

**QUÂNTICA PARA
INICIANTEs:
INVESTIGAÇÕES
E PROJETOS**

**EXPLICAÇÕES
E MODELOS**

INTRODUÇÃO

Por que materiais em estado gasoso ou em estado de vapor emitem uma luz cujo espectro é constituído de linhas, enquanto materiais sólidos emitem luz cujo espectro é contínuo?

Por que a resistência elétrica de condutores metálicos aumenta com a elevação de temperatura, enquanto a resistência elétrica de alguns dispositivos feitos com materiais semicondutores – como é o caso do diodo – diminui com o aquecimento desses materiais?

Por que dispositivos semicondutores, como os utilizados na fabricação de um LDR, são sensíveis à luz?

Como funciona um LED e por que ele pode ser usado como uma pequena bateria solar?

Essas questões, que podem ser facilmente associadas a explorações propostas na Parte I deste livro, constituem o foco principal desta Parte II. Assim, para entender por que certos processos de emissão de luz geram espectros de linhas e outros geram espectros contínuos, ou por que metais e materiais semicondutores têm comportamentos tão diferentes quando aquecidos, ou como dispositivos semicondutores produzem luz e interagem com ela, vamos estudar a estrutura microscópica dos materiais.

Além de permitir a compreensão de explorações realizadas na parte I deste livro, esse estudo vai permitir entender o funcionamento do transistor, um dispositivo muito importante que será usado em diversos projetos da Parte III deste livro.

1

UM MODELO PARA O ÁTOMO

Boa parte da tecnologia contemporânea só se tornou possível graças a conhecimentos produzidos pelas Ciências Naturais – entre elas, a Química e a Física. Uma das conquistas dessas ciências que, indubitavelmente, merece destaque é o modelo atômico.

Nesta segunda parte do livro, o interesse em apresentar certas características do modelo atual do átomo deve-se à utilidade deste para o entendimento de diversos processos, entre outros: (i) condução de eletricidade no interior de materiais sólidos; (ii) variação da resistência elétrica com a temperatura; e (iii) interação entre a luz e as cargas elétricas que compõem os materiais semicondutores.

A ideia de que os materiais são constituídos por átomos foi concebida na antiguidade, mas o modelo atômico usado atualmente só foi desenvolvido a partir do século XX. Um dos primeiros modelos atômicos produzidos nesse século foi proposto por Ernest Rutherford (ver FIG. 1).

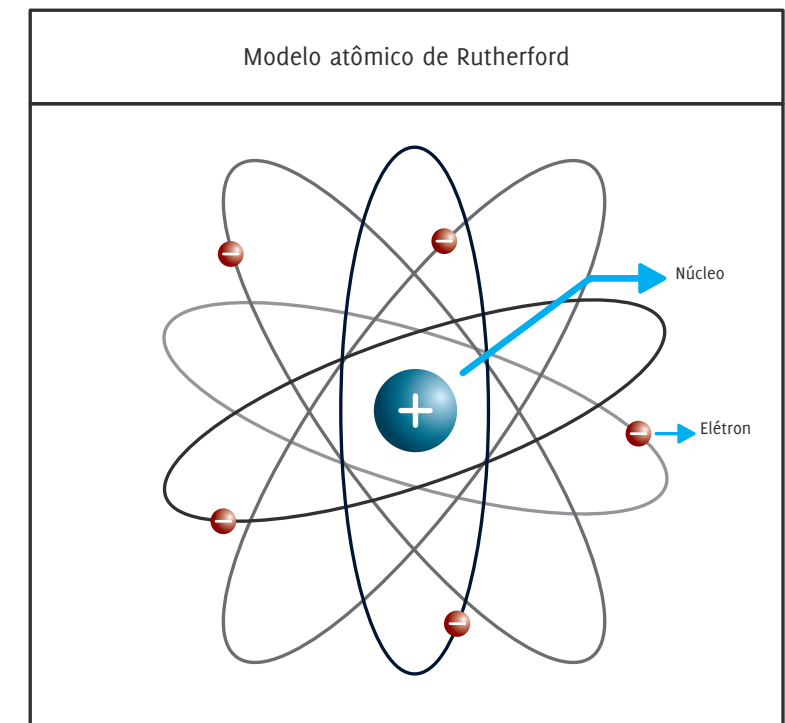


FIG.01

Em 1911, Rutherford imaginou que o átomo continha partículas atômicas de carga negativa – os elétrons –, que giravam em torno de um núcleo maciço e positivo. A semelhança entre essa imagem do átomo e a do sistema solar fez com que o modelo de Rutherford ficasse conhecido como Modelo Planetário.

Durante as primeiras décadas do século XX, o modelo atômico, proposto por Rutherford em 1911 e aperfeiçoado por Bohr em 1913, sofreu diversas modificações, até alcançar sua condição atual como um modelo essencialmente matemático. No início da década de 1930, por exemplo, descobriu-se que o núcleo maciço imaginado por Rutherford era constituído por dois tipos de partícula: os prótons, portadores de carga positiva, e os nêutrons, sem carga elétrica aparente.

1.1. Modelo atômico atual

Atualmente, não existe mais uma imagem simples do átomo, tal como a proposta no modelo de Rutherford, nem a necessidade de se conhecer a “aparência real” de um átomo. Ao criarem um conjunto de equações que permitem fazer previsões sobre o comportamento dos átomos em diversas situações, os cientistas abriram mão dessa suposta necessidade. Hoje, não se sabe como o átomo “*realmente é*”, mas são bem conhecidas muitas coisas sobre como essa minúscula estrutura se comporta.

1.1.1. Um registro de informações sobre os átomos

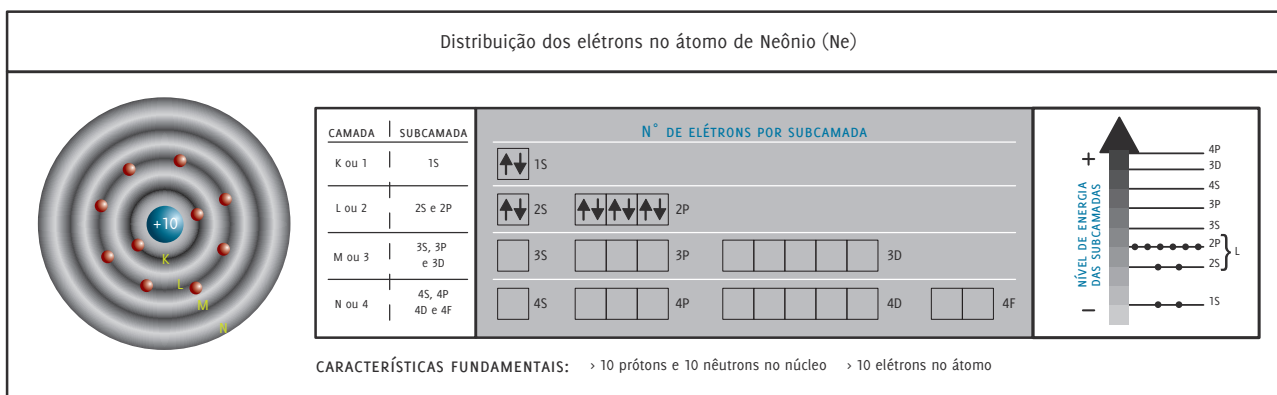
Na FIG. 2, reúnem-se diversas informações sobre o comportamento do átomo de neônio. Como se trata de uma figura complexa, que contém muitas e variadas informações, vamos descrevê-la aos poucos.



Obs. 01: No átomo de Ne, apenas as camadas K e L estão preenchidas

Obs. 02: Na tabela de fundo cinza, os elétrons do átomo foram representadas por setas. As setas indicam os campos magnéticos intrínsecos de cada elétron.

FIG.02



O primeiro aspecto sobre o qual se deve focar a atenção é o fato de que o átomo representado nessa figura possui muitos elétrons, que se distribuem no espaço ao redor do núcleo, em regiões conhecidas como “camadas”, nome pouco apropriado na verdade. Sabe-se, agora, que as “camadas” não contêm aglomerações de elétrons e apenas indicam posições em que é maior a chance de se detectarem elétrons.

Dentre os elétrons provavelmente detectados em uma mesma região (ou “camada”) nós podemos encontrar diferentes níveis de energia. Esses níveis de energia são identificados como “subcamadas” que estão presentes em uma mesma “camada”.

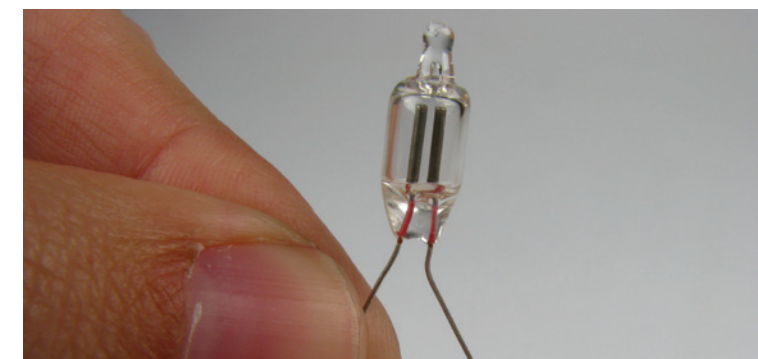
Note, na figura 2: (i) um quadro com a denominação das camadas e subcamadas; (ii) um quadro com a distribuição dos elétrons – indicados por setas – em subcamadas – identificadas por códigos tais como 1S, 2S, 2P, etc.; e (iii) um gráfico com os diferentes níveis de energia das subcamadas.

Nenhuma das representações usadas na figura 2 sugere a aparência microscópica do átomo. Tais representações registram apenas certas informações que possuímos hoje sobre a estrutura atômica. Desde a terceira década do século XX, os cientistas estão convencidos de que: (i) os elétrons não são pequenas bolinhas que se movem em linhas circulares ao redor do núcleo; e (ii) não é possível determinar, com exatidão e simultaneamente, a posição e a trajetória dos elétrons.

1.1.2. Mais informações sobre o átomo de neônio

O neônio, cuja estrutura é apresentada na figura 2, é um gás muito utilizado na fabricação de lâmpadas especiais. Os conhecimentos que temos hoje sobre os átomos de neônio foram obtidos por meio de equações criadas por uma ciência chamada Física Quântica. A escolha do neônio para iniciar a apresentação do modelo atual dos átomos justifica-se porque esse elemento faz parte da família dos gases nobres.

Figura 3: Pequena lâmpada de néon (tipo NE-2)



Muitos gases—entre eles, o nitrogênio (N_2), o oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2)—são formados por moléculas que contêm mais de um átomo. Os elementos que formam os gases nobres, no entanto, não se combinam facilmente com outros átomos, nem mesmo com átomos de sua própria “espécie”. Por isso, são chamados de monoatômicos. E, pela mesma razão, um modelo para um átomo de neônio é, também, um modelo para as partículas que compõem o gás neônio.

Os cálculos realizados com as equações da Física Quântica preveem que os elétrons de qualquer átomo se distribuem em camadas representadas pelas letras K, L, M, N..., ou pelos números 1, 2, 3, 4..., como mostrado na FIG. 2. Essas camadas comportam quantidades diferentes de elétrons—quanto mais distante do núcleo do átomo, maiores as chances de se detectarem elétrons.

Como já mencionamos anteriormente, o fato de dois ou mais elétrons apresentarem maiores chances de detecção em uma dada região do átomo—isto é, de dois ou mais elétrons poderem ser “situados” em uma mesma camada—não implica que esses elétrons apresentem o mesmo nível de energia. As diferenças entre os níveis de energia apresentados pelos elétrons constituem um dos critérios que levaram à ideia de subcamada.

No estado de mais baixa energia, os 10 elétrons do átomo de neônio distribuem-se desta maneira: (i) a camada 1, ou camada K, mais próxima do núcleo, “abriga” dois elétrons; (ii) os oito elétrons restantes “ficam situados” na camada 2, ou camada L; e (iii) essa segunda camada, por sua vez, apresenta dois níveis de energia permitidos para os elétrons, associados às subcamadas 2S e 2P, como mostrado na FIG. 2.

A presença de camadas e de níveis de energia vazios, na FIG.2, sugere que o átomo de neônio pode apresentar outros estados, diferentes do ilustrado nessa figura. Isso acontece, efetivamente, quando o neônio é usado nas chamadas lâmpadas de neon. Nesse caso, o átomo recebe e libera energia continuamente e, desse modo, emite a luz produzida pela lâmpada.

1.2. Níveis de energia permitidos e proibidos

Os cálculos da Física Quântica permitem determinar que níveis de energia são permitidos para os elétrons. Assim sendo, descobrimos que níveis específicos de energia são permitidos para os elétrons de cada átomo, enquanto todos os outros valores de energia são proibidos.

Por meio de cálculos, sabe-se que os oito elétrons que ocupam a segunda camada de um átomo de neônio—denominada camada L—não possuem o mesmo nível de energia: dois deles são menos “energéticos” que os outros. Essa informação está contida no gráfico colocado à direita da FIG. 2.

Quando os elétrons apresentam níveis de energia semelhantes, diz-se que eles ocupam a mesma subcamada. As subcamadas também estão associadas a certas regiões que compõem as camadas. Essas regiões são chamadas “orbitais”, mas não nos ocuparemos desse assunto aqui, dado que será suficiente relacionar o conceito de subcamada ao conceito de níveis de energia.

Assim sendo, a primeira camada—denominada K—possui apenas uma subcamada—identificada como 1S. Já a segunda camada—a L—possui duas subcamadas identificadas como 2S e 2P.

No quadro de fundo cinza, na parte central da FIG. 2, identifica-se o número de elétrons permitidos em cada subcamada e, portanto, quantos elétrons podem ser encontrados em cada nível de energia. Subcamadas do tipo S comportam apenas dois elétrons; subcamadas do tipo P podem apresentar seis elétrons; as do tipo D podem ser “ocupadas” por 10 elétrons; e as do tipo F, por 14.

Todas essas características dos átomos são previstas pelas equações da Física Quântica. Não se sabe por que os elétrons se comportam desse modo nos átomos, mas acredita-se que é assim que eles se comportam. Realizados desde as primeiras décadas do século XX, inúmeros experimentos têm aumentado a confiança dos cientistas em tais equações, criadas para prever o comportamento dos átomos.

Resumindo tudo o que se disse, até este ponto, sobre o modelo atômico atualmente usado nas Ciências, pode-se afirmar que:

(i) esse modelo se baseia em cálculos que preveem quanta energia os elétrons possuem e como se comportam dentro dos átomos;

(ii) há regiões em torno do núcleo, as camadas, onde é mais provável detectar os elétrons;

(iii) os elétrons que ocupam uma mesma camada não apresentam, necessariamente, o mesmo nível de energia; e

(iv) elétrons que apresentam níveis de energia semelhantes são agrupados em subcamadas.

