



MATERIAIS ELÉTRICOS SEMICONDUCTORES

AULA 3



Profª Eliane Silva Custódio



CONVERSA INICIAL

Os semicondutores são materiais que não tem a condutividade elétrica tão boa quanto os condutores, nem tão baixa quanto os isolantes. São materiais de condutibilidade intermediária, entre 10^{-6} e $10^4 (\Omega.m)^{-1}$, e possuem características elétricas únicas, o que os torna úteis para eletrônica.

Os semicondutores intrínsecos são aqueles com propriedade que não são controladas por impurezas e são baseadas na estrutura atômica inerente do material puro.

Os extrínsecos (tipo n ou p) possuem propriedades estáveis com a temperatura e podem ser controlados usando concentrações mínimas de impurezas.

Materiais semicondutores, incluindo silício e germânio, são usados como base para a construção de muitos dispositivos eletrônicos.

Estes materiais têm facilidade de ter sua condutividade elétrica controlada e, quando combinados adequadamente, podem atuar como interruptores, amplificadores ou dispositivos de armazenamento de informações.

TEMA 1 – MATERIAIS SEMICONDUCTORES

A diferença entre materiais condutores e isolantes na prática e de forma simples, é dizer que um conduz eletricidade o outro não. Porém, existe a concentração de portadores de carga, definidos pela letra n minúscula. Quando falamos de um material condutor, temos o n na faixa de 10^{22} elétrons livres por cm^2 . Já o isolante, tem um terço disso, 10^7 . Essa concentração é o que diferencia os dois tipos de material.

As concentrações entre esses valores caracterizam os semicondutores. Diferente dos condutores e isolantes, esses materiais possuem outro tipo de comportamento, além de trabalhar com elétrons livres, existe também o conceito de lacunas (como se fossem lugares em que há falta de elétrons).

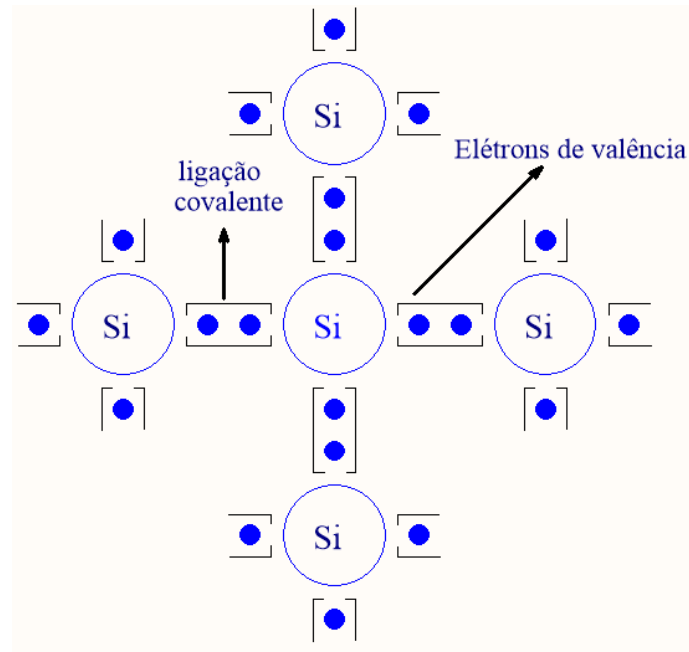
A resistividade dos materiais semicondutores se assemelha aos isolantes, que diminuem com o aumento da temperatura. A razão matemática dessa diminuição pode ser descrita por uma função exponencial.

Germânio (Ge), Arsenieto de gálio (GaAs) e silício (Si) são exemplos clássicos de materiais semicondutores.



O silício é um material abundante na prática, por isso se vê usado na maioria dos exemplos. A camada de valência de um átomo de Silício tem 4 elétrons, na estabilidade, esse átomo precisa de 8 elétrons. Então, 2 átomos podem se configurar de tal maneira a criar uma ligação chamada covalente, compartilhando 4 de seus 4 elétrons, ao invés de doar ou receber. A Figura 1 mostra um esquema dessa ligação chamada de cristal.

Figura 1 – Ligação covalente (Si)



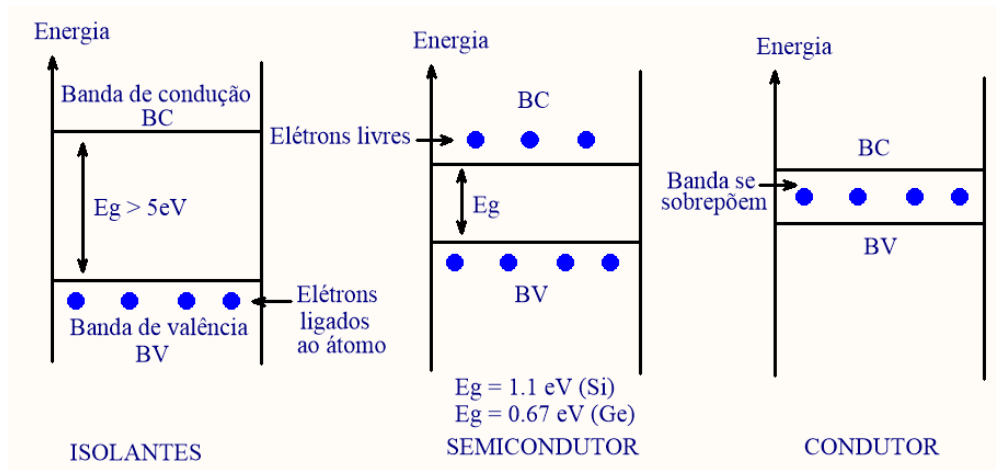
Apesar de existirem outros componentes com 4 elétrons na camada de valência, como carbono, germânio e estanho, somente o germânio se comporta como o silício.

O carbono na forma de diamante é um isolante e o estanho tem as características de condutor. A diferença crucial está na banda de energia (E_g).

A do diamante é muito elevada (6eV), a do germânio é de 0,785eV e no silício é de 1,21eV. No estanho o valor é muito pequeno. A Figura 2 demonstra esses valores em forma gráfica.



