

Amigo Leitor

No primeiro semestre de 1983 eu era estudante de Engenharia Elétrica na UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Fazia a disciplina “**Componentes Eletrônicos**”, ministrada pelo professor **Leon Schmiegelow**, que (com a clara intenção de facilitar uma boa nota para os alunos) passou-nos um trabalho sobre “O funcionamento do diodo”.

Eu não entendia muito de eletrônica e vi nesse trabalho uma oportunidade de obter algum conhecimento (embora eu soubesse que muita gente simplesmente copiava trechos de livros e colava figuras fotocopiadas de antigas apostilas para, simplesmente, faturar uma boa nota...).

Fui para a Biblioteca Central (meu “point” favorito durante todo o período da faculdade), descobri uns oito ou dez livros sobre o tema (lembre-se que não havia internet e nem se utilizava computador para trabalhos dessa natureza), passei um mês e meio lendo tudo o que podia sobre princípios de eletrônica e acabei escrevendo um ensaio muito bom. Eu gostei muito. O professor também. Tanto que me deu nota dez (o único da turma) e um grande e muito valioso elogio.

Esse trabalho ficou bastante “famoso” na época. Foi fotocopiado e utilizado como referência na disciplina por alguns semestres. O original ficou esquecido entre outros papéis, durante muito tempo. Mas, outro dia, eu o reencontrei. Li com muito gosto e resolvi publicar novamente, em uma versão integral, sem cortes e sem correções. O texto que você vai ler é cópia fiel do que foi apresentado em maio de 1983. Não mudei uma única palavra ou vírgula do manuscrito original de 25 páginas. Apenas digitei o texto e digitalizei os desenhos.

Espero que você goste e que seja útil de alguma forma.

Espero também os seus comentários, sugestões, críticas ou elogios, pelo e-mail [**professor@eniopadilha.com.br**](mailto:professor@eniopadilha.com.br)

Boa Leitura

Ênio Padilha
www.eniopadilha.com.br

DINÂMICA DE FUNCIONAMENTO DO DIODO

INTRODUÇÃO

Existe um dispositivo físico, usado em circuitos eletrônicos, cujo funcionamento é muito interessante pois depende da polaridade da tensão aplicada em seus terminais. (*O Capacitor Eletrolítico também depende, mas tem outras finalidades*).

Esse dispositivo é o DIODO e sua característica principal é a de não permitir a passagem de corrente elétrica num dos sentidos no circuito ao qual está ligado. Ou seja: Quando a corrente tem um sentido o DIODO comporta-se como um curto-circuito e, ao contrário, quando a corrente tem sentido inverso, o DIODO tem o mesmo comportamento de um circuito aberto.

O presente trabalho tem a finalidade de explicar o porquê disso acontecer, isto é: vamos penetrar na constituição íntima do material que compõe o DIODO para compreendermos a dinâmica de funcionamento dele.

Para que isto seja possível, achamos de boa didática dividir o tema em três partes:

1. TEORIA DAS BANDAS DE ENERGIA, onde encontraremos as razões que fazem com que os materiais tenham comportamentos diferentes quando submetidos a uma mesma diferença de potencial.

Em síntese, a teoria das bandas de energia nos explica porque existem materiais condutores, semicondutores e isolantes;

2. DOPAGEM, onde entenderemos como um material semicondutor pode ser transformado em condutor quando fazemos uma contaminação do mesmo, usando impurezas que podem dar elétrons ao material ou retirar elétrons dele.

3. JUNÇÕES, onde conseguiremos entender como dois materiais dopados, quando associados convenientemente, conseguem impedir a corrente elétrica num sentido, permitindo sua livre passagem no outro.

Nada mais tendo a introduzir, vamos ao trabalho, que o querido leitor já deve estar babando de curiosidade.

PRIMEIRA PARTE

TEORIA DAS BANDAS DE ENERGIA

A finalidade principal da Teoria das Bandas de Energia é a de explicar os fenômenos de condutibilidade elétrica nos materiais. É uma extensão dos conceitos de nível e sub-nível de energia de um átomo isolado.

Disso tiramos a primeira conclusão importante: **quando falamos em Bandas de Energia estamos falando de uma certa quantidade de material e não de um átomo.**

Sabemos que um cristal é constituído por um conjunto de CÉLULAS UNITÁRIAS (um conjunto de átomos dispostos tridimensionalmente e que constituem uma unidade fundamental de estrutura).

Nesse caso, devido a proximidade dos átomos (muito maior do que a observada nos líquidos ou nos gases) existe uma interação muito grande entre eles.