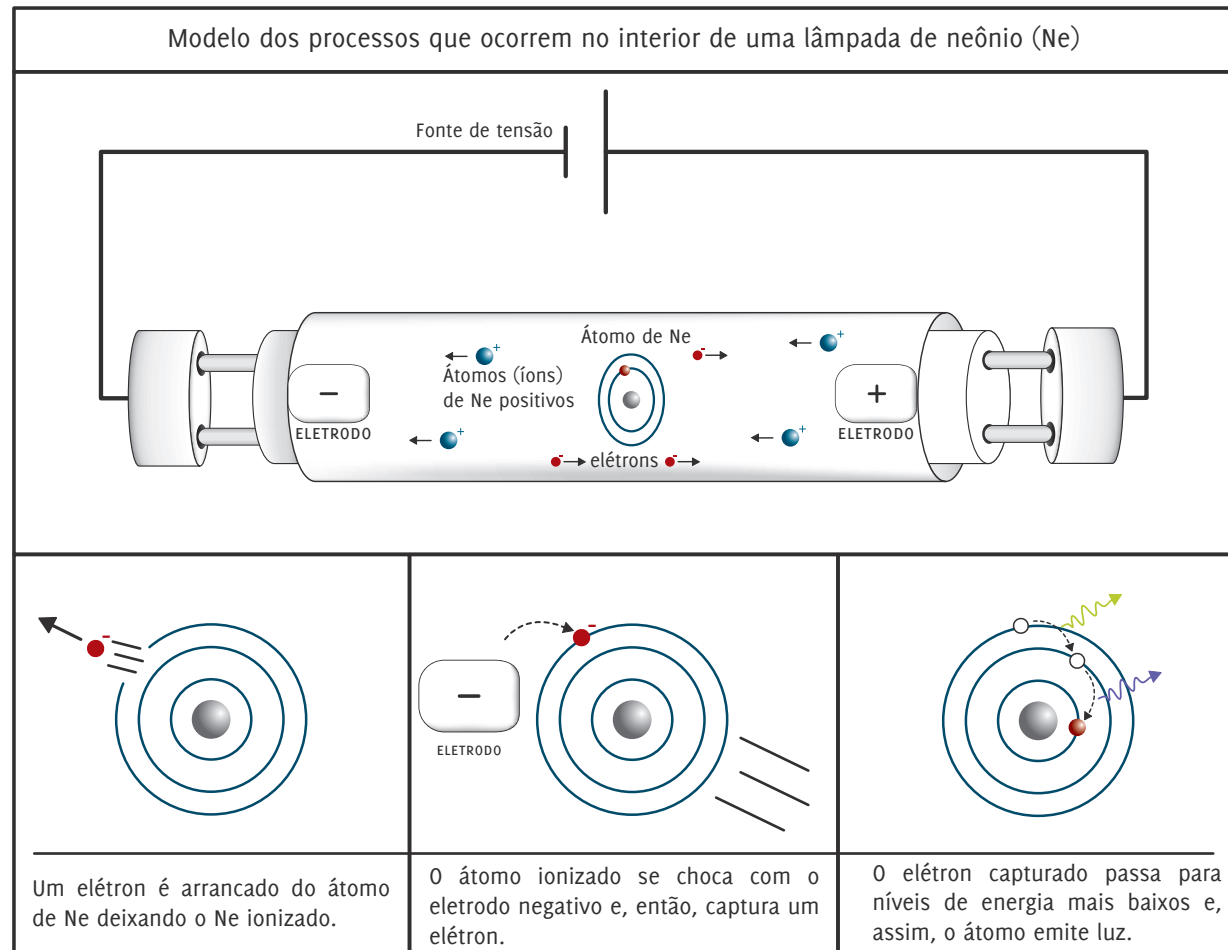
1.3. A emissão de luz pelos átomos

No modelo do átomo de neônio, há níveis de energia preenchidos por elétrons e outros que permanecem vazios. Quando esse átomo recebe energia, alguns de seus elétrons “saltam” para níveis de energia inicialmente vazios, deixando lacunas nos níveis de energia de onde saem. Se a energia recebida pelo átomo for suficientemente elevada, um ou mais elétrons pode(m) abandonar o átomo, transformando-o em um íon positivo.

Nas lâmpadas de neônio, uma tensão elétrica, ou “voltagem”, é aplicada a contatos metálicos situados nas extremidades da lâmpada, como mostrado na figura 4. Essa tensão provê a energia necessária para que alguns elétrons “saltem” entre estados de energia permitidos ou para que abandonem seus átomos de origem.



FIG.04



Como consequência, no interior desse tipo de lâmpada, forma-se uma mistura de elétrons livres – que têm carga elétrica negativa – e átomos ionizados – que têm carga elétrica positiva. Nesse ambiente, conhecido como plasma, elétrons e íons movem-se em sentidos opostos: os elétrons dirigem-se ao eletrodo positivo, enquanto os íons de carga positiva se direcionam ao eletrodo negativo, como mostrado na figura 4.

Quando alcançam o eletrodo negativo, ou catodo, os átomos de neônio ionizados capturam os elétrons que lhes faltavam e deixam, momentaneamente, de se apresentar como íons. Por um breve momento, os elétrons capturados “saltam” para níveis de energia mais baixos que existem em cada átomo. Quando ocorrem esses “saltos”, os elétrons liberam o excesso de energia que tinham quando ocupavam níveis de energia mais elevados. Essa energia é liberada sob a forma de “pacotes de luz”, conhecidos como fótons.

Como a diferença de energia entre os vários níveis de energia permitidos dentro de um átomo varia, alguns “saltos” permitem a emissão de “pacotes” maiores – ou seja, de fótons com mais energia –, enquanto outros “saltos” envolvem a emissão de fótons com menos energia.

1.4. Breve história da criação do conceito de fóton

A quantidade de energia emitida em cada “salto” dado pelos elétrons que pertencem a um átomo está diretamente relacionada com as características da luz emitida pelo átomo. A compreensão dessa relação da energia associada ao “salto” entre níveis de energia permitidos com as características da luz emitida por um dado átomo remete a 1900 e a um cientista chamado Max Planck.

Nesse ano, Planck e outros cientistas de sua época estavam envolvidos com um verdadeiro enigma científico, pois ninguém conseguia entender as características da radiação emitida por corpos aquecidos. Então, Planck criou a hipótese, que ele mesmo não compreendia completamente, de que os corpos aquecidos emitiam energia em “pacotes” e não sob a forma de ondas, como se supunha à época (FIG. 5).

A expressão matemática $\Delta E = h \cdot f$ foi proposta por Planck para relacionar a quantidade de energia (ΔE) dos “pacotes” de energia (de cuja existência ele suspeitava) com a frequência (f) das ondas que, aparentemente, o corpo aquecido emitia para o ambiente ao seu redor. Nessa equação, h é um número a que, atualmente, se dá o nome de Constante de Planck.

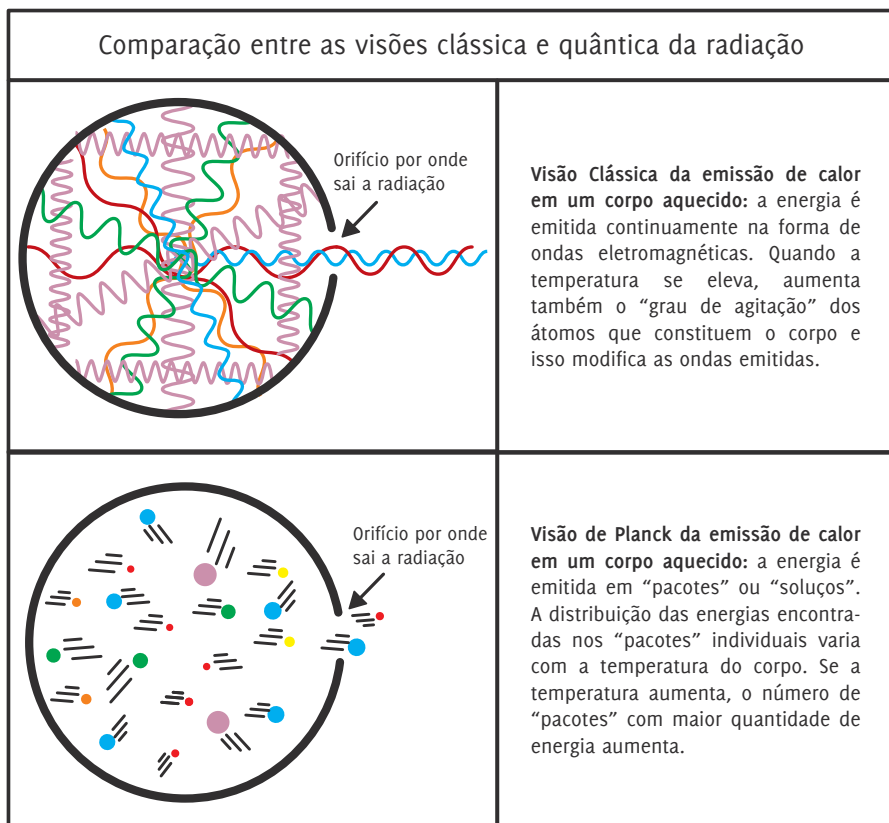


FIG.05

A Constante de Planck tem um valor muito pequeno ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Joules.segundo). Sabe-se, hoje, que todos os fenômenos associados à luz ou à estrutura da matéria dependem do valor de h .

Se houvesse um mundo em que vigorasse outro valor de h e em que as leis da Física concebidas a partir do século XX continuassem válidas, coisas muito bizarras se tornariam possíveis. A título de exemplo, suponha-se que o valor de h aumentasse alguns trilhões de vezes. Nesse caso, haveria uma chance, ainda que pequena, de uma bala de revólver arremessada contra uma parede de aço atravessar completamente a parede, sem que nenhuma das duas sofresse danos!

Em 1905, isto é, cinco anos depois da proposta pioneira de Planck, Albert Einstein utilizou a mesma expressão matemática ($\Delta E = h \cdot f$) para explicar outro fenômeno que fugia à compreensão dos cientistas da época – o efeito fotoelétrico. Esse trabalho, que permitiu compreender esse efeito importante, deu a Einstein o prêmio Nobel, uma das maiores honrarias conferidas a cientistas pela importância da obra de cada um deles.

Em 1913, Niels Bohr utilizou, mais uma vez, a equação de Planck para explicar como os átomos trocam energia com o ambiente que



os cerca. Bohr foi o primeiro a propor que os elétrons em um átomo são obrigados a apresentar níveis de energia definidos e que, por essa razão, eles só podem receber ou liberar energia sob a forma de “pacotes” ou fótons de luz.

Os cientistas já sabiam, então, que materiais no estado gasoso emitem luz cujo espectro corresponde a linhas coloridas. Sabiam, também, que cada tipo de material emite seu próprio e inconfundível espectro, que, por isso, funciona como uma espécie de “impressão digital”, própria a cada material (FIG. 6, 7 e 8).

Sem a proposta de Bohr, desenvolvida nas primeiras décadas do século XX, não se compreenderia por que o espectro da luz emitida por materiais no estado gasoso é constituído por linhas ou, ainda, por que cada material possui um espectro que lhe é específico.

FIG.06: O sódio no estado gasoso emite sete linhas coloridas que compõem seu espectro na faixa do visível

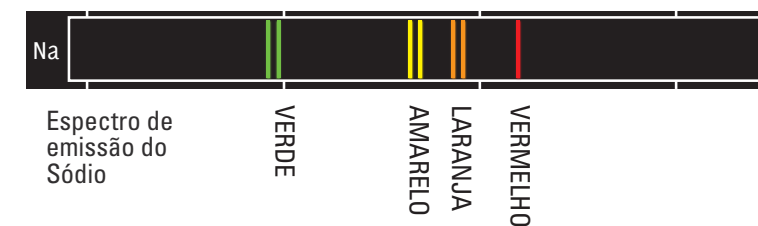
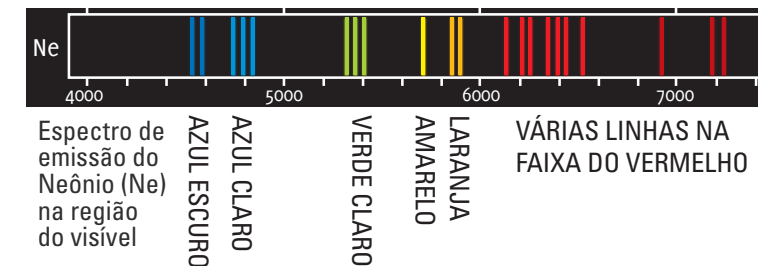


FIG.07: Comparando o espectro do hidrogênio com aquele emitido pelo sódio nota-se que se tratam de espectros bem distintos



FIG.08: Comparado aos espectros do sódio e do hidrogênio, vê-se que o espectro característico do neônio possui um número bem maior de linhas na região do visível



2

REUNIÃO DE ÁTOMOS E FORMAÇÃO DE SÓLIDOS

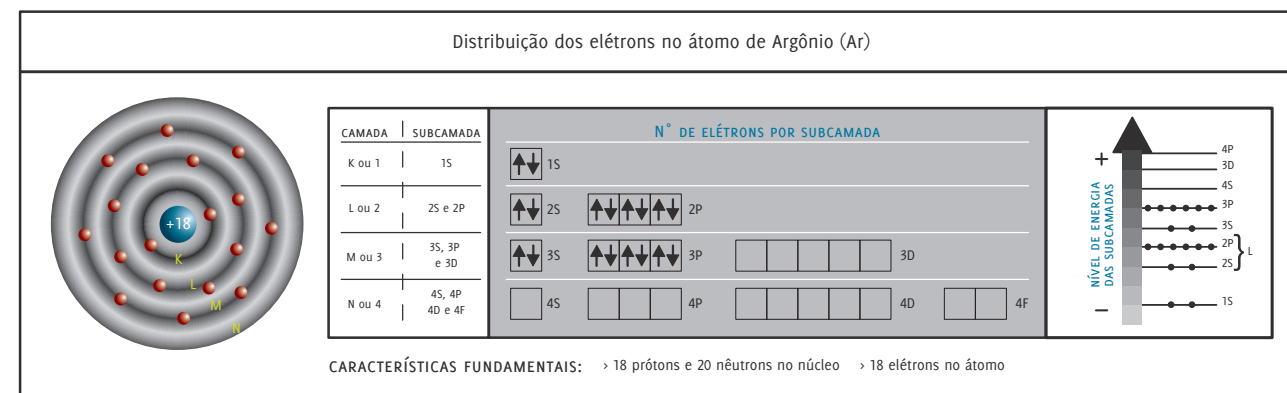
A formação de sólidos ou de líquidos envolve aproximação e, portanto, criação de ligações entre átomos. Atualmente, do ponto de vista das Ciências, estudar a interação, ou a ligação, entre átomos implica entender como os níveis de energia permitidos para os elétrons que “pertencem” a um átomo se combinam com os níveis de energia dos elétrons que “pertencem” a outros átomos, quando muitos átomos são aproximados uns dos outros.

Em geral, a formação de um material sólido a partir de átomos isolados envolve uma “economia de energia”. Sabe-se, por exemplo, que a energia de um sistema constituído por um trilhão de trilhões de átomos de ouro isolados – ou seja, 10^{24} átomos – é maior que a energia de um pequeno grão de ouro sólido que contém o mesmo número de átomos. Assim, durante a formação do ouro sólido, a reunião dos átomos reduz a energia do conjunto.

2.1 Átomos que dificilmente formam compostos

Para entender como a união de átomos produz esse tipo de “economia de energia”, convém estudar o caso de elementos químicos que muito raramente formam compostos – ou seja, os gases nobres, que dificilmente se combinam com outros átomos. Já demos início a tal estudo, quando, nas seções 1.1 a 1.4, fizemos referência ao modelo do átomo de neônio. Vamos retomar essa estratégia, resga-

FIG.09 Distribuição dos elétrons no átomo de neônio. Vamos retomar essa estratégia, resga-



tando, desta vez, informações sobre o átomo de argônio, outro gás nobre utilizado na fabricação de lâmpadas.

