

TEMAS ATUAIS DE FÍSICA

APLICAÇÕES DA FÍSICA QUÂNTICA:
DO TRANSISTOR
À NANOTECNOLOGIA

EDITORA LIVRARIA DA FÍSICA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Diretoria da SBF (Mandato de Julho de 2003 - Julho de 2005)

Presidente Adalberto Fazzio - USP

Vice-Presidente Paulo Murilo Castro de Oliveira - UFF

Secretário Geral Lívio Amaral - UFRGS

Secretário Oscar Nassif de Mesquita - UFMG

Tesoureiro Eudenilson Lins de Albuquerque - UFRN

Secretária para Assuntos de Ensino Deise Miranda Vianna - UFRJ

Comissão Editorial da Série

Carlos Eduardo Aguiar - UFRJ

Deise Miranda Vianna - UFRJ (coordenadora)

Fernanda Ostermann - UFRGS

Nelson Studart - UFSCar

Oscar Nassif de Mesquita - UFMG

Oto Néri Borges - UFMG

Eduardo de Campos Valadares
Esdras Garcia Alves
Alaor S. Chaves

Aplicações da Física Quântica: do Transistor à Nanotecnologia

Editora Livraria da Física
Sociedade Brasileira de Física
São Paulo, 1.^a edição, 2005
Ano Mundial da Física

Copyright © 2005: Editora Livraria da Física

Editor responsável: José Roberto Marinho
Capa: Arte Ativa
Diagramação: Arnaldo Gomes de Oliveira Filho
Desenhos: Cláudio Roberto
Revisão e editoração: Carlos Irineu da Costa
Impressão: Gráfica Paym

Dados de Catalogação na Publicação (CIP) Internacional
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Valadares, Eduardo de Campos

Aplicações da física quântica: do transistor à nanotecnologia / Eduardo de Campos Valadares, Alaor S. Chaves, Esdras Garcia Alves. – 1.^a ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. - (Temas atuais de física)

Bibliografia.

1. Física 2. Teoria quântica I. Chaves, Alaor S. . II. Alves, Esdras Garcia. III. Título.

04-7534

CDD-539

Índices para catálogo sistemático:
Física quântica 539

ISBN : 85-88325 – 32-2

Editora Livraria da Física

Telefone : 0xx11 – 3936 3413

Fax : 0xx11 – 3815 8688

Página na internet : www.livrariadafisica.com.br

Apresentação

Por iniciativa da Sociedade Brasileira de Física, está sendo lançada a série *Temas Atuais de Física*, integrada por uma coleção de livros que serão publicados gradativamente. Alguns membros desta instituição, pesquisadores nas áreas de Física e de Ensino de Física, que há algum tempo perceberam a necessidade do lançamento desta obra, foram indicados para compor uma Comissão Editorial encarregada da supervisão dos trabalhos de edição como um todo e da seleção dos autores, também pesquisadores nas áreas mencionadas. Os temas, selecionados pelos autores, cobrem, de maneira acessível, os principais tópicos deste surpreendente campo do conhecimento, oferecendo aos professores uma sólida introdução à Física desenvolvida no século XX. O principal intuito da coleção é o de suprir eventuais deficiências na formação dos professores, muito comuns nesta área. A obra contempla, ainda, as propostas dos Parâmetros Curriculares Nacionais, do MEC, alertando os docentes para as sugestões contidas neste documento.

Beatriz Álvares Alvarenga

Prólogo

A tecnologia tem expandido vertiginosamente as suas fronteiras e o seu impacto na sociedade desde o advento do transistor, um dispositivo básico em inúmeras aplicações presentes em nosso dia-a-dia, como rádios, tvs e computadores, só para citar alguns exemplos. A invenção do laser representou outro salto tecnológico importante com uma infinidade de aplicações práticas, incluindo telecomunicações, usos em medicina e diversas aplicações industriais e no setor de serviços. Estes avanços foram possíveis graças às descobertas sobre a natureza quântica da matéria e da luz no decorrer do século XX, que também abriram caminho para a Nanociência e a Nanotecnologia, atualmente em rápida expansão.