Vamos explicar melhor: Os elétrons das camadas de valências dos átomos que estão interagindo passam a pertencer a mais de um átomo, fazendo com que o cristal, como um todo, passe a se apresentar como um SISTEMA ELETRÔNICO que obedece ao princípio de Exclusão, de Pauli.

Portanto, nesse cristal, não poderemos encontrar mais de dois elétrons apresentando o mesmo nível de energia (*Na verdade o termo adequado seria subnível e não nível*).

Suponha que tenhamos um pedaço de alumínio constituído por $N=5$ átomos.

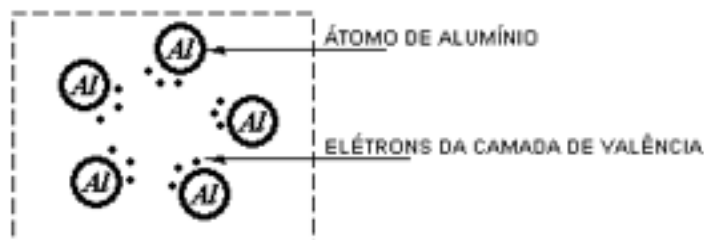


Figura 1

Os "N" átomos interagindo "criam" um sistema eletrônico no qual cada elétron ocupa um determinado nível de energia (E cada nível pode ser ocupado com, no máximo, dois elétrons).

A Teoria das Bandas de Energia diz que, para N átomos, teremos N níveis de energia em cada banda.

Assim a primeira Banda de Energia do Alumínio esta completamente cheia.

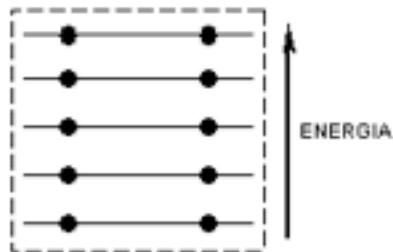


Figura 2

Mas, como pode ser visto, apenas 10 elétrons foram comportados pela primeira Banda de Energia, havendo ainda 5 outros "perdidos".

Para esses existe uma segunda Banda de energia.

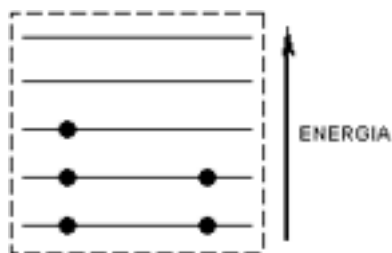


Figura 3

Obs: No caso, devido ao fato de os elétrons buscarem sempre os níveis de menor energia, é sabido que existe uma superposição da 2ª sobre a 1ª Banda, mas esse fato não é importante para a finalidade deste trabalho.

Voltemos ao Alumínio

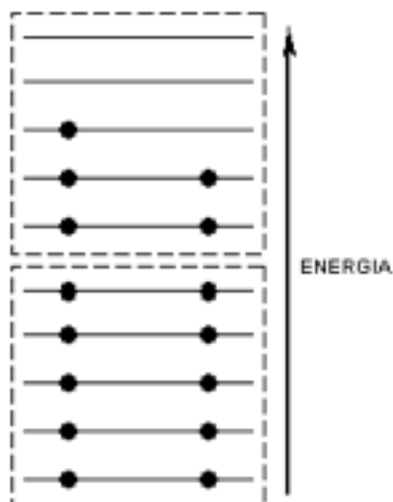


Figura 4

Esta é a nova maneira que usamos para representar o sistema eletrônico criado pela interação dos N ATOMOS DA SUBSTÂNCIA

Podemos perceber, analisando a configuração da figura 4, que os elétrons da 2ª Banda precisam de uma energia muito pequena, para serem "arrancados" dos seus níveis (essa energia é muito

menor que 1eV). Assim os ditos elétrons ficam livres dentro do material, de tal sorte que o alumínio é um bom condutor de eletricidade.

E todos os outros materiais bons condutores de eletricidade apresentam uma configuração de Bandas de Energia semelhante à do Alumínio.

Analisemos agora um outro material. O silício, por exemplo.