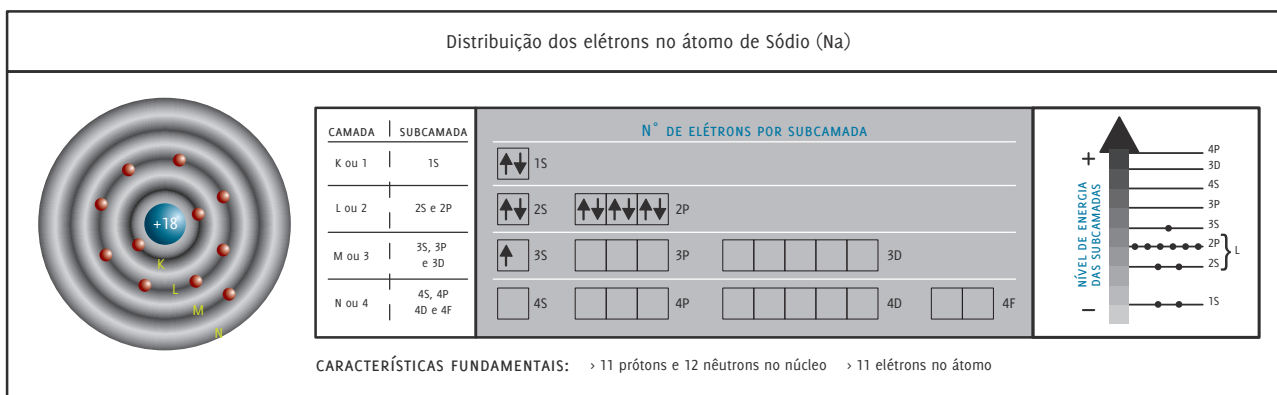
Comparando-se a distribuição de elétrons no argônio, mostrada na FIG. 9, com a distribuição deles no neônio, mostrada na FIG. 2, observa-se uma característica comum às duas estruturas: a presença de subcamadas completamente preenchidas – no neônio, a última subcamada preenchida é a 2P; no argônio, ela é a 3P.

Assim como o argônio e o neônio, os outros gases nobres também apresentam átomos com subcamadas preenchidas e, por essa razão, não se combinam facilmente com outros átomos. Como já foi dito, os gases nobres são monoatômicos e não, gases moleculares – como por exemplo, os gases atmosféricos nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2).

2.2. Sólidos constituídos por substâncias iônicas

Para comprovar quão especial é o caso dos gases nobres, vamos comparar a distribuição de elétrons nesses gases com a distribuição encontrada no sódio, no cloro e no alumínio. O sódio e o alumínio são elementos metálicos e servem como exemplo de uma característica comum a todos os átomos metálicos. O cloro foi escolhido para representar a classe de átomos conhecida como não metálicos. As distribuições eletrônicas do sódio, do alumínio e do cloro são apresentadas nas FIG. 10, 11 e 12.

FIG.10



A análise dessas três figuras deve começar pela comparação entre a distribuição eletrônica nos átomos de sódio e de cloro. O átomo de sódio pode perder o elétron que aparece isolado na subcamada 3S. Nesse caso, ele transforma-se no íon Na^+ e adquire uma estrutura eletrônica similar à do neônio, que é um gás nobre. O cloro, por sua vez,

pode receber um elétron extraído da última subcamada do átomo de sódio e, nesse caso, ele transforma-se no íon Cl^- e passa a apresentar uma estrutura eletrônica similar à do argônio, igualmente um gás nobre.

Durante a aproximação de átomos de sódio e de cloro, há forte tendência para o surgimento de íons Na^+ e Cl^- . Por terem uma distribuição eletrônica semelhante à dos dois gases nobres citados, esses íons são mais estáveis que eram antes de ter ocorrido o duplo processo de ionização. Eles também se atraem fortemente, devido ao fato de terem adquirido cargas elétricas de sinais opostos. Como resultado, forma-se uma substância sólida e cristalina, o $NaCl$, mais conhecida como sal de cozinha.

Um aspecto particularmente importante desse processo consiste no fato de que a energia da molécula, formada a partir da atração entre os íons Na^+ e Cl^- , é significativamente menor que a soma das energias apresentadas pelos dois átomos Na e Cl, quando ambos estão neutros e isolados um do outro.

FIG.11

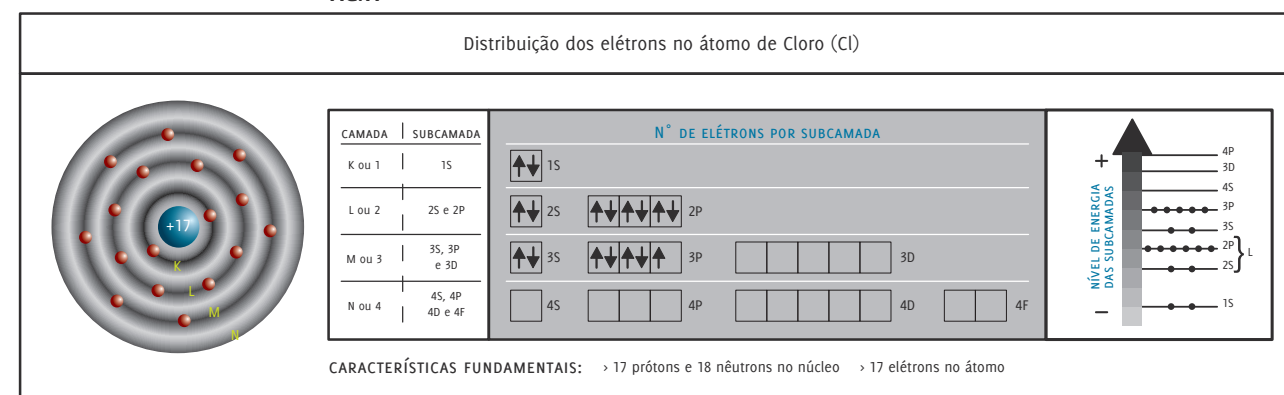
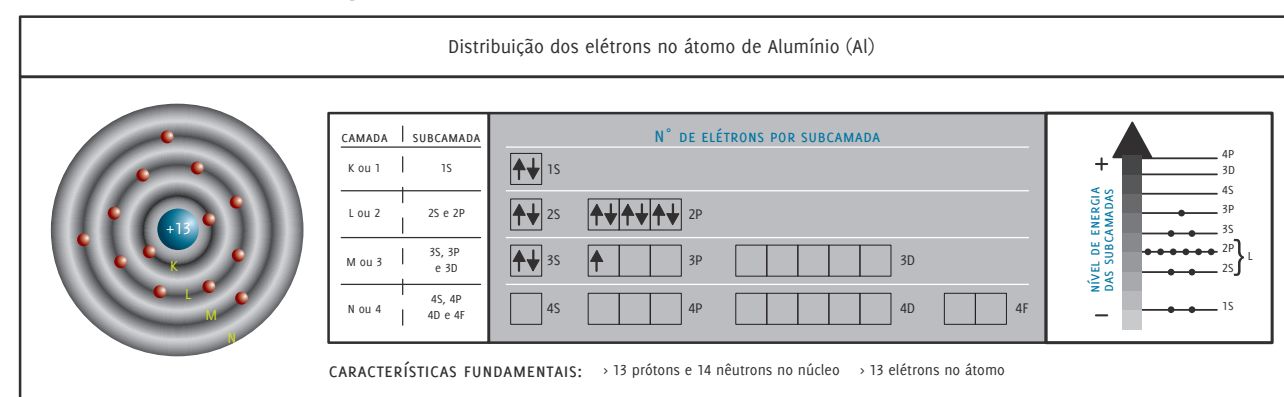


FIG.12



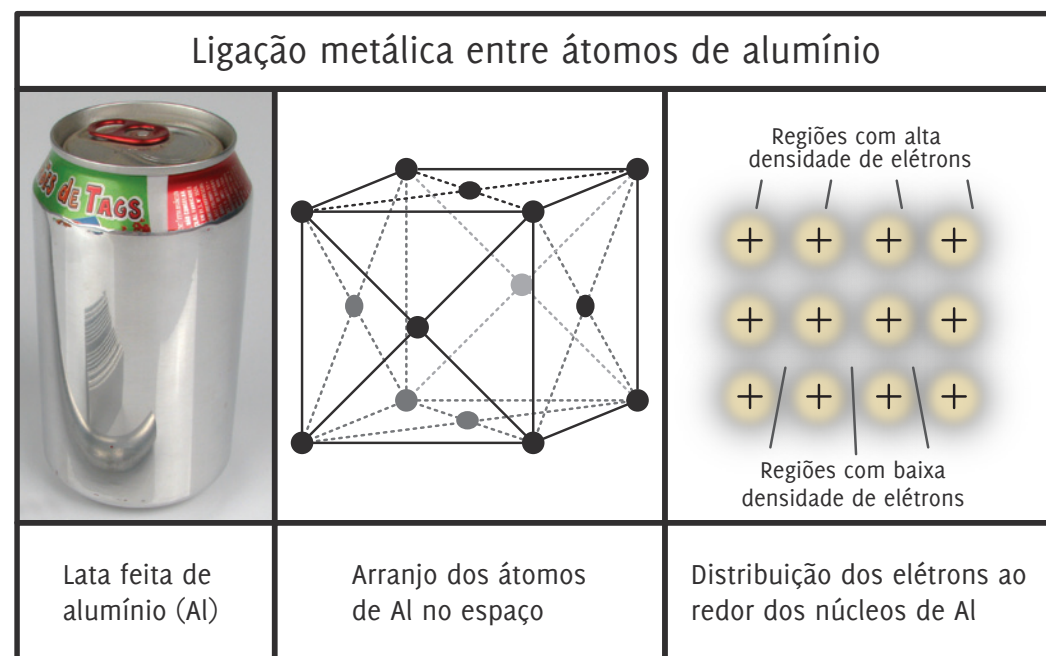
2.3. Bandas de energia em sólidos metálicos

A distribuição dos elétrons no sódio e no alumínio (FIG. 10 e 12) é exemplo de algo comum a todos os outros metais – nesses elementos, a última camada da distribuição eletrônica possui poucos elétrons. Além disso, há um único elétron “isolado” em uma subcamada, que apresenta um nível de energia superior aos demais.

Esse elétron encontra-se fracamente ligado a seu átomo de origem e pode se distanciar dele em algumas situações. Como se verá no prosseguimento desta seção, esse fato implica consequências importantíssimas no que diz respeito à capacidade exibida pelos metais para conduzir corrente elétrica.

Pode-se ter uma idéia aproximada de como os átomos estão organizados em um sólido metálico, ao se analisar o modelo esquemático mostrado na FIG. 13. O alumínio foi escolhido, nesse caso, para exemplificar as características da ligação metálica.

FIG.13



Nessa figura, do lado direito, vê-se uma série de núcleos atômicos positivos cercados de elétrons. Os setores mais próximos dos núcleos definem regiões escuras com “alta densidade” de elétrons. Em volta dessas regiões, há uma outra mais clara com “menor densidade” – ou seja, menor concentração de elétrons. Os elétrons encontrados nesta

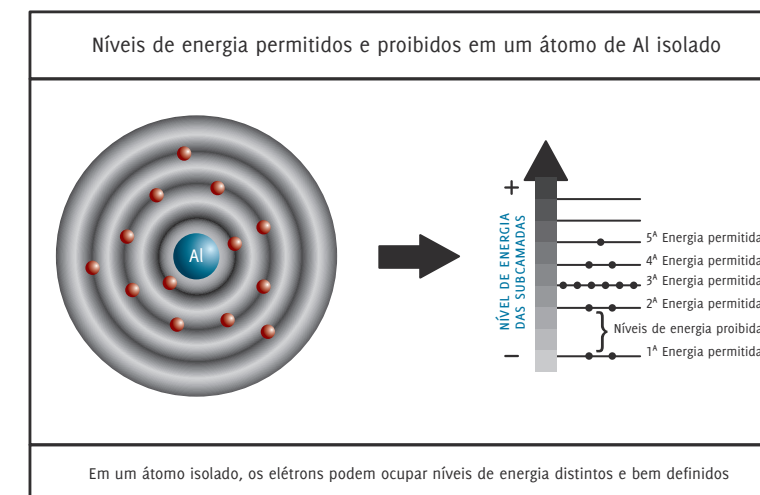
segunda região são justamente os que estão fracamente ligados a seus núcleos de origem. Por isso, costuma-se dizer que, nessa região, há uma espécie de “gás de elétrons”.

A palavra “gás” é usada, nesse contexto, porque, como já se sabe, os elétrons situados nessa região podem facilmente mudar de posição, uns em relação aos outros, o que permite que se desloquem por toda a estrutura cristalina. Além disso, os elétrons que compõem esse “gás” funcionam como uma espécie de “cola”, que atrai os átomos que compõem a rede cristalina e, também, é atraída por eles.

Outra característica importante de uma ligação metálica consiste no nível de energia que os elétrons que participam dessa ligação podem apresentar. Como ocorre em qualquer outro material, nem todos os níveis de energia são permitidos.

Quando átomos de um elemento metálico – caso do alumínio – se juntam para formar um sólido, os níveis de energia permitidos para os elétrons de cada átomo são afetados pela aproximação dos outros átomos. Esse processo está ilustrado nas FIG. 14, 15, 16 e 17.

FIG.14



Assim como acontece na formação do sólido conhecido como sal de cozinha, bem como na de qualquer outro sólido formado por ligação entre íons, a reunião de muitos átomos metálicos implica uma economia de energia. Por isso, o conjunto de átomos reunidos em um sólido apresenta uma energia menor que a existente no mesmo conjunto de átomos, quando estão isolados uns dos outros.

