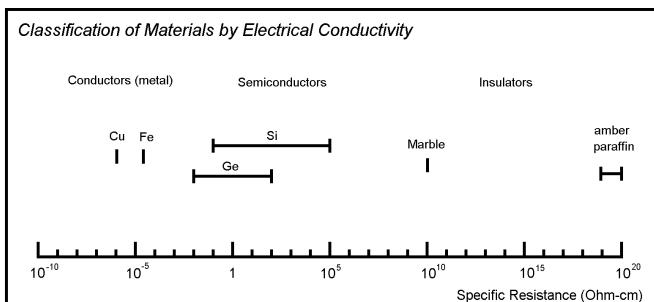


INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS MATERIAIS SEMICONDUTORES

INTRODUÇÃO

O material básico utilizado na construção de dispositivos eletrônicos semicondutores, não é um bom condutor, nem um bom isolante. Compare no quadro abaixo vários materiais classificados quanto à condutividade.



A resistência elétrica de um material, mantido a uma certa temperatura e determinada pela segunda lei de ohm:

$$R = \rho \cdot l / A$$

onde, R - resistência elétrica, medida em ohms [Ω]

l - comprimento do material em metros [m]

A - área do material em metros ao quadrado [m^2]

ρ - resistividade do material [$\Omega \cdot m^2$] / [m].

material	Resistência específica ($\Omega \cdot m$)
Cobre	$\approx 10^{-8}$
Ferro	$\approx 10^{-6}$
Silício	≈ 500
Germânio	≈ 0.5
Mica	$\approx 10^{10}$
Âmbar	maior que 10^{16}

O silício e o germânio, pertencentes ao grupo IV da tabela periódica são muito utilizados na construção de dispositivos eletrônicos.

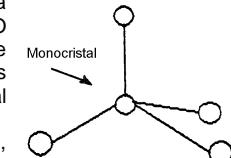
O silício é o mais utilizado, devido as suas características serem melhores em comparação ao germânio e também por ser mais abundante na face da terra.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Em comparação com os metais os isolantes, as propriedades elétricas dos semicondutores são afetadas por variação de temperatura, exposição a luz e acréscimos de impurezas.

Os materiais, silício e germânio têm a forma monocristalina e são utilizados com elevado grau de pureza. O progresso tecnológico de fabricação tem reduzido os níveis de impureza até a uma parte para dez bilhões ($1:10^{10}$), de impurezas do tipo adequado pode mudar a condutividade do material utilizado.

Os átomos de ambos os materiais, silício e germânio, formam um modelo muito definido que constitui uma estrutura chamada monocrystal.

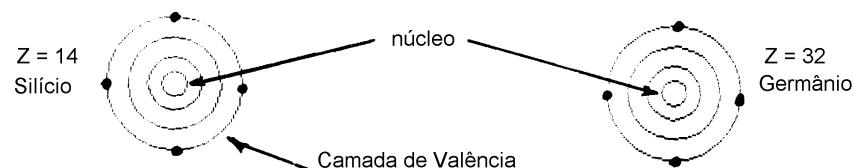


MODELOS ATÔMICOS DE BOHR

O átomo é constituído por partículas elementares, as mais importantes para o nosso estudo são os elétrons, os prótons e os nêutrons.

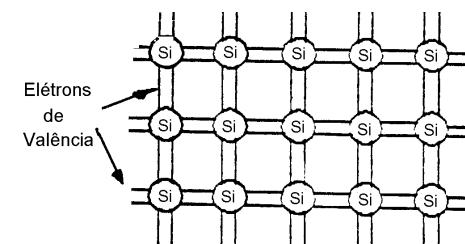
Na estrutura atômica de BOHR, os nêutrons e os prótons constituem a parte central do átomo chamada de núcleo e os elétrons giram em torno desse núcleo, em vários níveis energéticos.

Nas figuras abaixo estão representados os modelos atômicos de BOHR, para os átomos de silício e germânio. A última camada eletrônica (nível energético) é chamada camada de valência. O silício e o germânio são átomos tetravalentes, pois possuem quatro elétrons na camada de valência.



O potencial necessário para tornar livre qualquer um dos elétrons de valência é menor que o necessário para remover qualquer outro da estrutura. Em um cristal de silício ou germânio, puros (intrínsecos), estes quatro elétrons de valência participam da ligação atômica com quatro elétrons dos átomos vizinhos, formando ligações covalentes. Embora a ligação covalente implique numa ligação mais forte entre os elétrons de valência, ainda assim é possível que possam assumir o estado livre.

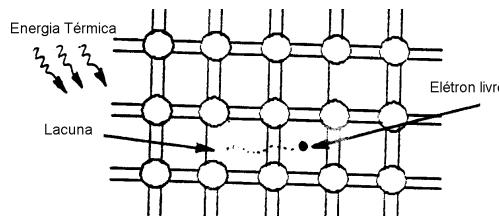
A figura abaixo mostra a estrutura planificada das ligações covalentes dos átomos de silício ou germânio.



