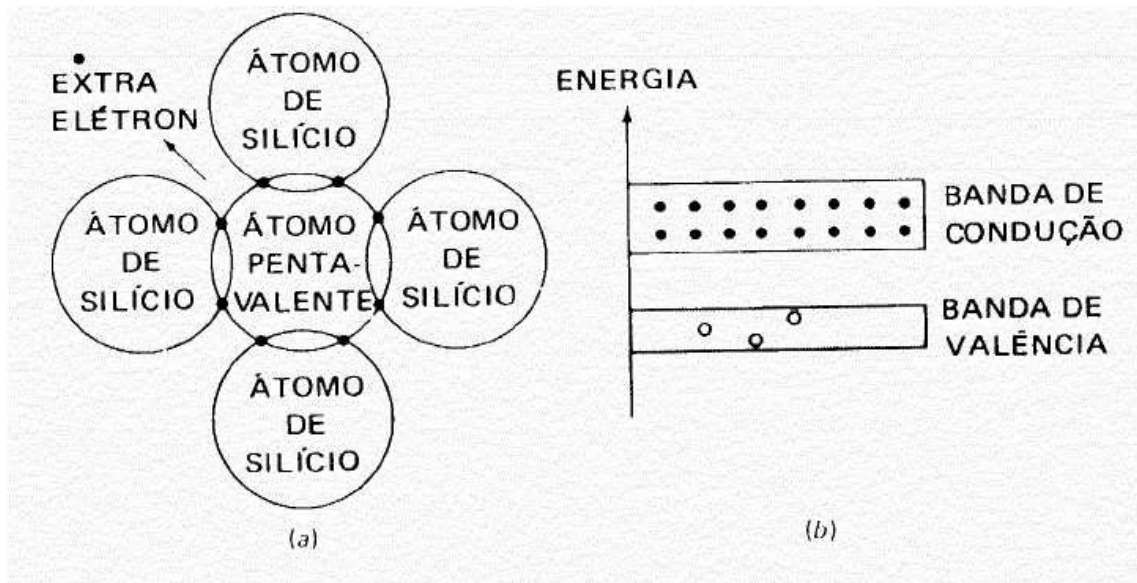


FIGURA 6 – Dopagem com impureza doadora.

1.12 SEMICONDUTOR TIPO-P

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

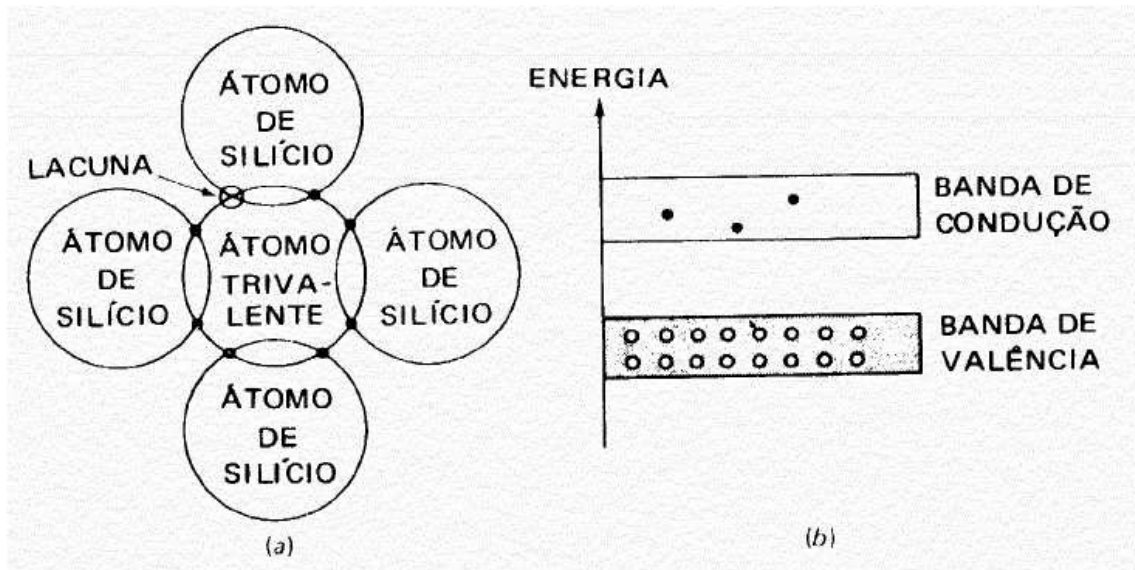


FIGURA 7 - Dopagem com impureza aceitadora

1.13 RESISTÊNCIA DE CORPO

Um semicondutor dopado ainda possui resistência elétrica, denominada resistência de corpo, quando é levemente dopado, possui resistência de corpo alta, à medida que a dopagem aumenta, a resistência de corpo diminui.

A resistência de corpo também é chamada resistência ôhmica, uma vez que obedece a lei de Ohm.

1.14 O DIODO NÃO POLARIZADO

É possível produzir um cristal com dopagem parte tipo-p e parte tipo-n, denominado cristal pn ou diodo (Figuras 8(a) e (b))., a primeira figura (a) mostra o cristal pn no instante de sua formação. O lado p possui várias lacunas (portadores majoritários) e o lado n possui vários elétrons livres (também portadores majoritários).

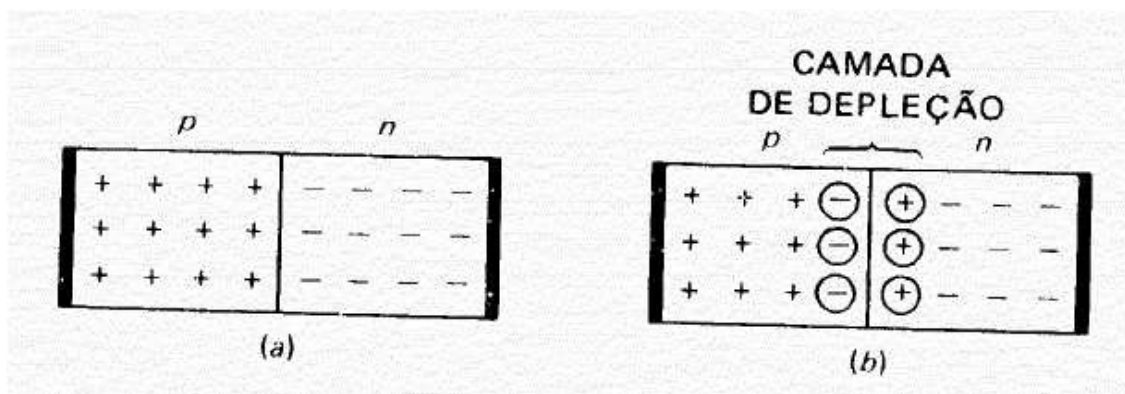


FIGURA 8 - (a) Antes da difusão (b) Depois da difusão

1.15 CAMADA DE DEPLEÇÃO

Devido à repulsão mútua, os elétrons livres no lado *n* difundem-se (espalham-se) em todas as direções, sendo que alguns atravessam a junção, quando um elétron livre sai da região *n*, a sua saída cria um átomo carregado positivamente (um íon positivo) na região *n*, o elétron, como um portador minoritário na região *p*, possui uma vida média curta. Logo após penetrar na região preenche uma lacuna, quando isso acontece, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).

Cada vez que um elétron difunde-se através da junção, ele cria um par de íons (Figura 8 (b)), íons estão fixos na estrutura do cristal por causa da ligação covalente e não podem se deslocar livremente como os elétrons livres e as lacunas, à medida que o número de íons aumenta, a região próxima a junção fica totalmente esgotada de elétrons livres ou lacunas, a região criada na junção chama-se camada de depleção.

1.16 BARREIRA DE POTENCIAL

Além de certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira a impedir o prosseguimento da difusão de elétrons livres através da junção, a intensidade da camada de depleção continua a aumentar com cada elétron que atravessa a junção até que se atinja um equilíbrio. Nesse ponto, a repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres através da junção, sendo a diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial.

A 25°C, esta barreira de potencial é aproximadamente igual a 0,7V para os diodos de silício (0,3V para os diodos de germânio).

1.17 POLARIZAÇÃO DIRETA

A figura 9 (a) mostra um diodo ligado a uma fonte de tensão CC em polarização direta, isto é, com o terminal positivo da fonte ligado à região p e o lado negativo da fonte ligado à região n.

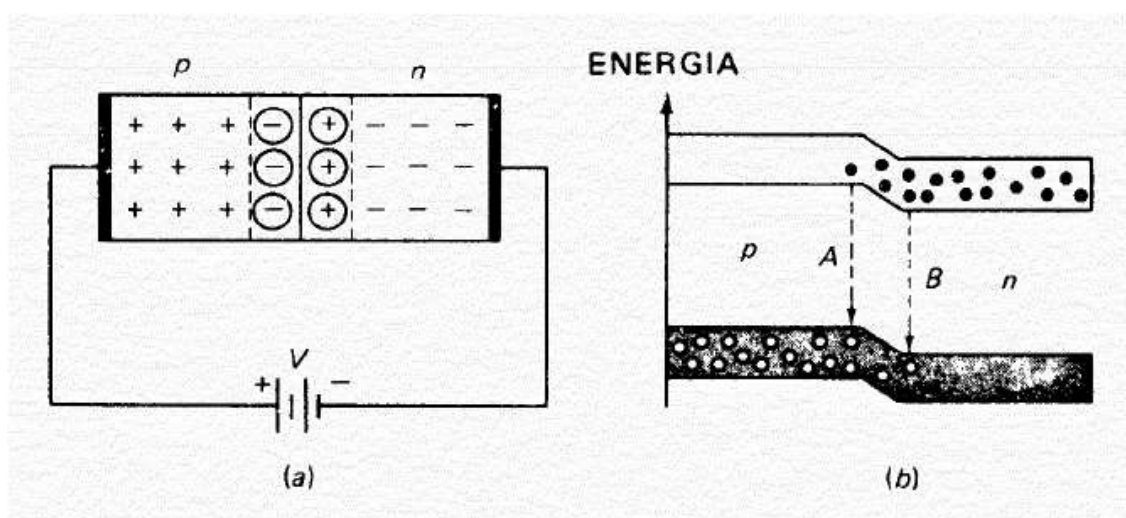


FIGURA 9 - (a) Polarização direta (b) Bandas

1.18 CORRENTE DIRETA ALTA

A polarização direta produz uma alta corrente direta, e o terminal negativo da fonte repele elétrons livres da região n em direção à junção, esses elétrons, com energia adicional, podem atravessar a junção e encontrar as lacunas, combinando ocorre em distâncias variáveis a partir da junção, dependendo de até onde um elétron livre possa evitar o encontro com uma lacuna. As chances de recombinação são maiores perto da junção, e a medida que os elétrons encontram as lacunas, eles se tornam elétrons de valência, e continuam a se deslocar para a esquerda através das lacunas do material p.

Quando os elétrons de valência atingem a extremidade esquerda do cristal, eles abandonam o cristal e escoam para o terminal positivo da fonte, no qual a história de vida de um único elétron que se desloca do terminal negativo para o terminal positivo da fonte é então, depois de deixar o terminal negativo, entra pela extremidade direita do cristal e o atravessa a região n como um elétron livre, e a

próxima à junção, recombina-se e torna-se um elétron de valência, atravessando a região p com um elétron de valência e depois de sair pela extremidade esquerda do cristal, segue para o terminal positivo da fonte.

1.19 BANDAS DE ENERGIA

A Figura 9 (b) mostra como visualizar o fluxo em termos de bandas de Energia, a barreira de potencial dá às bandas p um pouco mais de energia do que para as bandas n, um fluxo estável de elétrons de banda de condução desloca-se em direção à junção e preenche as lacunas próximas à junção, os elétrons capturados, agora elétrons de valência, movem-se para a esquerda a formar um fluxo estável através das lacunas na região p, dessa forma obtém-se um fluxo contínuo de elétrons através do diodo, e a medida que os elétrons livres desaparecem ao longe dos trajetos A e B, eles descem de um nível mais alto de energia para um outro mais baixo, a irradiar energia na forma de calor ou luz.

1.20. POLARIZAÇÃO REVERSA

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

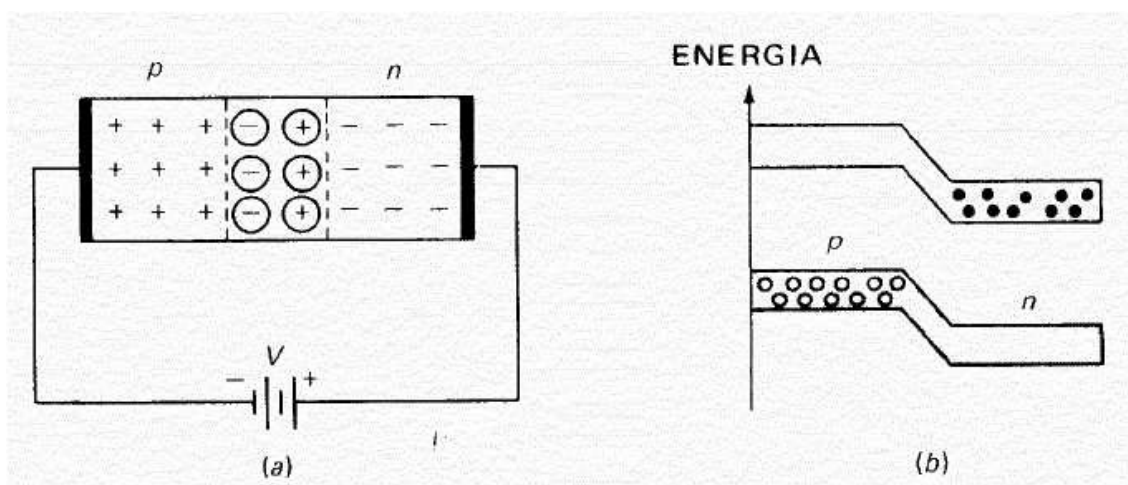


FIGURA 10 – (a) Polarização reversa (b) Bandas de energia

1.21 CAMADA DE DEPLEÇÃO

A polarização reversa força que os elétrons livres da região n se afastem da junção em direção ao terminal positivo da fonte, as lacunas da região p também se deslocam da junção para o terminal negativo, o afastamento dos elétrons e das

lacunas deixa mais íons positivos e negativos próximos à junção, respectivamente. Portanto, a camada de depleção fica mais larga, quanto maior a polarização reversa, maior torna-se a camada de depleção e a camada de depleção pára de aumentar quando sua diferença de potencial se iguala à tensão da fonte.

1.22 CORRENTE DE PORTADORES MINORITÁRIOS

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

1.23 CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL

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

1.24 CORRENTE REVERSA

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

1.25 TENSÃO DE RUPTURA

Se a tensão reversa for aumentada até certo ponto, atinge-se a tensão de ruptura do diodo, e ocorre que para diodos retificadores, a tensão de ruptura é geralmente maior que 50V , atingida a tensão de ruptura, o diodo passa a conduzir intensamente, a figura 11 (a) mostra um elétron produzido termicamente, e uma

lacuna na camada de depleção, devido à polarização reversa, o elétron livre é empurrado para a direita, ganhando velocidade, quanto maior a polarização reversa, mais rápido desloca-se o elétron, que pode colidir com um elétron de valência, e se estiver com energia o suficiente, formam-se dois elétrons livres, no qual elétrons livres podem se acelerar e desalojar outros elétrons de valência até ocorrer a maior avalanche possível e por causa do grande número de elétrons livres, o diodo conduz intensamente.

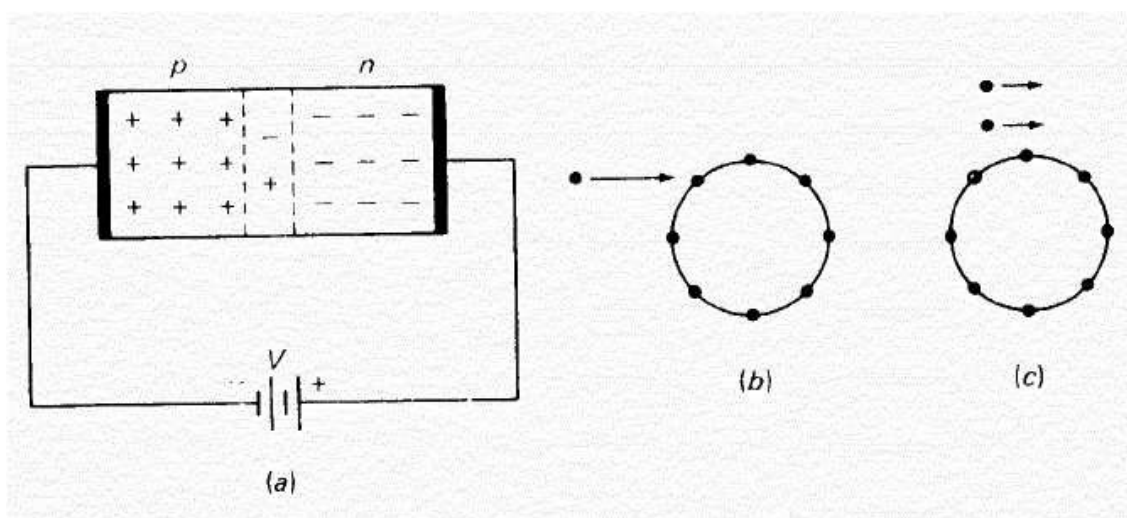


FIGURA 11 - Ruptura (a) portadores minoritários na camada de depleção (b) elétron livre atinge elétron de valência (c) Dois elétrons livres

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

1.26 EXTREMIDADES DO CRISTAL DO DIODO SEMICONDUTOR E OS CRISTAIS P e N.

A dopagem no diodo é feita pela introdução de elementos dentro de cristais tetravalentes, normalmente feitos de silício e germânio. Dopando esses cristais com elementos trivalentes, obterá átomos com sete elétrons na camada de valência, que

necessitam de mais um elétron para a neutralização (cristal P). Para a formação do cristal P, utiliza-se principalmente o elemento Índio . Dopando os cristais tetravalentes com elementos pentavalentes, obter-se-á átomos neutralizados (com oito elétrons na camada de valência) e um elétron excedente (cristal N).