Tomemos um pedaço de silício composto de $N=5$ átomos

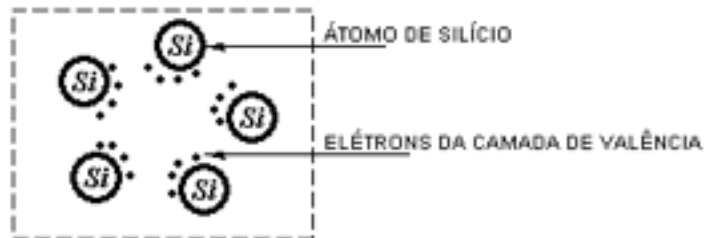


Figura5

A configuração de Bandas de Energia do Silício é a seguinte: (atentar para o detalhe de que a 3ª banda não se superpõe à 2ª como a 2ª à 1ª)

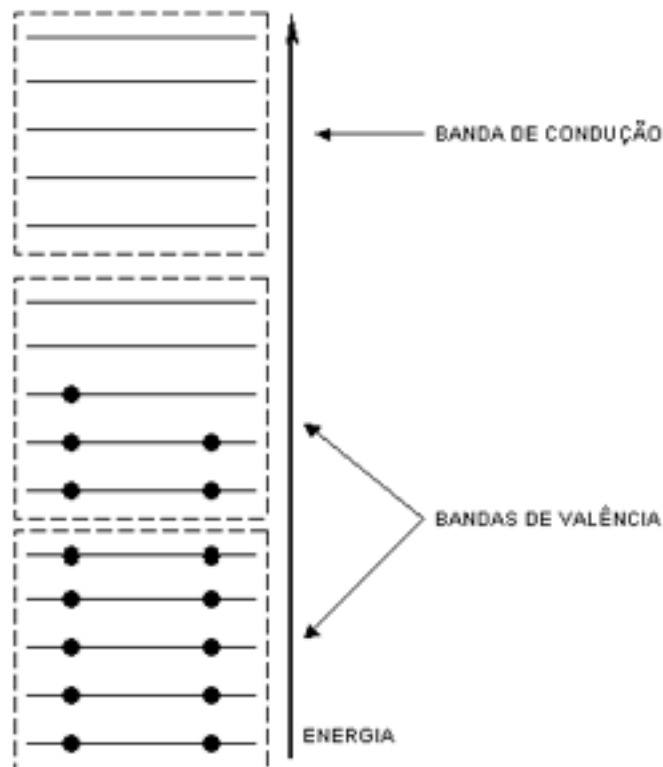


Figura6

O nível mais baixo de energia da Banda de condução é muito mais alto que o mais alto nível da 2ª banda, de tal forma que não existe a superposição observada entre a 2ª e a 1ª banda.

Pelo contrário, a energia necessária para fazer com que um elétron da 2ª banda passe para 3ª banda é muito grande, criando uma DIFICULDADE que pode ser representada por uma "banda intermediária" entre a banda de valência (2ª) e a banda de condução (3ª).

Essa "banda intermediária" é chamada BANDA PROIBIDA, pois nenhum elétron pode estar nos níveis de energia correspondentes a ela.

Isto é: quando fornecemos alguma energia a um elétron da 2ª Banda, uma das duas coisas acontece:

A) A energia é muito pequena e o elétron permanece na 2ª banda;

B) A energia é suficientemente grande e o elétron salta da 2ª para a 3ª banda, ficando, portanto, livre no material (E o material passa a ser condutor)

Os materiais que apresentam uma configuração de bandas de energia semelhantes a do Silício são considerados ISOLANTES ou SEMICONDUTORES.

A diferença entre uns e outros é a "distância" entre a banda de condução.

RESUMINDO

1- Nos cristais os átomos constituintes do material interagem uns com os outros, criando um sistema eletrônico.

2- Esse sistema eletrônico pode ser representado esquematicamente através de bandas de energia.

3- As bandas de energia de interesse são três:

BANDA DE VALÊNCIA

BANDA PROIBIDA

BANDA DE CONDUÇÃO

4- CONDUTORES são os materiais que apresentam uma superposição entre as duas primeiras bandas e não apresentam banda proibida.

5- ISOLANTES são os materiais que apresentam a Banda Proibida e esta é muito grande.

6- SEMICONDUTORES são os materiais que apresentam Banda Proibida mas esta é relativamente pequena.

SEGUNDA PARTE

DOPAGEM

Na primeira parte estudamos as bandas de energia e a maneira pela qual podemos reconhecer os isolantes, os condutores e os semicondutores.

Neste segmento vamos esquecer os condutores e os isolantes (objetos de estudos de eletricidade) e vamos estabelecer um contato mais íntimo com os semicondutores, posto que estes são a base de qualquer estudo em eletrônica.

Os semicondutores mais usados em eletrônica são o GERMÂNIO e o SILÍCIO, por causa do valor bastante baixo de suas bandas proibidas.

(Germânio - 0,785 eV; Silício - 1,21 eV)

Tanto o GERMÂNIO quanto o SILÍCIO apresentam uma estrutura cristalina com células unitárias iguais, a menos de uma constante de proporcionalidade, portanto, a partir de agora, tudo o que for dito a respeito do Germânio (qualitativamente) vale também para o Silício.