Os elétrons de valência podem absorver energia externa suficiente para se tornarem elétrons livres.

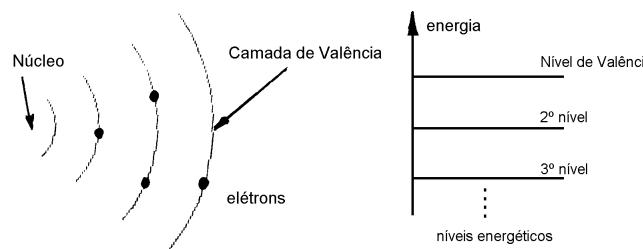
A temperatura ambiente a aproximadamente $1,5 \cdot 10^{10}$ portadores livres disponíveis para a condução de eletricidade em 1 centímetro cúbico de silício intríseco, sendo que a mesma temperatura o germânio terá aproximadamente 1000 vezes mais portadores livres.

Uma mudança na temperatura de um material semicondutor pode alterar consideravelmente o número de portadores disponíveis. Com a elevação da temperatura, os elétrons de valência absorvem energia térmica suficiente para quebra das ligações covalentes, contribuindo para o aumento da condutividade do material. A figura abaixo mostra a quebra de ligações covalentes.



NIVEIS DE ENERGIA

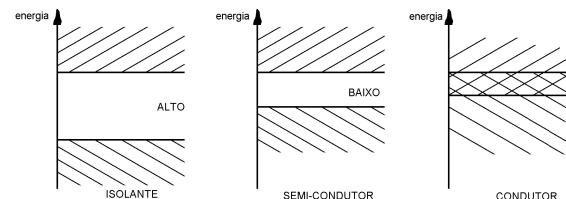
Na estrutura atômica isolada há níveis de energia discretos, associados a cada elétron em sua respectiva órbita. Entre esses níveis discretos nenhum elétron pode existir na estrutura atômica isolada. As figuras mostram níveis de energia, para um átomo isolado.



Os elétrons que ocupam a camada de valência, têm um nível energético mais elevado do que qualquer outro elétron do átomo, contudo podem possuir um nível mais elevado ainda quando torna se livre.

Quando os átomos de silício ou germânio formam o cristal, cada átomo da estrutura sofrendo a influencia de seus vizinhos fazem com que seus elétrons ocupem posições diferentes, dentro de uma mesma órbita, de um átomo vizinho.

O resultado final é uma expansão dos níveis discretos de energia possíveis. A figura abaixo ilustra essa situação.



MATERIAIS EXTRÍNSECOS

A adição de certos átomos estranhos aos átomos de silício ou germânio, chamados de átomos de impurezas, pode alterar a estrutura de camadas (bandas) de energia de forma suficiente mudar as propriedades elétricas dos materiais intrísecos.

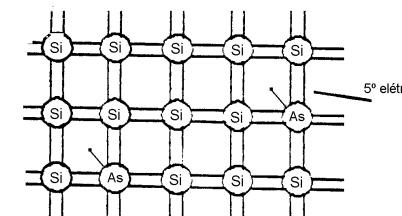
Um material semicondutor que tenha sido submetido a um processo de dopagem por impurezas é chamado de material extrínseco. Há dois materiais extrínsecos de muita importância para a fabricação de dispositivos semicondutores. Esses materiais são chamados de tipo N e tipo P.

MATERIAL DOPADO TIPO N

Um método de dopagem consiste na utilização de elementos contendo cinco elétrons na camada de valência (penta-valente), como o antimônio, arsênio e fósforo.

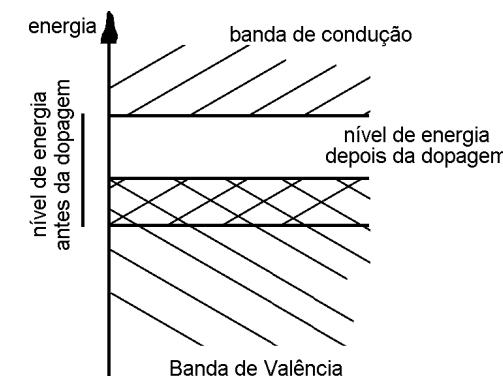
O elemento penta-valente é adicionado ao silício ou germânio, intríseco.

Quatro ligações covalentes serão estabelecidas. O quinto elétron, porém, fica desassociado de qualquer ligação. Esse elétron pode tornar-se livre mais facilmente que qualquer outro, podendo nessas condições vagar pelo cristal.



A figura mostra a estrutura planificada de um material do tipo N.

Como o quinto elétron foi doado ao material pelo átomo penta-valente esse é chamado de átomo doador. O nível de dopagem é da ordem de um átomo doador para 10 milhões de átomos do cristal de silício ou germânio, ($1:10^7$). O efeito deste processo de dopagem é mostrado no diagrama energético a seguir:

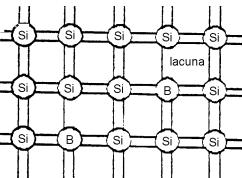


O material tipo N resultante, é eletricamente neutro.