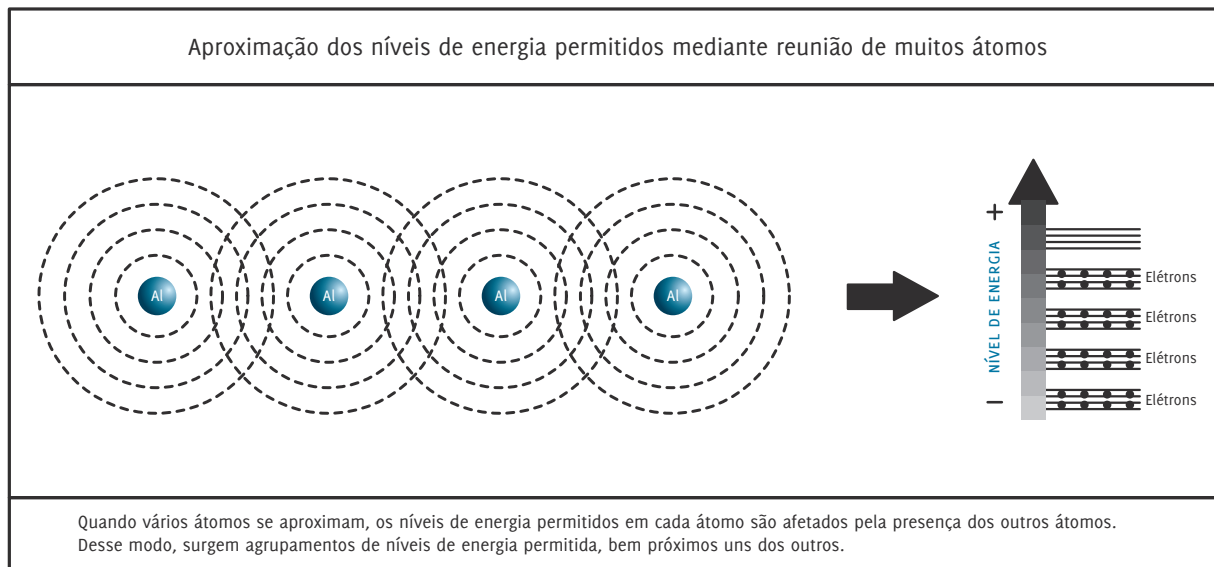


FIG.15

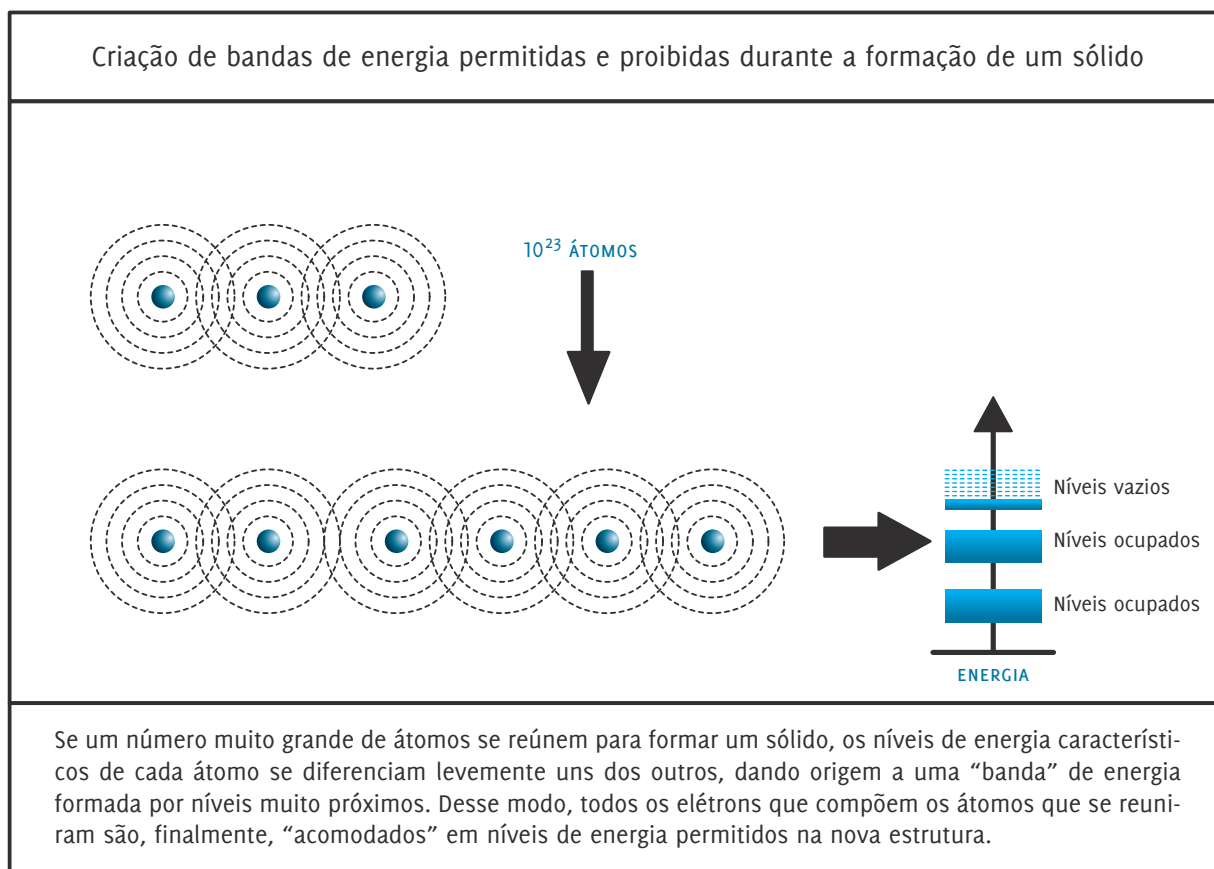


FIG.16

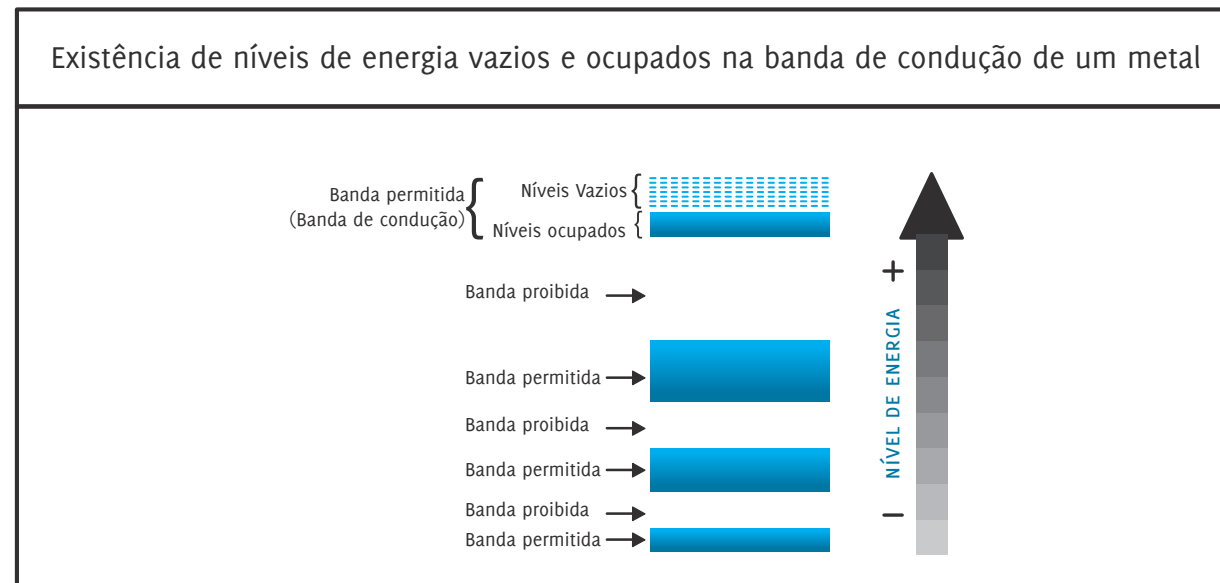


FIG.17

A exemplo do que ocorre em átomos isolados, a reunião de um grande número de átomos mantém a existência de inúmeros níveis de energia proibidos para os elétrons. A reunião de muitos níveis proibidos dá origem às bandas de energia proibidas, ilustradas na FIG. 17.

Para melhor entender as características da última banda de energia constituída durante a formação de um sólido metálico, é preciso lembrar que os últimos elétrons de um átomo metálico isolado ocupam uma subcamada com muitos estados permitidos, mas vazios, como mostrado nas FIG. 10 e 12, em que estão ilustradas as distribuições de elétrons no sódio e no alumínio. Por isso, a reunião de átomos metálicos dá origem a uma banda de energia com muitos níveis de energia vazios e permitidos, como se verifica na FIG. 17. Esses níveis vazios podem ser compartilhados por elétrons presentes em todos os átomos do sólido.

Das diversas bandas de energia criadas quando se forma um sólido, as ilustradas na FIG. 17 são as mais importantes. Afinal, os elétrons que ocupam as últimas bandas de energia de um material são os responsáveis por todos os fenômenos químicos e, também, pelo fenômeno da condução de corrente elétrica.

A existência de uma banda de energia parcialmente vazia na estrutura de bandas de energia de um sólido metálico facilita o deslocamento de elétrons de um nível de energia já ocupado para outro desocupado. Quando esse deslocamento acontece, os elétrons que ocupam a última banda de energia parcialmente preenchida passam a se comportar, *grosso modo*, como “elétrons livres”. Na FIG. 18, está

ilustrada a ligação de um sólido metálico aos polos de uma bateria, uma das situações em que esse processo costuma ocorrer.



espectro da luz emitida pelo filamento metálico de uma lâmpada incandescente é contínuo e, por isso, muito diferente do espectro de linhas, que é característico da luz emitida, por exemplo, por uma lâmpada germicida, ou do espectro emitido por substâncias submetidas a uma chama.

Um metal aquecido emite todas as cores na faixa do visível. Isso acontece, porque os elétrons existentes na banda de condução de um metal podem realizar transições de energia tanto entre níveis muito próximos quanto entre níveis mais distantes. Em outras palavras, os elétrons de um metal podem ir e voltar entre os inúmeros níveis disponíveis na região vazia da banda.

As transições que se verificam entre níveis de energia muito próximos dão origem a fótons de baixa energia, ou fótons de infravermelho. As transições que ocorrem entre níveis de energia mais distantes produzem fótons com mais energia na região visível do espectro eletromagnético – isto é, do vermelho ao violeta.

Como as transições entre níveis mais próximos são mais comuns, o filamento aquecido emite mais fótons infravermelhos que qualquer outro tipo de fóton. Por isso, as lâmpadas incandescentes são pouco eficientes do ponto de vista da produção de luz visível. Tipicamente, apenas 5% de todos os fótons emitidos por uma lâmpada de filamento se situam na faixa do visível. Praticamente, nenhum fóton é produzido na região do ultravioleta e 95% dos fótons emitidos situam-se na faixa do infravermelho.

Efeito da energia fornecida por uma bateria sobre os elétrons presentes em um condutor metálico

Em um condutor metálico existem níveis de energia vazios e permitidos que estão muito próximos a níveis preenchidos. Elétrons podem facilmente transitar entre esses níveis.

Quando a chave é ligada, a bateria transfere energia para os elétrons do condutor metálico que passam a ocupar níveis anteriormente vazios. Surge, então, uma corrente elétrica.

O modelo que descreve as características das bandas de energia em uma ligação metálica também pode ser utilizado para explicar por que o

3

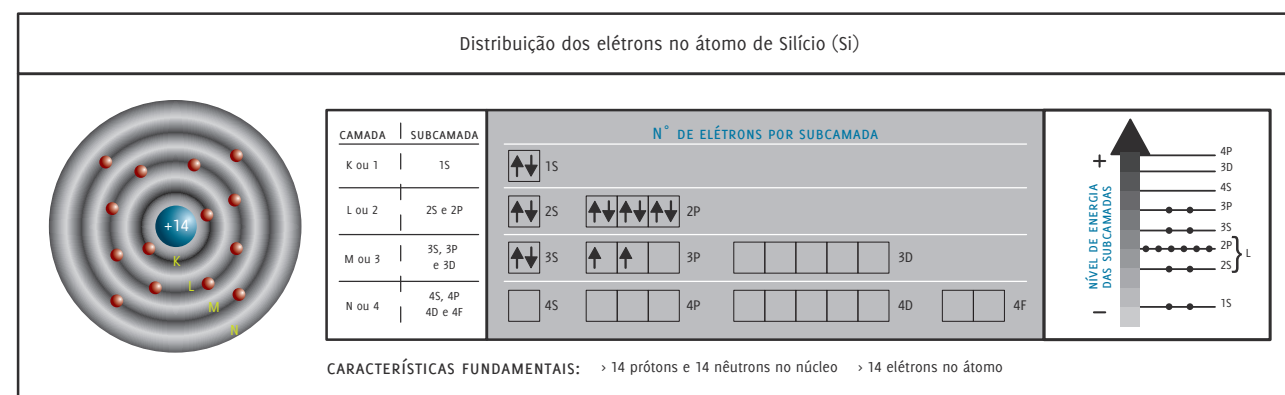
CARACTERÍSTICAS DE SÓLIDOS SEMICONDUTORES

Um sólido formado por material semicondutor apresenta características bastante diferentes das que são próprias aos sólidos que formam os condutores metálicos. O silício é o elemento semicondutor mais usado na indústria, em geral, e, por isso, inicialmente, vamos focar a atenção nesse elemento. A exemplo do que foi feito anteriormente, vamos começar pela análise da distribuição dos elétrons em um átomo de silício isolado.

Nesta fotografia, vemos um luxímetro: um aparelho destinado a medir a intensidade luminosa. O sensor desse aparelho é feito de silício.



FIG.20



Em átomos isolados desse elemento, há dois elétrons “desacompanhados” na subcamada 3P, como mostrado na FIG. 20. Algumas consequências desse fato podem ser compreendidas quando se compara a distribuição dos elétrons do silício com a observada no argônio, um gás nobre. Com base nessa comparação, conclui-se que o acréscimo de quatro elétrons na subcamada 3P faria com que o átomo de silício se tornasse quase tão estável quanto o átomo de argônio, que tem as subcamadas 3S e 3P completamente preenchidas. Essa estabilidade é alcançada, quando vários átomos de silício se ligam uns com os outros e compartilham os elétrons situados, originalmente, nas subcamadas 3S e 3P. Vamos ver como isso acontece.

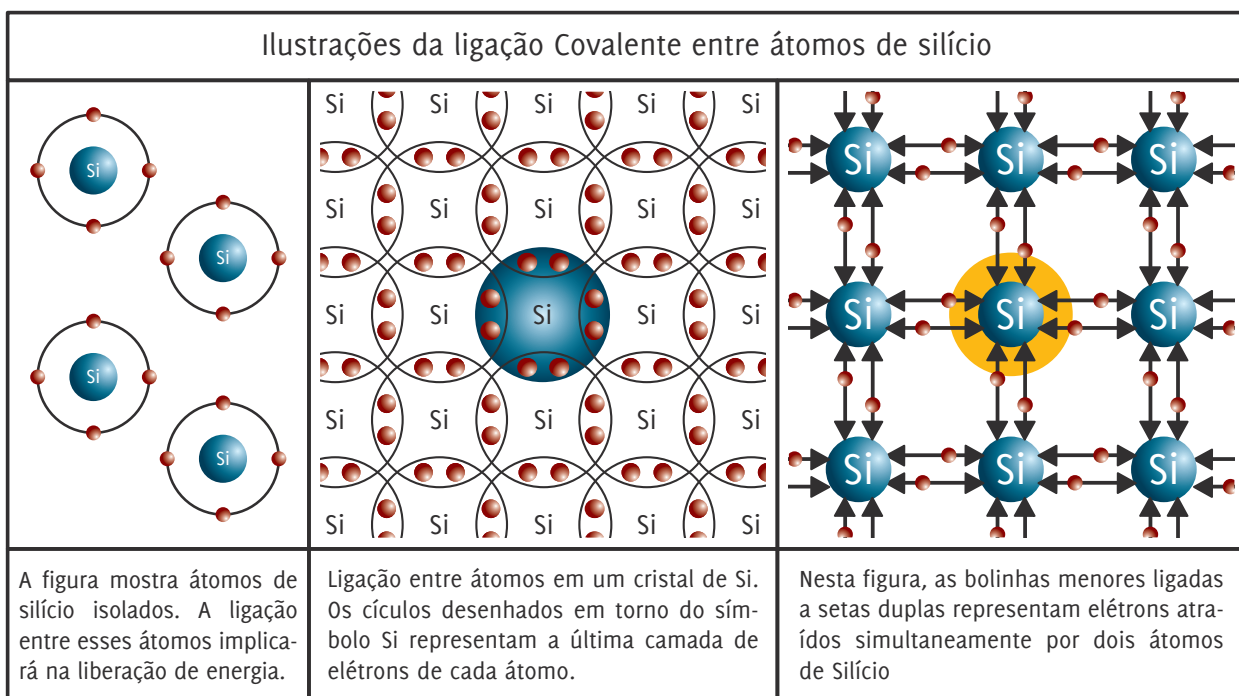
3.1. Cristal semiconductor e ligação covalente

Os quatro elétrons que faltam para permitir ao silício alcançar maior estabilidade podem ser obtidos, quando diversos átomos de silício se unem e formam um sólido cristalino, com estrutura especial. Uma pequena região dessa estrutura cristalina é mostrada na FIG. 21.

Nas FIG. 21-a e 21-b, os círculos em torno do símbolo Si representam a última camada de elétrons de cada átomo. Na FIG. 21-b, as regiões de superposição entre dois círculos definem o compartilhamento de

FIG.21

Ilustrações da ligação Covalente entre átomos de silício



elétrons entre dois átomos. Na FIG. 21-c, os círculos foram substituídos por setas duplas, para mostrar que os elétrons compartilhados por dois átomos de silício são atraídos, simultaneamente, pelos dois átomos. A ligação entre átomos que se baseia nessa forma de “compartilhamento” de elétrons da última camada – os elétrons de valência –, é conhecida como ligação covalente.