Para a formação do cristal N, utiliza-se principalmente o elemento Fósforo. Quanto maior a intensidade da dopagem, maior será a condutibilidade dos cristais, pois suas estruturas apresentarão um número maior de portadores livres (lacunas e elétrons livres) e poucas impurezas que impedem a condução da corrente elétrica. Outro fator que influencia na condução desses materiais é a temperatura. Quanto maior for sua temperatura, maior será a condutibilidade pelo fato de que a energia térmica tem a capacidade de quebrar algumas ligações covalentes da estrutura se desfazerem, acarretando no aparecimento de mais portadores livres para a condução de veículo embriagado. Após dopadas, cada face dos dois tipos de cristais (P e N) terá uma determinada característica diferente da oposta, gerando regiões de condução do cristal, uma com excesso de elétrons, outra com falta destes (lacunas), e entre ambas, haverá uma região de equilíbrio por recombinação de cargas positivas e negativas, chamada de região de depleção (à qual possui uma barreira de potencial). Por meio da Física do estado sólido, os pesquisadores descobriram então, que a estrutura atômica de certos materiais como o Germânio ou o Silício continha alguns elétrons livres os quais escapavam, deixando buracos ou vacâncias de cargas na matriz do cristal. Assim formatada a chamada camada de contorno ou junção P-N, permitia o fluxo da corrente em apenas uma direção após a aplicação de uma corrente alternada entre os dois pontos de contatos no cristal.

Basicamente, este tipo de diodo feito pelo homem consiste em conformar a estrutura atômica do Germânio adicionando-se a sua matriz pequenas quantidades de impurezas conhecidas como DOPE.

Estas impurezas são átomos de diversos elementos químicos, geralmente metais, os quais têm a sua própria configuração eletrônica. Assim, por exemplo, enquanto alguns elementos químicos como o Fósforo, o Arsênico, e o Antimônio têm 5 elétrons na sua órbita externa por outro lado o Alumínio, o Índio, o Gálio ou o Boro somente 3.

Estes átomos são chamados de doadores ou receptores respectivamente devido a sua capacidade de doar ou receber elétrons. Ao adicionarem-se estas impurezas na matriz do cristal de Germânio, obtêm-se dois tipos de estrutura

cristalina: uma mistura contendo excesso de elétrons livres, também chamada de Germânio negativo e, outra com falta de elétrons, chamada de Germânio positivo.

Agora, ou juntar-se estes dois tipos de estrutura ou seja, o Germânio P e N, ocorre uma transferência de carga elétrica na camada de contorno da junção P-N. Desta forma, o cristal P e N tem um excesso e falta de elétrons respectivamente. Estas cargas repelem-se entre si evitando-se uma posterior difusão de elétrons e buracos no cristal, gerando ao mesmo tempo, uma diferença de potencial. Na realidade este tipo de arranjo cristalino opera como um retificador, ou seja, quando uma tensão positiva em relação ao cristal P é aplicada ao cristal N, a mesma é aumentada sem qualquer fluxo de corrente. Por outro lado, se uma tensão negativa é aplicada ao cristal N, é neutralizada, permitindo o aparecimento de uma pequena tensão de forma que a mesma induz o movimento de elétrons continuamente. Tem-se, assim, a formação de um diodo cujo cristal ou material semiconductor é o Germânio.

Em princípio, o diodo de contato pontual era quase idêntico aos primitivos detectores a cristal. Sua estrutura consistia de uma pequena bolacha de Germânio, onde em sua face plana era feito o contato por meio de um fio de Tungstênio espiralado, semelhante ao princípio do bigode de gato inventado por Pickard.

O diodo de Germânio quando comparado ao seu congênere termiônico, tinha várias vantagens como ausência do filamento, tamanho e custo reduzido, uma vez que podia atuar tanto como elemento detector como comutador. Assim foi largamente empregado nos primeiros tipos de televisores e computadores. Entretanto, como visto o diodo contato pontual nada mais era do que uma versão melhorada do primitivo detector a cristal. Desta maneira, foram logo substituídos por dispositivos mais avançados, os chamados diodos sem contato, cujo princípio operacional estava agora intimamente ligado na conformação de espessuras uniformes das junções, diretamente no material semiconductor.

1.27 JUNÇÃO P-N, OU BARREIRA DE POTENCIAL.

Da mesma forma que os elétrons livres do cristal N se movimentam, as cargas positivas ou lacunas(buracos) conduzem corrente elétrica pelo fato de que uma lacuna é ocupada por um elétron proveniente de uma corrente elétrica que passa sobre o cristal e que força a criação de outra lacuna atrás de si. Entre as duas regiões, uma de maioria negativa, outra de maioria positiva, existe uma terceira, esta

de maioria neutra, isto é, nem de carga negativa, nem de carga positiva, é a junção entre ambas, chamada de região neutra da junção P-N. Na região neutra não há excesso de elétrons nem lacunas porque alguns elétrons do material tipo N se difundem pela junção e entram em combinação com algumas lacunas (buracos) do material tipo P, reciprocamente, algumas lacunas(buracos) se difundem pela junção e entram em combinação com alguns elétrons do material do tipo N. Com a passagem de lacunas para a camada N, gera-se um pequeno potencial elétrico positivo e com a passagem de elétrons livres para a camada P, gera-se um pequeno potencial elétrico negativo, gerando uma pequena tensão interna, por isso do nome barreira de potencial, que pode chegar aproximadamente a 0,3 volts nos diodos de germânio e 0,7 volts nos diodos de silício. Essa barreira de potencial causa uma queda de tensão, interferindo na tensão sobre os outros componentes pertencentes ao mesmo circuito do diodo. Quando a tensão a que é submetido o diodo ,alimentado por uma fonte geradora, é menor que sua barreira de potencial(<0,3V ou <0,7V), a corrente elétrica é baixíssima pela oposição ao fluxo de portadores livres feita pela barreira de potencial, porém se a tensão a que for submetido o diodo for mais alta do que sua barreira de potencial, a corrente elétrica torna-se alta e a oposição dos portadores livres feita pela barreira de potencial é pequena em relação a tensão de alimentação, sendo quase desprezível.

1.28 POLARIZAÇÃO DO DIODO

A polarização do diodo é dependente da polarização da fonte geradora. A polarização é direta quando o pólo positivo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal P (chamado de anodo) e o pólo negativo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal N (chamado de catodo). Assim, se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna do diodo, os portadores livres se repeliram por causa da polaridade da fonte geradora e conseguiram ultrapassar a junção P-N, movimentando-os e permitindo a passagem de corrente elétrica. A polarização é indireta quando o inverso ocorre. Assim, ocorrerá uma atração das lacunas do ânodo (cristal P) pela polarização negativa da fonte geradora e uma atração dos elétrons livres do catodo (cristal N) pela polarização positiva da fonte geradora, sem existir um fluxo de portadores livres na junção P-N, ocasionando no bloqueio da corrente elétrica. Pelo fato de que os diodos fabricados não são ideais (contém impurezas), a condução de corrente elétrica no diodo (polarização direta) sofre uma resistência

menor que 1 ohm, que é quase desprezível. O bloqueio de corrente elétrica no diodo (polarização inversa) não é total devido novamente pela presença de impurezas, tendo uma pequena corrente que é conduzida na ordem de microampères, chamada de corrente de fuga, que também é quase desprezível.

1.29 TESTES COM O DIODO

Os diodos, assim como qualquer componente eletrônico, operam em determinadas correntes elétricas que são especificadas em seu invólucro ou são dadas pelo fabricante em folhetos técnicos. Além da corrente, a tensão inversa (quando o diodo está polarizado inversamente) também é um fator que deve ser analisado para a montagem de um circuito e que tem suas especificidades fornecidas pelo fabricante. Se ele for alimentado com uma corrente ou tensão inversa superior a que ele suporta, o diodo pode danificar, ficando em curto ou em aberto. Utilizando de um ohmímetro ou um multímetro com teste de diodo, pode-se verificar se ele está com defeito. Colocando-se as ponteiros de prova desses aparelhos nas extremidades do diodo (catodo e ânodo), verifica-se que existe condução quando se coloca a ponteira positiva no ânodo e a negativa no catodo, além de indicar isolação quando ocorre o inverso. Assim o diodo está em perfeitas condições de operação e com isso é possível a localização do catodo e do ânodo, porém se os aparelhos de medição indicarem condução dos dois caminhos do diodo, ele está defeituoso e em curto. Se os aparelhos de medição indicarem isolação nos dois caminhos, ele também está defeituoso e em aberto.

1.30 USOS

O fenômeno da condutividade em um só sentido é aproveitado como um chaveamento da corrente elétrica para a retificação de sinais senoidais, portanto, este é o efeito diodo semicondutor tão usado na eletrônica, pois permite que a corrente flua entre seus terminais apenas numa direção. Esta propriedade é utilizada em grande número de circuitos eletrônicos e nos retificadores.

Os retificadores são circuitos elétricos que convertem a tensão CA (AC) em tensão CC (DC). CA vem de Corrente alternada, significa que os elétrons circulam em dois sentidos, CC (DC), Corrente contínua, isto é circula num só sentido.

A certa altura o potencial U , formado a partir da junção n e p não deixa os elétrons e lacunas movimentarem-se, este processo dá-se devida assimetria de cargas existente.

1.31 TIPOS DE DIODOS SEMICONDUTORES

Os diodos são projetados para assumir diferentes características: diodos retificadores são capazes de conduzir altas correntes elétricas em baixa frequência, diodos de sinal caracterizam-se por retificar sinais de alta frequência, diodos de chaveamento são indicados na condução de altas correntes em circuitos chaveados. Dependendo das características dos materiais e dopagem dos semicondutores há uma gama de dispositivos eletrônicos variantes do diodo:

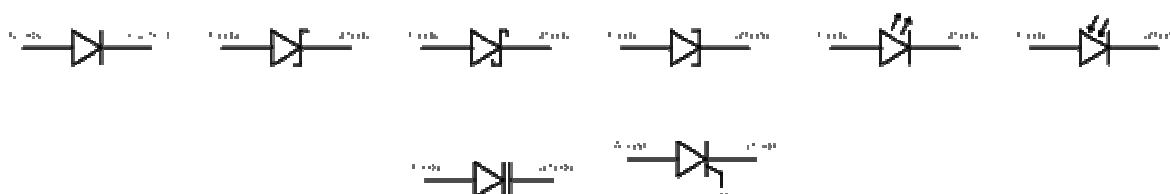


FIGURA 12 – Diferentes tipos de diodos.

2. REFERÊNCIAS

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

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Diodo>

<http://www.fazano.pro.br/port95.html>

LED: DIODO EMISSOR DE LUZ

Daniel Motter

1. INTRODUÇÃO

Diodo emissor de luz é um caso especial de diodo, onde nele, devido ao material envolvido em sua construção, há uma grande emissão de energia na forma de uma determinada frequência, que pode ser tanto na faixa do espectro visível, quanto no infravermelho.

Os diodos compostos de matérias como o silício e o germânio, que são os materiais que compõem os dispositivos semicondutores mais utilizados na engenharia, também apresentam uma parte de sua energia emitida na forma de fótons, mas esta é insignificante e nem pode ser notada.

Os LEDs são as lâmpadas promissoras, pois apresenta aspectos muito favoráveis em questão de consumo de energia e impacto ambiental.

2. HISTÓRICO

As pesquisas relacionadas aos diodos emissores de luz decorreram da seguinte forma:

Em 1920 foi criado o primeiro LED pelo russo Oleg Vladimirovich Losev, onde seus estudos foram divulgados em revistas científicas alemãs, russas e britânicas, mas sua descoberta não gerou uma utilização prática para os LEDs nas décadas seguintes;

41 anos depois, os cientistas Bob Biard e Gary Pittman, trabalhando na Texas Instruments, descobriram o LED infravermelho, que emite radiação infravermelha a se passar uma corrente em GaAs (arsenieto de gálio);

No ano seguinte o primeiro espectro visível prático, com uma emissão da frequência da luz vermelha, foi desenvolvido por Nick Holonyak Jr, enquanto trabalhava na General Company. Holonyak é visto como o pai do diodo emissor de luz;

No início da década de 70 M. George Craford, um antigo aluno de graduação Holonyak, inventou o primeiro LED amarelo e melhorou o brilho do LED vermelho - alaranjado por um fator de dez;

Em fevereiro de 2008, na Universidade Bilkent, na Turquia, foi constatado uma luz visível de 300 lumens por watt de eficiência de um LED.

3. TEORIA BÁSICA

LED (Light-Emitting Diode) é um dispositivo semicondutor de junção $p-n$, onde a polaridade da tensão externa aplicada, a constituição e a dopagem dos materiais envolvidos influenciam na emissão da luz. Isto é, influencia na emissão de ondas de diferentes frequências (ou comprimentos de onda), que pode ser ondas como o infravermelho ou do espectro visível.

Para uma apresentação completa da teoria básica deste dispositivo, será necessário mostrar como ocorre a condução elétrica em materiais. Para isso, determinaremos este fenômeno para materiais condutores, isolantes e principalmente para os materiais semicondutores, onde será abordado o diodo (dispositivo semicondutor de junção $p-n$), e os LEDs, que são um caso específico de diodo.

4. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

4.1 MATERIAIS CONDUTORES

Materiais condutores são metais que apresentam uma estrutura cristalina e estão ligados uns aos outros pelos seus respectivos elétrons de valência, na chamada ligação metálica. As ligações metálicas nos metais sólidos permitem o movimento livre dos elétrons de valência, uma vez que eles são compartilhados por muitos átomos, não estando ligados a um átomo específico. Os elétrons de valência podem ser vistos como constituindo uma nuvem de carga elétrica em torno de “cernes” positivos (núcleo).

Será apresentado o modelo de bandas de energia dos elétrons em metais sólidos, o qual permite compreender o mecanismo da condução elétrica nos metais. Consideraremos o metal sódio, pois apresenta uma estrutura eletrônica relativamente simples.

Nos átomos isolados, os elétrons estão ligados aos núcleos e podem apenas ocupar níveis bem definidos de energia e devem obedecer ao princípio da exclusão de Pauli, sendo que os orbitais devem ser preenchidos de acordo com suas regras, onde apenas deve haver dois átomos por nível.

Os 11 elétrons do átomo neutro de sódio distribuem-se colocando dois no nível 1s, dois no nível 2s, seis no nível 2p e um no nível 3s, como esta indicado na figura 1.a. Os elétrons nos níveis mais baixos ($1s^1$, $2s^2$, $2p^6$) estão fortemente ligados e constituem os elétrons de cerne do átomo de sódio (figura 1b). O elétron exterior $3s^1$ pode participar na ligação com outros átomos e designa-se por elétron de valência.

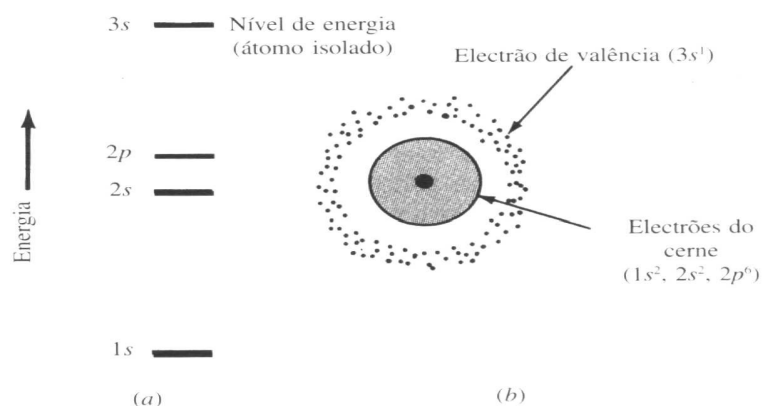


FIGURA 1: (a) Princípio Níveis de energia num átomo isolado de sódio. (b) Arranjo dos elétrons num átomo de sódio.

Numa amostra sólida de sódio, os átomos estão próximos e tocam uns nos outros. Os elétrons de valência encontram-se deslocados (figura 2a) e inter-atuam; as suas órbitas interpenetram-se de tal modo que os níveis de energia originais, bem definidos, separam-se uns dos outros e originam bandas de energia mais largas (figura 2b). Os elétrons interiores não originam bandas, pois estão protegidos ou blindados pelos elétrons de valência.

Cada elétron de valência numa amostra de sódio, por exemplo, tem de estar, de acordo com o princípio da exclusão de Pauli, num nível de energia ligeiramente diferente. Assim, se houver N átomos de sódio na amostra, onde N pode ser um número enorme, haverá na banda 3s, N níveis de energia $3s^1$ que diferem ligeiramente. Cada nível de energia designa-se por estado. Na banda de energia de valência, os níveis estão tão próximos que formam uma banda continua de energia.