MATERIAL DOPADO TIPO P

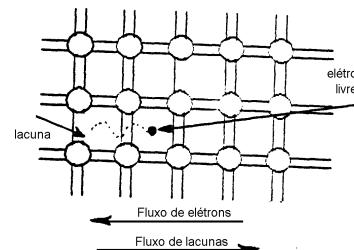
O material tipo P é formado pela dopagem do semicondutor intrínseco por átomos trivalentes como o boro, gálio e índio. Há agora um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes. A falta dessa ligação é chamada de lacuna (buraco). Na figura, temos a estrutura planificada de um material tipo P:

Como uma lacuna pode ser preenchida por um elétron, as impurezas trivalentes acrescentadas ao silício ou germânio intrínseco, são chamados de átomos aceitadores ou receptores. O material tipo P resultante é eletricamente neutro.



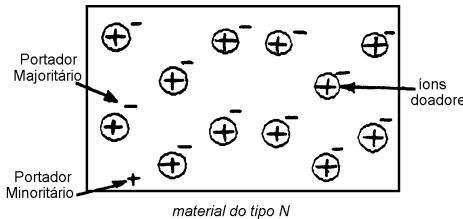
Condução devido às lacunas

O elétron livre, devido à quebra da ligação covalente pode vir a ocupar uma lacuna. Quando isso ocorrer, deixa no lugar que ocupava uma nova lacuna. A figura abaixo mostra essa situação:

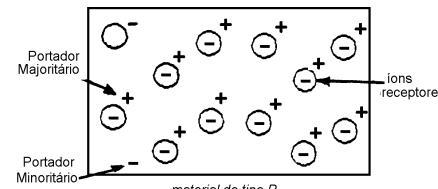


No estado intrínseco, o número de elétrons livres no silício ou germânio é devido à quebra de ligações covalentes por fontes térmicas ou luminosas, gerando um número pequeno de lacunas.

No material tipo N o número de lacunas, não muda significativamente com relação ao material intrínseco, sendo, portanto o elétron o portador majoritário deste material e a lacuna, o portador minoritário.



Já no material tipo P, os elétrons são portadores minoritários e as lacunas, portadores majoritários.



O DIODO IDEAL

Antes de estudarmos as características de um dispositivo real, primeiramente consideraremos o diodo ideal, de maneira a simplificar o entendimento do diodo semicondutor. O diodo ideal é um elemento de circuito, que tem as seguintes características:

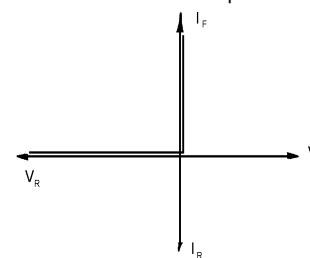
- é um curto circuito na região de polarização direta.
- é um circuito aberto na região de polarização inversa.



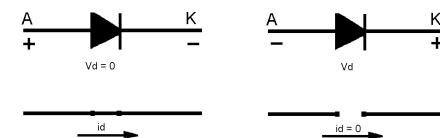
Resistência direta: $\frac{V_f}{I_f} = 0$

Resistência inversa: $\frac{V_r}{I_r} = \infty$

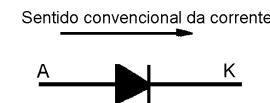
Característica volt – ampére



Circuitos equivalentes



O sentido convencional da corrente, é indicado pela ponta da flecha no símbolo.



RETIFICADOR BÁSICO COM DIODO IDEAL

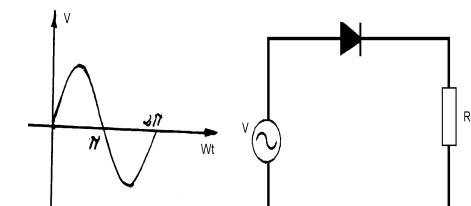
O processo de retificação consiste em se converter uma grandeza alternada com valor médio zero, em uma grandeza com valor médio maior ou menor que zero.

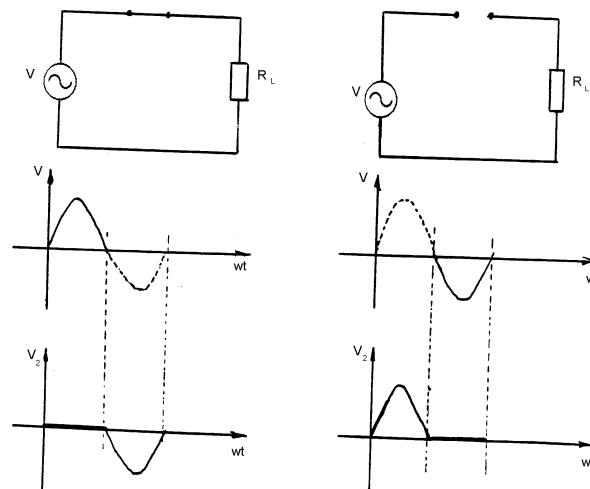
O exemplo a seguir mostra o processo de retificação, num circuito retificador básico.