Nano, que significa “anão” em grego, quer dizer também um bilionésimo. Um nanômetro (1 nm), por exemplo, corresponde a um bilionésimo (10^{-9}) do metro e um nanosegundo corresponde a um bilionésimo do segundo. O diâmetro de um átomo é cerca de 0,2 nm, enquanto o de um fio de cabelo é de aproximadamente 50 000 nm. Já as dimensões típicas de um vírus se encontram na faixa de 5 a 100 nm. O nanomundo abrange desde átomos a objetos com cerca de 100 nm. Esse é o universo da nanociência e da nanotecnologia.

No presente livro são introduzidos brevemente conceitos básicos da Física Quântica e a sua utilização na descrição do comportamento da matéria e da luz, que constituem a base da Nanotecnologia. A partir daí são discutidos vários fenômenos e dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, incluindo o transistor, lasers convencionais e o nanolaser, que se encontra na esfera do nanomundo.

Procuramos abordar as aplicações da Nanociência e da Nanotecnologia que tenham impacto direto no dia-a-dia das pessoas. Os principais alvos da Nanociência e da Nanotecnologia são dispositivos, sistemas vivos e processos envolvendo dimensões que vão de cem bilioné-

simo a um décimo de bilionésimo do metro. Isso inclui os blocos fundamentais que constituem os organismos vivos, assim como estruturas produzidas artificialmente. Novas aplicações baseadas nas propriedades especiais de sistemas inéditos são apresentadas de forma vívida e acessível.

O boom atual da Nanociência e da Nanotecnologia foi desencadeado nas três últimas décadas. Uma combinação de novas técnicas de síntese de moléculas e sólidos e de equipamentos que permitem a visualização e a manipulação da matéria na escala atômica – os chamados microscópios de varredura por sonda (SPM) –, foi decisiva. Apresentamos os princípios de operação desses equipamentos e algumas de suas aplicações. Técnicas de crescimento de filmes finos com controle da espessura em escala atômica e a litografia por feixe de elétrons também fazem parte de nosso roteiro.

A Nanociência e Nanotecnologia estão se tornando realidades palpáveis graças à auto-organização na escala nanométrica. Esse modo muito promissor de se produzir nanosistemas é apresentado e comparado com fenômenos mais convencionais, como o crescimento de cristais. Uma ampla variedade de aplicações associadas à Nanotecnologia, como nano-eletrônica, materiais avançados, biotecnologia e diagnóstico médico proporcionam um painel representativo das várias áreas de pesquisa que estão forjando a nossa próxima era tecnológica.

Demonstrações, experimentos simples e alguns projetos mais avançados fazem parte de nossa abordagem da Nanotecnologia. Esperamos que eles sejam instigantes e inspirem os leitores a explorarem na prática as imensas oportunidades associadas à tecnologia atual.

Sumário

Apresentação	v
Prólogo	vii
1 A Pré-História da Nanotecnologia	1
1.1 Elétrons, Átomos, Moléculas e Sólidos Cristalinos	1
1.2 A Descoberta do Elétron	1
1.3 O Modelo Atômico de Thomson	3
1.4 A Experiência de Rutherford	3
1.5 O Modelo de Bohr	4
1.6 A Mecânica Quântica: a Linguagem da Nanotecnologia	6
1.7 Moléculas e Sólidos	7
1.8 Metais, Semicondutores e Isolantes	7
1.9 Experimentos e Projetos Propostos	10
1.9.1 Variação da Resistência Elétrica de um Fio Me- tálico Aquecido	10
1.9.2 Espectrômetro de CD	11
1.9.3 Pêndulos Acoplados	13
2 Dispositivos Semicondutores e os Limites da Microele- trônica	15
2.1 A Versatilidade dos Semicondutores	15
2.2 Dopagem: Elétrons e Lacunas sob Medida	16
2.3 Junção pn	18
2.4 Diodos	19
2.5 LEDs (Light Emitting Diodes)	20
2.6 Resistores Elétricos Semicondutores Dependentes da Luz (LDR)	21
2.7 O Transistor	22

