

1

A resistividade é uma propriedade muito importante no estudo dos componentes eletrónicos.

Se considerarmos um condutor de secção transversal  $A$   $mm^2$  e comprimento  $l$  em metros, define-se resistividade como o produto da resistência em Ohm vezes a área do condutor dividida pelo comprimento do mesmo.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

A resistividade é expressa em  $\Omega \cdot m$ .

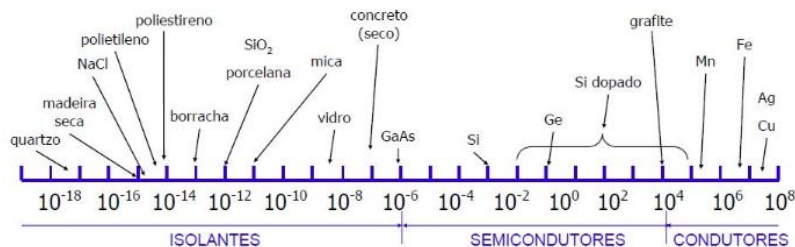
É frequente usar uma propriedade chamada *condutividade elétrica*. É uma medida da facilidade com que os eletrões se movem no material.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Esta propriedade representada pelo símbolo  $\sigma$  é o inverso da resistividade sendo expressa em unidades designadas por  $(\Omega \cdot m)^{-1}$ . Também se exprime algumas vezes também em Siemens/m.

2

Quanto à condução elétrica os materiais podem ser classificados como condutores, semicondutores ou isolantes.



Os materiais condutores têm condutividade elétrica entre  $10^4$  e  $10^8$ .

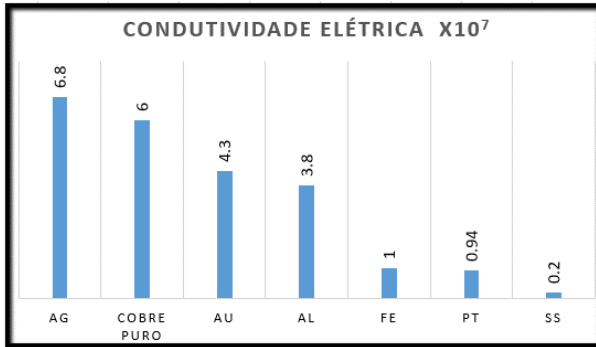
Entre  $10^{-6}$  e  $10^4$  temos os semicondutores.

Abaixo dessa gama temos os isolantes.

### Condução elétrica em metais

Os materiais condutores são, na maioria, metais.

O gráfico abaixo mostra os valores de condutividade elétrica de alguns metais.



A prata é o melhor condutor de eletricidade mas usa-se pouco, por razões de custo.

O mais usado é o cobre cuja condutividade é de  $6 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$ .

A ligação atômica dos metais é chamada ligação metálica. Os átomos estão muito próximos, dispostos numa estrutura cristalina.

O cobre por exemplo tem estrutura cúbica de faces centradas. Cada átomo está rodeado de 12 outros. Os elétrons de valência exteriores são atraídos para os núcleos dos átomos vizinhos. Formam uma nuvem de elétrons de baixa densidade.

A condução de corrente elétrica é efetuada pelo movimento de elétrons livres através da rede cristalina do metal.

4

### Efeito da temperatura na condução elétrica dos metais

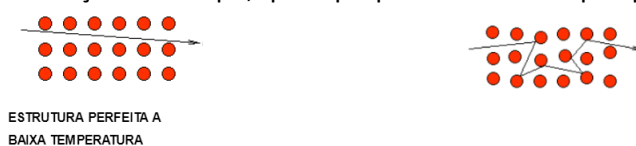
Há diversos fatores que afetam a condutividade elétrica. No entanto só falaremos de 2: temperatura e elementos de adição.

À temperatura ambiente, os íons positivos (átomos sem os elétrons de condução) têm energia cinética e vibram em torno das suas posições na rede.

À medida que a temperatura aumenta, estes íons vibram com amplitude crescente e há uma troca contínua de energia entre os íons e os elétrons de valência.

Na ausência de um potencial elétrico, o movimento dos elétrons é aleatório e restrito, pelo que não há fluxo global de elétrons em nenhuma direção, ou seja, não há corrente elétrica.