A variação do potencial estabelecida pelo gerador alternado tem o comportamento senoidal.

Para valores da tensão nos terminais do gerador, de wt de 0 a π a tensão nos terminais do diodo e tal que ele conduz, pois está sob polarização direta.

De π a 2π , não conduz, pois está sob polarização inversa.

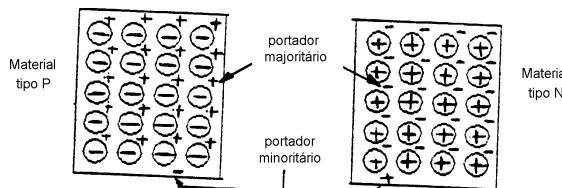




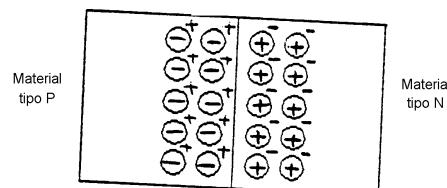
O DIODO DE JUNÇÃO

O diodo semicondutor é um dispositivo básico numa grande variedade de circuitos que vão dos mais simples aos mais complexos.

O diodo de junção semicondutor é formado unindo os materiais do tipo N e P construídos a partir da mesma base de silício ou germânio,

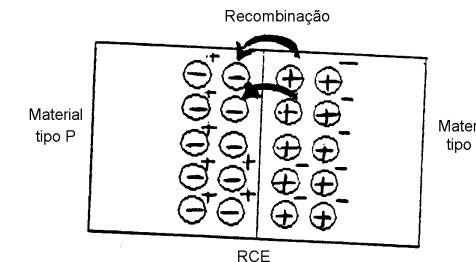


Os materiais do tipo N e do tipo P são eletricamente neutros. Quando são unidos formam um dispositivo chamado diodo de junção.



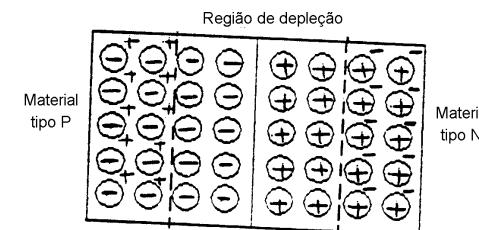
No instante em que os dois materiais são unidos, os elétrons e as lacunas próximos a junção, se combinarão, resultando numa região sem portadores.

Quando um elétron ou lacuna cruza a junção, penetra num meio onde será minoritário. Ao processo do elétron preencher uma lacuna, dá-se o nome de recombinação.



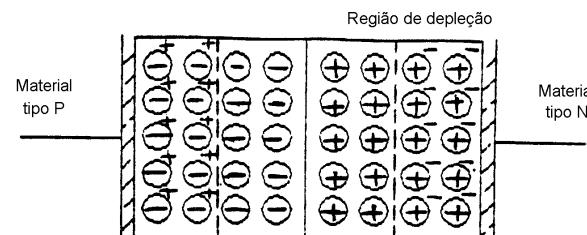
A região próxima a junção fica sem portadores associados, sendo chamada de região de depleção ou região de carga espacial (RCE).

Com a movimentação dos portadores majoritários de ambos os lados da junção, no processo de recombinação a região de depleção cria uma barreira de potencial, favorecendo o processo de deriva que irá se opor ao processo de difusão.



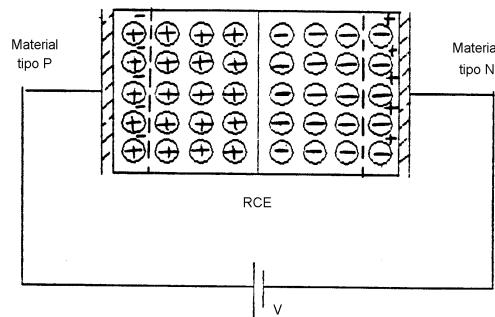
A deriva possibilita que um portador minoritário cruze a junção, porém há um instante em que as tendências de deriva e difusão se equilibram, cessando a movimentação de cargas. A união dos dois tipos de materiais permanece eletricamente neutra. A figura abaixo representa um diodo de junção já formado.

CONSTRUÇÃO E CARACTERÍSTICAS



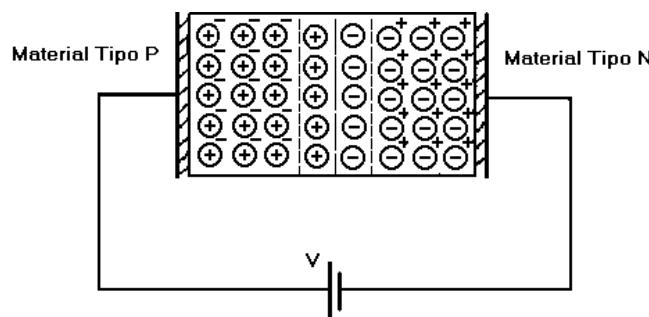
[O Diodo de Junção Polarizado.](#)
[Condição de Polarização Inversa.](#)

Sendo aplicado um potencial externo, reverso com relação às regiões de material P e N, o número de cargas descobertas, sem portadores associados aumentará, até que se atinja uma nova situação de equilíbrio, aumentando ainda mais a região de depleção, favorecendo a movimentação de minoritários. A figura abaixo mostra um diodo de junção polarizado inversamente.