Os átomos de um cristal de Germânio são ligados de tal forma que cada um dos 4 elétrons das suas camadas de valência é compartilhado por 2 átomos.

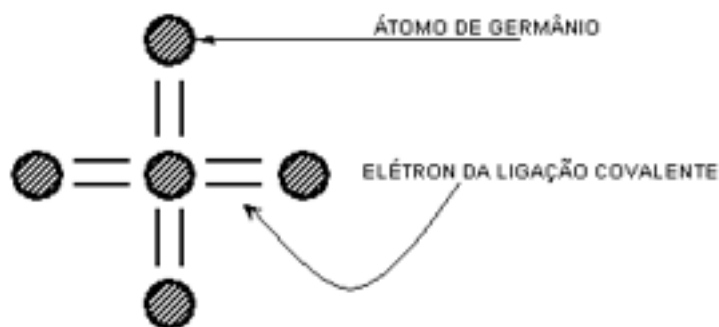


Figura 7

A coisa funciona exatamente assim à zero Kelvin.

Quando elevamos a temperatura do cristal, começamos a alterar a agitação térmica do material, de maneiras que, à temperatura ambiente (aprox. 300 K) algumas ligações covalentes do cristal são rompidas, gerando elétrons livres dentro do material.

Quando uma ligação é rompida, aparece, no lugar do elétron que saiu, um espaço vazio.

Uma falta de elétron.

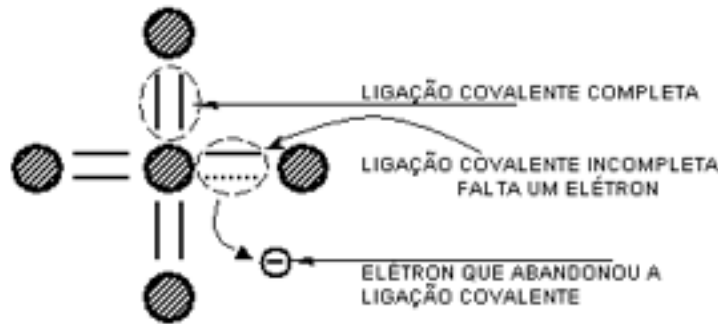


Figura 8

A essa falta de elétron que resulta do rompimento da ligação covalente, damos o nome de LACUNA.

LACUNA, portanto, é uma portador de carga positiva que aparece no material quando um elétron abandona uma ligação covalente.

É intuitivo perceber que, num material puro, o número de lacunas é sempre igual ao número de elétrons livres e que a lacuna tem uma carga elétrica de mesmo valor (com sinal contrário) que a do elétron.

As lacunas podem mover-se dentro do material, (é bom atentar para o detalhe de que a velocidade do elétron não é a mesma para a lacuna (em módulo))

O movimento das lacunas é resultante da substituição da lacuna de uma ligação por um elétron de outra ligação.

Acompanhemos a seqüência:

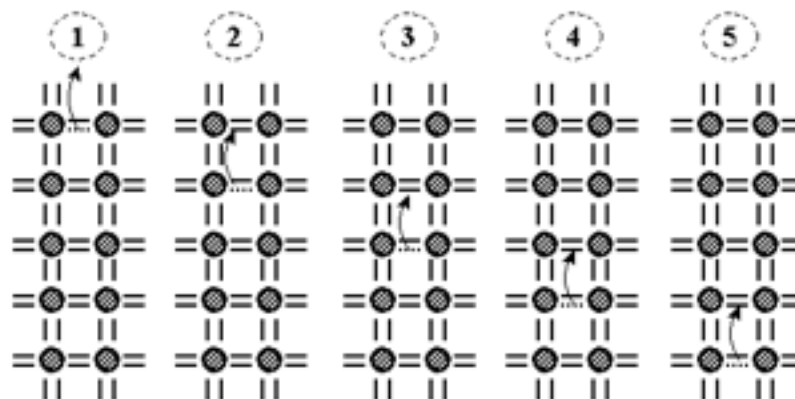


Figura 9

É bom, também, que o querido leitor saiba que **não existe uma partícula que corresponda à lacuna**. O movimento dos elétrons ilustrados na figura 9 é que caracteriza, para todos os efeitos, o deslocamento de um portador de carga positiva (Lacuna) em sentido contrário ao do elétron.