Quando aplicamos um potencial elétrico, os elétrons adquirem uma velocidade de deriva segundo a direção do campo, que é proporcional ao campo aplicado, mas de sinal oposto.



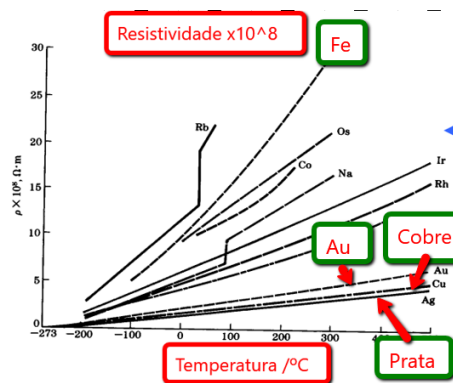
À medida que a temperatura aumenta, os íons vibram cada vez mais e um grande número de ondas elásticas termicamente excitadas difundem ou dispersam os elétrons de

condução resultando numa diminuição dos percursos livres médios e dos tempos de relaxação entre colisões.

Para a maior parte dos metais acima de  $-200^{\circ}\text{C}$  a resistividade elétrica varia de forma linear com a temperatura.

A condutividade elétrica baixa com a temperatura.

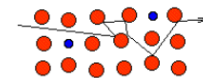
O declive depende do metal.



5

### Efeito das impurezas ou elementos de adição na condução elétrica dos metais

Estes fatores contribuem para dispersar o fluxo de eletrões e também pela existência de imperfeições adicionadas a deslocamentos e limites de grão.



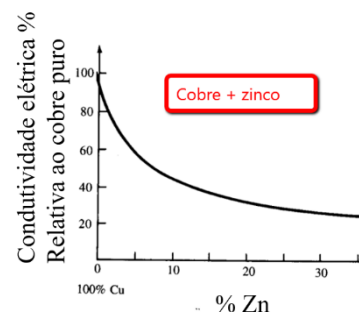
É comum usarem-se elementos de adição para obter materiais com propriedades específicas.

Se adicionarmos 5 a 40% de zinco ao cobre obtemos o latão (Cu-Zn).

Os elementos de adição baixam a condutividade elétrica.

O latão com 10% de zinco tem uma condutividade elétrica 50% abaixo da do cobre puro, como se vê no gráfico.

O latão tem muitas vantagens como a maquinabilidade, maleabilidade, etc.



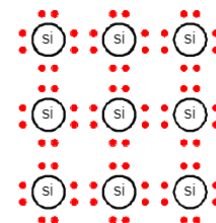
6

### Semicondutores intrínsecos

Chamam-se semicondutores intrínsecos aos semicondutores puros.

Os materiais mais usados são o silício e o germânio.

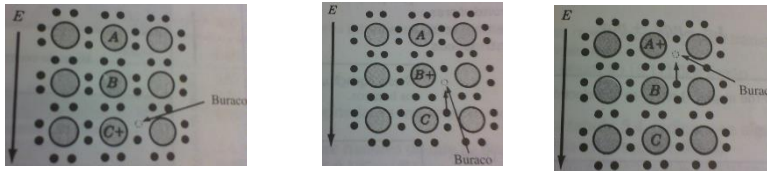
Os átomos estão ligados numa estrutura de tetraedro. Nesta estrutura, cada átomo de silício ou de germânio contribui com 4 eletrões de valência compartilhados com os átomos vizinhos.



Os eletrões ligantes não podem mover-se através da rede cristalina e, portanto, não podem conduzir eletricidade a menos que lhe seja fornecida energia suficiente para os excitar para fora das suas posições ligantes.

Nesse caso o elétron de valência transforma-se num elétron livre de condução, ao mesmo tempo que se origina um buraco positivamente carregado na rede cristalina.

No silício ou no germânio tanto os elétrons como os buracos atuam como transportadores de carga, movendo-se no campo elétrico aplicado.

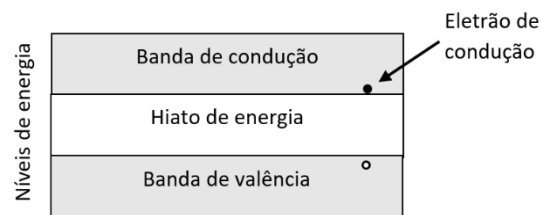


Os elétrons serão atraídos para o terminal positivo e os buracos para o terminal negativo.