A corrente pelo diodo de junção na condição de polarização reversa é chamada de corrente de saturação inversa, representada neste texto por I_r .

[Condição de Polarização Direta](#)



A condição de polarização direta é estabelecida aplicando-se um potencial positivo (direto) com relação aos materiais P e N. O fluxo de minoritários ainda existe, porém é pequeno comparado ao fluxo de recombinação, devido a quebra do equilíbrio inicial. A região de depleção diminui, favorecendo a movimentação dos portadores majoritários. A figura a seguir, mostra o diodo de junção polarizado diretamente.

O fluxo de portadores majoritários aumentará exponencialmente com o aumento da polarização direta.

Portanto o fluxo total será:

$$I_d = I - I_r$$

Através da física do estado sólido pode-se demonstrar que a corrente do diodo está relacionada com a temperatura (T) e a polarização aplicada (V).

$$I_d = I_r \left(\frac{q \cdot V - I}{e \cdot \eta \cdot k \cdot T} \right)$$

onde: q - carga do elétron

V - tensão aplicada ao diodo

K - constante de BOLTZMAN

T - temperatura em KELVIN

η - constante empírica

I_r - corrente de saturação reversa

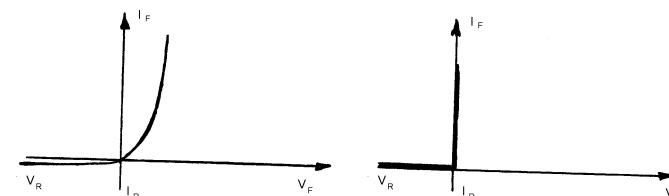
I_d - corrente total no diodo

$$\text{A temperatura ambiente de } 25^\circ\text{C}; \quad T = T_c + 273 \\ \text{então } T = 298 \text{ K e } q/k = 11600$$

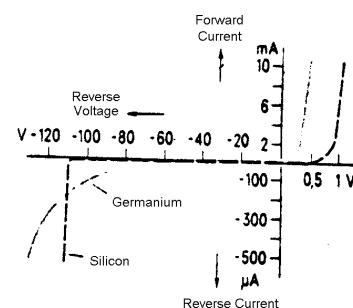
O valor de η varia de 1 a 2 para o silício e vale 1 para o germânio.

[Curva Característica teórica.](#)

Note a semelhança da curva característica teórica para o diodo de junção com a analisada para o diodo ideal.

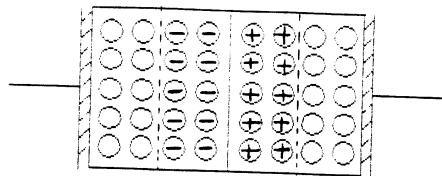


Curva característica de um diodo real, a semelhança com a curva teórica também é muito grande. No diodo real, deve ser vencida a barreira de potencial do diodo para que possa conduzir. O potencial a ser vencido deve ser da ordem de 0,7volts para diodos de silício e de 0,2volts para diodos de germânio.

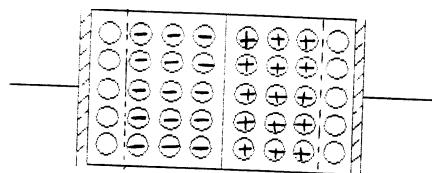


FENÔMENOS DE RUPTURA

No diodo sem polarização, já existe uma região de depleção que cria uma barreira de potencial, representada na figura abaixo:



Quando é aplicada a polarização reversa, aumenta a largura da região de depleção, aumentando também a velocidade com que os portadores minoritários cruzam a junção. A figura abaixo mostra o diodo de junção com polarização reversa.

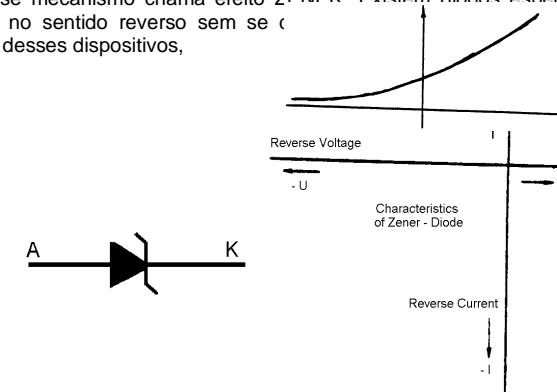


A partir de um certo valor de tensão aplicada ao diodo, haverá choques dos elétrons livres com elétrons das ligações covalentes, com possível retirada desses elétrons. Ocorrerá um efeito multiplicativo, aumentando consideravelmente o número de elétrons disponíveis para a condução de corrente. Esse efeito, chamado avalanche, faz com que a corrente aumente rapidamente para qualquer novo acréscimo de tensão reversa aplicada ao diodo.