Figura 2 – Diagrama de energia em 0K

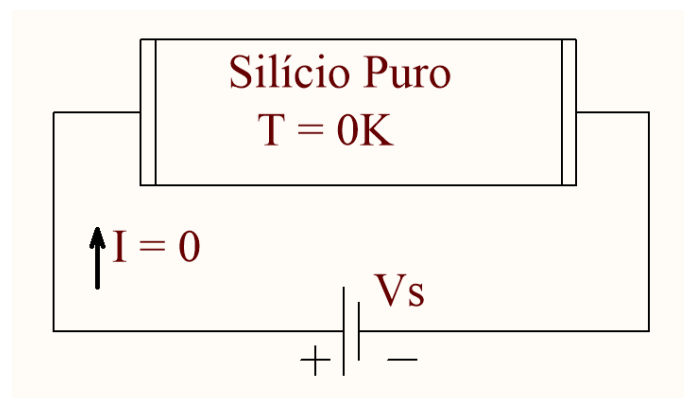


O isolante tem o *gap* de energia bem grande, isso quer dizer que para o elétron passar da BV para BC ele precisa de pelo menos 5eV de energia. Já o condutor não precisa de quase nada de energia para conduzir e o semicondutor está entre o isolante e o condutor.

1.1 Fenômenos de transporte em semicondutor

Quando se submete um metal a uma diferença de potencial, ele tem capacidade de conduzir a corrente elétrica na sua estrutura atômica, tem elétrons com fraca atração ao núcleo e tais elétrons podem ser chamados de elétrons livres. Por outro lado, o material silício tem uma quantidade de elétrons que se movimentam dentro do cristal. Entretanto, se a temperatura for por volta de zero graus kelvin (bem baixa), os elétrons param de se movimentar e não agem mais como elétrons livres, se tornando um isolante, como pode ser visto na Figura 3.

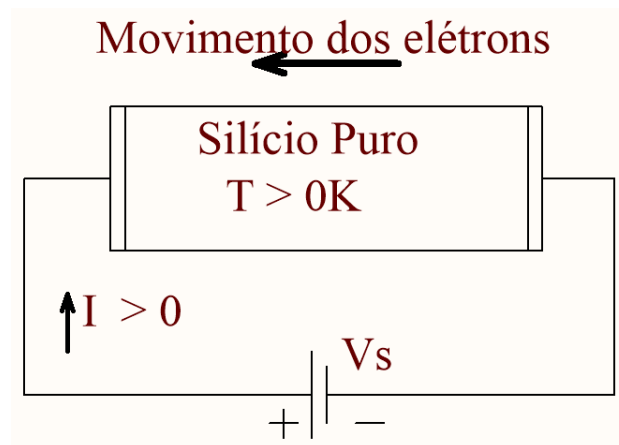
Figura 3 – Condução do silício puro a 0 K





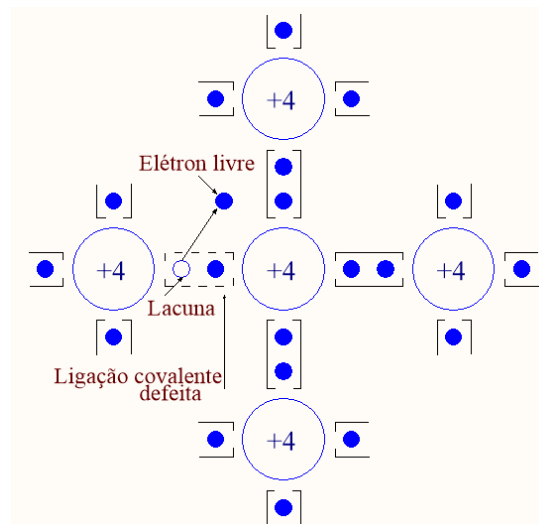
A partir de temperaturas mais elevadas, começando na temperatura ambiente, essas ligações acontecem pela energia térmica recebida e possibilitam a corrente conduzida, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Silício – temperatura ambiente



A energia térmica quebra as ligações covalentes liberando um elétron e deixando um buraco que chamamos de lacuna, se for aumentado a temperatura teremos o aumento dessas quebras, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Ligação covalente desfeita



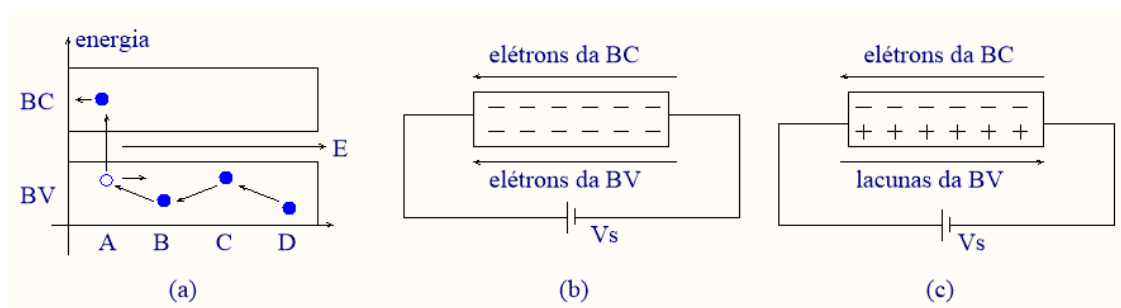
Quando se trabalha com um semiconductor intrínseco (puro) o número de elétrons tende a ser o mesmo que os de lacunas. Porém a energia térmica altera essa igualdade e se a energia térmica aumentar a concentração intrínseca no material semiconductor. Se levar em consideração que a condutividade é proporcional a concentração de elétrons livre a condutividade do material puro aumenta com a temperatura.



O semicondutor de silício, se comparado ao de germânio, tem um número menor de portadores livres. Por esse motivo é mais utilizado na prática, pela menor influência da temperatura. Se aplicada uma diferença de potencial em um semicondutor, as lacunas dentro desse material se locomovem, porém, de maneira diferente.

Na Figura 6, item a, tem-se uma lacuna que foi ocasionada por aumento de temperatura. Essa lacuna, por sua vez, cria uma ligação incompleta, que por meio de uma pequena diferença de energia, atrai um elétron de um átomo próximo, conforme o item b mostra, e acontece sucessivamente, com o no item c.

Figura 6 – (a) diagrama de energia; (b) e (c) trajetos para corrente



Existem 2 tipos de condução de corrente elétrica nos semicondutores: um pelos elétrons livres e outro pelas lacunas, razão pela qual os semicondutores se diferenciam dos metais.