Um buraco tem uma carga positiva igual em módulo à carga do elétron.

Outra forma de descrever o processo é através do diagrama de bandas de energia.

Aqui indicam-se só as energias necessárias para o processo. Não se dá uma ideia física do movimento dos elétrons na rede cristalina.



Os elétrons ligantes ocupam a banda de valência inferior.

Acima da desta banda está o hiato de energia proibida. Neste hiato não há estados de energia permitidos. No silício a 20°C o hiato é de 1.2 eV.

Acima do hiato está a banda de condução praticamente vazia (a 20°C).

A zero graus Kelvin, os semicondutores intrínsecos não conduzem.

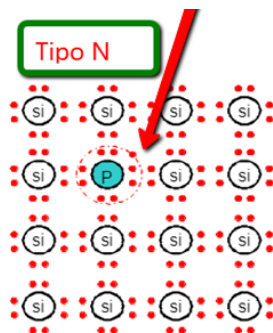
A temperaturas superiores alguns elétrons de valência são termicamente ativados e excitados através do hiato de energia até à banda de condução originando pares elétron-lacuna. Na zona em que este mecanismo predomina, a condução elétrica aumenta com a temperatura.

### Semicondutores extrínsecos

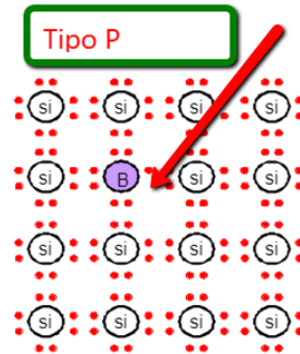
Chamam-se semicondutores extrínsecos os que resultam da adição de impurezas dissolvidas.

As concentrações das impurezas situam-se no intervalo de 100 a 1000 partes por milhão (PPM).

Adicionando substâncias como o boro (B), alumínio (Al) ou gálio (Ga) obtemos um semiconductor do tipo P pois estas substâncias têm 3 eletrões na camada externa.



Se adicionarmos substâncias como fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb) estas substâncias doam eletrões de condução pois têm 5 eletrões na camada externa. Chamam-se semicondutores extrínsecos tipo N.



A condutividade elétrica de um semiconductor extrínseco é afetada pela temperatura. A baixas temperaturas a condução do silício é determinada pelo número de átomos de impurezas por unidade de volume, que são ativados (ionizados).

Quando a temperatura aumenta, há cada vez mais átomos de impurezas ionizados; por isso a condutividade elétrica do silício extrínseco aumenta com a temperatura no domínio extrínseco.

Existe um intervalo de temperatura onde a condutividade elétrica é sensivelmente constante. Nos componentes eletrónicos, procura-se que este intervalo seja próximo da temperatura ambiente.

Acima deste intervalo há uma variação muito acentuada da condutividade elétrica.

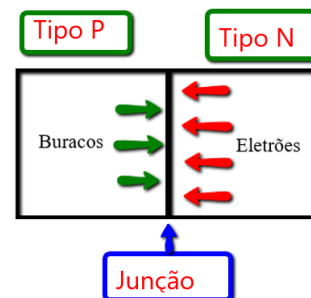
### Junção PN

Se juntar um semiconductor tipo P a um do tipo N obtemos um componente chamado díodo.

A maior parte dos dispositivos semicondutores é baseada nas propriedades da fronteira entre materiais do tipo P e do tipo N.

Antes de formar a junção, os 2 tipos de semicondutores são eletricamente neutros.

No material tipo P, o transporte de carga é efetuado pelas lacunas.



No material do tipo N, os elétrons são os transportadores majoritários.

Após a junção, os elétrons e as lacunas difundem-se através da junção e recombina-se.

9

### Região de depleção da junção PN

Os íons formados na junção ou próximo desta são fisicamente maiores e mais pesados do que os elétrons e as lacunas. Por isso ficam nas respectivas posições na rede do silício.

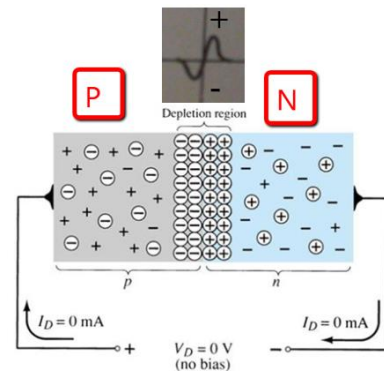
Após algumas recombinações o processo pára, porque os elétrons não conseguem atravessar a junção para o material do tipo P, devido à repulsão por parte dos íons negativos.