2.8	Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET)	23
2.9	MOSFETS e “Átomos Artificiais”	25
2.10	Circuitos Integrados	26
2.11	Processo Planar	27
2.12	Fotolitografia e Litografia por Feixe de Elétrons	28
2.13	Pincéis de Luz	30
2.14	Pincéis de Elétrons	30
2.15	Inimigos Gigantescos	32
2.16	Experimentos Propostos	33
3	Dos Lasers “Gigantes” a Nanolasers	35
3.1	Encolhendo os Lasers	35
3.2	Amplificação da Luz pela Emissão Estimulada de Radiação (Laser)	35
3.3	Mecanismos de Geração de Luz em um Laser	37
3.4	Inversão de População e os Diversos Tipos de Laser	38
3.5	Aplicações dos Lasers	44
3.6	“Usinando Nanoestruturas”: Primeiros Passos	45
3.7	Barreiras de Potencial e Poços Quânticos	46
3.8	Lasers de Poços Quânticos	47
3.9	Lasers de Fios Quânticos e de Pontos Quânticos	48
4	O Potencial Gigantesco do Infinitamente Pequeno	51
4.1	O Nanomundo em Evidência	51
4.2	O que Muda no Nanomundo	52
4.3	A Nanotecnologia ao Longo da História	53
4.4	Instrumentos que Viabilizaram a Nanociência e a Nanotecnologia	54
4.5	A Auto-Organização nas Várias Escalas	56
4.6	Auto-Organização e Estruturas Nanométricas	57
4.7	Zeólitas: Nanotecnologia Aplicada à Produção de Petróleo	58
4.8	Nanotubos de Carbono e suas Múltiplas Aplicações	59
4.9	Obtenção de Água Doce com Nanotubos	62
4.10	Filamentos para Lâmpadas a Base de Nanotubos de Carbono	63
4.11	Nanotubos de Outros Elementos e Compostos	64
4.12	Magneto-Resistência Gigante: Memórias de Terabytes	64
4.13	Sistemas Eletromecânicos Nanométricos	66
4.14	Impacto da Nanotecnologia na Medicina	67

4.15 Disponibilizando Drogas de Forma Controlada	67
4.16 Nanopartículas Magnéticas e Tumores	68
4.17 Nanotecnologia e o Meio-Ambiente: Uso de Partículas Magnéticas Porosas	69
4.18 De Nanopasso em Nanopasso, um Salto Gigantesco	69
A Projetos Avançados, Circuitos e <i>Layouts</i>	71
A.1 Sistema de Iluminação Pública	71
A.2 Sistema de Comunicação Óptica	73
A.3 Projeto: Eletroscópio	78
B Como Fabricar Placas de Circuito Impresso	82

Capítulo 1

A Pré-História da Nanotecnologia

1.1 Elétrons, Átomos, Moléculas e Sólidos Cristalinos

O funcionamento do transistor e do laser, bem como o de vários outros dispositivos eletrônicos e opto-eletrônicos, baseia-se na existência de elétrons e na natureza quântica da matéria e da luz. Ao final do século XIX, deu-se a descoberta do elétron e, na primeira metade do século XX, foi formulada a Mecânica Quântica, a linguagem que descreve o comportamento de elétrons, átomos isolados e arranjos de átomos formando moléculas, líquidos e sólidos.

O desenvolvimento do transistor, do laser e de um sem-número de dispositivos opto-eletrônicos e eletrônicos presentes no nosso dia-a-dia foi possível graças aos avanços em ciência básica que os precederam. Neste capítulo apresentamos, de forma sucinta, as bases teóricas de grande parte da tecnologia atual.

1.2 A Descoberta do Elétron

Há mais de dois mil anos, os filósofos gregos Leucipo e Demócrito especularam que a matéria era constituída de partículas indivisíveis que eles denominaram átomos. Todavia, somente no início do século

XX a existência dos átomos pôde ser comprovada com bases científicas. Vários experimentos demonstraram que os átomos apresentam uma estrutura que pode ser modificada por ações externas. Um dos passos importantes nessa direção foi a descoberta do elétron, em 1897, pelo físico inglês J. J. Thomson.