TEMA 2 – O SEMICONDUTOR EXTRÍNSECO

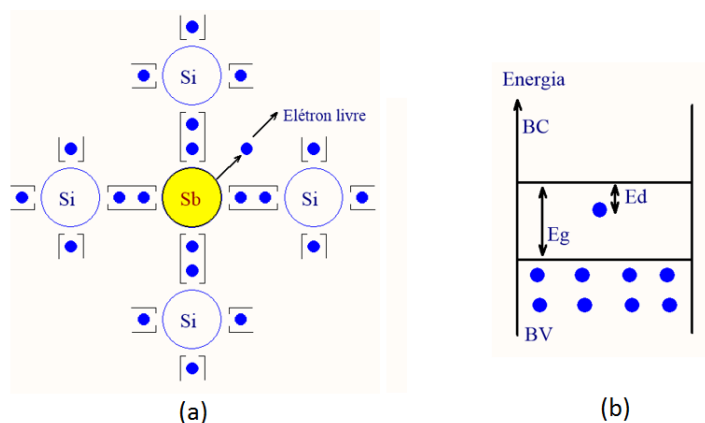
A dependência da temperatura da condutividade em semicondutores intrínsecos é quase exponencial, mas isso não é útil para a maioria das aplicações.

Não podemos controlar com precisão o comportamento de um semicondutor intrínseco, pois pequenas variações na temperatura podem alterar significativamente a condutividade. Por isso, é adicionado um pequeno número de átomos de impureza ao material (dopagem). Assim é produzido uma semicondutor extrínseco. Esses átomos de impureza (na maioria das vezes penta ou trivalentes) inserem um tipo predominante de condução, ou seja, por elétrons livres ou por lacunas. O material de silício tem dopagem com o nível de 1 átomo impuro para 10^8 de silício. Existem 2 tipos de semicondutores extrínseco: o tipo N e o tipo P.

2.1 Semicondutor tipo N

Suponha que seja adicionado um átomo de impureza como antimônio (que tem uma valência de 5) no silício, Figura 7 (a). 4 dos elétrons do átomo de antimônio participam do processo de ligação covalente, enquanto o elétron extra entra em um nível de energia logo abaixo da banda de condução, conforme diagrama de energia na Figura 7 (b).

Figura 7 – (a) ligação do átomo Sb - (b) diagrama de energia



Como o elétron extra não está fortemente ligado aos átomos, apenas um pequeno aumento de energia (E_d), é necessário para o elétron, entrar na banda de condução. Um dopante do tipo n doa um elétron livre e o *gap* de energia que controla a condutividade é agora E_d e não E_g .

Os átomos pentavalentes são chamados de impurezas doadoras do tipo N e como exemplo cita-se: arsênio (As), antimônio (Sb) e o fósforo (P).

O silício dopado é chamado de semicondutor do tipo N.

Quando se usa impurezas do tipo N altera-se o número de elétrons livres, aumentando-os. Por consequência, o número de lacunas diminui.

Desta forma, os portadores majoritários desse tipo de semicondutor intrínseco são os elétrons livres.

2.2 Semicondutor tipo P

Quando é adicionado uma impureza, como gálio ou boro, que tem uma valência de 3 no Si ou Ge, não há elétrons suficientes para completar o processo de ligação covalente. Uma lacuna é criada na banda de valência que pode ser preenchida por elétrons de outros locais da banda (Figura 8).

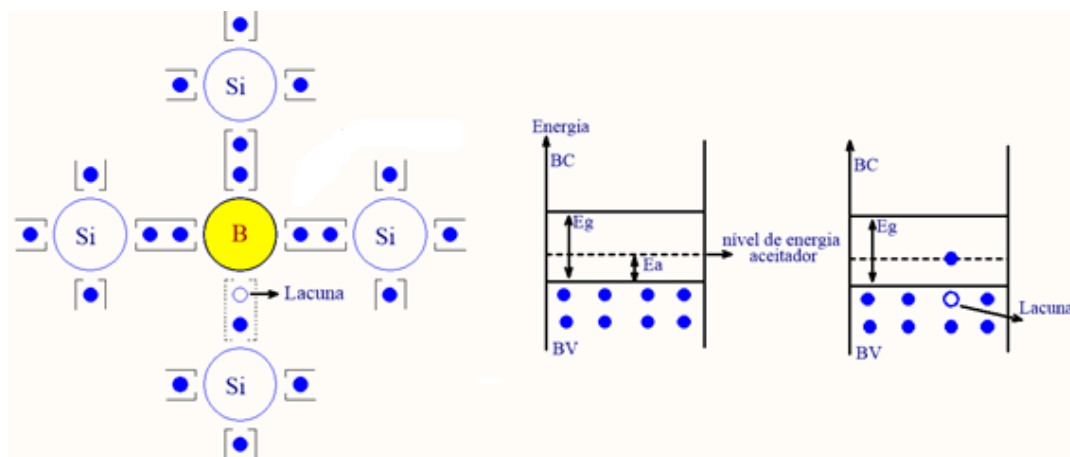


As lacunas atuam como aceitadoras de elétrons. Esses locais de lacuna têm uma energia um pouco maior que o normal e criam um nível de aceitador de possíveis energias elétricas logo acima da banda de valência (Tabela 1).

O elétron deve ganhar uma energia de apenas E_a para criar uma lacuna na banda de valência, desta forma a lacuna carrega a carga.

O silício ou o germânio dopado com impurezas aceitadoras são conhecidos como semicondutores do tipo p, e nesse caso, os portadores majoritários são positivos.

Figura 8 – Inclusão da impureza trivalente e criação de lacuna na banda de valência



2.3 Resistência do semicondutor

Um material semicondutor tem sua resistência regida pela lei de Ohm, com o adicional de temperatura. Entretanto, leva-se em consideração sua dopagem, quanto maior for a dopagem, menor será a resistência do semicondutor extrínseco.

2.4 Variação da condutividade com a temperatura devido a dopagem

A quantidade de inserção de impurezas é medida em partes por milhão. O usual é de 1 parte por milhão nos semicondutores intrínsecos. No extrínseco essa quantidade pula para 100 a 1000 parte por milhão (ppm).

A Tabela 1 tem um resumo das principais impurezas usadas nos semicondutores de silício e germânio.



Tabela 1– Elementos usados como impurezas e suas energias de ionização

	Tipo	Ge	Si
Boro (B)	P	0,0104	0,045
Alumínio (Al)	P	0,0102	0,057
Gálio (Ga)	P	0,0108	0,065
Índio (I)	P	0,0112	0,160
Fósforo (P)	N	0,0120	0,044
Arsênico (As)	N	0,0127	0,049
Antimônio (Sb)	N	0,0096	0,039

A inserção de impurezas ou dopagem auxilia o semicondutor extrínseco a adquirir características mais voltadas aos condutores, pois a condutividade tende a aumentar para materiais isolantes e o inverso para materiais condutores.

TEMA 3 – DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES PUROS

O valor da concentração de portadores livres interfere de forma direta e proporcional na condutividade do material semicondutor, ou seja, se a concentração aumenta, por consequência aumenta a condutividade.