Da mesma forma, as lacunas que eventualmente atravessem a junção são repelidas pelos volumosos íons positivos no material tipo N.

Os íons imóveis da junção dão origem a uma zona sem transportadores de carga chamada região de depleção.

Em condições de equilíbrio, portanto em circuito aberto, há uma barreira de potencial que impede o fluxo de transportadores de carga.

Não há circulação de corrente em condições de circuito aberto.



10

### Polarização reversa da junção PN

Vejamos o que se passa quando aplicamos uma tensão externa.

Dizemos que a junção está polarizada.

Esta polarização será reversa, se o terminal P estiver ligado ao pólo negativo e o terminal N ao pólo positivo.

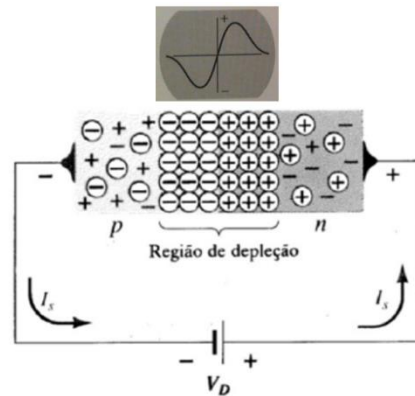
Neste caso os elétrons são atraídos para o terminal positivo e afastam-se da junção.

Os buracos serão atraídos para o terminal negativo, afastando-se também da junção.

O movimento de afastamento aumenta a largura da barreira de potencial.

Não há corrente transportada pelos transportadores majoritários.

No entanto os transportadores minoritários gerados termicamente – buracos no material tipo N e elétrons no material tipo P – são atraídos para a junção e podem combinar-se e originar a passagem de uma corrente muito fraca chamada *corrente de fuga*.



### Polarização direta da junção PN

Quando o material do tipo N estiver ligado ao terminal negativo e o material do tipo P ao terminal positivo dizemos que a polarização é direta.

Neste caso os elétrons são repelidos para a junção e podem sofrer combinação.

Os elétrons são repelidos pelo terminal negativo da tensão aplicada em direção à junção e as lacunas são repelidas pelo terminal positivo em direção à junção.

A barreira de potencial torna-se menor e isso permite a passagem de alguns elétrons e buracos através da junção, recombinando-se.

Há entrada de elétrons da tensão externa para o interior do terminal N do díodo. Por cada elétron que atravessa a junção e se recombina com uma lacuna, há outro elétron que entra na região N.

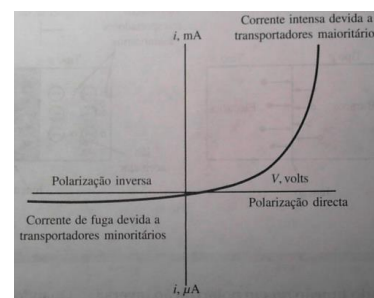
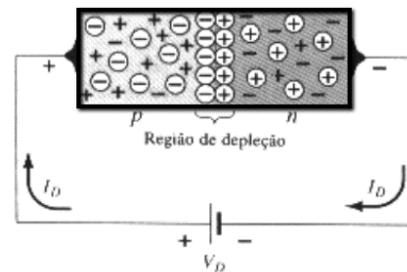
Como a barreira de energia que se opõe à corrente de elétrons é reduzida, há passagem de uma corrente elétrica apreciável.

A barreira de potencial depende do material do díodo.

Díodos silício: 0.55 a 0.7 V

Díodos de germânio: 0.15 a 0.3 V

O gráfico mostra a curva IV de um díodo real.