Thomson utilizou, em seus experimentos, uma versão primitiva dos atuais tubos de televisão e de lâmpadas néon, o chamado tubo de raios catódicos. Esse dispositivo foi também o precursor das válvulas eletrônicas que dominaram a tecnologia de rádios e transmissores até o advento do transistor. Trata-se de um tubo de vidro com dois eletrodos metálicos (ânodo e cátodo), sendo quase todo o ar em seu interior removido com uma bomba de vácuo (veja Figura 1.1). Ao ser aplicada uma alta tensão entre os dois eletrodos observa-se um clarão no tubo, os chamados raios catódicos. Com um vácuo ainda maior, os raios catódicos, ao atingir as paredes de vidro, produzem luz fluorescente. Além disso, esses raios podem ser defletidos com um imã (veja Figura 1.1b).

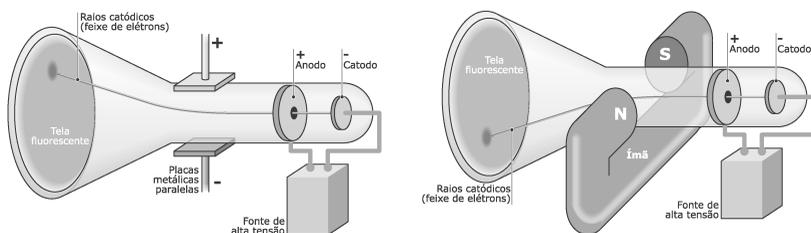


Figura 1.1. (a) Um campo elétrico intenso criado entre as duas placas deflete os raios catódicos. (b) O campo magnético do ímã também deflete os raios catódicos.

Inicialmente Thomson tentou coletar a carga dos raios catódicos utilizando um eletrômetro, um dispositivo que acusa a presença de carga elétrica (veja o projeto de uma versão atual desse dispositivo que está sugerido no Apêndice A), ao mesmo tempo que aproximava um ímã do tubo. Como o eletrômetro não acusava a presença de carga elétrica quando os raios catódicos eram desviados dele, Thomson concluiu que era impossível separar as cargas elétricas dos raios catódicos. Ele também constatou que os raios catódicos podiam ser desviados por um campo elétrico produzido entre duas placas metálicas (veja Figura 1.1a), quando um vácuo suficiente era produzido no interior do tubo.

Finalmente, combinando o efeito de campos elétricos e magnéticos, Thomson mediu a razão carga/massa e/m dos raios catódicos. Estes e outros experimentos demonstraram que esses raios eram dotados de uma carga negativa e possuíam uma massa muito menor que a dos gases conhecidos.

1.3 O Modelo Atômico de Thomson

A partir de seus resultados experimentais, Thomson formulou a sua hipótese mais audaciosa. Ele supôs que as partículas dos raios catódicos, denominadas elétrons, constituíam um novo estado da matéria, uma estrutura muito mais fina e fundamental que os gases conhecidos. Segundo ele, os elétrons seriam a base de todos os elementos químicos. Seu modelo para o átomo consistia em milhares de elétrons que se moviam como um enxame de abelhas em uma nuvem desprovida de massa e que possuía carga positiva, de modo que o conjunto seria eletricamente neutro.

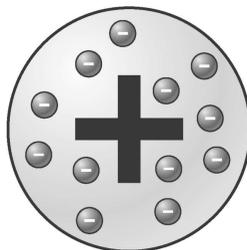


Figura 1.2. O átomo segundo Thomson.

1.4 A Experiência de Rutherford

Rutherford demonstrou que o modelo de Thomson era irrealista. Para tanto ele utilizou um feixe de partículas alfa, emitidas por polônio radioativo, que incidia em uma fina folha de ouro. Rutherford constatou que a maioria dessas partículas atravessava a placa sem sofrer alterações em sua trajetória. Todavia, uma pequena fração delas era refletida de volta. Tendo em vista esses resultados, Rutherford propôs um novo modelo para o átomo. Neste modelo o átomo possuía um pequeno núcleo maciço com carga positiva, em torno do qual orbitavam apenas alguns elétrons, como se o átomo fosse um sistema solar em miniatura.