O átomo de silício, no centro das FIG. 21-b e 21-c, está ligado a quatro átomos vizinhos. Os átomos mostrados nas laterais dessas duas ilustrações também estão ligados a quatro átomos vizinhos, que não aparecem nessas figuras. O sólido de silício organiza-se, portanto, de modo que todos os seus átomos ficam ligados a quatro átomos vizinhos.

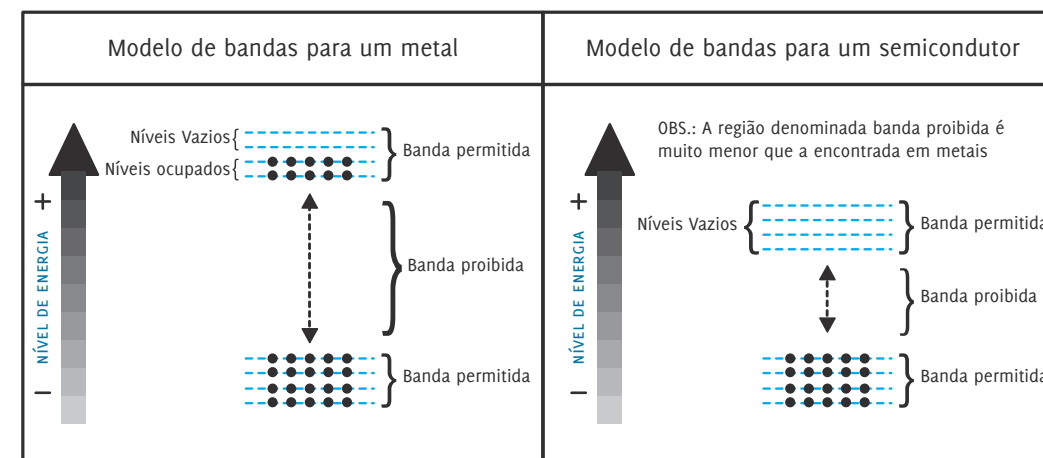
Juntando-se os quatro elétrons originais de cada átomo com os elétrons que os átomos compartilham com os quatro átomos vizinhos, cada átomo de silício que compõe o cristal de silício obtém os oito elétrons necessários para preencher completamente as subcamadas 3S e 3P, bem como para atingir uma configuração eletrônica parecida com a de um átomo de argônio.

O sólido de silício formado a partir das ligações covalentes de um dado número de átomos de silício possui uma energia interna menor que a existente no mesmo conjunto de átomos quando isolados. Por isso, esse tipo de sólido é estável.

3.2. Bandas de energia em semicondutores

Ao se comparar o que ocorre na ligação entre átomos de silício com o que acontece na ligação entre átomos de alumínio, observam-se diferenças muito importantes. Nas FIG. 22 e 23, estabelece-se uma compa-

FIG.22 E 23

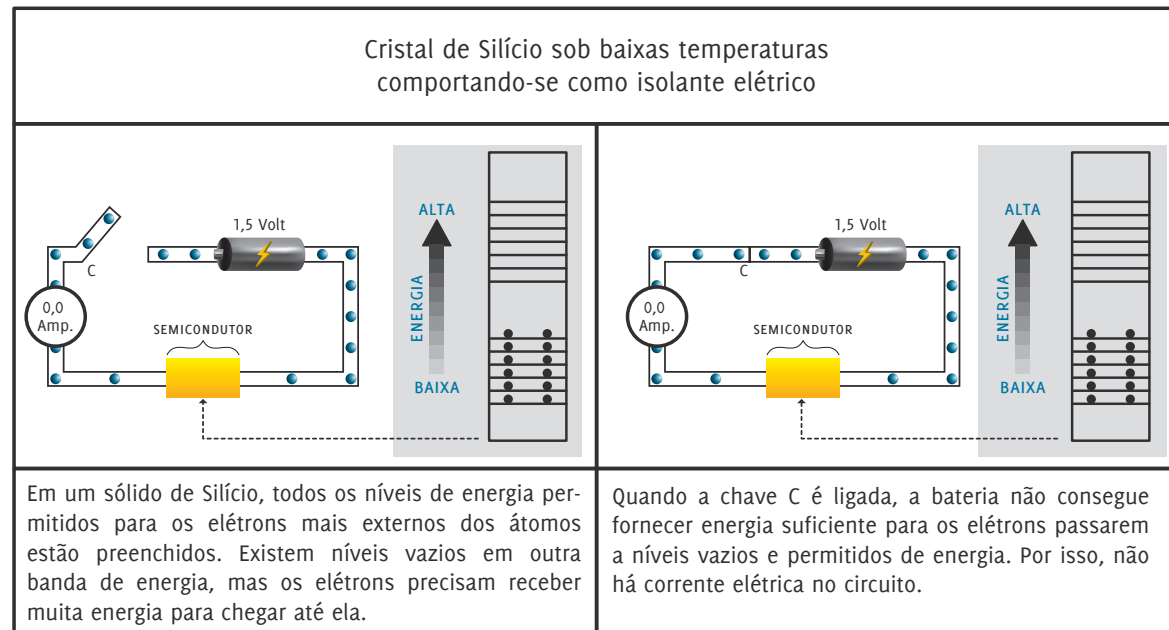


ração entre as duas últimas bandas de energia permitida e a última banda de energia proibida em um sólido metálico feito de alumínio e em um sólido semiconductor feito de silício.

Nos metais observa-se que há muitos níveis de energia permitidos em uma banda de energia em que há, também, níveis ocupados. A análise do modelo ilustrado na FIG. 18 evidencia que essa característica permite ao metal conduzir corrente elétrica ao ser ligado aos terminais de uma bateria.



FIG.24



Uma comparação entre as FIG. 18 e 24 revela que um cristal de silício não conduz corrente elétrica nas mesmas circunstâncias que permitem a condução de corrente em um sólido metálico.

3.3. Transformação de semiconductor em condutor

Vamos explicar, agora, como o aumento de temperatura e a incidência de luz podem provocar mudanças em um cristal de silício. E começamos pela descrição e análise do efeito do aquecimento sobre as características de um material semiconductor.

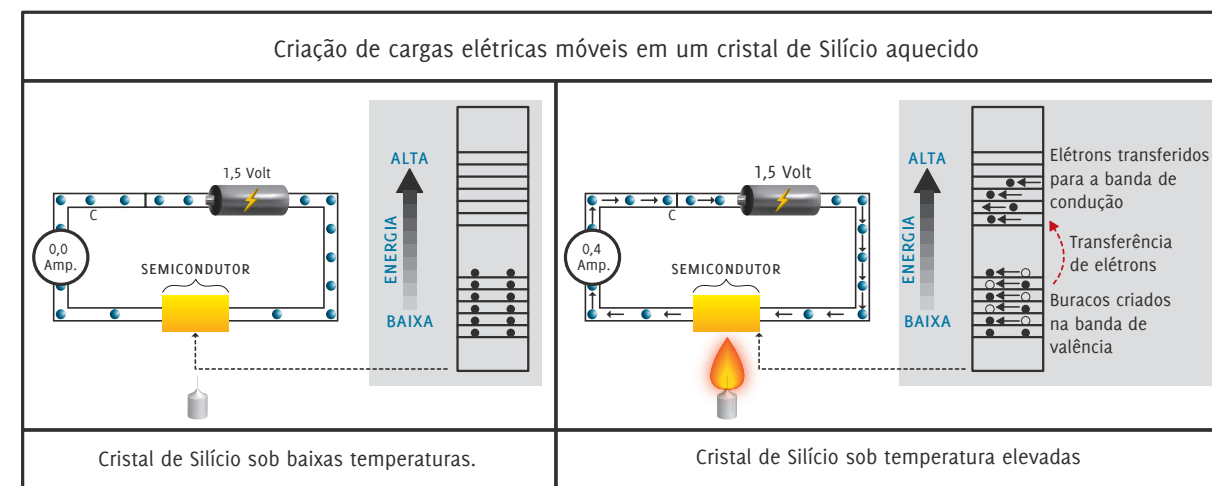
Na atividade **Temperatura e condução de eletricidade**, na Parte I deste livro (p. 26), você aprendeu que o aumento da temperatura em um filamento de metal e em um diodo de silício produz, em cada um desses

materiais, mudanças muito diferentes. Como utilizar as informações sobre metais e semicondutores, fornecidas agora, para explicar o que se pôde observar nos fenômenos investigados nessa atividade?

Basicamente, o que se comprovou em tal atividade é que o aumento de temperatura eleva a resistência dos metais e diminui drasticamente a resistência dos diodos de silício. Os metais, que já são bons condutores à temperatura ambiente, não precisam do acréscimo de energia associado ao aumento de temperatura para se tornarem bons condutores. Pelo contrário, o aumento de temperatura dificulta o movimento dos elétrons no metal.

Por outro lado, a elevada resistência elétrica, que caracteriza um material semiconductor em baixas temperaturas, resulta da baixa disponibilidade de cargas elétricas móveis – ou seja, elétrons na banda de condução e “buracos” (ausências de elétrons) gerados pela saída de elétrons anteriormente presentes na banda de valência. O aumento de temperatura tem enorme impacto sobre essa disponibilidade, pois fornece energia para o deslocamento de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Esse processo está ilustrado na FIG. 25.

FIG.25



Nos materiais semicondutores, o aquecimento torna possível a movimentação de elétrons tanto na banda de condução quanto na banda de valência. O que resulta do fato de que cada elétron que sai da banda de valência cria um buraco em uma ligação covalente, que pode ser preenchido por qualquer outro elétron presente na vizinhança.

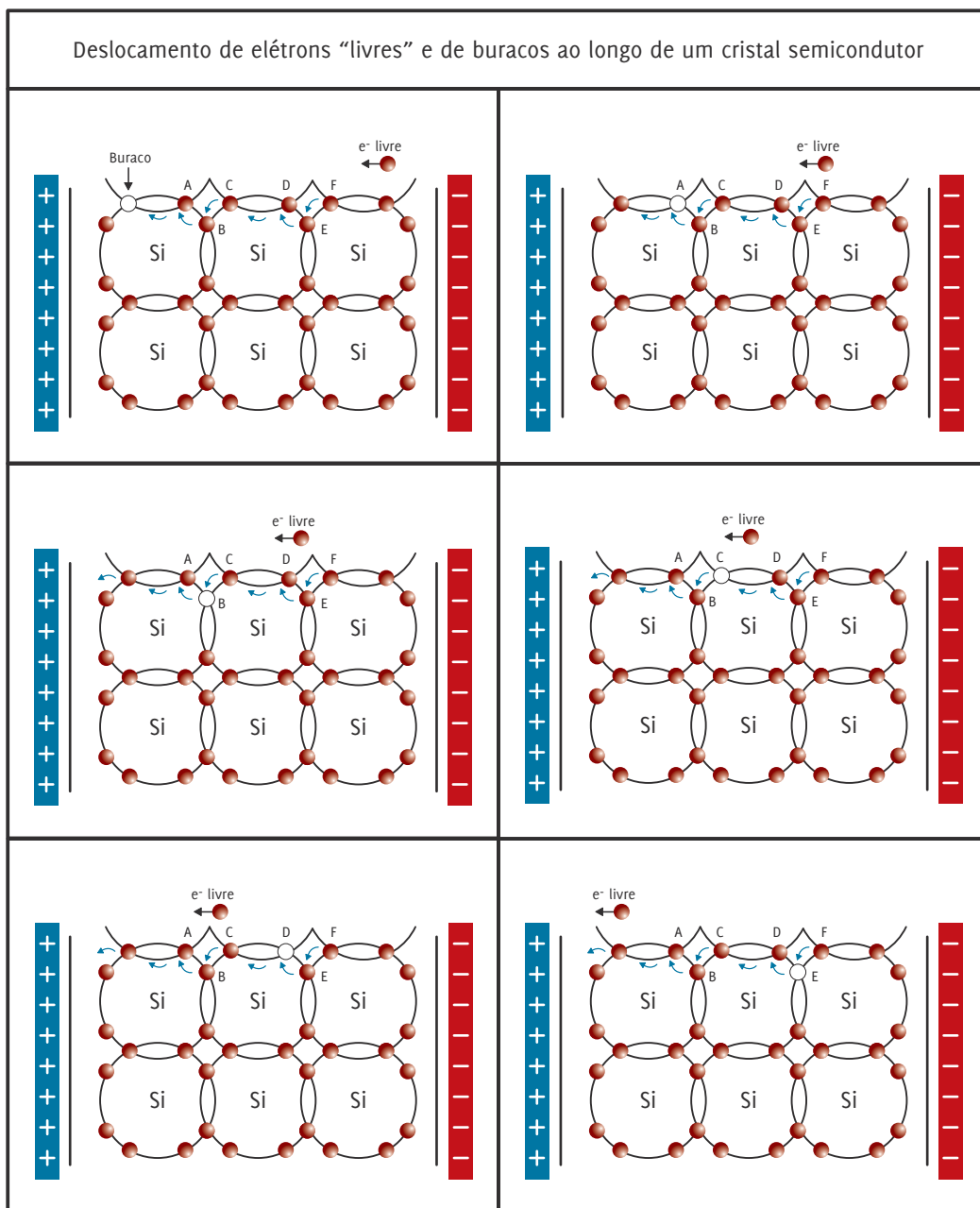


FIG.26

Na FIG. 26, ilustra-se o que pode acontecer quando um cristal de silício aquecido é inserido entre duas placas metálicas carregadas com cargas de sinais opostos. O elétron livre, representado na parte de cima da figura, desloca-se através da banda de condução, que está quase

vazia, indo da placa negativa para a positiva. Na banda de valência, os elétrons deslocam-se para ocupar os buracos deixados nas ligações covalentes pelos elétrons transferidos para a banda de condução.

O buraco, situado inicialmente próximo à placa positiva, tende a se deslocar para os pontos identificados pelas posições A, B, C, D, E e F, já que cada um dos elétrons que se encontra nessas posições tende a ocupar o lugar do buraco. Por essa razão, tudo se passa como se o buraco se deslocasse da placa positiva até a placa negativa.

O efeito da incidência de luz sobre um cristal semiconductor é similar ao efeito provocado pelo aquecimento. No caso de um LDR, como mostrado na FIG. 27, é a energia proveniente da luz que desloca elétrons da banda de valência para a banda de condução. Cada elétron que se desloca cria um par elétron/buraco, que, por sua vez, contribui para a condução de carga elétrica no interior do material. É isso que faz a resistência desse dispositivo diminuir quando adequadamente iluminado.