Se ambos os lados da junção forem muito dopados, a região de depleção será estreita. Isso faz com que os elétrons não tenham condições de ganhar energia cinética suficiente para retirada de outros elétrons das ligações covalentes.

Porém o próprio campo elétrico pode retirar os elétrons, fazendo com que haja um aumento considerável da corrente para qualquer novo acréscimo de tensão.

Esse mecanismo chama efeito ZFNFR. Existem diodos especiais que sustentam a condução no sentido reverso sem se romper. Exemplos desses dispositivos,

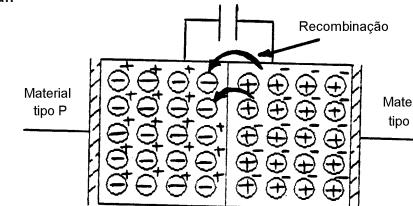


CAPACITÂNCIA EM DIODOS

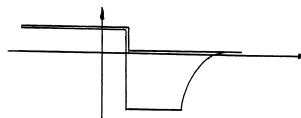
Os diodos entre outros dispositivos de junção apresentam efeitos capacitivos. A região de depleção que se forma num diodo polarizado reversamente, não possui portadores móveis associados aos átomos do material do tipo P e N. As regiões P e N, fora da região de carga espacial (RCE), possuem portadores, comportando-se como placas de um capacitor carregado, cujo dielétrico é a própria região de depleção. A figura a seguir, mostra um diodo reversamente polarizado e um capacitor, para comparação. A esse efeito capacitivo, chamamos, capacidade de transição ou de barreira.

Em polarização direta o diodo conduz bem, pois existe um processo contínuo de recombinação entre elétrons e lacunas. Mesmo diretamente polarizado, nas regiões P e N existem portadores minoritários que não recombinação. Subitamente quando é invertida a polarização, a corrente não diminui ao valor da corrente de saturação reversa, instantaneamente passando o diodo a conduzir por um determinado tempo no sentido reverso. O tempo necessário para que se estabeleça a corrente reversa em níveis normais ao tipo de diodo utilizado é conhecido como tempo de recuperação reversa (trr). A esse efeito capacitivo chamamos de capacidade de difusão ou de acumulação. A figura a seguir, mostra um circuito equivalente, com um capacitor em paralelo ao diodo.

O gráfico a seguir mostra a variação da capacidade de um diodo em função da polarização.



As formas de onda a seguir mostram o efeito da capacitância de difusão como é medido o tempo de recuperação reversa.

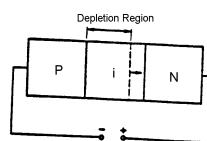


A representação do efeito capacutivo em diodos pode ser feita utilizando o símbolo de um capacitor em paralelo com o símbolo do diodo.

DIODOS ESPECIAIS

Diodo PIN

A região I tem alta resistência que pode tornar-se com elevada condutividade sob polarização direta. Em polarização reversa praticamente não conduz, oferecendo uma alta tensão de ruptura, da ordem de centenas de volts atuando como um capacitor. Em polarização direta comporta-se como uma resistência variável de baixo valor. Como resistor controlado pela corrente, atua como limitador em circuitos ou como atenuador em microondas.

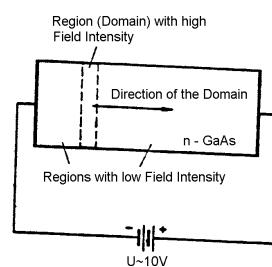


Dispositivo GUNN

Consiste de um cristal homogêneo de arsenieto de gálio sem a junção PN, não sendo polarizado como os demais diodos devido à ausência da junção.

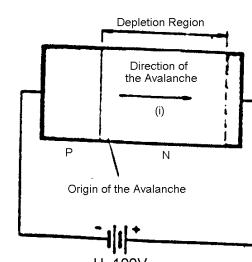
Basicamente é formado por uma região N, sobre uma base cristalina. O efeito GUNN foi apresentado em 1964 e refere-se a circulação de zonas de campo elétrico de valor elevado, chamados de domínios, que se movimentam através do cristal, quando o dispositivo é convenientemente polarizado.

Os domínios são agrupamentos de elétrons entre ânodo e cátodo, resultando num ciclo de pulsos de corrente de transição, determinado pela largura da camada N. O valor da tensão aplicada, também tem influência no ciclo de domínios. O dispositivo é utilizado na geração de oscilações em torno de 40GHz.