O querido leitor deve perceber também a importantíssima diferença entre os CONDUTORES (onde os portadores de carga são apenas os eletros) e os SEMICONDUTORES (onde os portadores de carga são os eletros e as lacunas)

Esse movimento de elétrons e lacunas no interior de um semicondutor é chamado de condução INTRÍNSECA e o material no qual isso acontece é um SEMICONDUTOR INTRÍNSECO.

A diferença entre um semicondutor intrínseco e um semicondutor extrínseco (que apresentaremos a seguir) é que os segundos são dopados, isto é: são contaminados com impurezas.

Suponhamos que, num cristal de Germânio, onde cada átomo é ligado a outros quatro átomos através de ligações covalentes, seja colocado (por um sistema qualquer, que não interessa no momento) um átomo de fósforo, por exemplo, que tem 5 elétrons na sua camada de valência.

Esse átomo de fósforo irá substituir um dos átomos da rede cristalina.

O leitor deve ter percebido que alguma coisa não anda direito. Afinal, se a rede é formada por átomos tetravalentes, a ligação do fósforo à rede provavelmente não será normal, isto é: vai sobrar um elétron.

Exatamente!

Quando colocamos um átomo de fósforo, ou antimônio ou arsênico (todos são pentavalentes) na rede cristalina, haverá um saldo de elétrons livres no material (um elétron para cada átomo de fósforo introduzido no cristal).

Nesse caso o cristal de Germânio apresenta:

1. Elétrons livres, devido às ligações covalentes rompidas pela energia térmica;
2. Lacunas, devidas aos elétrons que abandonaram as ligações covalentes;
3. Elétrons livres, devidos a introdução de átomos de fósforo na rede cristalina.

O leitor precisa saber que a quantidade de elétrons livres devidos à introdução de átomos de fósforo é muito maior que a quantidade devida ao rompimento natural das ligações covalentes.

Como o fósforo doa um elétron para a rede cristalina, chamamos o fósforo de IMPUREZA DOADORA ou IMPUREZA **TIPO N** (N de negativo que é o sinal da carga do elétron)

Ao semiconductor dopado com impureza do tipo N, chamamos de **SEMICONDUTOR TIPO N**.

Imaginemos agora, que, ao invés de uma substância pentavalente (como o fósforo) tenhamos uma substância trivalente (Índio, Alumínio, Gálio ou Boro) introduzida no cristal.

Nesse caso, ao invés de um elétron sobrando, teremos um elétron faltando.

E nós já sabemos que um elétron faltando equivale a uma lacuna, que é um portador de cargas positivas.

Nesse caso o cristal de germânio apresentará:

1. Elétrons livres, devidos às ligações covalentes rompidas pela energia térmica;
2. Lacunas, devidas aos elétrons que abandonaram as ligações covalentes;
3. Lacunas (em muito maior número), devidas à introdução de átomos de uma substância trivalente.

Essa substância trivalente tem a propriedade de receber um elétron da rede, isto é: criar uma lacuna. Por isso as substâncias trivalentes são substâncias **RECEPTORAS** ou **IMPUREZAS DO TIPO P** (P de positivo que é a carga da coluna).

Um semiconductor dopado com uma Impureza do tipo P é chamado **SEMICONDUTOR TIPO P**.

TERCEIRA PARTE

JUNÇÕES

Na segunda parte deste trabalho vimos como um semicondutor pode, através de uma DOPAGEM conveniente, transformar-se num condutor.

Veremos agora o que é que tudo isso tem a ver com DIODO.

Veremos como esses semicondutores podem impedir a passagem da corrente num sentido e não no outro.

Em primeiro lugar, vamos dizer uma coisa que todo mundo já sabe: **o diodo é um dispositivo constituído de dois semicondutores (um do tipo "P" e outro do Tipo "N") associados convenientemente.**

Portanto:



Figura 10

Vemos, então, que um semicondutor isolado (seja do tipo "P" ou "N") não constitui um diodo.

A junção dos dois materiais é que confere ao dispositivo resultante as características que nós já conhecemos.

Vejam, agora, porque a junção dos dois semicondutores gera o DIODO.

Vamos penetrar na intimidade do cristal para ver o que é que está acontecendo.

Tomemos dois pedaços de semicondutores.

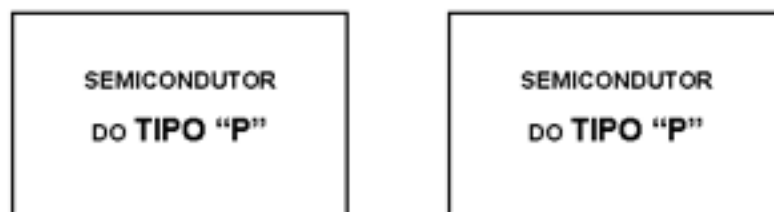


Figura 11

No material tipo "P", todos os átomos da substância trivalente receberam um elétron, transformando-se, dessa forma, íons "-". No material tipo "N", todos os átomos da substância pentavalente doaram um elétron, transformando-se, assim, em íons "+".