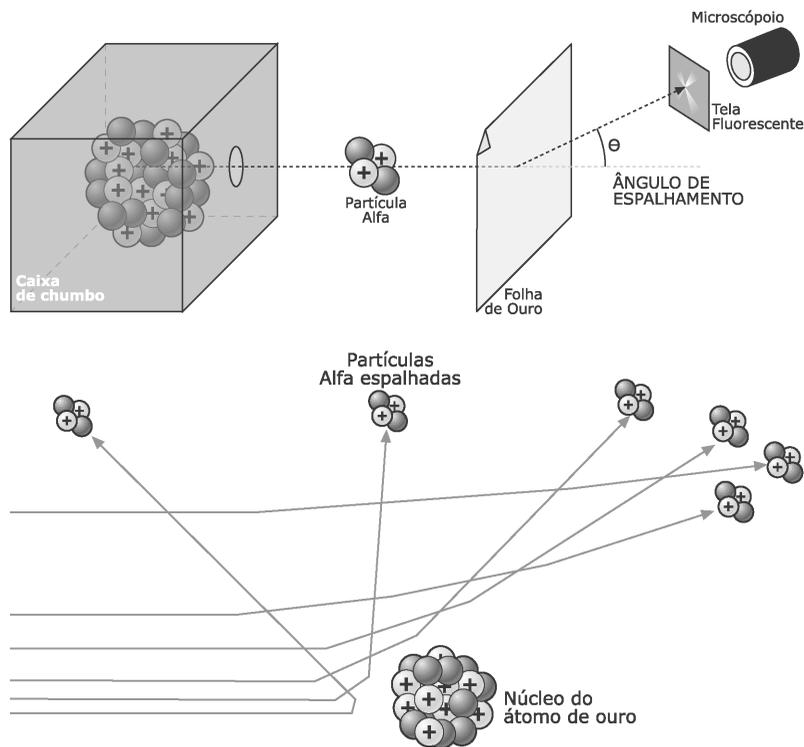


Figura 1.3. Experimento concebido por Rutherford que permitiu identificar o núcleo atômico a partir dos desvios de partículas alfa ao incidirem em uma fina folha de ouro.

1.5 O Modelo de Bohr

Do ponto de vista do eletromagnetismo clássico, o modelo de Rutherford para o átomo seria instável. Os elétrons em órbita em torno do núcleo atômico, por estarem acelerados, emitiriam ondas eletromagnéticas, como ocorre em uma antena transmissora, e perderiam energia até colidir com o núcleo. Assim, a matéria seria instável, o que contrariaria todas as evidências.

Bohr supôs que as leis físicas que descrevem o mundo macroscópico não se aplicariam ao mundo atômico. Na virada do século XIX para o século XX, Max Planck já havia introduzido o conceito de energias *discretas* para descrever o processo de interação entre radiação e matéria.

Para explicar o processo de absorção de radiação pela matéria, Einstein atribuiu à luz o caráter de partícula, mais tarde denominada de fóton, cuja energia E é proporcional à frequência f da onda eletromagnética correspondente ($E = hf$, onde h é a constante de Planck).

Bohr incorporou essas noções para descrever o átomo de hidrogênio, que possui um único elétron. Segundo Bohr, esse elétron só poderia se encontrar em certas órbitas circulares associadas a números inteiros ($n = 1, 2, 3, \dots, \infty$). A emissão de um fóton se daria se o elétron passasse de uma órbita de maior energia para outra de menor energia. A energia do fóton emitido seria igual à diferença de energia das duas órbitas. A absorção de luz corresponderia ao processo inverso. Com isso o espectro de emissão do átomo seria formado por linhas discretas, em contraste com o espectro contínuo da luz do Sol. O espectrômetro proposto ao final do capítulo permite observar o espectro discreto na faixa do visível de alguns gases, presentes nas lâmpadas dos postes de iluminação pública (lâmpadas de mercúrio e de sódio) e em lâmpada fluorescentes.