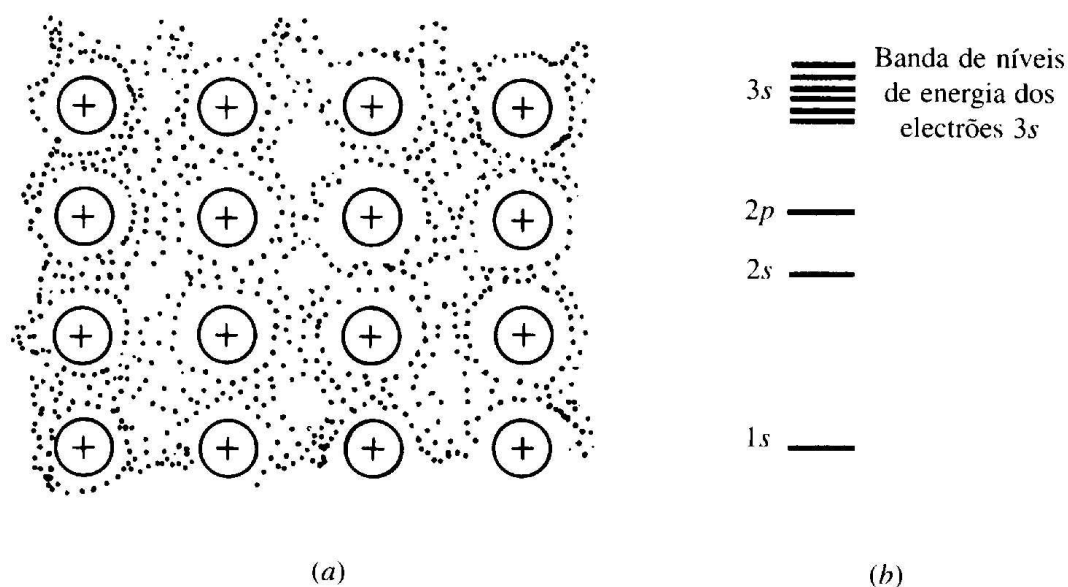


FIGURA 2: (a) Elétrons de valência deslocados numa amostra de metal sódio (b) Níveis de energia numa amostra de metal sódio.

No sódio metálico há sobreposição entre as bandas de energia $3s$ e $3p$, mas como há apenas um elétron $3s$ no átomo de sódio, a banda $3s$ está somente semi-preenchida (figura 3a).

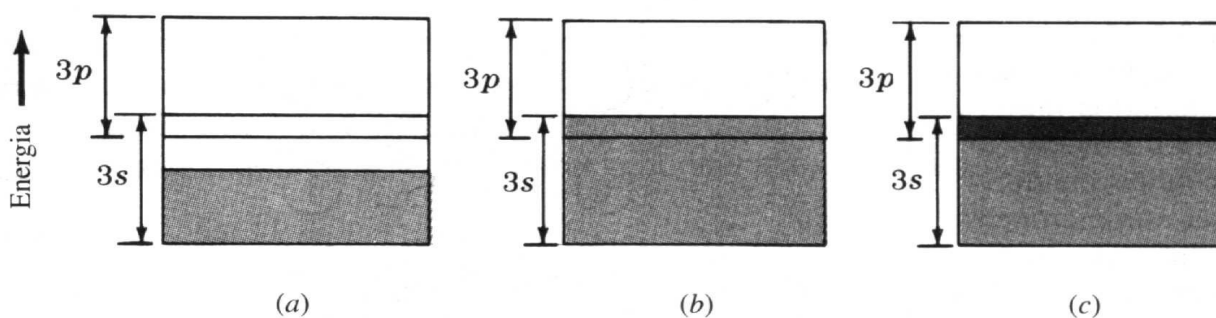


FIGURA 3: a) Sódio ($3s^1$) b) Magnésio ($3s^2$) c) Alumínio ($3s^2 3p^1$)

Em consequência, é necessária muito pouca energia para excitar os elétrons do sódio desde os níveis ocupados mais altos até os níveis desocupados mais baixos (as bandas de valência e de condução estão sobrepostas). Por esse motivo, o sódio é um bom condutor, já que basta uma quantidade muito pequena de energia para nele originar uma corrente de elétrons. O cobre, a prata e o ouro também tem bandas s exteriores semi-preenchidas.

No magnésio metálico, o nível 3s está preenchido com dois elétrons. Mas a banda de 3s se sobrepõe à banda 3p, o que permite que alguns dos elétrons passem para essa banda, originando uma banda combinada 3sp parcialmente preenchida (figura 3b). Não obstante de a existência de uma banda 3s totalmente preenchida, o magnésio é um bom condutor. Analogamente, o alumínio que tem uma configuração $3s^2 3p^2$ é também um bom condutor, porque a banda 3p parcialmente preenchida se sobrepõe à banda preenchida 3s (figura 3c).

4.2 MATERIAIS ISOLANTES

Nos isoladores, os elétrons são fortemente ligados aos átomos onde as ligações iônicas ou covalentes intervêm, e não são “livres” para que possam conduzir eletricidade, a menos que ofereça-lhes uma energia superior a E_g , que é o hiato de energia entre a banda de valência superior cheia e a banda de condução inferior vazia. A energia E_g pode ser da ordem de 6 a 7 eV no diamante puro, que é um ótimo isolante e seus elétrons estão fortemente presos em ligações covalentes tetraédricas sp^3 . A figura 4 apresenta o modelo da banda de energia em um isolante.



FIGURA 4 - Banda de energia de um material isolante.

4.3 MATERIAIS SEMICONDUTORES

Os semicondutores podem ser separados em dois grupos, semicondutores intrínsecos e extrínsecos.

4.3.1 SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS: mecanismos de condução elétrica.

Os semicondutores são materiais cujas condutividades elétricas se situam entre as dos metais (bons condutores) e dos isoladores (maus condutores). Os

semicondutores intrínsecos são semicondutores puros, cuja condutividade elétrica é determinada pelas suas propriedades condutoras próprias ou intrínsecas. Os elementos puros silício e germânio são materiais semicondutores intrínsecos. Estes elementos, que pertencem ao grupo 14 da Tabela Periódica, têm estrutura cúbica do diamante com ligações fortemente direcionais (figura 5). Os átomos estão ligados tetraedricamente na rede cristalina por pares de elétrons em orbitais ligantes híbridas sp^3 . Nesta estrutura, cada átomo de silício ou germânio contribui com quatro elétrons de valência.

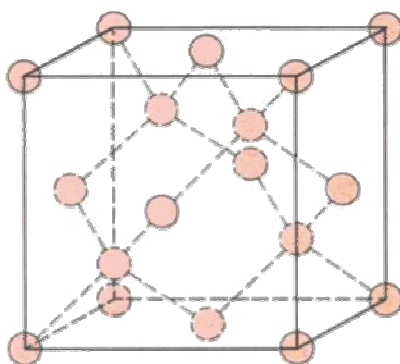


FIGURA 5 - Estrutura cristalina cúbica do diamante.

Sobre a condução elétrica em semicondutores intrínsecos, sabemos que os elétrons ligantes não podem mover-se através da rede cristalina e, portanto, não podem conduzir eletricidade a menos que seja fornecida energia suficiente para excitá-los para fora das suas posições ligantes, já que estes não possuem elétrons livres como os condutores, e sim, utilizam seus quatro elétrons de valência para fazer as ligações covalentes. Quando é fornecida uma quantidade crítica de energia a um elétron de valência, capaz de excitá-lo para fora de sua posição ligante, ele transforma-se em um elétron livre de condução, ao mesmo tempo em que se origina um “buraco” positivamente carregado na rede cristalina.

Na condução dos semicondutores, tanto o elétron quanto o buraco atuam como transportadores de carga. Um buraco é uma carga positiva de igual módulo à carga do elétron.

No diagrama de bandas de energia dos semicondutores intrínsecos (Si ou Ge, por exemplo), os elétrons ligantes do cristal covalentemente ligado ocupam níveis de energia na banda de valência, a qual está quase completamente preenchida a 20 °C.

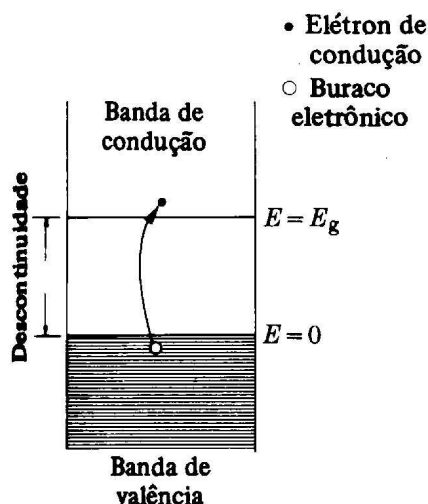


FIGURA 6 - Diagrama de bandas de energia de um semicondutor intrínseco.

Acima da banda de valência está o hiato de energia proibida, na qual não há estados de energias permitidos. No silício a 20 °C, o hiato é de 1,1 eV. Acima do hiato de energia, encontra-se uma banda de condução praticamente vazia.

4.3.2 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

Os semicondutores extrínsecos são soluções sólidas substitucionais muito diluídas, nas quais os átomos de impurezas dissolvidas têm características de valência diferentes dos átomos da rede cristalina dos solventes. Nestes semicondutores, as concentrações de átomos de impurezas adicionados situam-se habitualmente no intervalo entre 100 e 1000 partes por milhão.

4.3.2.1 Semicondutores extrínsecos do tipo *n* (negativo)

Quando um átomo de impureza de um elemento do grupo 15 (fósforo, por exemplo) substituir um átomo de silício, que é um elemento do grupo 14, haverá um elétron em excesso para além dos quatro necessários para estabelecer as ligações covalentes tetraédricas da rede do silício (figura 7. b).

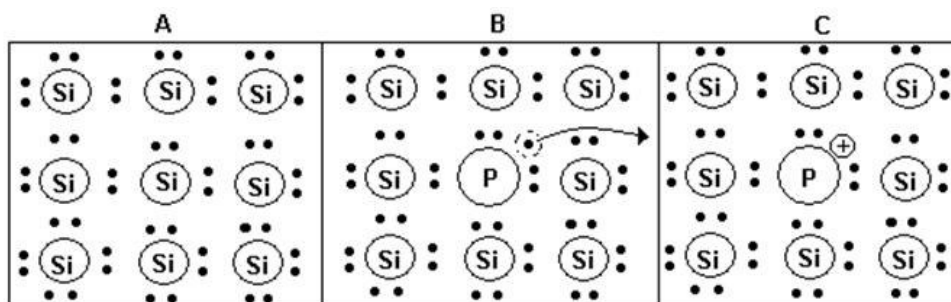
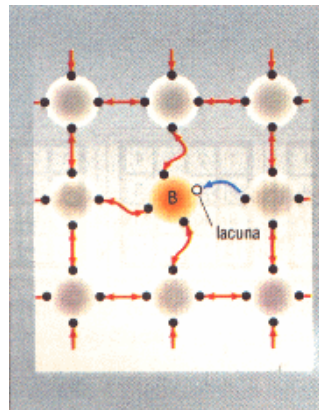


FIGURA 7 - (a) Estrutura do silício puro. (b) Estrutura do silício dopado com Fósforo (c) Quando o elétron em excesso vai para a banda de condução, o fósforo adquire uma carga positiva.

Este elétron extra encontra-se fracamente ligado ao núcleo positivamente carregado do fósforo, com uma energia de ligação de 0,044 eV a 27°C, logo, é necessária apenas uma energia de 0,044 eV para retirar o elétron extra, permitindo-lhe participar na condução elétrica. Sobre aplicação de um campo elétrico, o elétron extra transforma-se em um elétron livre, capaz de conduzir corrente, e o átomo de fósforo fica ionizado adquirindo uma carga positiva (figura 7c).

4.3.2.2 Semicondutores extrínsecos do tipo *p* (positivo)

Mesmo procedimento que para semicondutores extrínsecos do tipo *n*, mas nesse caso, ao invés de substituirmos um átomo de silício por um elemento da família 15, iremos substituir por uma da família 13, como o Boro. Isso causará a falta de um elétron nos orbitais ligantes, e aparece um buraco na estrutura de ligação do silício (figura 8).



**rede cristalina do silício
contaminado com material
trivalente**

FONTE: "Imagens da Física"
Ugo Amaldi - Scipione

FIGURA 8: Estrutura de silício dopada com boro.

Logo, as formas extrínsecas n e p dos semicondutores são representadas na figura 9 para n (negativa) e na figura 10 para forma p (positiva).

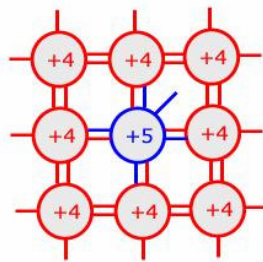


FIGURA 9: semicondutor do tipo n

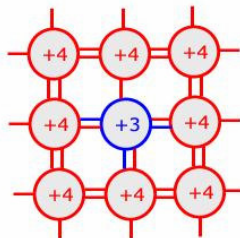


FIGURA 10: semicondutor do tipo p

5. DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

5.1 O DIODO DE JUNÇÃO *P-N* EM EQUILÍBRIO

Consideraremos um caso ideal, em que se forma uma junção juntando semicondutores de silício do tipo *p* e do tipo *n*. Antes de se formar a junção, os dois tipos de semicondutores são eletricamente neutros. No material do tipo *p*, os buracos são transportadores majoritários e os elétrons são transportadores minoritários. No material do tipo *n*, os elétrons são os transportadores majoritários e os buracos os minoritários.

Após junção dos materiais do tipo *n* e *p*, os transportadores majoritários na junção ou próximo dela difundem-se através da junção e recombina-se (figura 11).

Uma vez que os íons formados na junção ou próximo dela são fisicamente maiores e mais pesados que os elétrons e buracos, eles permaneceram nas respectivas redes do silício.

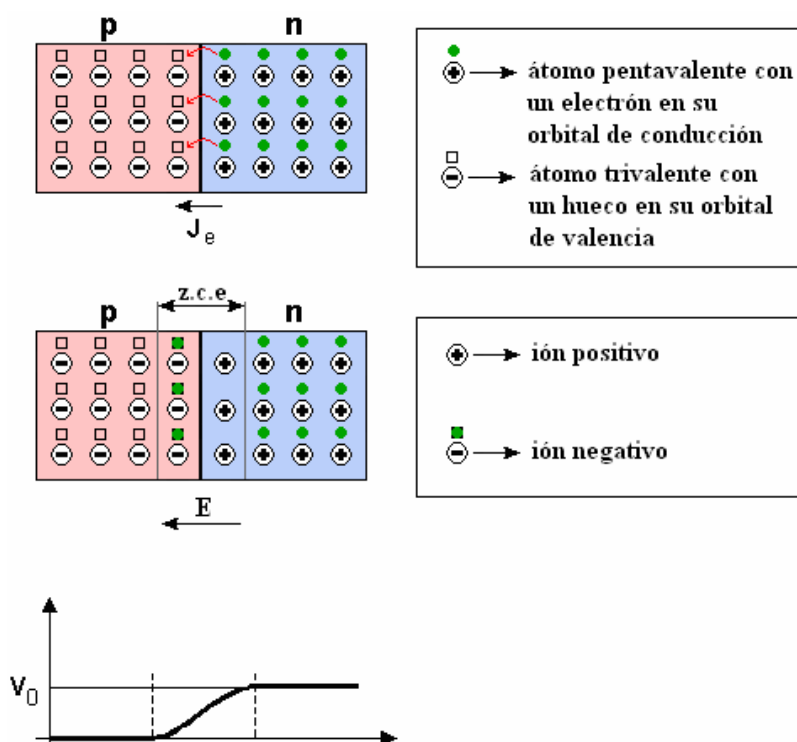


FIGURA 11: Diodo de junção *p-n* indicando-se a difusão para a junção dos portadores majoritários em uma situação de equilíbrio.

Após algumas recombinações dos transportadores majoritários na junção, o processo cessa, pois os elétrons são impedidos de atravessar a junção para o

material do tipo p , devido à repulsão dos íons negativos. O mesmo acontece para os buracos.

Os íons imóveis da junção dão origem a uma zona isenta ou despejada de transportadores majoritários designada por região de depleção.

Em condição de equilíbrio, isto é, sem potencial externo aplicado ao dispositivo, a uma diferença ou barreira de potencial que impede o fluxo de transportadores positivos.

5.2 O DIODO DE JUNÇÃO P - N POLARIZADO INVERSAMENTE

Caso em que se aplica uma tensão externa com o positivo da fonte no material tipo n e a o negativo no material de tipo p (figura 12).

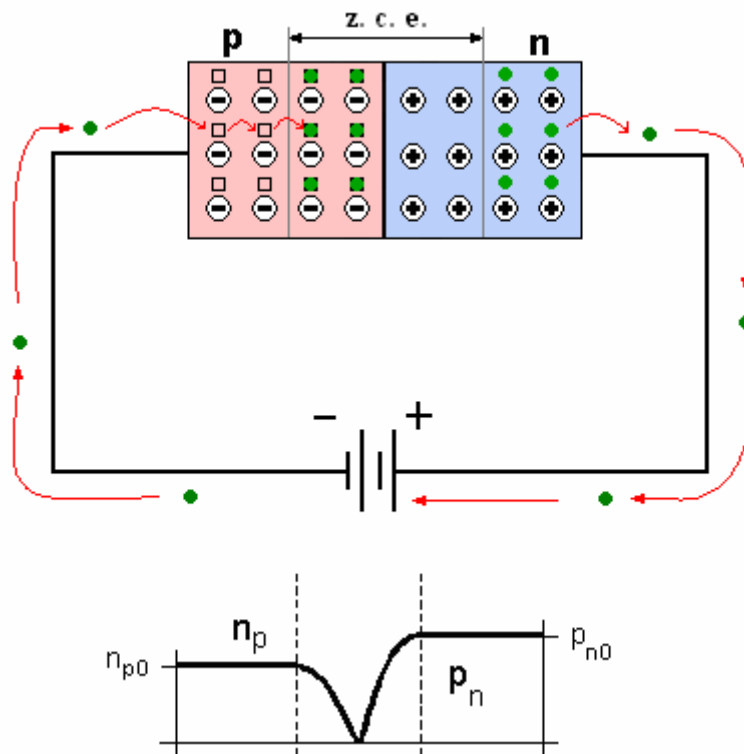


FIGURA 12: diodo polarizado inversamente.

Para estas ligações, os elétrons (transportadores majoritários) do material tipo n são atraídos para o terminal positivo da fonte, afastando-se da junção. O mesmo ocorre para os buracos (portadores majoritários no material tipo p) no material do tipo p . Eles são atraídos pelo negativo da fonte, também se afastando da fonte. O movimento destes portadores majoritários em ambos os materiais causa um aumento da largura da região de depleção, isso faz com que não haja corrente

transportada pelos portadores majoritários, apenas uma corrente de fuga pelos portadores minoritários que é quase desprezível.