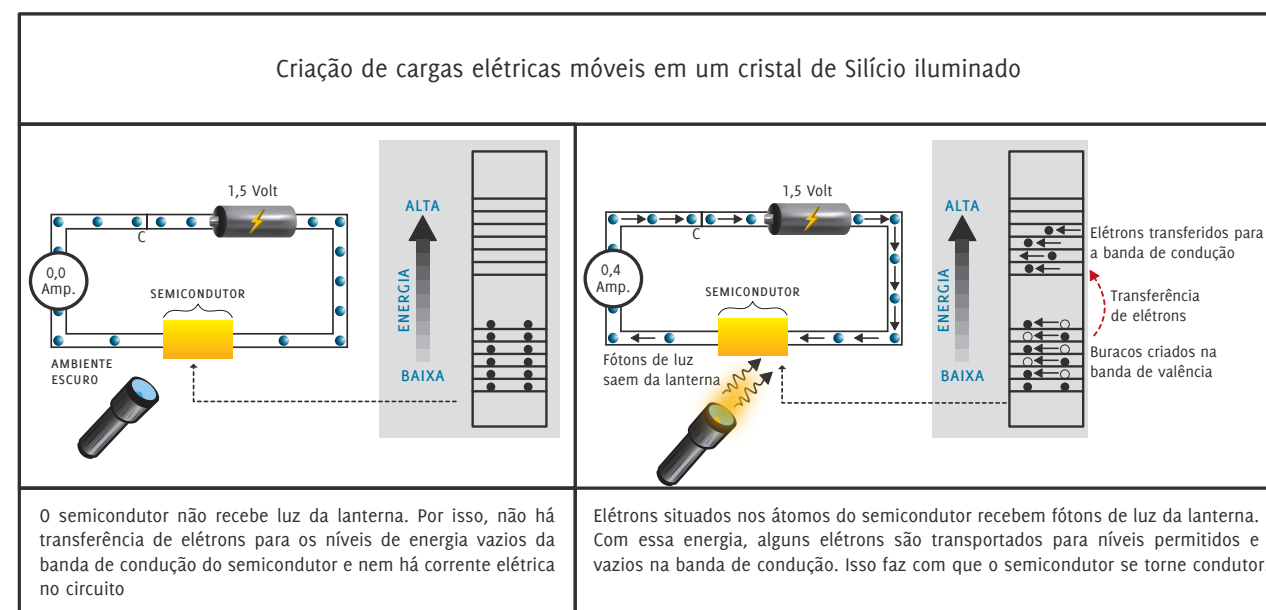


FIG.27

4

SEMICONDUCTORES DOPADOS E SUAS APLICAÇÕES

Nesta seção, você vai aprender como os dispositivos semicondutores são construídos para: **(i)** apresentar polaridade; **(ii)** emitir luz, quando submetidos a uma tensão elétrica, ou voltagem, apropriada; ou **(iii)**, ao contrário, gerar tensão elétrica, quando adequadamente iluminados. Também vai conhecer noções elementares sobre como é possível combinar três fatias de material semicondutor, contaminadas com certas impurezas, para formar um dispositivo conhecido como transistor. Os transistores são importantes, porque constituem a base de toda a tecnologia eletrônica disponível atualmente.

4.1. Semicondutores tipo N

Um material feito exclusivamente de átomos de silício, ou de outro elemento semicondutor – como é o caso do germânio –, é chamado de semicondutor puro. Com um semicondutor puro, pode-se construir dispositivos que não apresentam polaridade – por exemplo, um LDR. Entretanto, para construir dispositivos semicondutores como os diodos comuns e os LEDs, é preciso recorrer a um processo conhecido como dopagem.

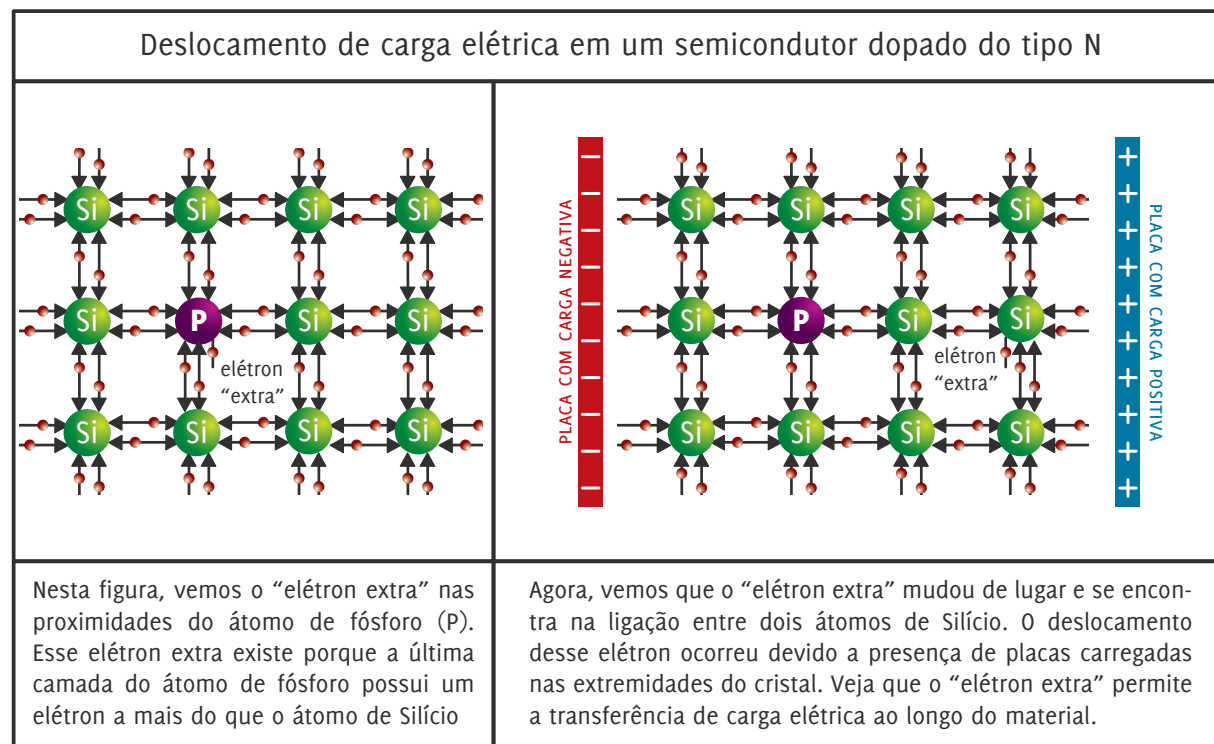
Quando um cristal semicondutor feito exclusivamente de átomos de silício recebe certa quantidade limitada de átomos de outro elemento químico, diz-se que o cristal foi dopado. Os átomos do outro elemento químico que são inseridos no cristal por meio da dopagem são chamados de impurezas.

O termo impureza é bastante enganoso nessas circunstâncias, já que, em geral, se acredita que a pureza é uma virtude e a impureza, um defeito. No entanto a introdução de átomos de outros elementos em um cristal de silício jamais pode ser entendida como prejudicial, pois, na verdade, vai produzir propriedades desejáveis e importantes para o novo material. É o que você vai ver na continuidade deste texto.

Para descrever o processo de dopagem, vamos, em primeiro lugar, analisar as alterações, observadas em um cristal de silício, que resultam da introdução de átomos de fósforo. Isso levará a compreender o processo de fabricação de um semicondutor tipo N.

As informações contidas na FIG. 28 ajudam a entender o que ocorre nesse tipo de dopagem. Nela, vê-se que um dos elétrons pertencentes ao átomo de fósforo (P), após a inserção do fósforo entre os átomos de silício (Si), não participa de ligações covalentes com os átomos vizinhos. Esse “elétron extra” comporta-se como os “elétrons livres” encontrados nos condutores metálicos. Essa é a razão de o átomo de fósforo inserido em um cristal de silício ser chamado de impureza doadora de elétrons, ou impureza tipo N – onde N significa carga negativa.

FIG.28



4.2. Semicondutores tipo P

Assim como é possível, durante a fabricação de um cristal de silício, trocar átomos de silício por átomos de fósforo, também se pode introduzir átomos de alumínio nesse tipo de cristal. O alumínio possui um elétron a menos que o átomo de silício. E esse elétron faz muita falta.

Analisando-se a FIG. 29-a, pode-se compreender as mudanças que a presença de alguns átomos de alumínio introduz em um cristal de silício. Nessa figura, vê-se a falta de um elétron na ligação entre o átomo de alumínio e um dos átomos de silício que está à sua volta. Esse

elétron “faltoso” dá origem a um “buraco”, que pode, por exemplo, mudar de lugar, quando placas carregadas são aproximadas do cristal, como mostrado na FIG. 29-b.

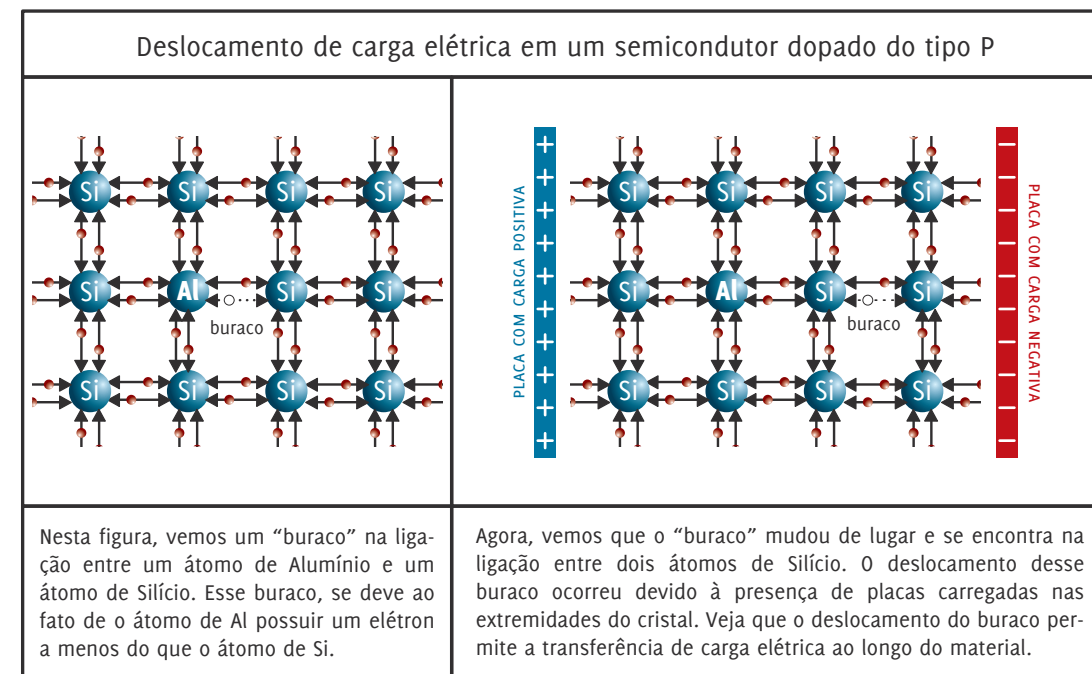


FIG.29

Costuma-se dizer que um buraco em um cristal de silício dopado com átomos de alumínio se comporta como uma carga positiva, devido à sua capacidade de “atrair” elétrons e devido ao fato de que os “buracos” parecem se mover em direção às cargas negativas, como ilustrado na figura 29-b. Essa é a razão de o átomo de alumínio inserido em um cristal de silício ser chamado de impureza receptora de elétrons, ou impureza tipo P – onde P significa carga positiva.

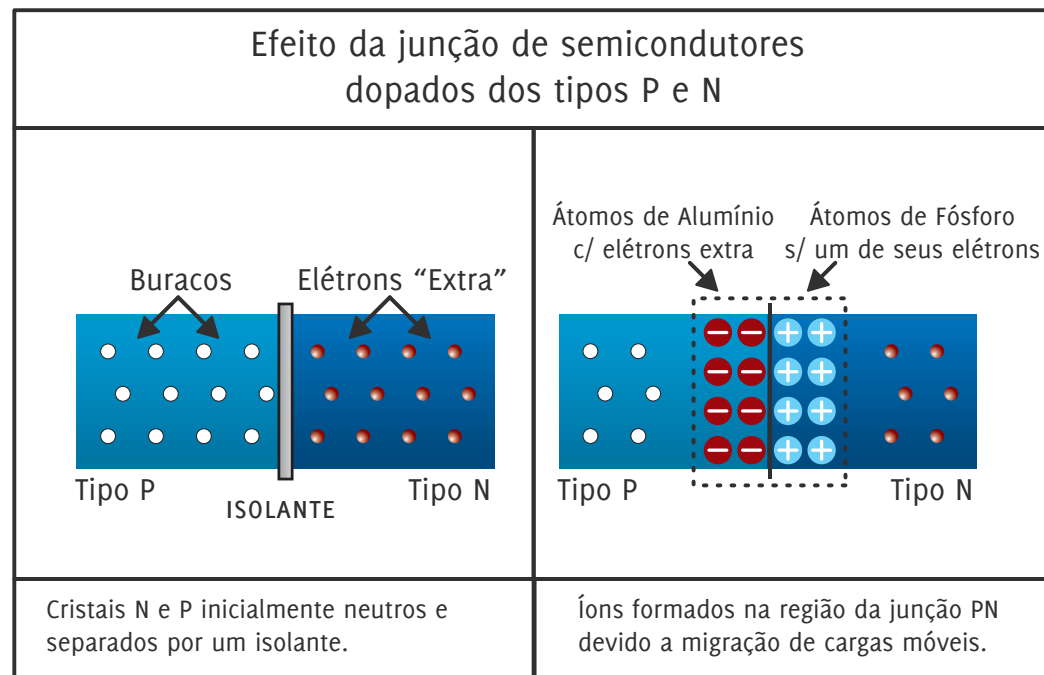
4.3. Junção PN, polaridade dos diodos e fotoemissão

Os diodos de todos os tipos – inclusive os LEDs – são constituídos pela junção de um cristal dopado com impurezas do tipo N com outro cristal dopado com impurezas do tipo P. A união desses dois materiais dá origem a uma junção PN, que é a base de muitos dos dispositivos semicondutores usados atualmente.

Na FIG. 30a, mostra-se uma junção PN separada por meio de um isolante, que impede o deslocamento, de um lado para o outro, das cargas móveis existentes nos lados P e N, e, na FIG. 30b, mostra-se o

que acontece algum tempo depois de se retirar o isolante inicialmente colocado entre as regiões N e P.

FIG.30



Quando o isolante é retirado, vários elétrons ligados a átomos de fósforo do lado N deslocam-se até átomos de alumínio responsáveis por buracos no lado P. No semiconductor tipo N, surgem átomos de fósforo com 15 prótons e apenas 14 elétrons, que vão se comportar como íons positivos, como mostrado pelas bolinhas positivas no lado N da junção, à direita da figura.

Por outro lado, no semiconductor tipo P, surgem átomos de alumínio com apenas 13 prótons, mas 14 elétrons. Esses átomos de alumínio vão se comportar como íons negativos, como mostrado pelas bolinhas negativas no lado P da junção.

Essa é a origem da polaridade dos LEDs e outros tipos de diodo. Por causa dessa polaridade, os diodos tendem a permitir a passagem de corrente em um sentido e a impedi-la no sentido oposto. Esse processo está ilustrado na FIG. 31.

Uma análise atenta dessa figura permite concluir que a ligação em polaridade direta aumenta a possibilidade de circulação de cargas elétricas ao longo do material, enquanto a ligação em polaridade inversa produz o efeito contrário.

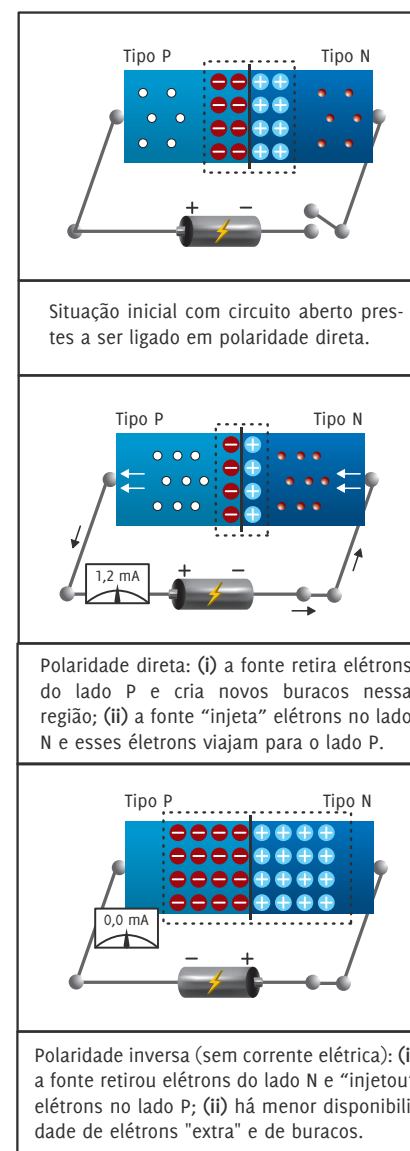


FIG.31

Uma corrente elétrica pode percorrer um circuito que contém um LED ligado em polaridade direta. Essa corrente permite que elétrons provenientes do lado N se combinem, continuamente, com buracos existentes no lado P. Observando-se o modelo de bandas mostrado na FIG. 32, é possível concluir que essa combinação permite a liberação de energia. Nessa figura, a seta curva, branca e pontilhada indica um processo de recombinação entre elétrons e buracos.