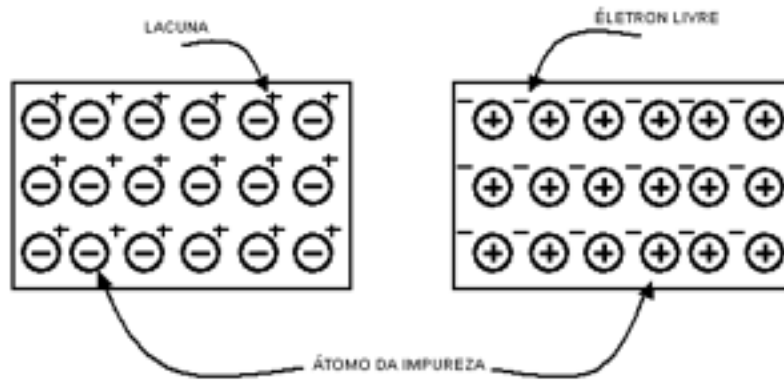


Figura12

É bom lembrar ao distinto leitor que o átomo da impureza substitui um átomo da rede cristalina, estando, portanto, completamente preso. O que se locomove no material é o elétron (ou lacuna) gerado por esse átomo.

Vejamos agora o que acontece quando unimos os dois semicondutores.

No exato momento da união, nada acontece, tudo permanece como era antes:

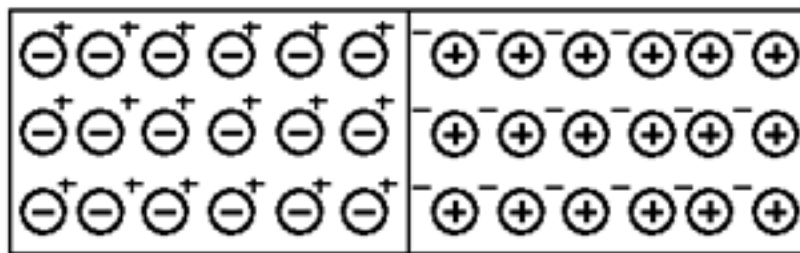


Figura 13

Temos, então um material no qual existe de um lado excesso de elétrons (cargas negativas) e, de outro, um excesso de lacunas (cargas móveis positivas).

Ora, é óbvio que a situação tende a se equilibrar, isto é: **imediatamente** após a união os elétrons do SEMICONDUTOR TIPO "N", que estão mais próximos à junção, tendem a passar para o SEMICONDUTOR TIPO "P".

Movimento análogo têm as lacunas que estão mais próximas à junção.

O que aconteceria se os átomos das impurezas não estivessem fixos na rede cristalina?

A resposta é simples: todos os elétrons e lacunas atravessariam a junção e interagiriam entre si e com os íons, num movimento desordenado que, em uma fração de segundos equilibraria todas as cargas, pondo a perder todo o trabalho que se tivesse tido para dopar os semicondutores.

Mas a coisa não ocorre assim.

Imediatamente após a união os elétrons e lacunas que estão na região próxima à junção interagem, anulando-se.

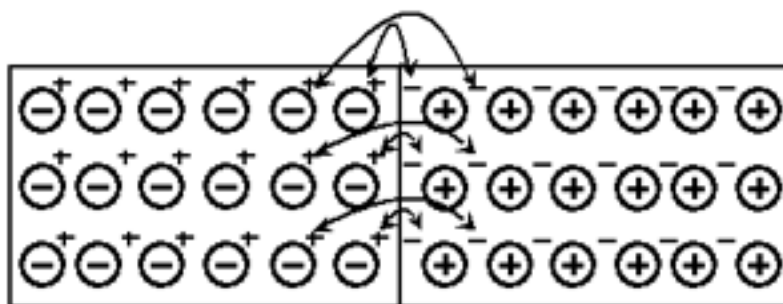


Figura 14

Como saldo, temos os íons “-” no semicondutor tipo "P" e os íons “+” no semicondutor tipo "N", completamente descobertos.