5.3 O DIODO DE JUNÇÃO *P-N* POLARIZADO DIRETAMENTE

Se for aplicada uma tensão externa com o positivo da fonte no material tipo *p* e a o negativo no material de tipo *n* (figura 13).

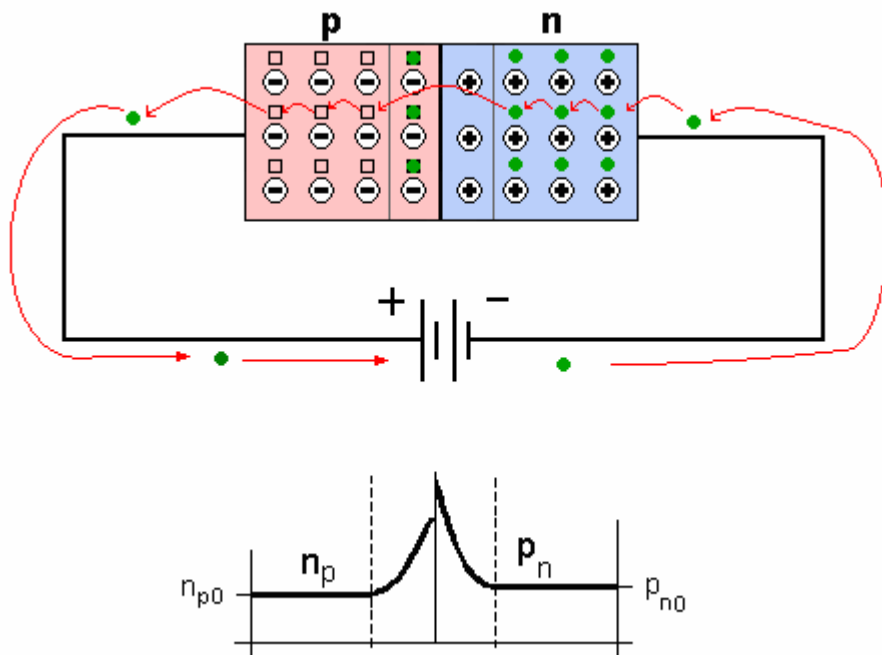


FIGURA 13: diodo polarizado diretamente.

Em polarização direta, a barreira de energia na junção torna-se menor, o que permite que alguns elétrons e buracos atravessem a junção e se recombinem.

Nesse tipo de polarização, a entrada de elétrons da fonte se dá pelo material negativo do diodo. Por cada elétron que atravessa a junção e se recombina com um buraco, outro elétron vindo da bateria. Por outro lado, por cada buraco que se recombina com um elétron no material do tipo *n*, há formação de um novo buraco por cada elétron que abandona o material do tipo *p*, movendo-se para o terminal positivo da fonte.

Como a barreira de energia que se opõe à corrente de elétrons é reduzida quando a junção *p-n* está polarizada, há uma passagem apreciável de corrente.

Se não tivéssemos considerado sendo um caso ideal, levaríamos em conta as correntes geradas pelos portadores minoritários, e o gráfico de um diodo polarizado reversa e diretamente seria o seguinte.

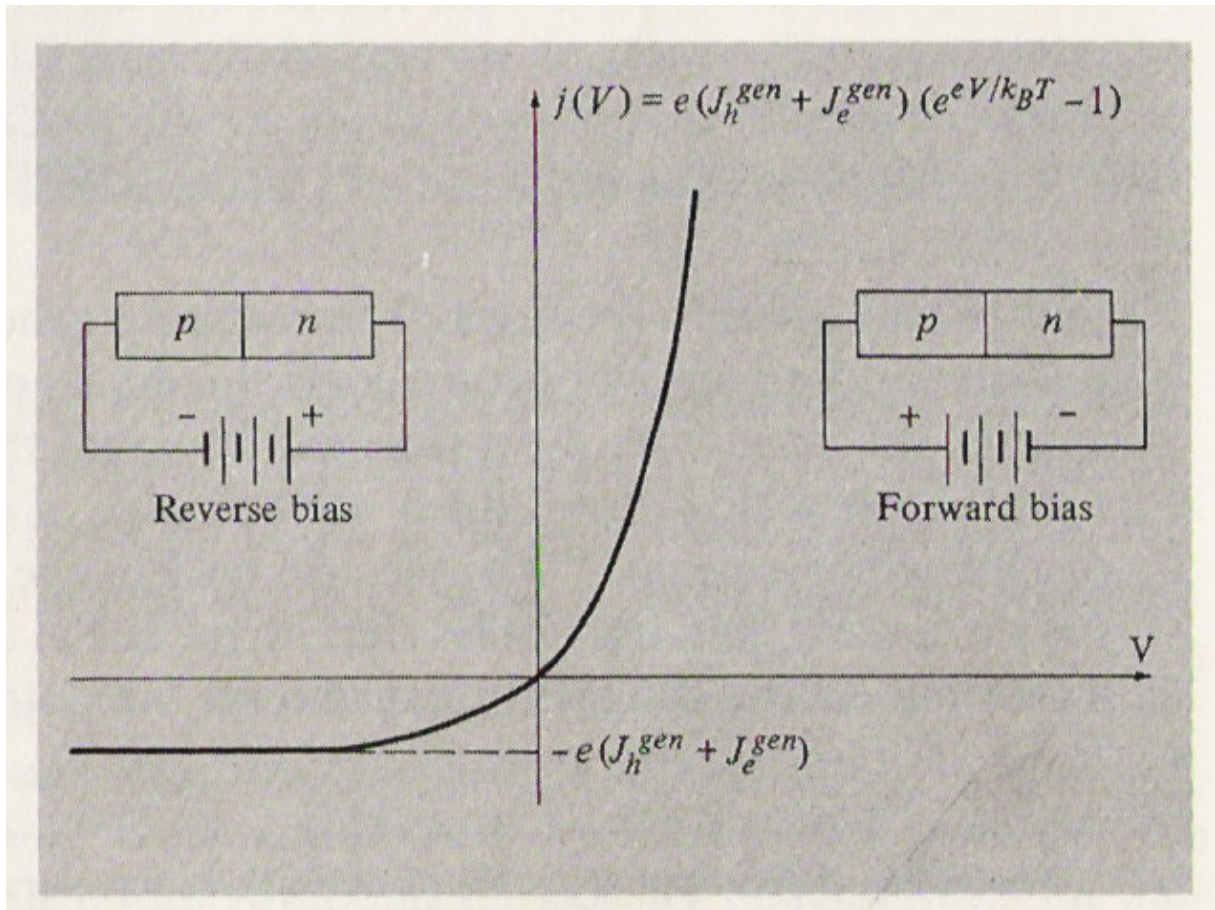


FIGURA 14: Diodo com a influência dos portadores minoritários.

6. FUNCIONAMENTO DO LED

Hoje em dia, os mostradores digitais estão em todas as partes, dos relógios de cabeceira aos fornos de microondas, e seria difícil passar sem os raios invisíveis da luz infravermelha que controlam as portas dos elevadores e fazem funcionar o controle remoto dos receptores de televisão. Em quase todos esses casos, a luz é emitida por uma junção p-n funcionando como um diodo emissor de luz (LED - Light-Emitting Diode). A seguir será apresentado como uma junção p-n pode emitir luz.

Considere primeiro um semiconductor simples. Quando um elétron da extremidade inferior da banda de condução preenche um buraco na extremidade superior da banda de valência (um fenômeno conhecido como recombinação), uma energia E_g igual à diferença entre os dois níveis é liberada. No silício, germânio, e

muitos outros semicondutores, esta energia se manifesta na forma de vibrações da rede cristalina. Em alguns semicondutores, porém, a energia pode ser emitida como um fóton de energia hf , cujo comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{\frac{E_g}{h}} = \frac{hc}{E_g}$$

Para que um semicondutor emita uma quantidade razoável de luz, é preciso que haja um grande número de recombinações. Isto não acontece em um semicondutor puro porque, à temperatura ambiente, o número de par elétron-buraco é relativamente pequeno, e dopar o semicondutor não resolve este problema. Um semicondutor do tipo n contém um grande número de elétrons, mas não existem buracos suficientes para se recombinar com todos esses elétrons; um semicondutor tipo p contém um grande número de buracos, mas não existem elétrons suficientes para se recombinar com todos esses buracos. Assim, nem um semicondutor puro nem um semicondutor dopado geram luz suficiente para serem usados em aplicações práticas.

O que precisamos é de um semicondutor nos quais elétrons e buracos estejam presentes na mesma região, em grandes números. Podemos obter um dispositivo com esta propriedade polarizando diretamente uma junção $p-n$ fortemente dopada (figura 15). Neste caso, a corrente i que atravessa a junção serve para injetar elétrons no lado n e buracos no lado p . Estes elétrons e buracos se encontram nas proximidades do plano de junção e se recombinam em grandes números, produzindo uma boa intensidade luminosa.

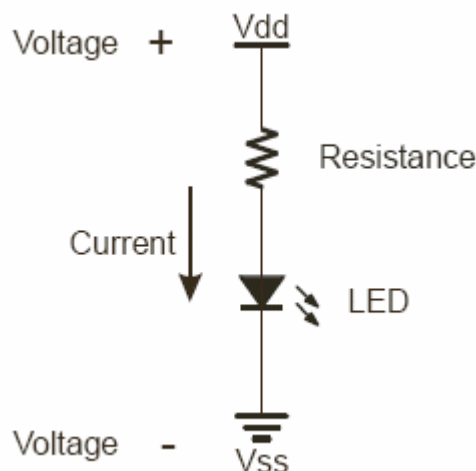


FIGURA 15: LED polarizado diretamente.

Alguns LEDs comerciais projetados para emitir luz visível são feitos de arsenieto de gálio (lado n) e arsenieto fosfeto de gálio (lado p). Um arranjo no qual do lado p existem 60 átomos de arsênio e 40 átomos de átomos de fósforo para cada 100 átomos de gálio, resulta em uma energia E_g de 1,8 eV, que corresponde à luz vermelha. Usando diferentes proporções de arsênio, fósforo e outros elementos (como o alumínio), é possível fabricar LEDs que emitem luz de praticamente qualquer cor, incluindo o infravermelho.

Cada vez que um elétron faz a recombinação com uma carga positiva, energia potencial elétrica é convertida em energia eletromagnética. Para cada recombinação de uma carga negativa e uma positiva, um quantum de energia eletromagnética é emitido na forma de um fóton de luz com uma frequência característica do material semiconductor, geralmente uma combinação de elementos químicos como o gálio, arsênio e fósforo.

Então o LED é um diodo que emite luz quando energizado. Em qualquer junção $p-n$ polarizada diretamente, existe, dentro da estrutura e próximo principalmente da junção, uma recombinação de elétrons e buracos. Esta recombinação exige que a energia do elétron livre não ligado seja transferida para um outro estado. Em todas as junções $p-n$ do semiconductor, parte desta energia será emitida na forma de calor e parte na forma de fótons. No silício e germânio, a maior parte é na forma de calor, e a luz emitida é insignificante. Em outros materiais, como fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) ou fosfeto de gálio (GaP), o numero de fótons da energia luminosa é suficiente para criar uma fonte de luz bem visível. Em função do tipo de energia que é liberada podem se distinguir dois tipos de recombinação: Recombinação não radiante na qual a maioria da energia de recombinação se libera como energia térmica e a recombinação radiante, a maioria da energia de recombinação se libera em forma de luz.

6.1 MATERIAIS UTILIZADOS NOS LED

A cor da luz emitida pelo LED depende unicamente do material e do processo de fabricação (principalmente da dopagem de impurezas).

A seguinte figura mostra as cores que podem ser obtidas para diferentes materiais usados.

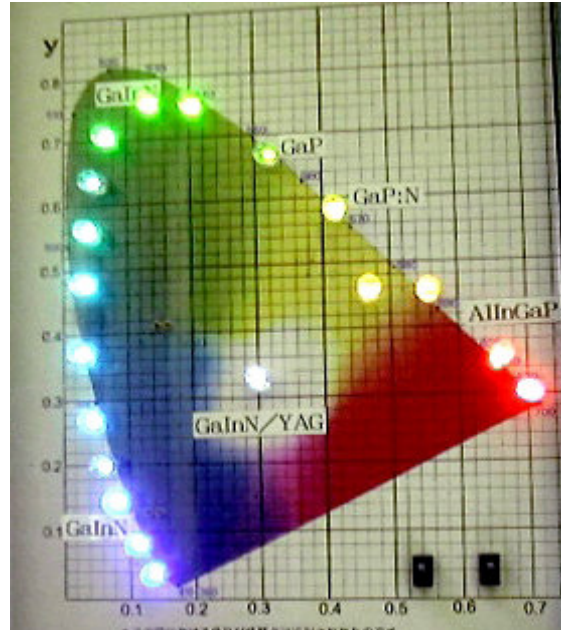


FIGURA 16 - Gama de cores segundo o material semiconductor do LED.

Na tabela 1 aparecem alguns exemplos de materiais utilizados junto com as cores que estes materiais irradiam.

TABELA 1 - Materiais utilizados na fabricação de alguns LED, comprimento de onda da luz emitida.

MATERIAL	COMPRIMENTO DE ONDA	COR
AsGa	904 nm	Infravermelho
InGaAsP	1300 nm	Infravermelho
AsGaAl	750 – 850 nm	Vermelho
AsGaP	590 nm	Amarelo
InGaAlP	560 nm	Verde
CSi	480 nm	Azul

7. CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DOS LEDs

As características intrínsecas dos LEDs fazem com que estes dispositivos sejam a melhor alternativa como fontes de luz convencionais, e eles fornecer uma ampla gama de utilização. Algumas características serão citadas:

7.1 TAMANHO PEQUENO

Um LED pode ser extremamente pequeno e mesmo assim proporcionar um feixe de luz alto, diferente de outros tipos de lâmpadas.

7.2 BAIXO CONSUMO DE ENERGIA:

Os LEDs têm um muito baixo consumo de eletricidade. Geralmente, um LED é concebido para funcionar há uma tensão de 2 a 3.6V e 0,02 a 0.03A, isto significa que é necessário mais do que 0.1W para operar.

7.3 LONGA VIDA

Com uma tensão nominal de funcionamento e atmosfera apropriada, LEDs têm uma vida útil de aproximadamente 100.000 horas.

7.4 ALTA EFICIÊNCIA LUMINOSA E BAIXA EMISSÃO DE CALOR

Os LEDs podem converter quase toda a energia utilizada em luz, onde apresenta alta eficiência luminosa e baixa emissão de calor. Um dos melhores LEDs do mercado hoje em dia é quase duas vezes tão eficiente como um filamento de tungstênio das lâmpadas incandescentes, em relação a intensidade de luz por unidade de potencia gasta.

7.5 PROTEGER O MEIO AMBIENTE

Os LEDs não são fabricados com materiais tóxicos, ao contrário com as lâmpadas fluorescentes que contenham mercúrio e colocou um risco de contaminação. O LED pode ser totalmente reciclado.

8. TIPOS DE ENCAPSULAMENTOS

Existem basicamente quatro tipos de encapsulamento, indexado pela sua cor.

8.1 TRANSPARENTE OU ÁGUA CLARA

É utilizado em alta potência para LEDs de emissão, uma vez que o objetivo destes LEDs é acender indicar algo, apenas.

8.2 COLORIDAS OU DE COR

Similar ao acima, mas colorido com a cor de emissão semelhante ao substrato de algumas garrafas de vidro.

8.3 DIFUSO OU DIFUSA

Os LEDs têm uma característica mais opaca do que o anterior, e são coloridos com as cores de emissão. As pequenas partículas em suspensão de tamanho microscópico são responsáveis por desviar a luz, este tipo de embalagem acrescenta muitos ângulos de visão, devido as reflexões causadas pelas partículas.

8.4 LÁCTEA OU LEITOSA

Este tipo de embalagem é uma difusa, mas não coloridas, elas são amplamente utilizadas em embalagens bicolores ou LEDs multicoloridos. O LED bicolor é composto por um cátodo comum e dois ânodos (três terminais) ou dois LEDs colocados em oposição (dois terminais). É muito importante notar que em todos os casos, o substrato do LED é o que determina a cor de emissão e não encapsulamento.

9. COMPARAÇÃO ENTRE LÂMPADAS

As lâmpadas mais utilizadas são as: incandescentes, halógenas, fluorescentes tubulares, fluorescentes compactas e de LEDs.

9.1 INCANDESCENTES



FIGURA 17 – Lâmpada Incandescente

TABELA 2 – Características da lâmpada incandescente

Consumo	60 W
Fluxo luminoso	900 lumens
Vida útil	1000 horas
Preço	\$
Eficiência luminosa	15 lumens/watt
Na casa ecológica	Não recomendada

Inventadas por Thomas Edison, são as mais antigas, mais baratas e mais usadas. São as que mais consomem energia e têm a menor vida útil. Desperdiçam muita energia em forma de calor, para aquecer o filamento de tungstênio. Lâmpadas incandescentes devem ser evitadas em uma casa ambientalmente correta.

9.2 HALÓGENAS

**FIGURA 18** – Lâmpada halógenas**TABELA 3** – Características da lâmpada halógenas

Consumo	50 W
Fluxo luminoso	900 lumens
Vida útil	2000 horas
Preço	\$\$
Eficiência luminosa	18 lumens/watt
Na casa ecológica	Não recomendada

Introduzidas no mercado mais recentemente, produzem uma luz branca e brilhante. Tem consumo relativo um pouco menor e são mais duráveis do que as incandescentes. Não são lâmpadas indicadas “ambientalmente corretas”.