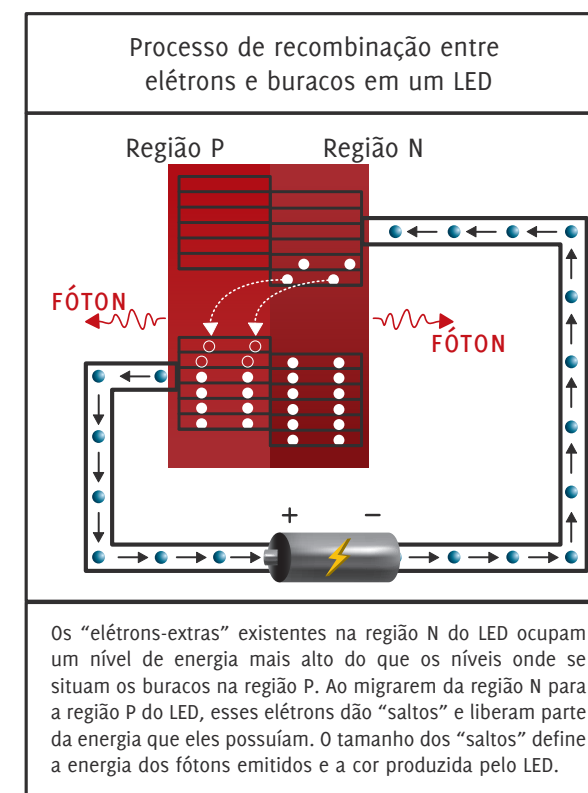


FIG.32



A ligação de uma junção PN em polarização direta cria, constantemente, buracos na região P, assim como fornece elétrons "extras" à região N. Por isso, a recombinação entre elétrons e buracos ilustrada na FIG. 32 ocorre continuamente no interior do LED, o que permite ao dispositivo emitir luz de modo constante.

4.4. Junção PN, detectores de luz e baterias solares

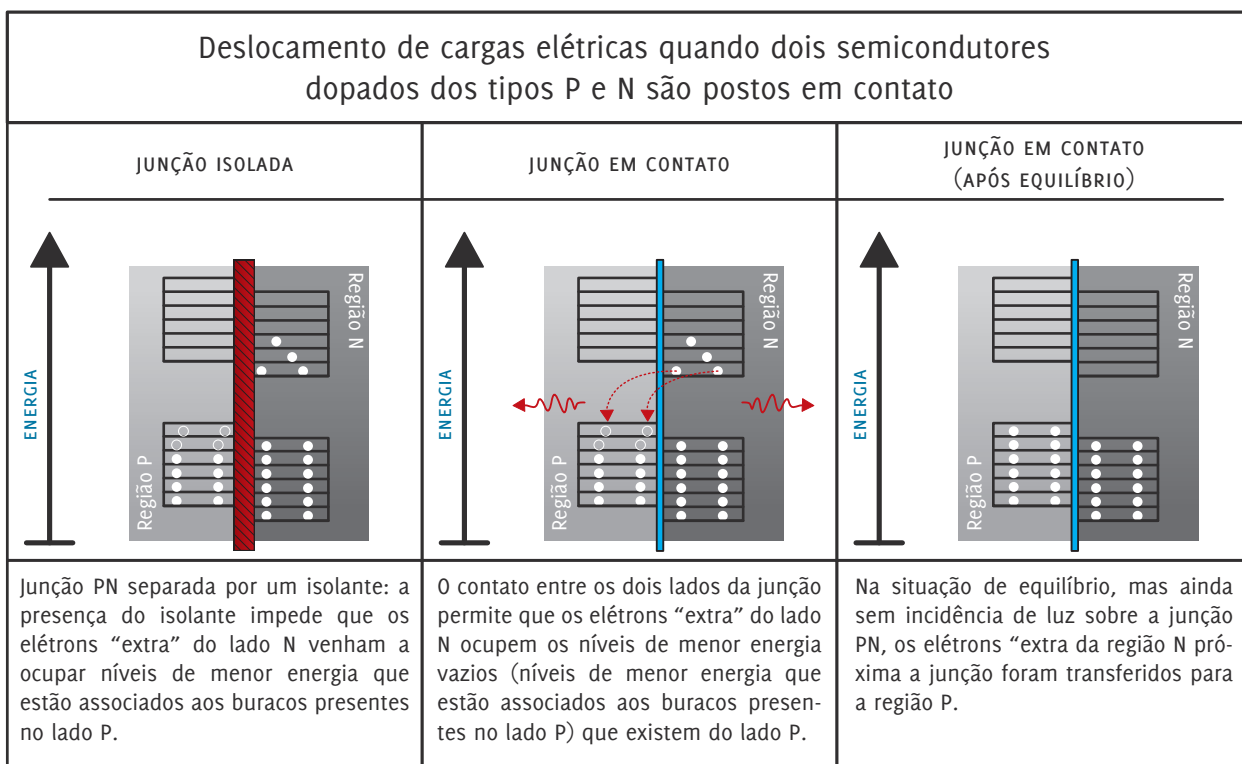
Os diversos modelos e ideias desenvolvidos até este ponto podem ser utilizados para explicar como um LED funciona como sensor de luz ou como funcionam as “baterias solares”, conhecidas em linguagem técnica como painéis fotovoltaicos. O estudo proposto nesta seção destina-se a possibilitar a compreensão dos processos que ocorrem nesses dispositivos, que, basicamente, utilizam uma junção PN para transformar luz em energia elétrica.

As junções PN presentes em LEDs e em painéis fotovoltaicos podem ser constituídas de vários tipos de material. Vamos, entretanto, centrar o estudo nos cristais de silício dopados com átomos de fósforo e de alumínio, a exemplo do que se fez nas seções anteriores deste texto.

Para entender como uma junção PN iluminada se torna capaz de gerar tensão elétrica, é preciso analisar o processo de deslocamento de cargas que ocorre em uma junção PN ainda não submetida à incidência de luz. Na FIG. 33, descreve-se esse processo em termos do modelo de bandas.



FIG.33



Os cristais usados na produção de LEDs e painéis fotovoltaicos são semitransparentes e podem ser atravessados por fótons de luz. Na FIG. 34, pode-se observar o que acontece quando fótons adequados incidem sobre elétrons situados em uma junção PN. A energia que, nesse caso, os elétrons recebem dos fótons permite que eles sejam transferidos para níveis de energia mais elevados.

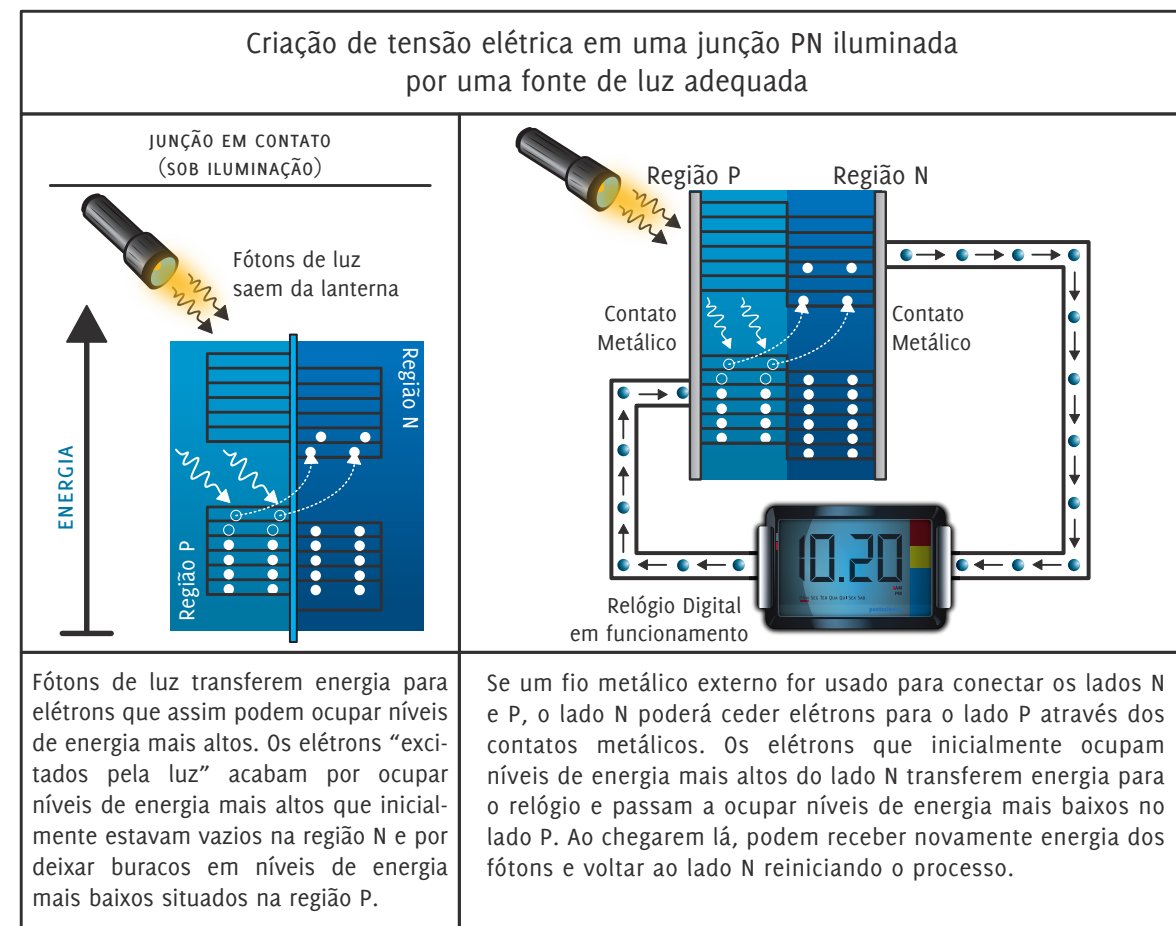


FIG.34

À direita dessa figura, vê-se o que acontece se a junção PN iluminada for ligada, externamente, por um fio metálico. Essa ligação permite que os elétrons “extras” de mais alta energia, situados na região N do cristal, utilizem o fio metálico para se deslocar até níveis mais baixos de energia, situados na região P. Um relógio digital, inserido “no meio do caminho”, pode funcionar, ao ser percorrido pela corrente elétrica associada a esse deslocamento de elétrons “extras”. O relógio recebe

os “pacotes” de energia que foram transferidos pela luz ao incidir sobre a junção PN. É essa energia que faz o relógio funcionar.

4.5. A dupla junção PN e o transistor BJT

O conteúdo desta seção não retoma nenhuma exploração ou experimento realizado na Parte I deste livro. Ele antecipa, teoricamente, um elemento importante dos circuitos e projetos sugeridos, a seguir, na Parte III – **Projetos e Aplicações**. Apesar disso, uma eventual dificuldade na compreensão do que apresentaremos aqui não impede a realização dos projetos propostos na Parte III. Dizemos isso por dois motivos: (i) a parte III envolve atividades práticas e pode ser desenvolvida sem um conhecimento teórico do funcionamento dos circuitos nela apresentados; (ii) o entendimento do funcionamento dos transistores, a nível teórico, envolve um investimento razoável de tempo e concentração. Mas, por que a compreensão teórica do funcionamento dos transistores é relativamente mais sofisticada do que aquela associada ao funcionamento dos diodos e LDRs?

Diodos e LDRs têm comportamento totalmente definido no ato de sua fabricação. Um transistor, todavia, que utiliza junções PN, tal como os diodos, mas é bastante flexível, já que seu comportamento pode ser alterado. Por ser flexível, o transistor pode, então, apresentar “respostas” variadas a diferentes “estímulos” nele aplicados.

Para fazer um transistor, basta unir três fatias de semicondutores dopados, fazendo um “sanduíche” de materiais, que pode apresentar duas configurações básicas: (i) duas camadas de material semicondutor tipo P, que envolvem uma camada de semicondutor tipo N

(FIG. 35a); ou (ii) duas camadas de material semicondutor tipo N, que envolvem uma camada de semicondutor tipo P (FIG. 35b).

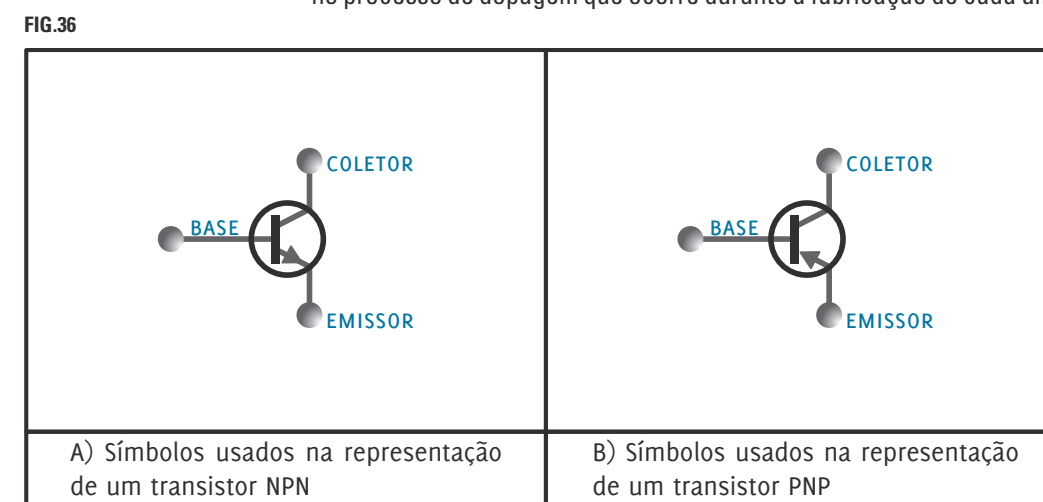
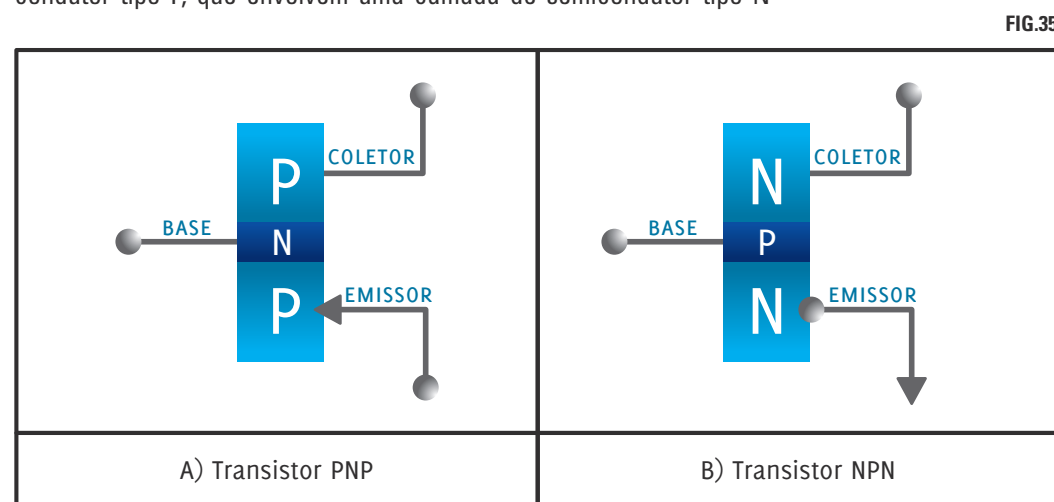
O primeiro “sanduíche” dá origem ao transistor PNP e o segundo, ao transistor NPN. Os dispositivos semicondutores NPN ou PNP são conhecidos como transistores bipolares de junção – cuja sigla, em inglês, é BJT –, um nome que se deve ao fato de haver, nesses transistores, duas junções PN. Nas análises que se seguem, o transistor NPN vai ser usado como exemplo, mas tudo o que se disser será válido, com pequenas adaptações, no que diz respeito a um transistor PNP.