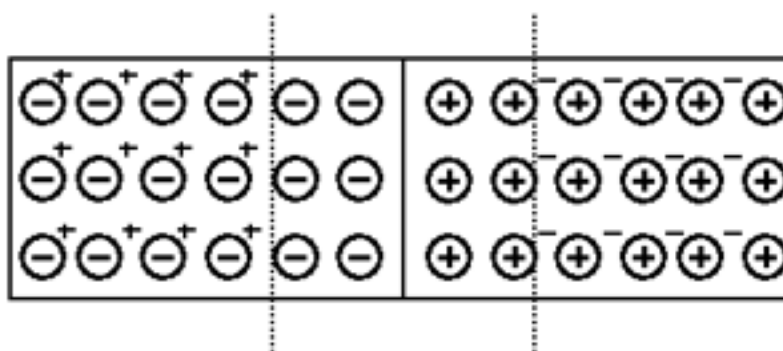


Figura 15

Os íons + e os íons - que estão próximos à junção são chamados de CARGAS DESCOBERTAS

Essas cargas descobertas constituem o que nós chamamos de BARREIRA DE POTENCIAL, pois ela tende a barrar a passagem dos elétrons e das lacunas.

Percebemos que os elétrons restantes do semicondutor tipo "N" não "querem" mais passar para o outro lado, pois sentem-se repelidos pelas cargas negativas dos íons - existentes na barreira de potencial.

Comportamento análogo assumem as lacunas do semicondutor tipo "P".

É bom frizar que **o aparecimento das cargas descobertas (e, conseqüentemente, da barreira de potencial) se dá imediatamente após a união dos dois materiais.** Os elétrons e as lacunas mais afastados da junção são "tomados de surpresa". Quando dão pela coisa já é tarde demais. Não há mais tempo para tentar qualquer reação.

Bem, senhores, o que temos aí (um dispositivo formado pela junção de um semiconductor tipo "P" com um semiconductor tipo "N") é o famoso **DIODO!**



Figura 16

Vamos provar isto.

Quer dizer: Vamos mostrar que o dispositivo que construímos tem o comportamento característico dos diodos.

Para isso vamos aplicar uma tensão nos terminais desse dispositivo.

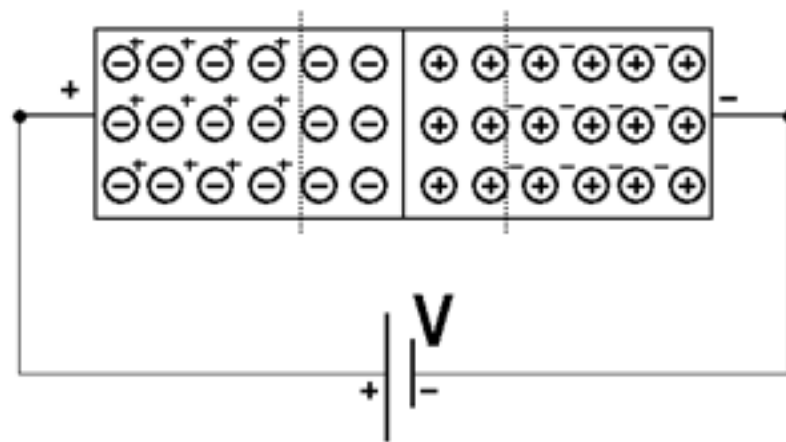


Figura 17

Quando aplicamos a tensão V ao dispositivo (com a polaridade indicada no desenho) fornecemos uma determinada energia aos elétrons e às lacunas.

Como o leitor deve ter percebido, os elétrons do semiconductor tipo "N" sentem-se repelidos pela carga negativa oriunda da fonte de tensão. Então eles procuram o outro terminal do dispositivo.

Um movimento análogo é o efetuado pelas lacunas do semiconductor tipo P

Porém, perguntaria o leitor ignaro:

E a barreira de potencial? Não existe mais?

É claro que a **BARREIRA DE POTENCIAL** ainda existe. O que ocorre é que a energia fornecida pela fonte de tensão pode ser (e geralmente é) superior à necessária para que os elétrons e as lacunas vençam a dita barreira.

O que se estabelece, então, é uma corrente elétrica, produzida pelo deslocamento ordenado de elétrons para a esquerda e de lacunas para a direita.

Mostramos, portanto, que, se aplicarmos uma tensão com a polaridade mostrada nas figuras 17 e 18, estabelece-se, no nosso dispositivo, uma corrente elétrica normal.