Entretanto, a sensibilidade da temperatura em um semicondutor é muito alta, dessa maneira normalmente não se usa o semicondutor puro nos circuitos eletrônicos. Sabe-se da importância do controle de temperatura nos equipamentos eletrônicos.

A sensibilidade que o semicondutor puro tem também é usada em tecnologias atuais, dentre elas, ressalta-se 2 famílias de componentes que a utilizam:

1. Termistores: são componentes sensíveis a temperatura constituída de materiais semicondutores, usados para medir temperaturas.
2. Fotocondutores: são componentes sensíveis a luz, ou seja, transformam luz em corrente elétrica.

Essas famílias de componentes não são construídas com silício e germânio, pois na natureza esses dois materiais não são encontrados puros.

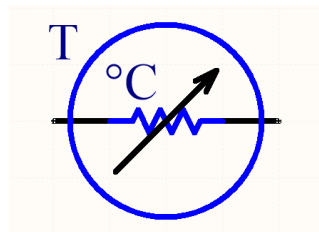
3.1 Termistores

São componentes construídos com material semicondutor, que por meio da mudança de temperatura variam também na sua resistência. Tem-se dois tipos:

1. PTC (*Positive Temperature Coefficient*): a resistência aumenta com o aumento da temperatura.
2. NTC (*Negative Temperature Coefficient*): a resistência diminui com o aumento da temperatura.

A Figura 9 mostra o símbolo desse componente.

Figura 9 – Símbolo do termistor



São usados como sensores térmicos ou para compensar variação de temperatura em dispositivos, e podem ser considerados transdutores do tipo que convertem energia térmica em energia elétrica.

Termistores são obtidos de óxidos metálicos como o óxido de níquel, manganês, cobre, zinco, que fornecem produtos com condutividades que crescem muito rapidamente com a temperatura.

Na Figura 10 temos um modelo de termistor NTC da fabricante Vishay.

Figura 10 – NTC modelo NTCLE100E3



Fonte: Vishay, 2019.



Os termistores são utilizados como sensores de temperatura em termometria, como nos reles de proteção de motores e na medição e controle de temperatura.

3.2 Fotorresistores

São componentes construídos por semicondutores que alteram sua condutividade se forem expostos à luz. Na prática, tem-se o LDR (*Light Dependent Resistor*) demonstrado na Figura 11.

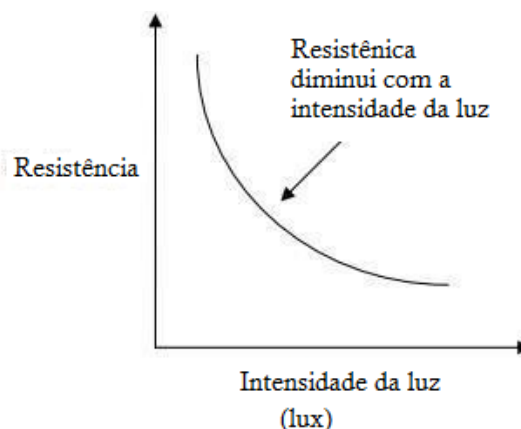
Figura 11 – LDR componente e símbolo



Fonte: Luna Optoelectronics, 2019.

Na ausência de luz um fotorresistor apresenta uma alta resistência (em torno de $1\text{M}\Omega$), entretanto, quando incide a luz em seu corpo semicondutor, a resistência diminui sensivelmente para poucos ohms. Porém, ela não cai de forma linear (Figura 12). Alguns países proibiram os LDRs feitos de chumbo ou cádmio por questões de segurança ambiental.

Figura 12 – Curva do LDR





Como o LDR é semicondutor puro se a intensidade da luz é mantida constante, a resistência ainda pode variar significativamente de acordo com as mudanças de temperatura, então, eles também são sensíveis às mudanças. Esta propriedade torna os LDRs inadequados para medições precisas de intensidade de luz.

Outra propriedade interessante do fotoresistor é que há latência de tempo entre mudanças na iluminação e mudanças na resistência. Esse fenômeno é chamado de taxa de recuperação de resistência.

Em geral, leva cerca de 10 ms para a resistência cair completamente quando a luz é aplicada após a escuridão total, enquanto pode levar até 1 segundo para a resistência retornar ao valor inicial após a remoção completa da luz. Por essa razão, o LDR não pode ser usado em locais em que há flutuações rápidas de luz. São registrados ou usados para acionar equipamentos de controle.

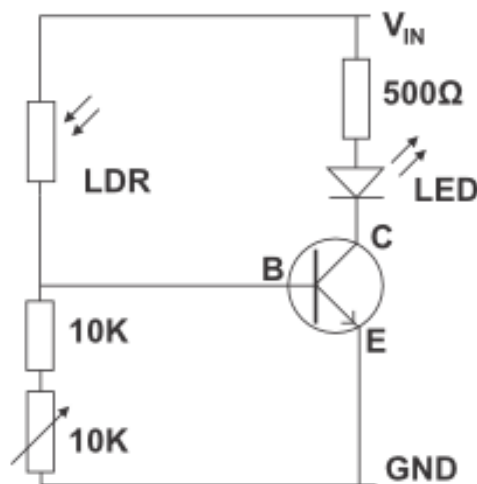
3.3 Aplicações típicas para fotoresistores

Existem diversas aplicações para o LDR, como sensoramento de presença de luz, ou seja, pode-se desligar ou ligar um circuito atrás da presença de luz usando um LDR no processo. Há exemplos de uso como *hobby*, como robôs que seguem uma linha usando fonte de luz. Se um sensor de luz básico for necessário, um circuito LDR como o da Figura 13 pode ser usado.

O LED acende quando a intensidade da luz que atinge o resistor LDR é suficiente. O resistor variável de 10K é usado para definir o limite no qual o LED será ligado. Se a luz LDR estiver abaixo da intensidade limite, o LED permanecerá no estado desligado.

Em aplicações do mundo real, o LED seria substituído por um relé ou a saída poderia ser conectada a um microcontrolador ou outro dispositivo.

Figura 13 – Exemplo de sensor de luz



TEMA 4 – JUNÇÃO PN

A junção p-n é o bloco de construção fundamental da eletrônica. A maioria dos dispositivos eletrônicos é feita de silício. Ao explorar as propriedades elétricas do silício é possível adquirir uma compreensão do funcionamento interno da junção p-n.

4.1 Silício (Si)

Um único átomo de silício consiste em catorze elétrons carregados em torno de um núcleo de catorze prótons positivamente carregados e catorze nêutrons eletricamente neutros.