O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio fornece energias expressas em eV (energia adquirida por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de 1 volt) dadas por $E_n = E_0/n^2$, em que

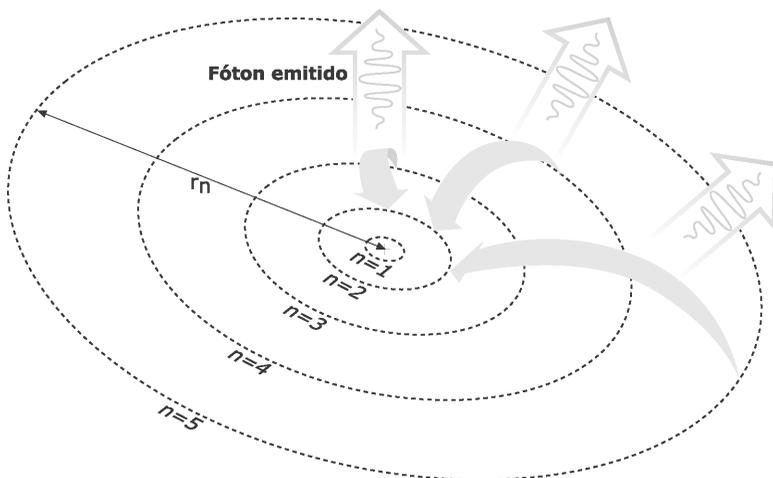


Figura 1.4. Transições previstas pelo modelo de Bohr, consistentes com os dados espectroscópicos disponíveis na época.

$E_0 = -13,6$ eV. O estado fundamental do elétron ($n = 1$) corresponde à órbita de mais baixa energia, e $n = \infty$ define o limiar do contínuo, a partir do qual o elétron se encontraria “livre” da influência do núcleo atômico (átomo ionizado), podendo a partir daí ter energias arbitrárias. Esses resultados estavam em ótima concordância com o espectro do hidrogênio, obtido com grande precisão. O sucesso desse modelo impulsionou várias pesquisas que culminaram com a formulação da Mecânica Quântica, a descrição atual do mundo atômico.

1.6 A Mecânica Quântica: a Linguagem da Nanotecnologia

O modelo de Bohr pressupõe que os elétrons dos átomos descrevem órbitas bem definidas em torno do núcleo atômico, assim como os planetas em torno do Sol. De Broglie sugeriu que o elétron, assim como a luz, se comporta como onda e também como partícula. A natureza dual do elétron é incompatível com a idéia de órbitas. O princípio da incerteza de Heisenberg, um dos pilares da Mecânica Quântica, estabelece que é impossível se determinar simultaneamente a posição e o momento do elétron, assim como o valor preciso de sua energia em um dado instante. Schrödinger introduziu uma equação de onda não-relativística (válida apenas para velocidades muito menores que a velocidade da luz no vácuo), que associa ao elétron uma função chamada função de onda, expressa em termos das coordenadas espaciais $\mathbf{r} = (x, y, z)$ e do tempo t . Em geral, $\Psi(\mathbf{r}, t)$ é um número complexo e portanto não pode ser associado a uma grandeza física mensurável. Somente o módulo quadrado de $\Psi(\mathbf{r}, t)$, $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2$, tem significado físico e é interpretado como a densidade de probabilidade do elétron. Isso significa que a probabilidade do elétron ser encontrado em um dado instante t em um pequeno volume ΔV em torno de um ponto com coordenadas (x, y, z) é igual ao produto $|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 \Delta V$.

Toda equação de onda fornece um espectro discreto de frequências para ondas confinadas espacialmente (ondas estacionárias), como ocorre na corda de um violão e em um tambor. A equação de Schrödinger aplicada a elétrons confinados, por exemplo, ligados a núcleos atômicos, fornece um espectro discreto de energias. Essa equação é útil para se determinar, além do espectro de átomos com mais de um elétron, o espectro de moléculas e sólidos cristalinos, que envolvem um número enorme de núcleos atômicos e de elétrons.

Além de massa e carga, o elétron possui outro atributo, o “spin”. Tanto um campo elétrico quanto um campo magnético atuam sobre a carga do elétron. Além de atuar sobre a carga do elétron, o campo magnético atua sobre seu spin. Os núcleos atômicos são constituídos de partículas de carga positiva, os prótons, e de partículas sem carga, os nêutrons, cujas massas são cerca de 1800 vezes maiores que a do elétron.