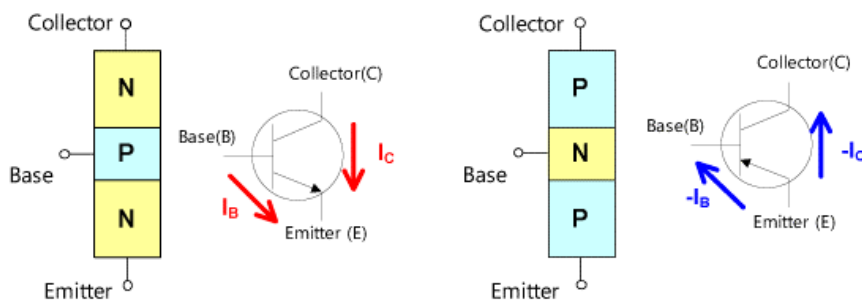
### Transístor bipolar

Chama-se transístor bipolar porque no seu funcionamento intervêm os dois tipos de transportadores de carga: elétrons e lacunas.

Um transístor bipolar é um dispositivo usado para amplificar a corrente ou para comutação.

É composto por 2 junções PN em sequência.

Pode ser de 2 tipos: PNP ou NPN.



Como se vê na figura é composto por 3 terminais: Emissor (E), Base (B) e Coletor (C).

### Funcionamento do transistor NPN

O emissor do transistor emite transportadores de carga.

No transistor NPN os transportadores são elétrons dado que o emissor é do tipo N.

A base controla o fluxo de elétrons. É do tipo P.

A base é muito delgada – cerca de  $10^{-3}$  cm – e é ligeiramente dopada, de modo que só uma pequena fração dos elétrons do emissor se recombinam com as lacunas da base. O coletor absorve elétrons vindos sobretudo do emissor.

No funcionamento normal do transistor NPN, a junção EB está em polarização direta e a junção CB em reversa.

A polarização direta da junção EB provoca uma injeção de elétrons do Emissor para a Base.

Alguns dos elétrons injetados na base desaparecem por recombinação com as lacunas de P.

A maioria dos elétrons do Emissor atravessa a fina espessura da Base indo para o Coletor onde são atraídos pelo terminal positivo.

Os fatores que fazem com que a maioria dos elétrons do Emissor – 95 a 99% - possam atingir o Coletor, são:

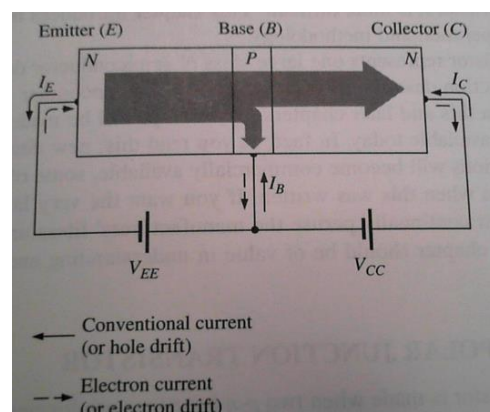
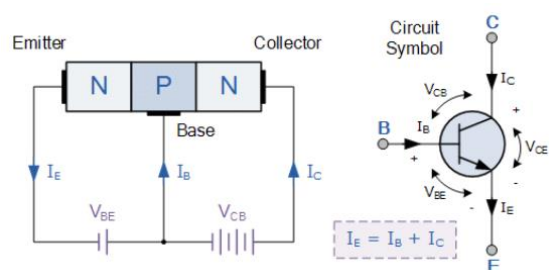
- uma forte dopagem do Emissor,
- uma ligeira dopagem da Base e
- uma Base muito estreita

Um pequeno número de lacunas flui da Base para o Emissor. A maior parte da corrente que circula do terminal da base para a Base é constituída por lacunas que fluem para substituir as que desaparecem por recombinação com elétrons.

A corrente para a Base é pequena – cerca de 1 a 5% da corrente de elétrons do Emissor para o Coletor.

A corrente para a Base pode de certo modo ser imaginada como uma válvula de controlo, uma vez que a fraca corrente da Base pode ser usada para controlar a corrente muito mais intensa do Coletor.

Uma visão mais quantitativa obtém-se através das curvas características do transistor. São fornecidas pelo fabricante.





Os transístores usam-se em comutação (corte ou saturação) ou como amplificadores de corrente.

Modos	Junção EB	Junção CB	Aplicação
Corte	Reversa	Reversa	Aplicações de comutação em circuitos digitais
Saturação	Direta	Direta	
Ativa	Direta	Reversa	Amplificador

O ganho de corrente  $\beta$  é definido como a razão entre a corrente do Coletor e a da Base.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Os valores normais de  $\beta$  são de 50 a 500, mas há transístores cujo valor é superior a 1000.