9.3 FLUORESCENTES TUBULARES



FIGURA 19 – Lâmpada fluorescente tubular

TABELA 4 – Características da lâmpada fluorescente tubular

Consumo	20 W
Fluxo luminoso	1000 lumens
Vida útil	7500 horas
Preço	\$\$
Eficiência luminosa	50 lumens/watt
Na casa ecológica	recomendada

Não devem ser quebradas e seu descarte exige coleta especial porque utilizam mercúrio em sua fabricação. Para funcionar, precisa de reator e starter, o que representa um custo adicional. São lâmpadas de baixo consumo de energia e vida útil longa. Não apresenta impacto ambiental considerável.

9.4 FLUORESCENTES COMPACTAS



FIGURA 20 – Lâmpada fluorescente compacta

TABELA 5 – Características da lâmpada fluorescente compacta

Consumo	15 W
Fluxo luminoso	900 lumens
Vida útil	8000 horas
Preço	\$\$\$
Eficiência luminosa	60 lumens/watt
Na casa ecológica	Altamente recomendada

Mais recentes no mercado, são uma evolução das fluorescentes tubulares. Além da vida útil longa e do baixo consumo apresentam outras vantagens: podem ser rosqueadas nos mesmos bocais das lâmpadas incandescentes, não precisam de reator e starter e, por serem compactas, se adaptam a uma variedade maior de luminárias. A desvantagem delas ainda é o preço, bem mais alto que o das incandescentes. O investimento inicial maior, mas é compensado pela vida útil longa e pela economia de energia elétrica. Não devem ser quebradas e exigem coleta de resíduos especial por causa do mercúrio presente nos tubos. Altamente recomendadas em relação a impacto ambiental.

9.5 LEDS

**FIGURA 21** – Lâmpada de LEDs

TABELA 6 – Características da lâmpada LEDs

Consumo	1.5 W
Fluxo luminoso	300 lumens
Vida útil	50000 horas
Preço	\$\$\$\$
Eficiência luminosa	200 lumens/watt
Na casa ecológica	Altamente recomendada

As lâmpadas de LEDs são formadas por LEDs agrupados e representam a nova promessa da indústria para reduzir o consumo de energia com iluminação. Essas lâmpadas ainda são bem caras, mas têm uma durabilidade altíssima e baixíssimo consumo de energia. Essas lâmpadas não são fabricadas com materiais tóxicos, e pode ser totalmente reciclada.

10. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Há várias inovações tecnológicas na área de iluminação relacionada aos diodos emissores de luz. Serão apresentadas duas consideradas verdadeiramente importantes em relação ao futuro.

10.1 OLED

O OLED (Organic Light-Emitting Diode), Diodo orgânico emissor de é uma tecnologia criada pela Kodak em 1980 e que promete telas planas muito mais finas, leves e baratas que as atuais telas de LCD. A idéia é usar diodos orgânicos, compostos por moléculas de carbono que emitem luz ao receberem uma carga elétrica. A vantagem é que ao contrário dos diodos tradicionais, essas moléculas podem ser diretamente aplicadas sobre a superfície da tela, usando um método de impressão. Acrescentados os filamentos metálicos que conduzem os impulsos elétricos a cada célula, está pronta uma tela a um custo extremamente baixo.

10.2 EMISSÃO DE ULTRAVIOLETA

Mas agora essas pequenas lâmpadas de estado sólido começam a avançar em outras fronteiras. Cientistas da empresa japonesa NTT conseguiram fabricar LEDs capazes de emitir luz com o menor comprimento de onda já observado em

qualquer semicondutor - entre 200 e 300 nanômetros, ou seja, na região do ultravioleta profundo.

A luz ultravioleta é largamente utilizada para a esterilização de objetos médicos e até da água potável. E ela é capaz também de destruir dioxinas e as moléculas estáveis dos perigosos PCBs (bifenilas policloradas), compostos altamente danosos ao meio-ambiente.

Já existem LEDs disponíveis comercialmente, capazes de emitir luz na faixa do azul e do ultravioleta, mas até um comprimento de onda de 365 nanômetros, ou seja, ainda na faixa do quase-infravermelho. Estes LEDs são feitos de nitreto de gálio (GaN).

Já os novos LEDs ultravioleta são fabricados com nitreto de alumínio (AlN). O grande feito dos cientistas japoneses foi descobrir uma forma de dopar o AlN, que até agora tinha se mostrado altamente resistente a um aumento dos dopantes.

11. REFERÊNCIAS

BOYLESTAD R. L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HALLIDAY David; RESNICK Robert; WALKER Jearl. Fundamentos da Física. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.v.4.

SMITH Willian F. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. 3ed. Portugal: Mc GRAW-HILL, 1996.

SCHMIDT Walfredo. Materiais elétricos: Condutores e Semicondutores. 2ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. v.2.

MENRISTOR, UM NOVO ELEMENTO PASSIVO

Érika Suek

1. INTRODUÇÃO

Em 1971 um engenheiro da Universidade de Berkerley, Dr. Leon Chua¹, pensou que deveria haver um quarto tipo de elemento passivo elétrico, um tipo de resistor com memória. Mas até aquele momento não se sabia ao certo como montar este tipo de elemento. O qual foi possível ser construído, 37 anos após os seus primeiros estudos, com a contribuição da grandiosa nanotecnologia. No laboratório da Hewlett-Packard (HP).

Dos teoremas de circuitos, os três básicos elementos passivos são definidos através de relações entre duas de quatro variáveis de circuitos, denominadas: corrente (i), tensão (v), carga elétrica (q) e fluxo magnético Φ_B . quando combinadas dois a dois geram seis possibilidades de relações. Nas quais três delas se devem aos elementos:

- Resistência- $v= Ri$ (relação entre v e i);
- Capacitância- $q= CV$ (relação entre carga q e v);
- Indutância- $\Phi_B = Li$ (relação entre Φ_B e i);

As outras relações se devem às explicações da teoria de Φ_B e q , dadas por:

- Fluxo magnético- $\Phi_B=v.t$ (relação entre Φ_B e v);
- Carga Elétrica- $q=i.t$ (relação entre q e i);

Restando apenas uma relação, a de carga com o fluxo magnético, a qual será descrita pela característica do novo elemento passivo:

- Memresistência- $\Phi_B=M.q$ (relação entre Φ_B e q);

¹ Um dos pioneiros da teoria de circuitos não lineares. Expôs suas teorias em: "Memristor - The missing circuit element." *IEEE Trans. Circuit Theory* **CT-18**, 507-519 (1971).

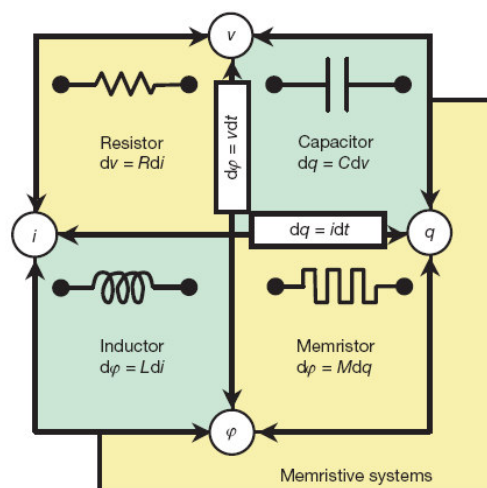


FIGURA 1 - Os quatro elementos passivos fundamentais de circuitos

Desta relação irá surgir um elemento parecido a um tipo de resistor não-linear com a idéia de se ter uma memória acoplada a este resistor, a qual exerceria uma função de “memória ativa” para quando se desligar um circuito esperando que todas as suas tensões e correntes armazenadas sejam nulas e em seguida ligá-lo novamente este resistor saberá o quanto de corrente passou no instante anterior ao desligamento da chave.

O que levou à continuidade dos estudos de Leon Chua foram as pesquisas de Stanley Williams e sua equipe no laboratório da Hewlett-Packard (HP) ao trabalhar com a eletrônica molecular e verificar que havia comportamentos inesperados e totalmente diferentes em seus dispositivos que dificilmente seriam explicados pelos atuais elementos, o que os levou a encontrar o artigo de Leon Chua.

Para um melhor entendimento de como funciona um memristor é utilizada a mesma analogia que é feita para um resistor: um tubo pelo qual uma certa quantidade de água (eletricidade) escoar dentro dele. No caso do resistor a largura do tubo é análoga a resistência quanto mais água passar pelo tubo maior será a resistência desse tubo, com o tamanho do tubo sempre constante para um dado resistor, diferenciando um resistor de outro pelos tamanhos dos tubos. Para o memristor o tamanho deste tubo é variável, se uma quantidade de água for empurrada para dentro do tubo em uma determinada direção, o tubo aumenta de tamanho, tornando menos resistivo. Se a água for empurrada na outra direção o tamanho do tubo será reduzido, aumentando a resistência. Quando o fluxo de água para de passar o tamanho do tubo não irá ser modificado, permanecerá o mesmo do anterior. Quando a água voltar a escoar dentro deste tubo, a largura inicial do tubo

será a mesma que aquela obtida anteriormente ao desligamento da passagem de água.

O comportamento da memresistência já tinha sido observado há mais de 50 anos atrás, e há 37 anos foi demonstrada teoricamente por Chua, e na prática foi construído um dispositivo com muitos transistores, capacitores e amplificadores, para fazer o mesmo efeito de um único memristor. Que foi criado nos últimos anos com o auxílio da nanotecnologia.

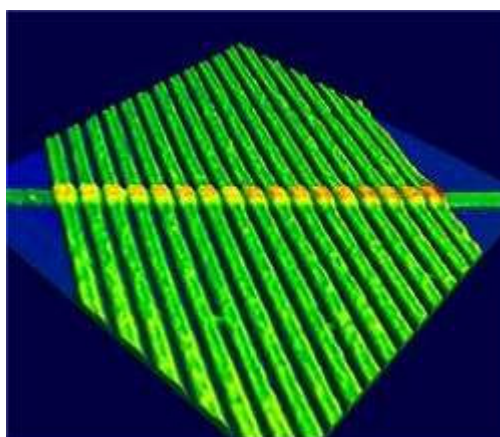


FIGURA 2 - Imagem feita em microscópio de força atômica, mostrando 17 memristores lado a lado.

Acredita-se que este novo elemento pode ser a chave para as tão almejadas redes neurais realistas, ao invés das artificiais, muito utilizada na área de Inteligência Artificial.

2. ESTRUTURA DO MEMRISTOR

Os memristores são nano fios com 50 nanômetros de largura, o que compreende cerca de 150 átomos. Os nano fios são formados por duas camadas de dióxido de titânio conectadas a condutores. Quando uma corrente elétrica é aplicada a um deles, a resistência dos outros se altera.

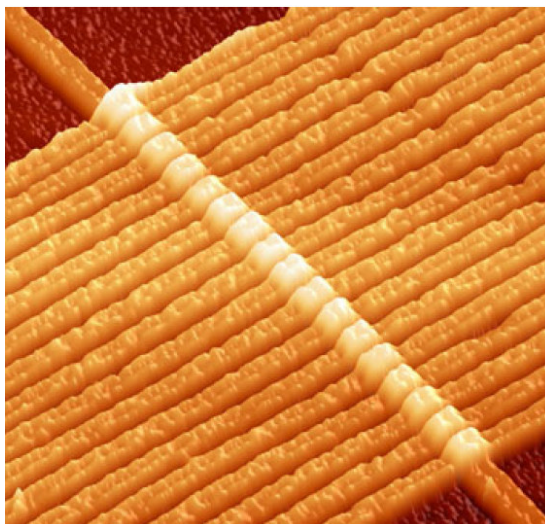


FIGURA 3 - imagem microscópica de 17 memristores.

William encontrou um memristor ideal de dióxido de titânio, material de pintura branca e filtro solar. Como silício, o dióxido de titânio que é um semicondutor, em seu estado puro é altamente resistivo. Contudo, ele pode ser dopado com outros elementos para fazê-lo muito condutivo. O TiO_2 , dopado não fica estacionário em um alto campo elétrico, ele tende a derivar na direção da corrente elétrica. Tal mobilidade é um veneno para um transistor comum, mas resulta exatamente no efeito desejado em um memristor. A colocação de um nível de tensão através de um filme fino de semicondutor TiO_2 dopado apenas de um lado, causa a diminuição da resistência elétrica. O deslocamento de corrente elétrica em outra direção então empurrará o dopante para trás, aumentando assim a resistência elétrica do TiO_2 .

A natureza microscópica do fato destes dispositivos alternarem as resistências e o transporte de carga em tais dispositivos atualmente encontra-se em debate. Mas uma proposta é dada pelo fato de que histerese requerer mais ou menos um arranjo eletrônico que modula a corrente eletrônica.

Baseado nisso, nos consideramos um filme fino de semicondutor de espessura D , entre dois contatos de meta, como mostra a figura abaixo. A resistência total desde dispositivo é determinada por dois resistores variáveis conectados em série, onde as resistências são dadas pelo total comprimento D do dispositivo. Especificamente, a película de semicondutor possui uma região com alta concentração de dopantes (considerada como sendo íons positivos), possuindo baixa resistência (R_{on}), e a outra resistência possui aproximadamente zero de concentração de dopantes e alta resistência (R_{off}).

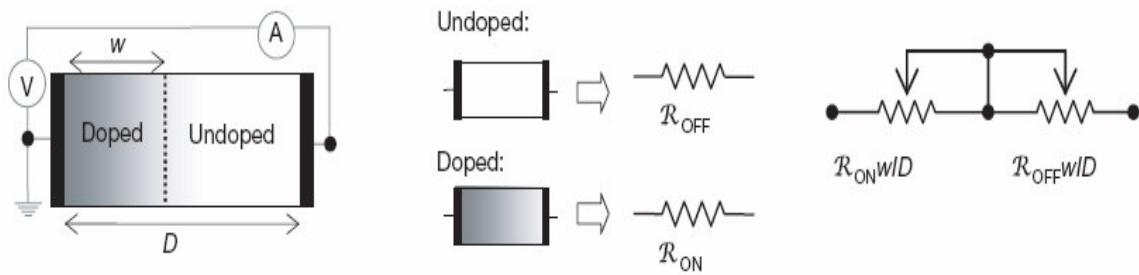


FIGURA 4 - filme fine de TiO₂ com seus terminais e representações.

3. EQUACIONAMENTO DA MEMRESISTÊNCIA

Como comentado nas seções anteriores, a característica deste dispositivo se deve ao fluxo magnético e a quantidade de carga elétrica que atravessa os terminais do memristor como dado na equação a seguir:

$$M(q) = \frac{d\Phi_B}{dq}$$

Sabe-se, através da Lei da Indução de Faraday, que o fluxo magnético é dado por uma integral no tempo da tensão elétrica, e a carga elétrica é a integral no tempo da corrente elétrica. Escrevendo a equação de maneira mais conveniente temos:

$$M(q) = \frac{d\Phi_B/dt}{dq/dt} = \frac{v}{i}$$

Com a equação acima temos então que a memresistência é apenas a resistência elétrica dependente de carga elétrica. Tem-se na fórmula a seguir a memresistência em função do tempo:

$$V(t) = M(q(t))i(t)$$

Com as observações de que, se $M(q)$ for uma constante, então obteremos a Lei de Ohm ($V=RI$). Se $M(q)$ for não-trivial, contudo, a equação não será equivalente, pois q e $M(q)$ irão variar com o tempo.

Logo, a equação descrita acima revela que a memresistência define uma relação linear entre tensão e corrente, desde que a carga seja invariante no tempo. Com corrente alternada, contudo, pode revelar a dependência linear na operação do circuito induzindo uma tensão mensurável sem o movimento da rede de cargas elétricas. Tão logo que a máxima carga de q não irá causar modificações em M .

Além do mais, se nenhuma corrente for aplicada em seus terminais o memresistor é estático. E a base para que um memresistor haja da forma como se tivesse uma memória acoplada a um resistor se deve à seguinte análise: Se $I(t)=0$, encontraremos $v(t)=0$ e um $M(t)$ constante.

Analisando agora as características de consumo de energia elétrica, temos uma similaridade com o resistor:

$$P(t)=i(t)v(t)=i^2(t)M(q(t))$$

Quando a variação de $M(q(t))$ for relativamente pequena, quando o elemento estiver sujeito a uma corrente alternada, o memristor parecerá como sendo um resistor elétrico, se $M(q(t))$ aumentar rapidamente, tanto a corrente elétrica quanto o consumo de energia elétrica vão parar rapidamente.

4. DIÓXIDO DE TITÂNIO-TiO₂

O dióxido de titânio é também conhecido como óxido de titânio (IV) ou titânia. Este elemento não é encontrado puro na natureza, deve ser extraído de minérios como a ilmenita. É um material semiconductor muito utilizado como pigmento em microeletrônica, sua grande faixa de atuação se deve ao aumento nos estudos na área da nanotecnologia, pois este material possui alto índice de refração, alta transmitância e estabilidade química.

Este óxido é polimórfico, pode ser obtido em três formas cristalinas:

Rutilo: um mineral usualmente tetragonal de hábito prismático, geralmente com cristais maclados.

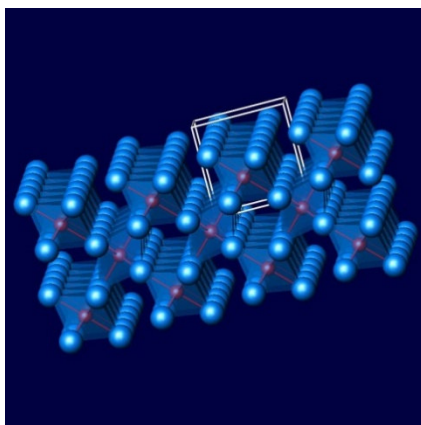


FIGURA 5 - Anatase:um mineral tetragonal de hábito octaédrico

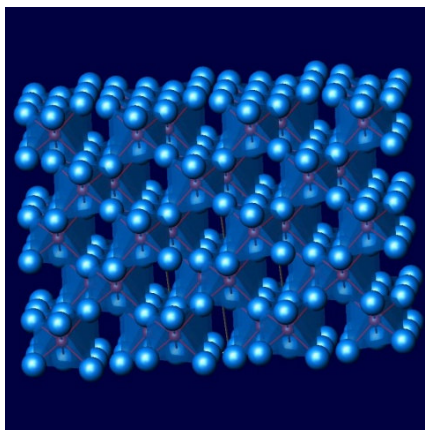


FIGURA 6 - Brookita:um mineral ortorrômboico

Para entende um pouco mais sobre os memristores deve-se estudar também como um material semicondutor se comporta e como se dá a sua dopagem.