IMPATT (Impact Avalanche and Transit Time)

Trabalhando em freqüências da ordem de 300GHz, tem um desempenho superior aos dispositivos GUNN, porém com tensões elevadas, da ordem de uma centena de volts. A tensão aplicada de modo reverso faz com que o diodo trabalhe na ruptura, resultando numa corrente de avalanche. São dispositivos de quatro camadas, sendo uma P e outra N, fortemente dopadas, uma N intermediária e uma camada intrínseca. A região de depleção é formada com a região N e a camada intrínseca. Devido a alta tensão reversa, a dissipação de potência é muito elevada.

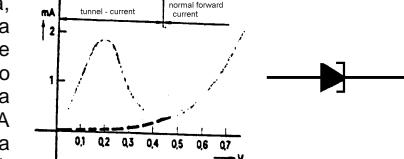


TRAPPAT (Trapped Plasma Avalanche Triggered Transit)

São diodos IMPATT, que requerem altíssimos campos elétricos aplicados quando usados com correntes externas convenientes, a ionização se estende por toda a região de depleção, então será desenvolvido um plasma e portadores.

DIODO TUNNEL (ou ESAKI)

Teve seu efeito explicado em 1958. Consiste em uma junção PN estreita altamente dopada, apresentando uma RCE muito estreita. Devido a largura RCE e a alta concentração de portadores de ambos os lados da junção, uma pequena tensão direta aplicada, faz com que o dispositivo inicie a processo de condução, através do tunelamento. A corrente aumenta rapidamente com o aumento da tensão até alcançar I_p (corrente de pico). A partir desse ponto o dispositivo apresenta uma resistência negativa, ou seja, com o aumento da tensão a corrente, diminui até I_v (corrente de vale). A partir desse ponto, a corrente volta a crescer com o aumento da tensão aplicada. A figura a seguir, mostra a curva característica de um diodo tunnel e seu símbolo. Os valores de I_p e I_v variam conforme a construção e a largura da barreira.



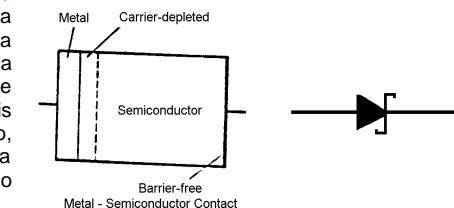
DIODO SCHOTTKY

Também é chamado de diodo HCT (Hot carrier Diode.). Teve seu efeito explicado por SCHOTTKY em 1939, porém foi descoberto por BRAUN em 1874.

Baseia-se na união de um metal e um semicondutor. Devido às pequenas dimensões em que pode ser construído, é muito utilizado na fabricação de circuitos integrados. São usados na fabricação do diodo SCHOTTKY, o silício ou arsenieto de gálio com forte dopagem como cátodos e ouro, prata ou alumínio como ânodos.

O funcionamento do dispositivo baseia-se no fato de que os níveis de energia são diferentes entre o semicondutor e o metal.

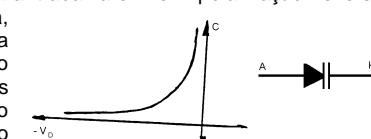
Quando em polarização direta, essa diferença provoca o aparecimento de uma corrente no sentido do semicondutor para o metal. Em polarização reversa o aumento da barreira de potencial impede a condução de corrente. Devido aos elétrons, únicos portadores de carga, é chamado de HCD. Devido à ausência de portadores minoritários, a resposta do SCHOTTKY é muito rápida podendo trabalhar em freqüências da ordem de 70GHz. A tensão de início de condução depende dos materiais escolhidos na fabricação do diodo, podendo variar de 0,25 a 0,75volts. A figura a seguir, mostra a estrutura e o símbolo do diodo SCHOTTKY.



DIODO VARICAP (VARACTOR)

Em condições de polarização reversa, todo diodo pode ser comparado a um capacitor, pois nessa condição as regiões P e N comportam-se como as placas (armaduras) e a RCE como o dielétrico.

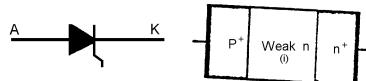
Os VARCAPS são diodos otimizados para trabalharem em polarização reversa, apresentando maiores variações de capacitância, em função do potencial reverso aplicado. Para baixas freqüências são fabricados com silício, sendo usado o arsenieto de gálio para freqüências mais elevadas. A figura a seguir mostra o comportamento da capacitância em função da polarização e o



símbolo do diodo varicap.

DIODO DE RECUPERAÇÃO EM DEGRAU

O diodo de recuperação em degrau tem um nível de dopagem que a medida que se aproxima da junção decresce de valor. Conduz com polarização direta como qualquer diodo de silício. Em polarização reversa, conduz por um certo tempo, interrompendo o processo logo a seguir. Utilizado num circuito adequado a corrente pode ser filtrada produzindo freqüências mais elevadas. A figura a seguir mostra a estrutura básica de um diodo de recuperação em degrau.