Como há um número igual de cargas positivas e cargas negativas, o átomo de silício não tem carga elétrica. Dos quatorze elétrons, apenas os 4 elétrons da camada de valência estão disponíveis para ligação química. Os restantes 10 elétrons estão fortemente ligados ao núcleo e não formam ligações para outros átomos. Em um cristal de silício, cada átomo se liga a 4 outros átomos de silício. Cada ligação consiste em 2 elétrons, 1 de cada um dos átomos de silício envolvidos na ligação.

Este tipo de ligação, em que os elétrons são compartilhados igualmente pelos átomos envolvidos, é chamada de ligação covalente.

Estes 4 elétrons de ligação dão ao silício uma propriedade muito importante: a de poder formar um cristal envolvendo todos os elétrons de ligação, com nenhum sobrando (carbono, que também tem 4 elétrons de ligação, pode



usar todos os seus 4 elétrons em ligações carbono-carbono covalentes e formam cristais de diamante).

Um cristal de silício consiste de átomos que não possuem carga e, portanto, o próprio cristal de silício não tem carga elétrica líquida.

Por suas propriedades elétricas, o silício é chamado de semicondutor. Se o cristal de silício é muito puro, então os 4 elétrons externos ocupam todas as ligações covalentes no cristal.

A temperaturas próximas do zero absoluto, os elétrons permanecem em suas posições de ligação. Neste caso, um cristal de silício é quase um isolante elétrico perfeito. Se, no entanto, energia suficiente é fornecida ao cristal por calor ou luz, é possível quebrar alguns destas ligações covalentes. Em silício, a energia de ligação da ligação covalente é 1,1eV (elétron volts). Quando uma ligação é fornecida com essa quantidade de energia (ou mais), um elétron pode se libertar de um átomo e o elétron fica livre para se mover por todo o cristal.

Uma energia de 1,1eV corresponde a um fóton na região do infravermelho o espectro eletromagnético. Um fóton com menos de 1,1 elétron volts de energia não tem energia suficiente para interagir com uma ligação no cristal de silício e, portanto, passa direto pelo cristal sem desalojar elétrons.

4.1.1 Dopagem do silício com fósforo (P)

Um único átomo de fósforo também não possui carga elétrica líquida. O fósforo é o próximo elemento do silício na tabela periódica, com quinze elétrons e quinze prótons. Mais uma vez, as cargas elétricas negativas dos elétrons neutralizam exatamente o cargas elétricas dos prótons, resultando em um átomo que não tem carga elétrica líquida. Destes quinze elétrons, apenas 5 deles estão disponíveis para ligação química.

A configuração desses 5 elétrons de ligação disponíveis dão ao fósforo suas propriedades químicas distintas. Para junções p-n, o aspecto importante é que o fósforo tem mais 1 elétron disponível para ligação do que o silício. Por meio da dopagem o fósforo pode substituir parte do silício átomos no cristal e quando isso acontece, o átomo de fósforo é chamado de dopante.

Os átomos de fósforo dopante formam, cada um, 4 ligações covalentes, da mesma forma que um átomo de silício faz com seus vizinhos.

O 5º dos elétrons de ligação de fósforo, o que não é usado na ligação covalente, agora desempenha um papel importante. Este elétron é apenas



fracamente ligado ao átomo de fósforo: tão fracamente (0,045eV) que, a temperaturas normais, a energia térmica de dentro do cristal é suficiente para libertá-lo do átomo de fósforo. Quando isso acontece, o elétron fica livre para viajar ao redor do cristal.

A condutividade elétrica de um cristal de silício pode ser controlada com cuidado ajustando o número de átomos dopantes no cristal. Em aplicações típicas de células solares há cerca de 1 átomo dopante para cada 5.000.000 átomos de silício.

Quando um átomo tipo o fósforo, com mais de 4 elétrons de ligação, é usado para dopar o silício, o material cristalino resultante é chamado silício do tipo n, isto porque nos elétrons sem restrições disponíveis a partir dos átomos dopantes cada um tem uma carga elétrica negativa.

4.1.2 A carga

Como visto, quando o silício é dopado com fósforo, o fósforo substitui átomos de silício no cristal e forma 4 ligações covalentes, bem como o silício puro. A energia térmica no cristal (somente na temperatura ambiente) quebra o 5º elétron fracamente ligado em fósforo longe do átomo de fósforo e esse elétron está agora disponível para se mover livremente ao redor do cristal.

Um átomo de fósforo que é substituído no cristal de silício, no entanto, não pode se mover, pois é covalentemente ligado e, portanto, fixado no lugar no cristal.

Com apenas quatorze elétrons (o 5º elétron fracamente ligado agora está fluando livremente ao redor do cristal), mas quinze prótons, o átomo de fósforo estacionário agora exibe um carga elétrica.

A soma de todas as cargas elétricas no material dopado, no entanto, é 0 (o cristal não tem carga elétrica líquida), pois todos os elétrons livres no material exatamente coincidem com o número de cargas positivas dos átomos de fósforo no cristal.

Se fosse possível remover ou drenar alguns dos elétrons livres (móveis) do tipo n cristal, a perda dos elétrons carregados negativamente deixaria o cristal com uma carga elétrica positiva. (O conceito é semelhante a remover elétrons do terminal superior de um gerador eletrostático Van de Graaff, pulverizando-os em uma correia em movimento, pois removendo elétrons dele, o terminal superior adquire uma carga positiva).



Se alguns dos elétrons móveis em um cristal de silício do tipo n fossem removidos do cristal, o cristal agora teria uma carga elétrica positiva.

Formando uma junção p-n, alguns dos elétrons livres no cristal do tipo n podem se afastar o material do tipo p, formando uma carga elétrica positiva local em uma região do tipo n cristal de silício.

4.1.3 Substituindo com boro

O boro, com 5 prótons e 5 elétrons, também pode substituir em um cristal de silício, em que um átomo de silício normalmente residiria. um átomo de boro tem apenas 3 elétrons disponíveis em sua camada de ligação, apenas 3 ligações covalentes podem ser formadas entre 1 boro átomo e os átomos de silício em um cristal. Isso porque é necessário compartilhar 2 elétrons, um de cada átomo, a fim de formar uma ligação covalente. Sem um 4º elétron na ligação, o boro pode formar apenas 3 ligações covalentes. A temperaturas próximas do 0 absoluto, esse átomo de boro com sua ligação ausente é estável. Na temperatura ambiente, há energia térmica suficiente para empurrar um elétron próximo para este vaga. Quando isso acontece, o átomo que forneceu o elétron para o átomo de boro agora tem uma vaga de elétrons que pode ser preenchida por um elétron de outro átomo no cristal. Desta forma, a vaga (buraco) pode se mover de átomo para átomo.