5. COMPORTAMENTO DE SEMICONDUTORES

O Dióxido de Titânio é um semicondutor, o que significa que este tipo de material possui uma diferença de um gap de energia menor que de um material isolante, mas maior da que de um material condutor, ou seja, sua condutividade não é tão fácil como a de um material condutor, mas acontece. Para se aumentar a condutividade de um material semicondutor é feito a sua dopagem ou eleva-se a temperatura em que ele está exposto, pelo fato de que um aumento da temperatura de um semicondutor pode resultar em um aumento substitucional do numero de elétrons livres no material.

Sabe-se que materiais intrínsecos são semicondutores cuidadosamente refinados para se obter a redução de impurezas a um nível muito baixo. São tão puros quanto permite a tecnologia moderna.

Um material semicondutor submetido ao processo de dopagem é chamado de material extrínseco.

Dependendo do tipo de substancia a ser colocada na estrutura do material tem-se material do tipo p ou n. Material do tipo p tem a lacuna como portador majoritário e o elétron como portador minoritário. Um material do tipo n o elétron é chamado de portador majoritário e a lacuna é chamada de portador minoritário.

É de suma importância saber que a concentração de impurezas em semicondutores intrínsecos é normalmente menor que 1 ppm. Já os materiais extrínsecos podem conter de 100 a 1000 ppm de impurezas.

6. CONCLUSÃO

A maior dificuldade ao formular o presente trabalho deu-se ao fato de que as publicações destes artigos sobre o memristor foram feitas há apenas dois meses atrás, com informações enxutas para apenas explicar o que seria este elemento e como funciona, sem muitos detalhes na sua construção. Outra dificuldade aconteceu pelo fato de que tais artigos estão escritos em inglês, o que dificultou a compreensão de algumas palavras científicas.

Com a presente pesquisa foi possível concluir que o avanço nos estudos da nanotecnologia irá nos auxiliar na criação de novos componentes com mais eficiência do que os elementos já existentes.

Se com apenas três elementos fundamentais passivos atualmente existentes já são construídos uma infinidade de eletrônicos, o que esperamos daqui a alguns anos com a descoberta deste novo elemento?

7. REFERÊNCIAS

Leon O. Chua, *Memristor - The Missing Circuit Element*. IEEE Transactions on Circuit Theory, September 1971.

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS. Memristor: cientistas comprovam existência do quarto componente eletrônico fundamental. Disponível em:<
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=memristor--cientistas-comprovam-existencia-do-quarto-componente-eletronico-fundamental&id=010110080502>> Acesso em: 05 de julho,2008.

Revista: Nature Physics.Dmitri B. Strukov, Gregory S. Snider, Duncan R. Stewart, R. Stanley Williams. The missing memristor found. 1 de maio,2008 .Vol.: 453, 80-83

WIKIPEDIA. Memristor. Disponível em :< <http://en.wikipedia.org/wiki/Memristor> > Acesso em: 1 de julho,2008.

Michael Kanellos. HP makes memory from a once-theoretical circuit . Disponível em: <http://news.cnet.com/8301-10784_3-9932054-7.html?hhTest=1 > Acesso em:7 de julho,2008.

APLICAÇÃO DA CIENCIA DOS MATERIAIS: DIODOS

Diogo Marujo

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é o estudo das aplicações da ciência dos materiais em engenharia. O foco do trabalho será em diodos, dispositivo semicondutor muito utilizado na engenharia elétrica.

Diodo semicondutor é um dispositivo ou componente eletrônico composto de cristal semicondutor de silício ou germânio numa película cristalina cujas faces opostas são *dopadas* por diferentes gases durante sua formação.

É o tipo mais simples de componente eletrônico semicondutor, usado como retificador de corrente elétrica.

2. DOPAGEM DO DIODO SEMICONDUTOR E OS CRISTAIS P E N

A dopagem no diodo é feita pela introdução de elementos dentro de cristais tetravalentes, normalmente feitos de silício e germânio. Dopando esses cristais com elementos trivalentes, obterá átomos com sete elétrons na camada de valência, que necessitam de mais um elétron para a neutralização (cristal P). Para a formação do cristal P, utiliza-se principalmente o elemento Índio . Dopando os cristais tetravalentes com elementos pentavalentes, obter-se-á átomos neutralizados (com oito elétrons na camada de valência) e um elétron excedente (cristal N).

Para a formação do cristal N, utiliza-se principalmente o elemento Fósforo. Quanto maior a intensidade da dopagem, maior será a condutibilidade dos cristais, pois suas estruturas apresentarão um número maior de portadores livres (lacunas e elétrons livres) e poucas impurezas que impedem a condução da corrente elétrica. Outro fator que influencia na condução desses materiais é a temperatura. Quanto maior for sua temperatura, maior será a condutibilidade pelo fato de que a energia térmica tem a capacidade de quebrar algumas ligações covalentes da estrutura se desfazerem, acarretando no aparecimento de mais portadores livres para a condução de veículo embriagado.

Após dopadas, cada face dos dois tipos de cristais (P e N) terá uma determinada característica diferente da oposta, gerando regiões de condução do

cristal, uma com excesso de elétrons, outra com falta destes (lacunas), e entre ambas, haverá uma região de equilíbrio por recombinação de cargas positivas e negativas, chamada de região de depleção (à qual possui uma barreira de potencial).

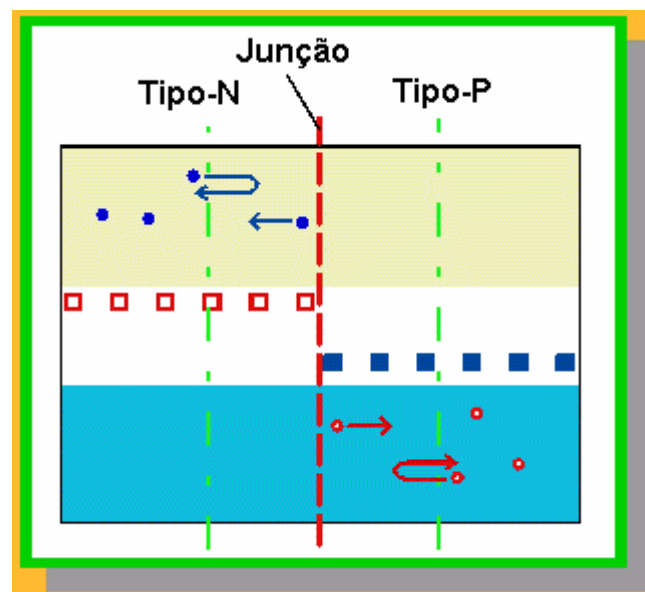
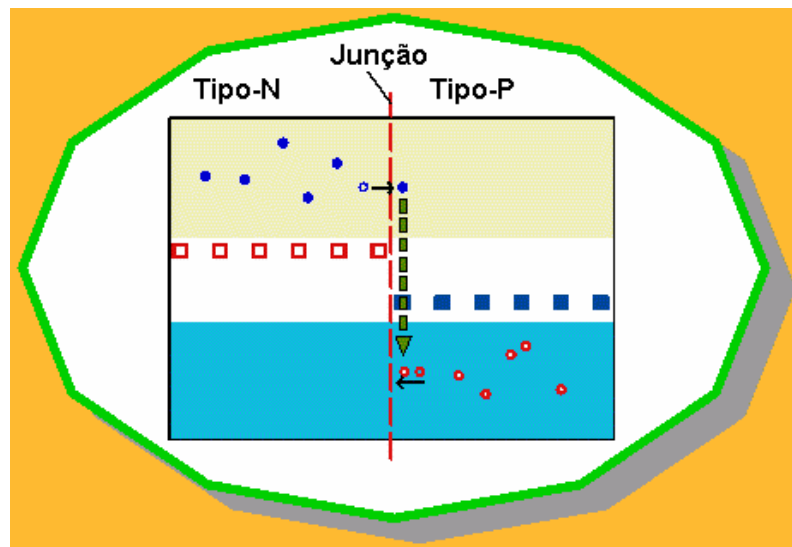
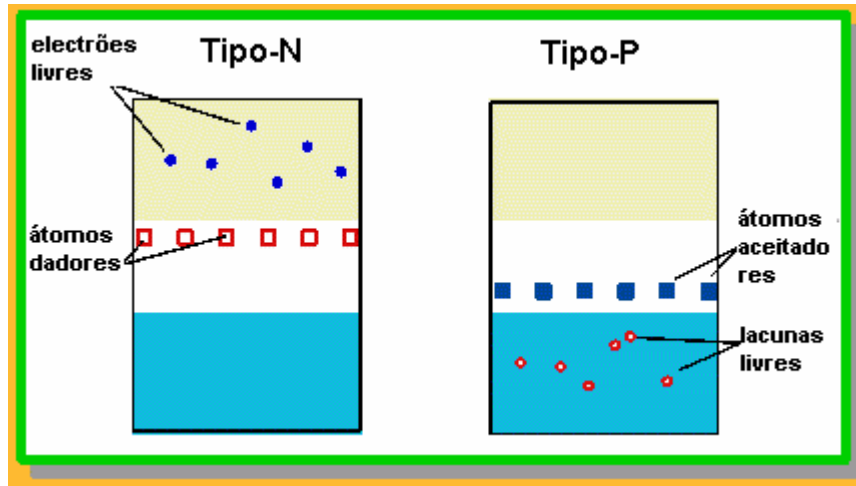


FIGURA 1 - Junção P-N, ou barreira de potencial.

Da mesma forma que os elétrons livres do cristal N se movimentam, as cargas positivas ou lacunas(buracos) conduzem corrente elétrica pelo fato de que uma lacuna é ocupada por um elétron proveniente de uma corrente elétrica que passa sobre o cristal e que força a criação de outra lacuna atrás de si. Entre as duas regiões, uma de maioria negativa, outra de maioria positiva, existe uma terceira, esta de maioria neutra, isto é, nem de carga negativa, nem de carga positiva, é a junção entre ambas, chamada de região neutra da junção **P-N**. Na *região neutra* não há excesso de elétrons nem lacunas porque alguns elétrons do material tipo *N* se difundem pela junção e entram em combinação com algumas lacunas(buracos) do material tipo *P*, reciprocamente, algumas lacunas(buracos) se difundem pela junção e entram em combinação com alguns elétrons do material do tipo *N*.

Com a passagem de lacunas para a camada N, gera-se um pequeno potencial elétrico positivo e com a passagem de elétrons livres para a camada P, gera-se um pequeno potencial elétrico negativo, gerando uma pequena tensão interna, por isso do nome barreira de potencial, que pode chegar aproximadamente a 0,3 volts nos diodos de germânio e 0,7 volts nos diodos de silício. Essa barreira de potencial causa uma queda de tensão, interferindo na tensão sobre os outros componentes pertencentes ao mesmo circuito do diodo. Quando a tensão a que é submetido o diodo ,alimentado por uma fonte geradora, é menor que sua barreira de potencial(<0,3V ou <0,7V), a corrente elétrica é baixíssima pela oposição ao fluxo de portadores livres feita pela barreira de potencial, porém se a tensão a que for submetido o diodo for mais alta do que sua barreira de potencial, a corrente elétrica torna-se alta e a oposição dos portadores livres feita pela barreira de potencial é pequena em relação a tensão de alimentação, sendo quase desprezível.

3. POLARIZAÇÃO DO DIODO

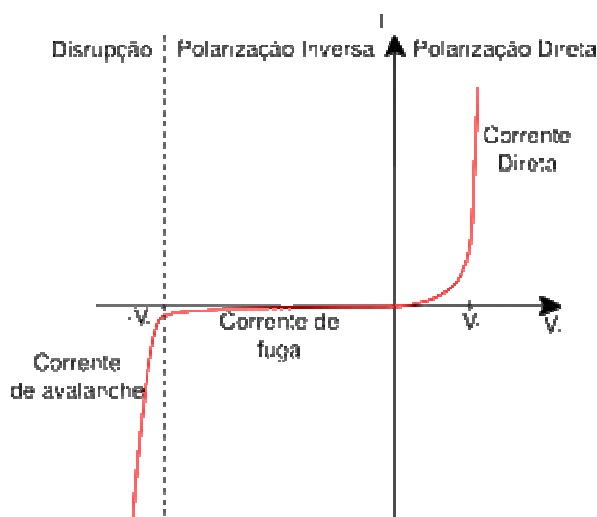


FIGURA 2 – Polarização direta e inversa do diodo.

O gráfico mostra a curva característica do comportamento do diodo em sua polarização direta e inversa

A polarização do diodo é dependente da polarização da fonte geradora. A polarização é direta quando o pólo positivo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal P(chamado de anodo) e o pólo negativo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal N(chamado de catodo). Assim, se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna do diodo, os portadores livres se repeliram por causa da polaridade da fonte geradora e conseguiram ultrapassar a junção P-N, movimentando-os e permitindo a passagem de corrente elétrica. A polarização é indireta quando o inverso ocorre. Assim, ocorrerá uma atração das lacunas do anodo(cristal P) pela polarização negativa da fonte geradora e uma atração dos elétrons livres do catodo(cristal N) pela polarização positiva da fonte geradora, sem existir um fluxo de portadores livres na junção P-N, ocasionando no bloqueio da corrente elétrica. Pelo fato de que os diodos fabricados não são ideais(contém impurezas), a condução de corrente elétrica no diodo(polarização direta) sofre uma resistência menor que 1 ohm, que é quase desprezível. O bloqueio de corrente elétrica no diodo(polarização inversa) não é total devido novamente pela presença

de impurezas, tendo uma pequena corrente que é conduzida na ordem de microampéres, chamada de corrente de fuga, que também é quase desprezível.

4. UTILIDADE

O fenômeno da condutividade em um só sentido é aproveitado como um chaveamento da corrente elétrica para a retificação de sinais senoidais, portanto, este é o efeito diodo semicondutor tão usado na eletrônica, pois permite que a corrente flua entre seus terminais apenas numa direção. Esta propriedade é utilizada em grande número de circuitos eletrônicos e nos retificadores.

Os retificadores são circuitos elétricos que convertem a tensão CA (AC) em tensão CC (DC). CA vem de Corrente alternada, significa que os elétrons circulam em dois sentidos, CC (DC), Corrente contínua, isto é circula num só sentido.

A certa altura o potencial U , formado a partir da junção n e p não deixa os elétrons e lacunas movimentarem-se, este processo dá-se devida assimetria de cargas existente.

5. TIPOS DE DIODOS SEMICONDUTORES

Os diodos são projetados para assumir diferentes características: diodos retificadores são capazes de conduzir altas correntes elétricas em baixa frequência, diodos de sinal caracterizam-se por retificar sinais de alta frequência, diodos de chaveamento são indicados na condução de altas correntes em circuitos chaveados. Dependendo das características dos materiais e dopagem dos semicondutores há uma gama de dispositivos eletrônicos variantes do diodo:

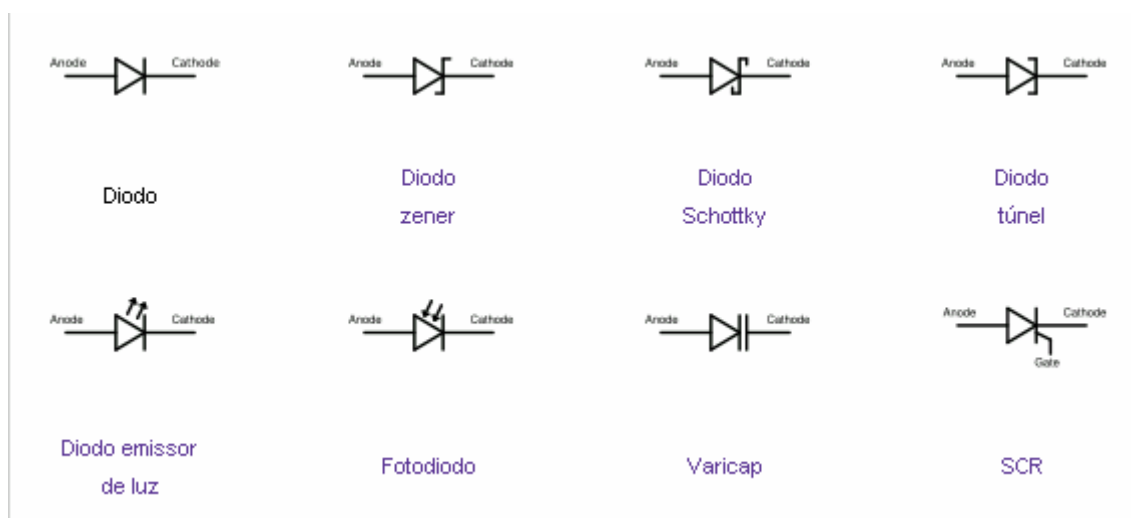


FIGURA 3 – Diferentes tipos de diodo.

5.1 LED

LED é a sigla em inglês para Light Emitting Diode, ou Diodo Emissor de Luz.

O LED é um diodo semicondutor (junção P-N) que quando energizado emite luz visível. A luz não é monocromática (como em um laser), mas consiste de uma banda espectral relativamente estreita e é produzida pelas interações energéticas do elétron. O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado eletroluminescência. Em qualquer junção P-N polarizada diretamente, dentro da estrutura, próximo à junção, ocorrem recombinações de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia possuída por esse elétron, que até então era livre, seja liberada, o que ocorre na forma de calor ou fótons de luz.