Embora a intenção, nesta seção, seja a de tratar apenas dos transistores bipolares de junção, convém lembrar que há outros tipos, como os transistores de efeito de campo – *Field Effect Transistor*, ou, simplesmente, FET –, predominantes nos circuitos eletrônicos dos computadores, e também os transistores unijunção, constituídos por apenas uma junção e empregados em circuitos osciladores e temporizadores.

Uma característica importante de um BJT, compartilhada por todos os demais tipos de transistores, é a presença de três terminais metálicos, cada um deles ligado a um dos três semicondutores dopados que o compõe.

As três camadas de material semicondutor reunidas na confecção de um BJT apresentam diferenças importantes. A camada ligada ao terminal chamado de coletor tem espessura maior que as demais; a ligada ao terminal chamado de base apresenta uma espessura cerca de mil vezes menor; e a ligada ao terminal chamado de emissor tem espessura intermediária.

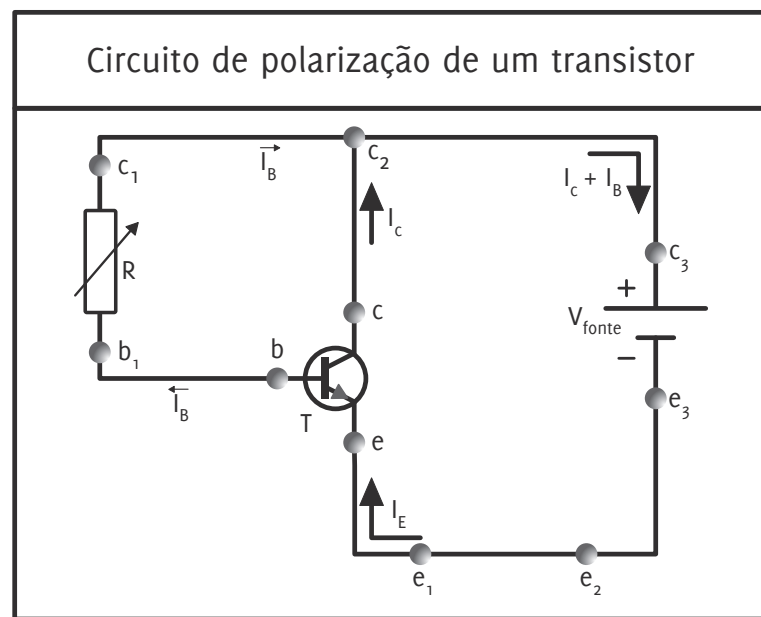
Além dessa variedade na espessura, há uma diferença importante no processo de dopagem que ocorre durante a fabricação de cada uma



dessas três camadas. A camada ligada ao emissor é a mais fortemente dopada, o que significa que esse terminal possui um grande número de portadores de carga que podem ser injetados nas outras camadas, como se verá a seguir.

Essa é a razão de, no símbolo criado para representar o transistor BJT, mostrado na FIG. 36, o emissor ser identificado por uma seta e, também, de a corrente elétrica no terminal emissor (I_E) ser maior que as existentes nos terminais coletor (I_C) e base (I_B).

A camada ligada à base é a mais fracamente dopada e, por isso, há, nela, menor disponibilidade de portadores de carga e maior resistência elétrica, quando comparada com as outras duas camadas. Como resultado, a corrente elétrica na base (I_B) é menor que as que circulam nos dois outros terminais (I_C e I_E), como ilustrado na FIG. 37. O circuito apresentado nessa figura é conhecido como “circuito de polarização”. Quando polarizado desse modo, o transistor pode ser usado como amplificador.



No circuito apresentado na FIG. 37, uma leve alteração na resistência R vai provocar uma pequena mudança na corrente I_B , que circula no terminal base, e uma grande variação na corrente I_C , que circula no terminal coletor. Para entender como isso é possível, é necessário, primeiro, compreender como a tensão elétrica, no circuito mostrado, afeta o comportamento das camadas emissor, coletor e base. Assim,

FIG. 37: Circuito utilizado para polarizar um transistor NPN (representado na figura por um círculo próximo à letra T). Esse circuito contém uma fonte de tensão (V_{fonte}) e um resistor variável (R). As correntes elétricas formadas pelo deslocamento de elétrons que circulam nos diversos trechos do circuito estão representadas pelos símbolos I_C , I_B e I_E (onde $I_E = I_C + I_B$)



1. *Coulomb*: unidade de medida da carga elétrica no Sistema Internacional de Medidas que equivale à carga de $6,25 \cdot 10^{18}$ elétrons – ou seja, seis quintilhões e 250 quatrilhões de elétrons.

vamos retomar a analogia entre circuito hidráulico e circuito elétrico, iniciada na seção **O que acontece?** do experimento **O LED e as Células Fotovoltaicas**, na Parte I deste livro.

Essa analogia foi utilizada para comparar a função que uma bateria, ou qualquer outra fonte de tensão, exerce em um circuito elétrico à função de uma bomba de água em um circuito hidráulico. Como resultado, a tensão elétrica de uma bateria sobre as cargas elétricas móveis presentes no circuito ilustrado nessa figura foi, então, considerada análoga à pressão produzida pela bomba sobre a água.

Tanto a bomba de água quanto a fonte de tensão são responsáveis por promover a variação de energia potencial, que permite o funcionamento dos circuitos. No circuito hidráulico, a energia potencial gravitacional da água é elevada pela ação da bomba. Tal energia diminui, posteriormente, quando a água é usada para realizar trabalho e promover transformações de energia em um moinho de grãos.

No circuito elétrico, a energia potencial elétrica de cada **Coulomb**¹ de carga elétrica que “atravessa” a fonte de tensão (V_{fonte}) também é elevada. No circuito da FIG. 37 essa energia diminui quando os portadores de carga passam pela resistência elétrica R , presente no circuito. Por essa razão, diz-se que o potencial elétrico na extremidade b_1 do resistor R é diferente do potencial elétrico na extremidade c_1 .

A variação da energia potencial elétrica de cada Coulomb de carga elétrica que atravessa o resistor R dá origem a uma medida chamada de diferença de potencial, representada pelo símbolo V_{bc} (lê-se: diferença de potencial entre os pontos b e c). Nesse símbolo, o uso do V deve-se ao fato de que essa grandeza física é medida em Volts. Assim, quando se diz que a tomada de uma residência oferece uma “voltagem” de 127 V ou de 220 V, está-se dizendo que existe, entre os dois terminais da tomada, uma diferença de potencial igual a 127 V ou a 220 V.

Um detalhe muito importante para se poder compreender o circuito de polarização do transistor mostrado na FIG. 37 consiste em que só há diferença de potencial entre regiões de um circuito, em que energia elétrica se transforma em outras formas de energia. Sendo assim, nesse circuito: (i) o ponto c tem o mesmo potencial que os pontos c_1 , c_2 e c_3 ; (ii) o ponto b tem potencial correspondente ao do ponto b_1 ; (iii) o ponto e tem o mesmo potencial que os pontos e_1 , e_2 e e_3 .

Disso, segue-se que os potenciais elétricos nos pontos c – ligado ao terminal coletor do transistor – e c_1 – ligado a um dos terminais do resistor R – são iguais ao potencial elétrico do polo positivo da fonte de tensão. Esse potencial é, certamente, maior que o potencial elétrico

no ponto b_1 e, portanto, maior que o potencial no ponto b , ligado ao terminal base do transistor. Considerando-se que o terminal coletor do transistor é uma fatia de semiconductor dopado do tipo N – com cargas negativas em excesso – e que o terminal base é uma fatia de semiconductor dopado do tipo P – com cargas positivas em excesso –, chega-se à conclusão de que a junção PN, formada pela união da base e do coletor, está inversamente polarizada.

Uma consulta à seção 4.3 desta parte do livro, denominada *Junção formada por materiais dopados, polaridade dos diodos e emissão de luz nos LEDs*, pode ajudá-lo (la) a relembrar as características de uma junção PN inversamente polarizada. Nesse caso, conclui-se que a circulação de elétrons do terminal coletor para o terminal base é dificultada pelo fato de a junção coletor/base estar inversamente polarizada.

No circuito apresentado na FIG. 37, o terminal ligado ao emissor do transistor (ponto e do circuito) está ligado diretamente ao terminal negativo da fonte de tensão e, por essa razão, nenhum outro ponto do circuito pode ter potencial tão negativo quanto ele. Assim sendo, o potencial elétrico do ponto b , embora negativo em relação ao ponto c , é indubitavelmente positivo em relação ao ponto e . A principal consequência desse fato consiste em que a junção PN, formada pela união do emissor à base, se encontra diretamente polarizada.

Portanto, como em todo e qualquer diodo diretamente polarizado, a polarização direta da junção formada pela união do emissor à base facilita a circulação, nela, de cargas elétricas.

Todavia, como a base é uma região muito estreita e está negativamente polarizada em relação ao coletor, há apenas um pequeno fluxo de elétrons saindo pelo terminal b , ligado à base, que constitui a corrente I_b , representada no circuito da FIG. 37.

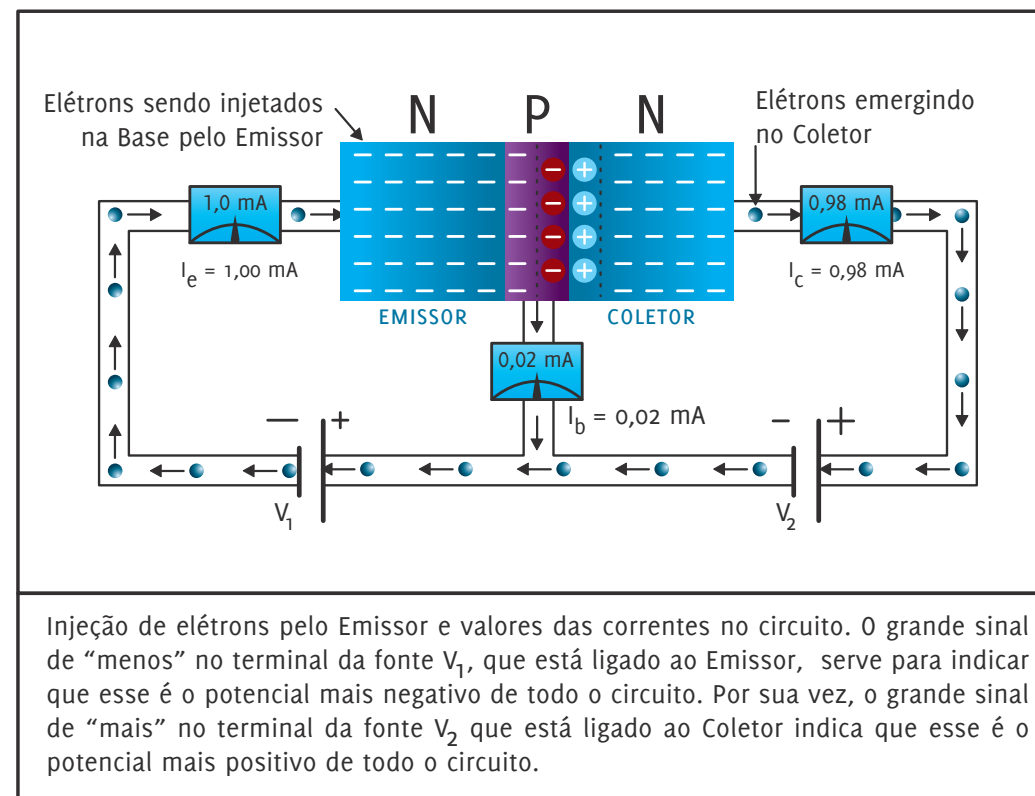
Assim, a maior parte dos elétrons que saem do emissor e correspondem à corrente elétrica I_e , representada no circuito da figura 37, penetra no coletor e não na base, como mostrado na FIG. 38. A corrente I_c que sai do terminal ligado ao coletor torna-se, desse modo, quase igual à corrente I_e .

Embora os circuitos reais usados para polarizar os transistores se pareçam mais com o circuito ilustrado na FIG. 37 que com o mostrado na FIG. 38, esta última figura é, conceitualmente, importante para se poder entender por que uma variação na pequena corrente de base (I_b) provoca uma grande mudança na corrente do emissor (I_e) e, conseqüentemente, na corrente do coletor (I_c).

Para melhor compreender esse aspecto do funcionamento de um transistor, observe que, na junção da base ao coletor mostrada FIG. 38,

há cargas elétricas estáticas – envolvidas, nessa figura, por pequenos círculos. Essas cargas estáticas resultam da polarização invertida a que é submetida a junção.

FIG.38



As cargas estáticas mostradas na FIG. 38 formam uma barreira à circulação de corrente do emissor para o coletor. Ainda assim, muitos elétrons injetados pelo emissor vencem essa barreira e penetram no coletor. Para isso, contudo, é importante haver uma corrente, mesmo que pequena, que saia do terminal ligado à base. Essa “fuga” de elétrons pelo terminal da base impede o acúmulo de mais cargas negativas na barreira criada na junção base/coletor e facilita a “injeção de elétrons” promovida pelo emissor. Por isso, se a corrente de base for igual a zero, as correntes I_e e I_c também o serão. Esse comportamento dá origem a uma importante aplicação dos transistores, já que, por meio desses dispositivos eletrônicos, ao anular, ou permitir, a circulação de corrente no circuito ligado à base, se pode ligar, ou desligar, os circuitos conectados aos terminais emissor e coletor.

Quando a corrente I_B aumenta um pouco, o “estímulo” para que o emissor injete elétrons na base e, por conseguinte, no coletor aumenta drasticamente. Esse efeito provoca um aumento significativamente elevado tanto na corrente I_E quanto na corrente I_C . De modo simétrico, uma leve diminuição em I_B gera uma queda amplificada não só em I_E mas também em I_C .

Essa possibilidade de promover grandes mudanças na corrente que passa pelos elementos do circuito ligados ao terminal coletor, a partir de pequenas mudanças na corrente que passa pelos elementos do circuito ligados ao terminal base, constitui uma das principais aplicações dos transistores do tipo BJT. Diz-se, nesse caso, que o transistor funciona como um amplificador de sinais. No caso do circuito representado na FIG. 37, como já se disse, mudanças na corrente I_B podem ser provocadas por uma pequena variação no valor da resistência R .

Grande parte dos sensores utilizados em eletrônica – microfones e sensores de temperatura ou de luminosidade, entre outros – é constituído por dispositivos muito sensíveis, que fornecem sinais elétricos de pequena intensidade. Esses sinais não são, portanto, capazes de acionar diretamente determinados aparelhos – como alto-falantes, motores e outros conversores de energia elétrica. Contudo, se forem aplicados ao terminal base de um transistor BJT, os pequenos sinais gerados por dispositivos sensíveis podem ser amplificados, para gerar um grande sinal elétrico entre os terminais coletor e emissor. Esse sinal de maior intensidade é apropriado para acionar aparelhos de maior potência como motores e alto-falantes.