Isso pode ser considerado como elétrons carregados negativamente se movendo ao redor das lacunas (deixando assim uma nova lacuna) ou, alternativamente, apenas como cargas positivas movendo-se por meio do material (como lacunas móveis).

A temperatura ambiente, um átomo de boro no cristal foi forçado a ter mais 1 elétron do que o número de prótons em seu núcleo e, nessa configuração, o boro átomo adquiriu uma carga elétrica negativa.

Quando um átomo como o boro (com menos elétrons de ligação do que o silício) é usado para dopar silício, o material resultante é chamado silício tipo-p, pois esses tipos de átomos dopantes geram lacunas móveis no cristal com cada lacuna com uma carga elétrica.



4.1.4 Movimento de elétrons e buracos

Um cristal de silício terá elétrons ou buracos móveis dependendo da dopagem. Como elétrons e buracos, cada um deles tem uma carga elétrica, os campos são afetados. Outro efeito importante é o movimento térmico aleatório dos elétrons e buracos. Este tipo de movimento é chamado de fluxo difusivo e é importante na compreensão das junções p-n e das células solares.

4.2 Corrente de difusão e junção PN

Se um professor colocar algumas gotas de perfume na frente de uma sala de aula, não demorará muito até que os alunos na parte de trás da sala possam detectar o seu odor. Durante um longo período de tempo, a sala de aula acabará por conter uma distribuição uniforme de moléculas de perfume no ar.

Este é um fenômeno puramente aleatório e não está relacionado com nenhuma concentração local de perfume no ar: os átomos de perfume irão derivar aleatoriamente até que eventualmente haja uma distribuição de moléculas de perfume no ar da sala de aula.

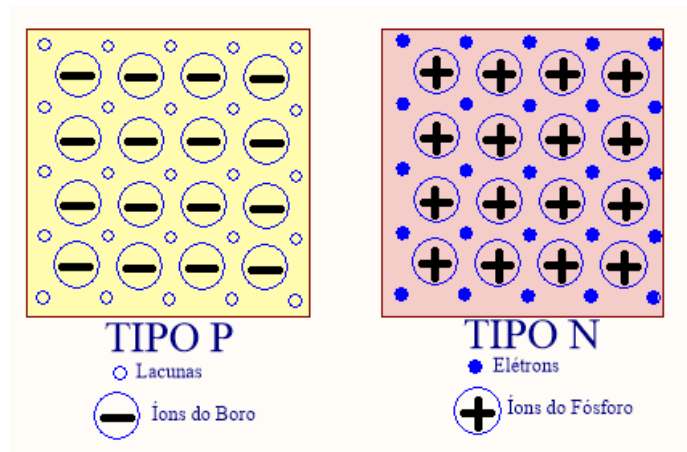
Em um cristal de silício dopado com fósforo do tipo n, os elétrons livres se difundirão (como o perfume na sala de aula) por todo o cristal de forma puramente aleatória, até que haja uma distribuição igual de elétrons livres por todo o volume do cristal de silício tipo-n.

Em um cristal de silício dopado com boro tipo p, as lacunas correspondentes se tornarão igualmente distribuídas por todo o volume do cristal do tipo p.

4.3 Formando uma junção p-n

A dopagem de um lado de um pedaço de silício com boro (um dopante do tipo p) e o outro lado com fósforo (um dopante do tipo n) forma uma junção p-n. Primeiro, no entanto, considere duas peças separadas de silício: uma do tipo n, a outra do tipo p, como na Figura 14.

Figura 14 – Dopagem do Si

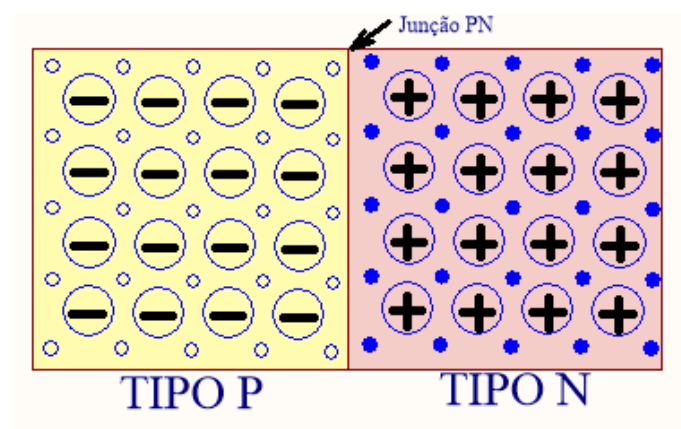


O material do tipo n tem um grande número de elétrons livres (carregados negativamente) que podem percorrer o material. O número de átomos de fósforo carregados positivamente (chamado íons positivos), que não são livres para se movimentar, equilibram exatamente o número e estes elétrons livres negativos.

Da mesma forma, para o material do tipo p, há grandes números de lacunas livres (carregados positivamente) que podem se mover pelo material. Seu número e carga positiva são contrabalançados pelo número de boro carregado negativamente de átomos (chamados íons negativos).

Imagine que os materiais do tipo n e do tipo p são reunidos, como na Figura 15.

Figura 15 – Tipo N e tipo P juntos



É interessante ver o que acontece com os elétrons e lacunas, uma vez que essas duas peças de silício são unidas (junção PN). Devido a dopagem do cristal de silício, há grandes números de elétrons móveis no lado N, mas muito poucos elétrons móveis no lado P.

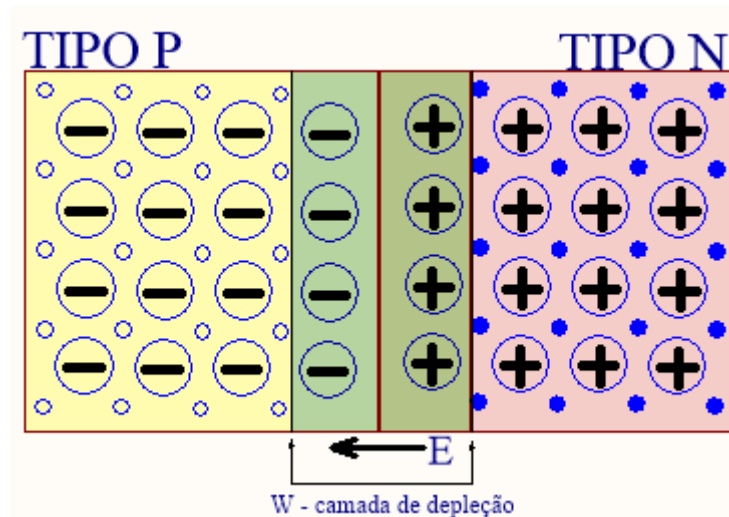


Por causa do movimento térmico aleatório dos elétrons livres, os elétrons da região N começam a se difundir para região P. Da mesma forma, devido a dopagem do silício, há um grande número de lacunas móveis no lado P, mas muito pouco no N. Lacunas no lado P, portanto, começam a se difundir para o lado N.