As regularidades exibidas pelos diversos átomos presentes na tabela periódica podem ser entendidas considerando-se as regras da Mecânica Quântica e as interações eletromagnéticas entre os elétrons do átomo e deles com o núcleo atômico. O espectro discreto de emissão e absorção de luz de um átomo é característico do mesmo e permite identificar os elementos químicos e seus íons (veja o projeto “Espectrômetro de CD”, ao final do capítulo).

1.7 Moléculas e Sólidos

Dois ou mais átomos podem se ligar formando uma molécula estável. As ligações entre átomos são favorecidas quando a energia do conjunto se torna menor que a soma das energias de cada átomo isolado.

Quando uma molécula é formada a partir de átomos com vários elétrons, aqueles mais fortemente ligados aos núcleos originais são pouco afetados. Contudo, os elétrons mais externos, denominados **elétrons de valência**, que se encontram mais fracamente ligados ao núcleo atômico, têm as suas funções de ondas distorcidas à medida que os átomos se aproximam. Os elétrons de valência são os responsáveis pelas ligações químicas. Com isso, a molécula passa a ter novos níveis de energia associados aos elétrons da molécula responsáveis pelas ligações químicas e a modos vibracionais e/ou rotacionais (veja a analogia com pêndulos nos experimentos e projetos propostos ao final do capítulo).

No caso de um sólido, as múltiplas interações entre os átomos distorcem os níveis discretos dos átomos individuais, dando origem a faixas de energia (“bandas”), separadas por bandas “proibidas”, mais conhecidas como “*gaps*”.

1.8 Metais, Semicondutores e Isolantes

A característica mais marcante dos metais (por exemplo, ouro, prata, cobre, alumínio, chumbo, etc) é que eles são bons condutores de ele-

tricidade à temperatura ambiente, ou seja, apresentam baixa resistividade elétrica, ρ , que é uma característica do material. A resistividade ρ está relacionada com a resistência elétrica R de um fio de comprimento L e área transversal A através da relação $R = \rho L/A$. Todavia, com o aumento da temperatura a sua resistividade aumenta (veja experimento com lâmpada de filamento ao final deste capítulo). Já os semicondutores (por exemplo, silício, germânio, selênio e telúrio, arseneto de gálio, seleneto de zinco, etc) apresentam uma resistividade comparativamente bem maior à temperatura ambiente. Ao contrário do que ocorre nos metais, a resistividade elétrica dos semicondutores diminui à medida que a sua temperatura aumenta.

Metais e semicondutores se diferenciam também pelo número de elétrons livres disponíveis para a condução elétrica. Nos metais, esse número é da ordem de 10^{22} elétrons por cm^3 , ou seja, cada átomo do material contribui com cerca de um elétron. Já nos semicondutores o número de elétrons livres é bastante reduzido, cerca de um elétron para cada 10^3 a 10^{10} átomos do cristal, o que significa 10^{12} a 10^{19} elétrons livres por cm^3 . Os materiais isolantes, por sua vez, usualmente não dispõem de elétrons livres, por isso não conduzem eletricidade, mesmo a temperaturas elevadas.

O comportamento elétrico dos diversos materiais pode ser compreendido, em linhas gerais, a partir do conceito de bandas de energia e utilizando-se o princípio de exclusão de Pauli, que regula a distribuição dos elétrons nas bandas. De acordo com esse princípio, se uma banda fica cheia, a banda seguinte passa a ser ocupada, como em um estacionamento de carros com vários andares. Uma vez ocupada uma vaga, ela deixa de existir.

Nos semicondutores “puros”, isto é, sem átomos estranhos presentes (“impurezas”), a zero grau absoluto, a mais baixa temperatura possível, os elétrons preencheriam totalmente a banda de mais baixa energia, denominada banda de valência, ficando vazia a banda seguinte, denominada banda de condução. Quando a temperatura do semiconductor é elevada, elétrons da banda de valência absorvem energia térmica da rede cristalina, o suficiente para alcançar a banda de condução, onde são livres para participar da condução elétrica. A vaga deixada na banda de valência, denominada *lacuna*, também contribui para a corrente elétrica.

A lacuna pode ser vista como uma vaga em um estacionamento muito cheio. O manobrista dos carros pode mudá-la de lugar quando transfere um carro que ocupava um espaço no estacionamento para