No silício e no germânio, que são os elementos básicos dos diodos e transistores, entre outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida (devido a opacidade do material), e os componentes que trabalham com maior capacidade de corrente chegam a precisar de irradiadores de calor (dissipadores) para ajudar na manutenção dessa temperatura em um patamar tolerável.

Já em outros materiais, como o arseneto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons de luz emitido é suficiente para constituir fontes de luz bastante eficientes.

A forma simplificada de uma junção P-N de um LED demonstra seu processo de eletroluminescência. O material dopante de uma área do semicondutor contém átomos com um elétron a menos na banda de valência em relação ao material semicondutor. Na ligação, os íons desse material dopante (íons "aceitadores") removem elétrons de valência do semicondutor, deixando "lacunas" (ou buracos), portanto, o semicondutor torna-se do tipo P. Na outra área do semicondutor, o material dopante contém átomos com um elétron a mais do que o semicondutor puro em sua faixa de valência. Portanto, na ligação esse elétron fica disponível sob a forma de elétron livre, formando o semicondutor do tipo N.

Os semicondutores também podem ser do tipo compensados, isto é, possuem ambos os dopantes (P e N). Neste caso, o dopante em maior concentração

determinará a que tipo pertence o semiconductor. Por exemplo, se existem mais dopantes que levariam ao P do que do tipo N, o semiconductor será do tipo P. Isso implicará, contudo, na redução da Mobilidade dos Portadores.

A Mobilidade dos Portadores é a facilidade com que cargas n e p (elétrons e buracos) atravessam a estrutura cristalina do material sem colidir com a vibração da estrutura. Quanto maior a mobilidade dos portadores, menor será a perda de energia, portanto mais baixa será a resistividade.

Na região de contato das áreas, elétrons e lacunas se recombinaem, criando uma fina camada praticamente isenta de portadores de carga, a chamada barreira de potencial, onde temos apenas os íons "doadores" da região N e os íons "aceitadores" da região P, que por não apresentarem portadores de carga "isolam" as demais lacunas do material P dos outros elétrons livres do material N.

Um elétron livre ou uma lacuna só pode atravessar a barreira de potencial mediante a aplicação de energia externa (polarização direta da junção). Aqui é preciso ressaltar um fato físico do semiconductor: nesses materiais, os elétrons só podem assumir determinados níveis de energia (níveis discretizados), sendo as bandas de valência e de condução as de maiores níveis energéticos para os elétrons ocuparem.

A região compreendida entre o topo da de valência e a parte inferior da de condução é a chamada "banda proibida". Se o material semiconductor for puro, não terá elétrons nessa banda (daí ser chamada "proibida"). A recombinação entre elétrons e lacunas, que ocorre depois de vencida a barreira de potencial, pode acontecer na banda de valência ou na proibida. A possibilidade dessa recombinação ocorrer na banda proibida se deve à criação de estados eletrônicos de energia nessa área pela introdução de outras impurezas no material.

Como a recombinação ocorre mais facilmente no nível de energia mais próximo da banda de condução, pode-se escolher adequadamente as impurezas para a confecção dos LEDS, de modo a exibirem bandas adequadas para a emissão da cor de luz desejada (comprimento de onda específico). Funcionamento

A luz emitida não é monocromática, mas a banda colorida é relativamente estreita. A cor, portanto, dependente do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. O LED que utiliza o arseneto de gálio emite radiações infravermelhas. Dopando-se com fósforo, a emissão pode ser vermelha ou amarela,

de acordo com a concentração. Utilizando-se fosfeto de gálio com dopagem de nitrogênio, a luz emitida pode ser verde ou amarela. Hoje em dia, com o uso de outros materiais, consegue-se fabricar LEDS que emitem luz azul, violeta e até ultra-violeta. Existem também os LEDS brancos, mas esses são geralmente LEDS emissores de cor azul, revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorve a luz azul e emite a luz branca. Com o barateamento do preço, seu alto rendimento e sua grande durabilidade, esses LEDS tornam-se ótimos substitutos para as lâmpadas comuns, e devem substituí-las a médio ou longo prazo. Existem também os LEDS brancos chamados RGB (mais caros), e que são formados por três "chips", um vermelho (R de red), um verde (G de green) e um azul (B de blue). Uma variação dos LEDS RGB são LEDS com um microcontrolador integrado, o que permite que se obtenha um verdadeiro show de luzes utilizando apenas um LED.

Em geral, os LEDS operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os LEDS infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5V, os vermelhos com 1,7V, os amarelos com 1,7V ou 2.0V, os verdes entre 2.0V e 3.0V, enquanto os LEDS azuis, violeta e ultra-violeta geralmente precisam de mais de 3V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 ou mais horas.

Semáforo de LED com contador regressivo, em Poá-SP, Brasil

Como o LED é um dispositivo de junção P-N, sua característica de polarização direta é semelhante à de um diodo semicondutor.

Sendo polarizado, a maioria dos fabricantes adota um "código" de identificação para a determinação externa dos terminais A (anodo) e K (catodo) dos LEDS.

Nos LEDS redondos, duas codificações são comuns: identifica-se o terminal K como sendo aquele junto a um pequeno chanfro na lateral da base circular do seu invólucro ("corpo"), ou por ser o terminal mais curto dos dois. Existem fabricantes que adotam simultaneamente as duas formas de identificação.

Nos LEDS retangulares, alguns fabricantes marcam o terminal K com um pequeno "alargamento" do terminal junto à base do componente, ou então deixam esse terminal mais curto.

Mas, pode acontecer do componente não trazer qualquer referência externa de identificação dos terminais. Nesse caso, se o invólucro for semitransparente, pode-se identificar o catodo (K) como sendo o terminal que contém o eletrodo interno mais largo do que o eletrodo do outro terminal (anodo). Além de mais largo, às vezes o catodo é mais baixo do que o anodo.

Os diodos emissores de luz são empregados também na construção dos displays alfas-numéricos.

Há também LEDS bicolores, que são constituídos por duas junções de materiais diferentes em um mesmo invólucro, de modo que uma inversão na polarização muda a cor da luz emitida de verde para vermelho, e vice-versa. Existem ainda LEDS bicolores com três terminais, sendo um para acionar a junção dopada com material para produzir luz verde, outro para acionar a junção dopada com material para gerar a luz vermelha, e o terceiro comum às duas junções. O terminal comum pode corresponder à interligação dos anodos das junções (LEDS bicolores em anodo comum) ou dos seus catodos (LEDS bicolores em catodo comum).

Embora normalmente seja tratado por LED bicolor (vermelho+verde), esse tipo de LED é na realidade um "tricolor", já que além das duas cores independentes, cada qual gerada em uma junção, essas duas junções podem ser simultaneamente polarizadas, resultando na emissão de luz alaranjada.

Geralmente, os LEDS são utilizados em substituição às lâmpadas de sinalização ou lâmpadas pilotos nos painéis dos instrumentos e aparelhos diversos. Para fixação nesses painéis, é comum o uso de suportes plásticos com rosca.

Como o diodo, o LED não pode receber tensão diretamente entre seus terminais, uma vez que a corrente deve ser limitada para que a junção não seja danificada. Assim, o uso de um resistor limitador em série com o LED é comum nos circuitos que o utilizam.

Tipicamente, os LEDS grandes (de aproximadamente 5 mm de diâmetro, quando redondos) trabalham com correntes da ordem de 12 a 30 mA e os pequenos (com aproximadamente 3 mm de diâmetro) operam com a metade desse valor.

Os LEDS não suportam tensão reversa (V_r) de valor significativo, podendo-se danificá-los com apenas 5V de tensão nesse sentido. Por isso, quando alimentado por tensão C.A., o LED costuma ser acompanhado de um diodo retificador em antiparalelo (polaridade invertida em relação ao LED), com a finalidade de conduzir

os semi-ciclos nos quais ele - o LED - fica no corte, limitando essa tensão reversa em torno de 0,7V (tensão direta máxima do diodo), um valor suficientemente baixo para que sua junção não se danifique. Pode-se adotar também uma ligação em série entre o diodo de proteção e o LED.

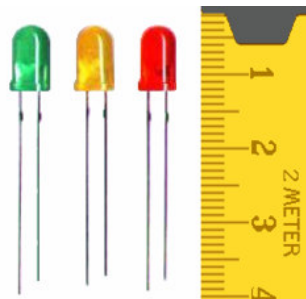


FIGURA 4– Tamanho de LED.

5. 2 DIODO ZENER

Diodo Zener é um tipo de diodo especialmente projetado para trabalhar na região de avalanche, ou seja, na região de ruptura de tensão reversa da junção PN.

O diodo Zener difere do diodo convencional pelo fato de receber uma dopagem (tipo N ou P) maior, o que provoca a aproximação da curva na região de avalanche ao eixo vertical. Isto reduz consideravelmente a tensão de ruptura e evidencia o efeito Zener que é mais notável à tensões relativamente baixas (em torno de 5,5V). Desta forma, qualquer diodo que seja projetado para operar na região de avalanche (mesmo que não seja a baixas tensões) é denominado de diodo Zener.

A seguir é mostrado um esquema do funcionamento do diodo zener:

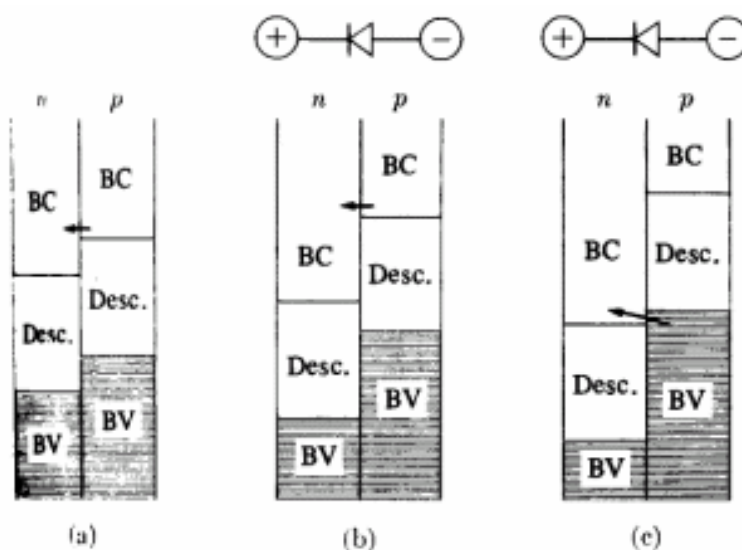


FIGURA 5 – Diodo Zener (esquemático). Uma polarização inversa abaixa a descontinuidade do lado n da junção e eleva a descontinuidade do lado p. Pequena corrente flui nas partes (a) e (b) porque há poucos elétrons na banda de condução (BC) do lado p, ou seja, poucos elétrons servindo como transportadores. (c) Quando a voltagem se torna grande o suficiente, uma avalanche de elétrons pode se mover diretamente da banda de valência (BV) do lado p da junção para a banda de condução do lado n. Se a voltagem inversa for diminuída, a situação retroage para (b) e (a), e apenas correntes desprezíveis fluirão nesses sentidos. Essa voltagem incidental pode ser calibrada.

O diodo Zener pode funcionar polarizado diretamente ou inversamente. Quando está polarizado diretamente, funciona como outro diodo qualquer, não conduz enquanto a tensão aos seus terminais for inferior a 0,6 V (diodo de silício) e a partir desta tensão começa a conduzir, primeiro pouco e depois cada vez mais depressa, sendo não linear a curva de crescimento da corrente com a tensão. Por esse fato, a sua tensão de condução não é única, sendo considerada de 0,6 ou 0,7 V.

Qualquer diodo inversamente polarizado praticamente não conduz desde que não ultrapasse a tensão de ruptura. Na verdade, existe uma pequena corrente inversa, chamada de "corrente de saturação" e devida unicamente à geração de pares de elétron-lacuna na região de carga espacial, à temperatura ambiente. No diodo Zener acontece a mesma coisa. A diferença é que, no diodo convencional, ao atingir uma determinada tensão inversa, a corrente inversa aumenta bruscamente (efeito de avalanche) e a dissipação térmica acaba por destruir o dispositivo, não sendo possível inverter o processo. No diodo Zener, por outro lado, ao atingir uma tensão chamada de Zener (geralmente bem menor que a tensão de ruptura de um

diodo comum), o dispositivo passa a permitir a passagem de corrente bem maiores que a de saturação inversa, mantendo constante a tensão entre os seus terminais. Cada diodo Zener possui uma tensão de Zener específica como, por exemplo, 5,1 V, 6,3 V, 9,1, 12v e 24v.

Quanto ao valor da corrente máxima admissível, existem vários tipos de [diodo]. O valor indicado é o da potência. Por exemplo, existem diodos Zener de 400 mW, 1W além de outros valores. O valor da corrente máxima admissível depende desta potência e da tensão de Zener. É por isso que o diodo Zener se encontra normalmente associado com uma resistência em série, destinada precisamente a limitar a corrente a um valor admissível.

5.3 DIODO SCHOTTKY

Diodo Schottky é um tipo de diodo que utiliza o efeito Schottky na semicondução. Seu nome é uma homenagem ao físico alemão Walter Schottky.

Um diodo Schottky é formado colocando-se um filme metálico em contato direto com um semicondutor, como indicado na figura abaixo. O metal é usualmente depositado sobre um material tipo N, por causa da maior mobilidade dos portadores neste tipo de material. A parte metálica será o anodo e o semicondutor, o catodo.

Numa deposição de Al (3 elétrons na última camada), os elétrons do semicondutor tipo N migrarão para o metal, criando uma região de transição na junção.

Note-se que apenas elétrons (portadores majoritários em ambos materiais) estão em trânsito. O seu chaveamento é muito mais rápido do que o dos diodos bipolares, uma vez que não existe carga espacial armazenada no material tipo N, sendo necessário apenas refazer a barreira de potencial (tipicamente de 0,3V). A região N tem uma dopagem relativamente alta, a fim de reduzir as perda de condução, com isso, a máxima tensão suportável por estes diodos é de cerca de 100V.

A aplicação deste tipo de diodos ocorre principalmente em fontes de baixa tensão, nas quais as quedas sobre os retificadores são significativas.

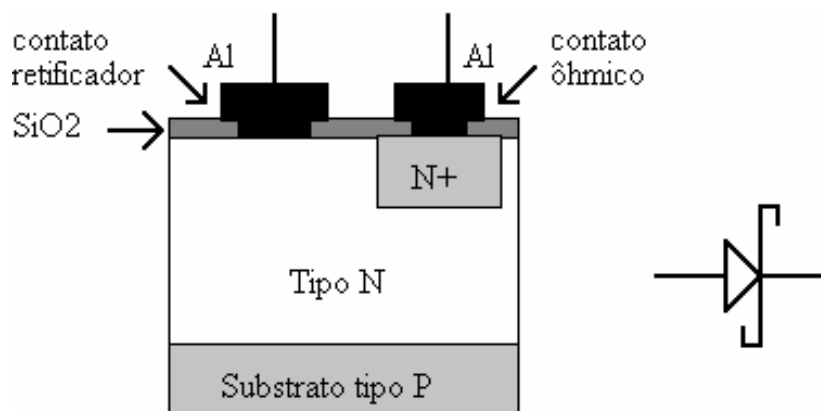


FIGURA 6 – Diodo Schottky.

5.4 FOTODÍODO

Um fotodiodo é um componente eletrônico e um tipo de fotodetector. É uma junção PN designada para responder a uma entrada ótica. Fotodiodos possuem uma "janela" ou uma conexão de fibra ótica, responsável por deixar a luz passar e incidir na parte sensível do dispositivo. Também pode ser usado sem a "janela" para detectar raios ultravioleta ou raios-x.

Fotodiodos podem ser usados tanto na polarização reversa quanto na polarização direta. Na polarização direta, a luz que incide sobre o fotodiodo faz a corrente transcorrer através do dispositivo, levando-a a ir para o sentido frontal. Isso é conhecido como o efeito fotoelétrico, e é a base das células de captação de energia solar - aliás, uma célula de captação de energia solar é apenas um monte de grandes, e baratos, fotodiodos. Diodos geralmente possuem uma altíssima resistência quando a polaridade é revertida. Essa resistência é reduzida quando a luz, em uma apropriada frequência, brilha na junção.

Se iluminarmos uma junção p-n reversamente polarizada, a corrente varia quase linearmente com o fluxo luminoso. Este efeito é aproveitado no fotodiodo semiconductor. Este dispositivo é formado de uma junção p-n recoberta por um plástico transparente, como mostra a figura ao lado. Com exceção de uma janela sobre a junção, as demais partes são pintadas de preto ou encapsuladas em um invólucro metálico. O dispositivo completo é extremamente pequeno e suas dimensões são milimétricas.

Se aplicarmos tensões reversas, além de poucos décimos de volt, obteremos uma corrente quase constante. A corrente que obtemos colocando o dispositivo no escuro corresponde à corrente de saturação reversa devida à geração térmica dos

portadores minoritários. Se um feixe de luz incide *sobre* a superfície, novos pares elétron-lacuna serão gerados.

O fotodiodo $p-n$ é particularmente a versão melhorada $n-p-n$ e encontram muitas aplicações na leitura de altas velocidades das perfuradoras de cartões e fitas de computadores, sistema de *detecção de luz*, leitura da trilha sonora de um filme, chaves operadas por luz, linhas de produção contendo objetos que interrompam um fluxo luminoso, etc.

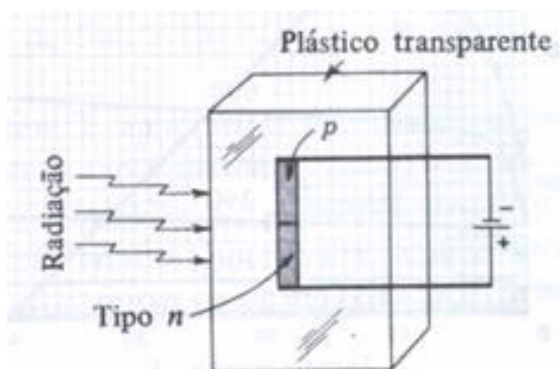


FIGURA 7 – Fotodiodo.