DIODO DE RETAGUARDA (BACK DIODE)

Diodo com elevado nível de dopagem das regiões P e N, que apresenta efeito ZENER em níveis de tensão reversa menores que 0,5volt. Os diodos de retaguarda conduzem melhor no sentido reverso do que no sentido direto. A curva característica de um diodo de retaguarda é mostrada a seguir.

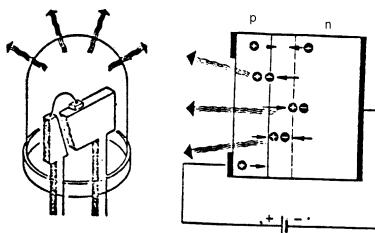


LIGHT EMITTING DIODE (LED)

O princípio da eletroluminescência em semicondutores já tinha sido observado desde 1907, porém somente depois da utilização do arsenieto de gálio na construção desse tipo de dispositivo, e que se tornou eficiente a conversão de corrente elétrica em luz.

O funcionamento do LED baseia-se no fato de que um elétron se encontrando na camada de condução, possui um alto nível energético adquirido pela absorção de energia externa. Quando o elétron volta para a camada de valéncia, devolve ao meio a energia cedida e fótons são liberados, pois o elétron recombina e volta a preencher uma lacuna. Os elétrons são introduzidos na camada N, por uma fonte de corrente. Para cruzar a barreira de potencial, são levados a camada de condução. Após a passagem pela junção, os elétrons recomboram, preenchendo lacunas da camada de valéncia e nesse processo liberam energia. A cor da luz emitida depende do material utilizado no cristal e também do nível de dopagem.

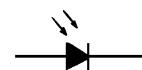
As figuras a seguir. Mostram o processo de recombinação, o símbolo e um tipo de encapsulamento bastante comum.



Curva característica de um LED

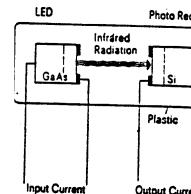
FOTODIODO

A incidência de energia luminosa numa junção PN libera elétrons da camada de valéncia para a camada de condução. A corrente reversa de um diodo é devido a movimentação de portadores minoritários que surgem em ambos os lados da junção. Num fotodiodo, a corrente reversa é controlada através da incidência da luz na junção, através de encapsulamentos especiais. A figura a seguir mostra o símbolo utilizado para um fotodiodo.



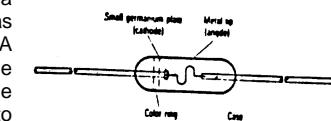
OPTOACOPLADOR ELETRÔNICO (FOTOACOPLADOR)

Existem diversos tipos de fotoacopladores. O mais simples utiliza um diodo emissor de luz (LED) e um fotodiodo num mesmo encapsulamento. A passagem de corrente no LED, produz radiação infravermelha, que é absorvida pelo fotodiodo, produzindo corrente. O acoplador ótico tem como característica principal proporcionar a isolação entre dois circuitos. A figura a seguir mostra o símbolo de um tipo de fotoacoplador.



DIODO DE CONTATO DE PONTO

Uma pequena haste de metal é pressionada contra uma região do tipo N. Por um processo de fusão é criada no ponto de contato uma região do tipo P. A junção é muito pequena entre as regiões P e N criando capacitações muito baixas. A utilização desse dispositivo é grande em circuitos de freqüência elevada, porém com baixos níveis de potência. A figura a seguir, mostra um diodo de contato de ponto.



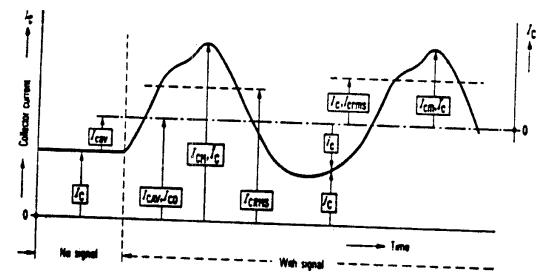
CONVENÇÕES

Basic symbol chart

Whether the letters of the symbols are to be written in upper case or lower case letters can be taken from the following chart.

Subscripts	Symbols	
	i, v, p	I, V, P
a b c f r m av	Instantaneous value of the variable component	RMS, average, and peak value of the variable component
E B C F R M AV	Instantaneous total value (as referred to zero)	DC value, average, rms, and peak value (as referred to zero)

GRANDEZAS ELÉTRICAS



- I_c DC value, no signal
 I_{CAV} Average value of the total current (referred to zero)
 I_{CM}/I_c Peak value of the total current (referred to zero)
 I_{CRMS} RMS value of the total current (referred to zero)
 I_{cav} (Arithmetic) mean of the variable component superimposed on the closed circuit direct current I_c (referred to the DC no-signal value I_c)
 I_c RMS value of the variable component (referred to the average value I_{cav})
 I_{cm}/I_c Peak value of the variable component (referred to the arithmetic mean I_{cav})
 I_c Instantaneous total value (refer to zero)
 I_c Instantaneous value of the variable component (referred to the arithmetic mean I_{cav})