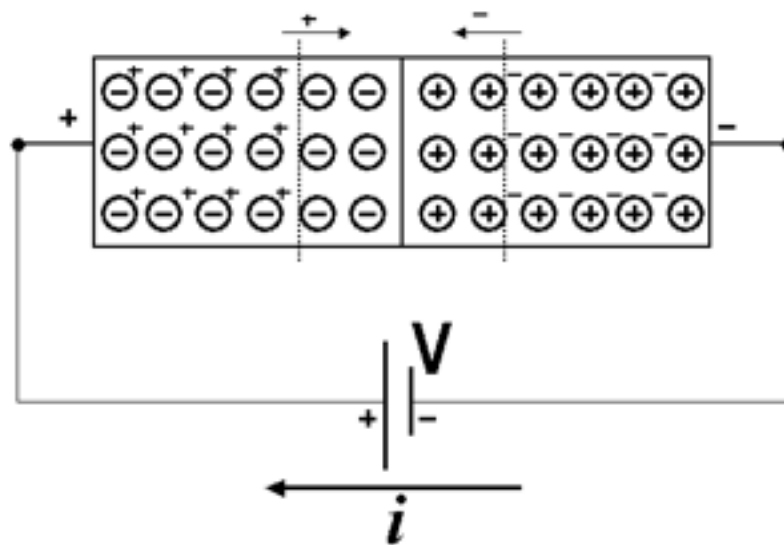


Figura 18

Resta-nos, então, mostrar que, se invertemos a polarização da bateria, não haverá corrente elétrica.

Neste caso também vamos admitir que a energia fornecida pela fonte seja consideravelmente maior do que a energia da barreira de potencial.

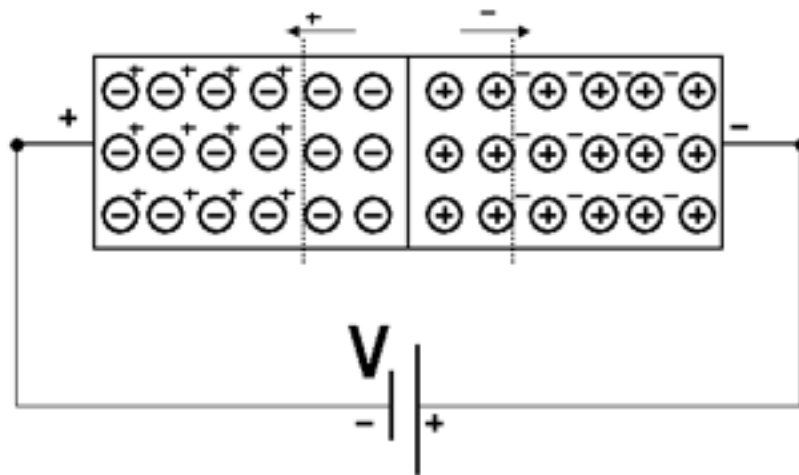


Figura 19

Vejamos o que acontece com as lacunas, no lado "P":

Elas sentem uma atração pelo polo negativo da bateria, além de serem repelidas pela barreira de potencial.

Como esse movimento, nesse sentido não define uma corrente elétrica, as lacunas ficam todas numa região do dispositivo próximas ao terminal negativo da bateria.

O mesmo pode-se dizer dos elétrons no lado "N" em relação ao polo positivo da bateria.

Mostramos, portanto, que, se invertemos a polaridade da bateria, não haverá corrente elétrica

Na verdade irá existir uma pequena corrente devido aos portadores minoritários – lacunas e eletros divididos às ligações covalentes rompidas – Porém essa corrente não tem valor relevante quando levamos em consideração o valor da tensão aplicada.

Está demonstrado, portanto, que o dispositivo que contruímos é **um DIODO**.

CONCLUSÃO

Qualquer leitor, por menos esperto que seja, deve ter percebido que este trabalho não foi feito com o objetivo de "faturar" nota com o professor.

A própria linguagem utilizada denuncia que o alvo destes escritos não é o professor e sim outros estudantes, colegas de aula, pessoal de outras fases, que estão por vir...

Este trabalho foi feito com muito carinho e, certamente não vamos querer vê-lo engavetado, mofando no meio de montes de papel. Seria muito interessante que ele pudesse ser lido por outras pessoas.

Todos os estudos realizados foram qualitativos. A leitura deste texto nos dá uma idéia de como a coisa funciona. Nem de longe tivemos a pretensão de fazer um estudo aprofundado, minucioso, cheio de fórmulas, relações, gráficos... Nada disso. Tudo o que pretendemos foi dar ao leitor uma iniciação. Uma primeira palavra.

Se você entendeu, afinal de contas o porquê do funcionamento do DIODO, então estamos plenamente realizados.

Florianópolis(SC), maio de 1983

Ênio Padilha Filho

8014115-0 – Engenharia Elétrica – UFSC