5.5 VARICAP

Os diodos de capacitância variável, varistores ou varicaps como também são chamados, são diodos de silício que aproveitam uma propriedade importante das junções quando polarizadas no sentido inverso e o componente não conduz a corrente. Na figura ao lado temos o símbolo e o aspecto de um diodo deste tipo.

O que ocorre é que, quando o diodo não conduz, sendo polarizado no sentido inverso, as partes do material semicondutor onde a corrente pode atuar, funcionam como as placas de um capacitor e a junção como um dielétrico.

O interessante é que se variando a tensão neste componente, os portadores de carga que se recombina na junção podem aproximar-se ou afastar-se mudando assim a capacitância do componente. O diodo se comporta então como um capacitor, em que podemos controlar a capacitância variando a tensão inversa aplicada: menor tensão terá maior capacitância. Esta propriedade, faz com que o diodo varicap seja usado em lugar dos capacitores variáveis no circuito de sintonia de muitos tipos de aparelhos.

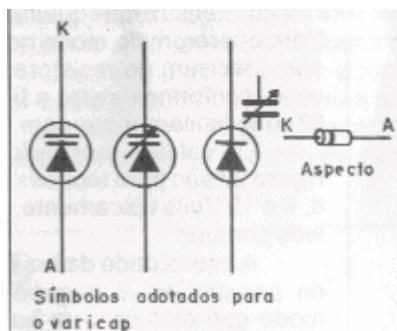


FIGURA 8 – Varicap ou varistor.

5.6. OLED

Organic Light-Emitting Diode ou diodo orgânico emissor de luz é uma tecnologia criada pela Kodak em 1980 e que promete telas planas muito mais finas, leves e baratas que as atuais telas de LCD. A idéia é usar diodos orgânicos, compostos por moléculas de carbono que emitem luz ao receberem uma carga elétrica. A vantagem é que ao contrário dos diodos tradicionais, essas moléculas podem ser diretamente aplicadas sobre a superfície da tela, usando um método de impressão. Acrescentados os filamentos metálicos que conduzem os impulsos elétricos a cada célula, está pronta uma tela a um custo extremamente baixo.

A idéia é usar diodos orgânicos, compostos por moléculas de carbono que emitem luz ao receberem uma carga elétrica. A vantagem é que ao contrário dos diodos tradicionais, essas moléculas podem ser diretamente aplicadas sobre a superfície da tela, usando um método de impressão. Acrescentados os filamentos metálicos que conduzem os impulsos elétricos a cada célula, está pronta uma tela a um custo extremamente baixo.

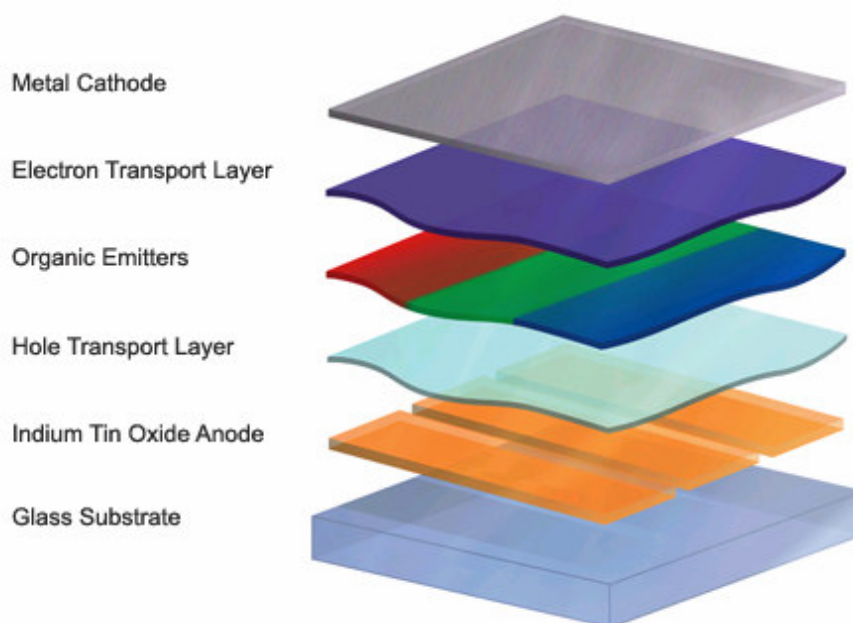
Uma das principais características da tela orgânica é que ela possui luz própria. Com isto não necessita de luz de fundo ou luz lateral, (backlight ou sidelight) e ocupa menos espaço, dois fatores que tornam a tecnologia muito interessante para uso em computadores de mão e laptops. Outra importante característica é que por emitir luz própria cada OLED quando não polarizado torna-se obscuro obtendo-se assim o "preto real", diferentemente do que ocorre com LCDs que não conseguem obstruir completamente a luz de fundo e ainda neste caso não há consumo de energia para a modulação de luz de fundo.

Além destas vantagens as telas OLED possuem baixos tempos de resposta (uma das principais desvantagens do LCD), podem ser visualizadas de diversos ângulos (180°), têm contraste muito melhor (de 1000:1 contra 100:1 das telas LCD no escuro), suportam melhor o calor e o frio, além de ser produzidas de forma mais simplificada e usando menos materiais do que os LCDs.

Alguns fabricantes preferem chamar a tecnologia OEL de OLED (Organic Light-Emitting Diode).

Uma desvantagem em utilizar essa tecnologia e sua facilidade em decompor-se em locais de alta umidade. Tendo que ser hermeticamente encapsulados para que fatores externos não afetem o aparelho.

Na figura a seguir, podemos observar a estrutura de um OLED.



Organic Light Emitting Diode Diagram

FIGURA 9 – OLED.

5.7 DIODO TÚNEL

O diodo túnel ou diodo Esaki é um tipo de diodo semicondutor extremamente rápido, que opera na casa dos GHz, através da utilização dos efeitos da mecânica quântica.

Recebeu o nome do físico Leo Esaki, que em 1973 recebeu o Prêmio Nobel em Física pela descoberta do efeito túnel utilizado neste tipo de diodo semicondutor.

Ele funciona somente na área de resistência negativa, somente quando tem-se uma tensão muito próxima de zero (chamada de avalanche, do diodo zener), ou seja, ele só funciona como diodo túnel quando polarizado reversamente, quando polarizado diretamente ele funciona como qualquer outro diodo. A sua área de funcionalmente é somente quando a tensão é "considerada" negativa.

5.8 SCR

SCR (do inglês Silicon Controlled Rectifier - Retificador Controlado de Silício) é um componente eletrônico semiconductor de quatro camadas. Composto, geralmente, por três terminais, dois dos quais formam um diodo bipolar (um anodo e o outro catodo), e o terceiro terminal constitui um gate (porta), através do qual se efetua o "disparo" do dispositivo.

A construção de quatro camada demonstrado que o direito é conhecido como um Silicon Controlled Rectifier, ou SCR. Para formar-lo, temos que adicionar uma ligação tipo-p região próxima ao cátodo. Esta ligação é conhecida como o gate.

Se aterrarmos tanto o cátodo e o gate, e aplicarmos uma tensão positiva para o anodo, não irá atuar fluxo através deste dispositivo. Isto está em harmonia com a base do diodo. Neste caso, porém, não vamos permitir que a tensão aplicada no anodo a ultrapasse o SCR breakover de tensão. Assim, se nada acontecer, o SCR continuará a ser desligado indefinidamente.

No entanto, se agora aplicarmos uma pequena tensão positiva para o gate de modo a levar em frente o viés catódicos junção, o dispositivo irá se transformar totalmente a imediatamente. Novamente, isto é, uma consequência do comportamento da base diodo. A diferença é que nós podemos controlar rigorosamente o tempo e tensão aplicada no gate se for.

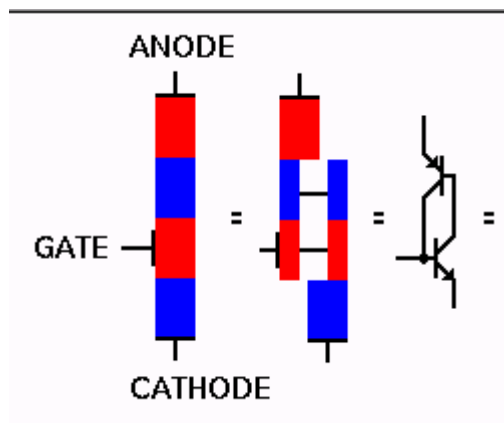


FIGURA 10 – SRC.

6. JUNÇÃO PN

Denomina-se junção P-N à estrutura fundamental dos componentes eletrônicos comumente denominados semicondutores, principalmente diodos e transistores. É formada pela junção metalúrgica de dois cristais, geralmente Silício (Si) e (atualmente menos comum) Germânio (Ge), de natureza P e N, segundo sua composição a nível atômico. Estes dois tipos de cristais são obtidos ao se dopar cristais de metal puro intencionalmente com impurezas, normalmente algum outro metal ou composto químico.

6.1 SILÍCIO PURO OU INTRÍNSECO

Os cristais de Silício são formados a nível atômico por uma estrutura cristalina baseada em ligações covalentes que se produzem graças aos 4 elétrons de valência do átomo de Silício. Cabe também mencionar as lacunas ou buracos que são o lugar deixado pelo elétron quando abandona a camada de valência e torna-se um elétron livre, isto é o que se conhece com pares elétron-lacuna e sua criação se deve à temperatura segundo as leis da termodinâmica. Em um semicondutor puro (intrínseco), à temperatura constante, o número de lacunas é igual ao número de elétrons livres.

6.2 SILÍCIO EXTRÍNSECO TIPO "P"

Um semicondutor tipo P é obtido através do processo de dopagem, adicionando-se um certo tipo de composto, normalmente trivalente, isto é, com 3 elétrons na camada de valência, ao semicondutor para aumentar o número de portadores de carga livres (neste caso positivas, lacunas).

O propósito da dopagem tipo P é criar abundância de lacunas. No caso do silício, uma impureza trivalente deixa uma ligação covalente incompleta, fazendo que, por difusão, um dos átomos vizinhos ceda-lhe um elétron completando assim suas quatro ligações. Assim os dopantes criam as lacunas. Cada lacuna está associada com um íon próximo carregado negativamente, portanto o semicondutor mantém-se eletricamente neutro. Entretanto quando cada lacuna se move pela rede, um próton do átomo situado na posição da lacuna se vê "exposto" e logo se vê equilibrado por um elétron. Por esta razão uma lacuna comporta-se como uma carga positiva. Quando um número suficiente de aceitadores de carga são adicionados, as lacunas superam amplamente a excitação térmica dos elétrons. Assim, as lacunas são os portadores majoritários, enquanto os elétrons são os portadores minoritários nos materiais tipo P. Os diamantes azuis (tipo IIb), que contém impurezas de boro (B), são um exemplo de semicondutor tipo P que se produz de maneira natural.

6.3 SILÍCIO "EXTRÍNSECO" TIPO "N"

Um Semicondutor tipo N é obtido através do processo de dopagem em que se adiciona um composto, normalmente pentavalente, isto é, com 5 elétrons na camada de valência, ao semicondutor para aumentar o número de portadores de carga livres (neste caso negativos, elétrons livres).

Quando o material dopante é adicionado, este aporta seus elétrons mais fracamente ligados aos átomos do semicondutor. Este tipo de agente dopante é também conhecido como material doador já que cede um de seus elétrons ao semicondutor.

O propósito da dopagem tipo N é o de produzir abundância de elétrons livres no material. Para ajudar a entender como se produz a dopagem tipo N considere-se o caso do silício (Si). Os átomos do silício têm uma valência atômica de quatro, portanto forma-se uma ligação covalente com cada um dos átomos de silício adjacentes. Se um átomo com cinco elétrons de valência, tais como os do grupo VA da tabela periódica (ex: fósforo (P), arsênico (As) ou antimônio (Sb)), se incorpora à rede cristalina no lugar de um átomo de silício, então este átomo terá quatro ligações covalentes e um elétron não ligado. Este elétron extra dá como resultado a formação de elétrons livres, o número de elétrons no material supera amplamente o número de lacunas, neste caso os elétrons são portadores majoritários e as lacunas portadores

minoritários. Pelo fato de que os átomos com cinco elétrons de valência têm um elétron extra para "dar" eles são chamados átomos doadores. Note-se que cada elétron livre no semiconductor nunca está distante de um íon dopante positivo imóvel, e o material dopado tipo N geralmente tem uma carga elétrica líquida final igual a zero.

Ao unir ambos os cristais, manifesta-se uma difusão de elétrons do cristal N ao P (J_e).

Ao se estabelecer estas correntes aparecem cargas fixas em uma zona em ambos os lados da junção, zona que recebe diferentes denominações como barreira interna de potencial, zona de carga espacial, de esgotamento ou empobrecimento, de esvaziamento, etc.

A medida que progride o processo de difusão, a zona de carga espacial vai aumentando sua largura aprofundando-se nos cristais em ambos os lados da junção. A acumulação de íons positivos na zona N e de íons negativos na zona P, cria um campo elétrico (E) que atuará sobre os elétrons livres da zona N com uma determinada força de deslocamento, que se oporá à corrente de elétrons e terminará por detê-los.

Este campo elétrico é equivalente a dizer que aparece uma diferença de tensão entre as zonas P e N. Esta diferença de potencial (V_0) é de 0,7 V no caso do silício e 0,3 V se os cristais são de germânio.

6.3 POLARIZAÇÃO DIRETA DA JUNÇÃO P-N

Para que um diodo esteja polarizado diretamente, temos que conectar o pólo positivo da bateria ao anodo (zona P) do diodo e o pólo negativo ao catodo (zona N). Nestas condições podemos observar que:

- O pólo negativo da bateria repele os elétrons livres do cristal N, de maneira que estes elétrons se dirigem à junção P-N.
- O pólo positivo da bateria atrai os elétrons de valência do cristal P, isto é equivalente a dizer que empurra as lacunas para a junção P-N.
- Quando a diferença de potencial entre os bornes da bateria é maior que a diferença de potencial na zona de carga espacial P, os elétrons livres do cristal N, adquirem a energia suficiente para saltar até as lacunas do cristal P, as quais previamente foram deslocadas para a junção P-N.

- Uma vez que um elétron livre da zona N salta à zona P atravessando a zona de carga espacial, cai em uma das muitas lacunas da zona P convertendo-se em elétron de valência. Uma vez que isto ocorre o elétron é atraído pelo polo positivo da bateria e se desloca de átomo em átomo até chegar ao final do cristal P, através do qual introduz-se no fio condutor e chega à bateria.

Neste caso, a bateria diminui a barreira de potencial da zona de carga espacial (cedendo elétrons livres à zona N e atraindo elétrons de valência da zona P), permitindo a passagem da corrente de elétrons através da junção; isto é, o diodo polarizado diretamente conduz a eletricidade.

6.4 POLARIZAÇÃO INVERSA DA JUNÇÃO P-N

Neste caso o pólo negativo da bateria é conectado à zona P e o pólo positivo à zona N, o que faz aumentar a zona de carga espacial, e a tensão nesta zona até que se alcança o valor da tensão da bateria.

- O pólo positivo da bateria atrai os elétrons livres da zona N, os quais saem do cristal N e se introduzem no condutor no qual se deslocam até chegar à bateria. A medida que os elétrons livres abandonam a zona N, os átomos pentavalentes que antes eram neutros, ao verem-se desprendidos de seu elétron no orbital de condução, adquirem estabilidade (8 elétrons na camada de valência, ver semicondutor e átomo) e uma carga elétrica líquida de +1, o que os faz converterem-se em íons positivos.
- O pólo negativo da bateria cede elétrons livres aos átomos trivalentes da zona P. Recordemos que estes átomos só têm três elétrons de valência, e uma vez às ligações forem formadas covalentes com os átomos de silício, têm somente 7 elétrons de valência, sendo o elétron que falta denominado lacuna. Acontece que quando estes elétrons livres cedidos pela bateria entram na zona P, caem dentro destas lacunas com o que os átomos trivalentes adquirem estabilidade (8 elétrons em seu orbital de valência) e uma carga elétrica líquida de -1, convertendo-se assim em íons negativos.
- Este processo se repete e de novo até que a zona de carga espacial adquire o mesmo potencial elétrico da bateria.

Nesta situação, o diodo não deveria conduzir a corrente; não obstante, devido ao efeito da temperatura formar-se-ão pares elétron-lacuna em ambos os lados da

junção produzindo-se uma pequena corrente (da ordem de $1\mu\text{A}$) denominada corrente inversa de saturação. Além disso, existe também uma corrente denominada corrente superficial de fugas a qual, como o próprio nome indica, conduz uma pequena corrente pela superfície do diodo; já que na superfície, os átomos de silício não estão rodeados de suficientes átomos para realizar as quatro ligações covalentes necessárias para obter estabilidade. Este faz com que os átomos da superfície do diodo, tanto da zona N como da P, tenham lacunas em seus orbitais de valência e por isto os elétrons circulam sem dificuldade através deles. Não obstante, assim como a corrente inversa de saturação, a corrente superficial de fugas é desprezível.

7. CONCLUSÃO

Ao termino deste trabalho podemos concluir que o estudo da ciência dos materiais é muito importante, pois através dela que novos equipamentos são criados e melhorados.

Como exemplo, podemos destacar o Oled, que foi desenvolvido após muitos estudos de materiais.

8. REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R. e NASHEKSKI, L. **“Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”**, 6a Edição, Editora Prentice-Hall do Brasil, 1999.

MALVINO, A. P. e LEACH, D. P. **“Eletrônica Digital - Princípios e Aplicações”**, Vol. 1, São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1987.

WIKIPEDIA. A ENCICLOPEDIA LIVRE. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Semicondutor> Acesso em: 25 junho 2008