Agora, se os elétrons e lacunas não tivessem carga elétrica, esse processo de difusão resultaria na distribuição uniforme dos elétrons e lacunas em todo o volume. Eles, no entanto, têm uma carga elétrica, e isso faz com que algo interessante aconteça.

Saindo da região N, um elétron livre deixa na mesma região um íon positivo, se for o caso contrário entrando na região P, tem-se a recombinação com uma lacuna ou íon negativo. Assim é criado um campo elétrico em um semiconductor de dopagem (Figura 16).

Figura 16 – Campo elétrico em semiconductor



Esses íons fixos estabelecem um campo elétrico bem na junção entre o tipo N e material do tipo P. Os elétrons livres e lacunas são influenciados por este campo com os elétrons sendo atraídos em direção aos íons de fósforo positivos, e as lacunas sendo atraídas para os íons negativos de boro. Assim, o campo elétrico faz com que alguns dos elétrons e buracos fluam na direção oposta ao fluxo causado pela difusão. Esses fluxos opostos eventualmente alcançam um equilíbrio estável com o número de elétrons fluindo devido à difusão, equilibrando exatamente o número de elétrons fluindo de volta por conta do campo elétrico. O fluxo líquido de elétrons da junção é 0 e o fluxo líquido de lacunas na junção também é 0.



4.4 Região de depleção

Dentro da região de esgotamento existem poucos elétrons e lacunas móveis, pode-se dizer que está “esgotado” de cargas móveis, deixando apenas as cargas fixas associadas aos átomos dopantes.

Como resultado, a região de depleção é altamente resistiva e agora se comporta como se fosse puro silício cristalino, como um isolante quase perfeito.

A resistência da região de depleção pode ser modificada pela de um campo para o campo elétrico interno “E”. Se o campo elétrico adicionado estiver na mesma direção ao campo elétrico “E”, a resistência da região de depleção se tornará maior. Se o campo elétrico adicionado é oposto em direção ao campo elétrico interno, a resistência da região se tornará menor.

A região de depleção pode, portanto, ser considerada como um resistor controlado por tensão.

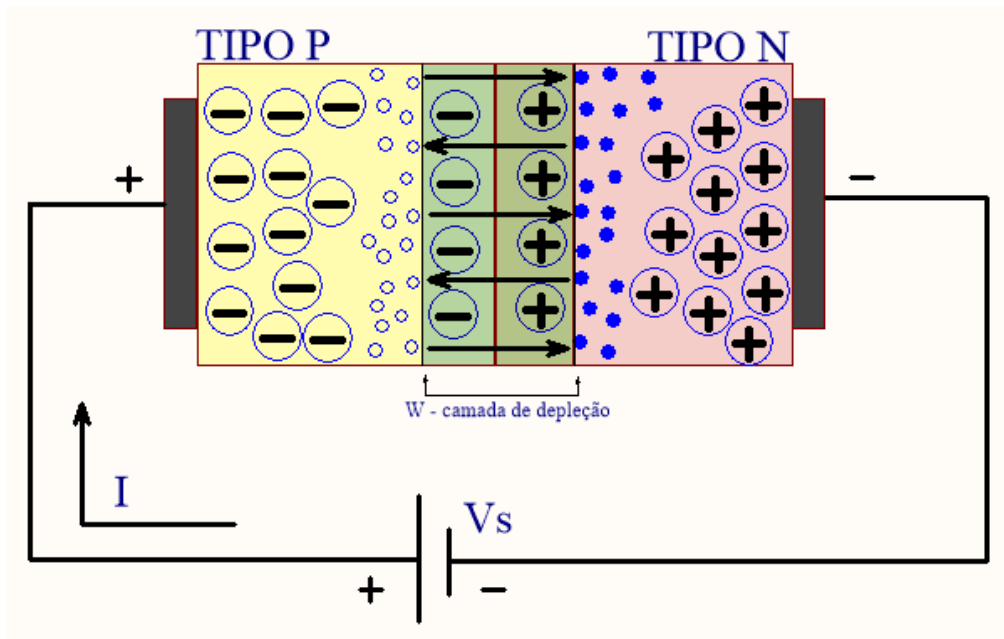
TEMA 5 – JUNÇÃO PN POLARIZADA

A junção PN é a junção mais simples usadas nos semicondutores, como nos diodos retificadores por exemplo. Se for aplicada uma tensão elétrica nessa junção, tem-se duas ações que são dependentes da polarização da tensão envolvida. A primeira dita polarização direta e a outra, polarização reversa.

5.1 Junção PN – polarização direta

Tomamos como base a Figura 17, temos uma junção PN polarizada diretamente pela fonte V_s por meio de contatos metálicos. Na junção P podem ser vistas as lacunas e na junção N pode-se ver elétrons livres.

Figura 17 – Cristal PN polarizado diretamente



Chama-se esse tipo de polarização de direta. Quando a fonte V_s começa a fornecer tensão tem-se a condução de corrente para o diodo semicondutor. Na junção P temos a repulsão dos elétrons livres pelo polo positivo da fonte. No mesmo momento temos a repulsão das lacunas na junção N pelo mesmo motivo, o polo negativo cria a repulsão. Essas duas repulsões diminuem a largura de banda W da camada de depleção conforme a Figura 18.

No momento em que a camada de depleção for baixa o bastante para ser quebrada pela condução de corrente, temos a chamada polarização direta.

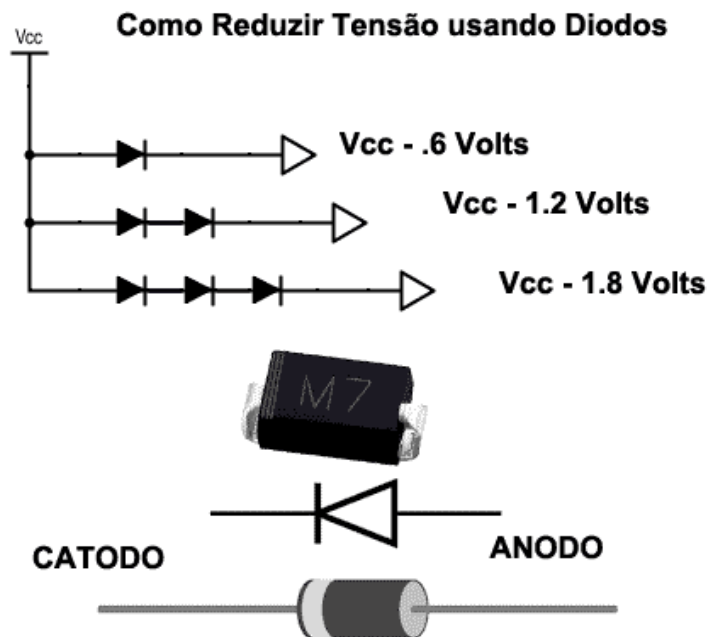
Os contatos metálicos que são ligados ao semicondutor são fabricados de tal maneira que o potencial de contato nas junções independe do valor da corrente e possuem constância, esses contatos são do tipo Ohmico.

Nesse sentido, a corrente direta tem limitação na resistência desse contato somando a resistência do semicondutor, e por último a resistência da camada de depleção.

Na prática tem-se uma pequena tensão do diodo e deve-se considerar essa queda. Essa tensão no diodo de silício é de 0,6 até 0,75V.

A Figura 18 demonstra uma forma de usar essa queda a nosso favor, ou técnica de diminuir (se houver a necessidade) a tensão.

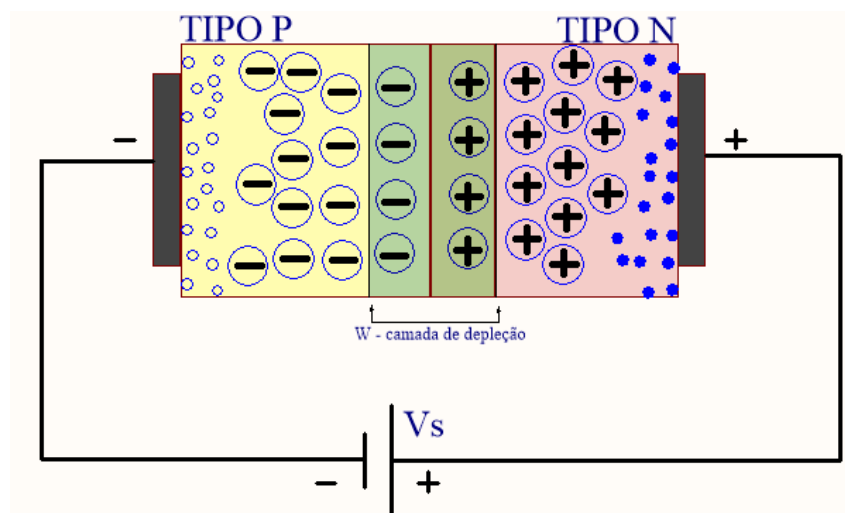
Figura 18 – Redução de tensão



5.2 Junção PN – polarização reversa

Na Figura 19 temos uma junção PN polarizada diretamente pela fonte V_s por meio do contatos metálicos. Na junção P podem ser vistas as lacunas e na junção N podemos ver os elétrons livres.

Figura 19 – Polarização reversa



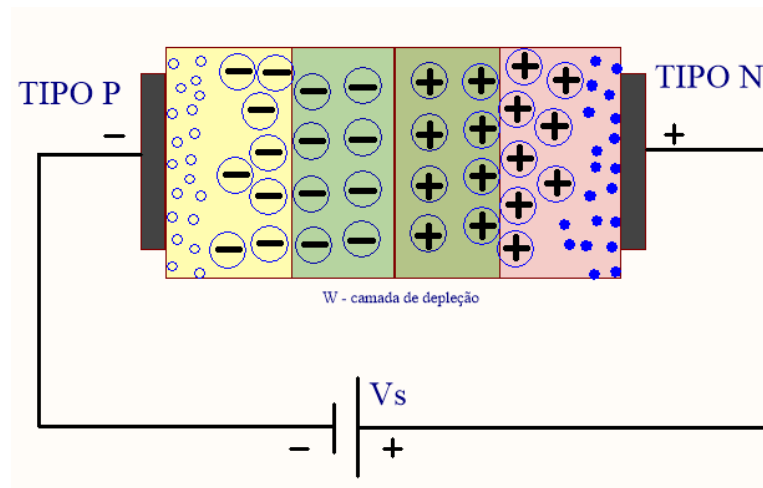
Na polarização reversa temos a atração dos elétrons e lacunas pelos polos da fonte V_s , que aumenta a camada de depleção W . Quanto maior a tensão reversa, maior o campo retardador para os majoritários. Ocorre então um aumento da barreira de potência, e diminui a 0 a difusão de portadores



majoritários. Por fim, há uma resultante de corrente de condução de minoritários chamada I_s constante (Figura 20). Essa corrente tem, por definição, que ser de saturação reversa.

Na prática, se o semiconductor tiver uma alta tensão reversa, pode-se chegar em um ponto chamado crítico, ocorrer tensão de ruptura e então, queimar.

Figura 20 – Camada de depleção maior conforme tensão aplicada



FINALIZANDO

Estudamos materiais com propriedades semi condutoras e materiais que mudam sua resistência por meio da luz e do calor.

Os semicondutores, sem dúvida, foram um marco no avanço tecnológico da eletrônica moderna. Por exemplo: existem microprocessadores no seu celular com milhões de transistores miniaturizados. Esses componentes são de uso tão vasto que dificilmente uma pessoa consegue conhecer e trabalhar com todos durante sua vida acadêmica e profissional.



REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 5. ed. LTC, 2000.

ASKELAND, D; WRIGHT, W. **The science and engineering of materials**. 6. ed. Cengage Learning, 2014.

NTC thermistor. **Resistor guide**. Disponível em: <<http://www.resistorguide.com/ntc-thermistor/>>. Acesso em: 22 maio 2019.

PN junction diode. **Eletronics tutorial**. Disponível em: <https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_3.html>. Acesso em: 22 maio 2019.

PN junction theory. **Eletronics tutorial**. Disponível em: <https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_2.html>. Acesso em: 22 maio 2019.

P-N junction. **Encyclopaedia britannica**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/p-n-junction>>. Acesso em: 22 maio 2019.

SEMICONDUCTOR buying guide. **RS**. Disponível em: <<https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=solutions/semiconductor-buying-guide>>. Acesso em: 22 maio 2019.

SEMICONDUCTOR theory: intrinsic semiconductors. **Allaboutcircuits**. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/video-lectures/semiconductor-theory-intrinsic-semiconductors/>>. Acesso em: 22 maio 2019.

SHACKELFORD, F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.