

Materiais e Dispositivos Eletrônicos



SERGIO M. REZENDE

Professor Titular
Departamento de Física
Universidade Federal de Pernambuco

*Materials e
Dispositivos Eletrônicos*



São Paulo – 2015
Editora Livraria da Física

Copyright © 2015 Editora Livraria da Física

4a. Edição

Editor: JOSÉ ROBERTO MARINHO
Assistente editorial: VÍCTOR PEREIRA MARINHO
Projeto gráfico e diagramação: CASA EDITORIAL MALUHY & CO.
Capa: ARTQUANTUM - ANTONIO M. A. MORAIS

*Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do
Acordo da Língua Portuguesa.*

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

Rezende, Sergio M.

Materiais e Dispositivos Eletrônicos / Sergio M. Rezende.
- 4a. ed. - São Paulo : Editora Livraria da Física, 2015.

Bibliografia.

ISBN 978-85-7861-359-4

1. Aparelhos e dispositivos eletrônicos 2. Eletrônica I. Título.

15-07490

CDD-621.381

Índices para catálogo sistemático:

1. Materiais e dispositivos : Engenharia eletrônica 621.381

ISBN 978-85-7861-359-4

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Todo esforço foi feito no sentido de se evitar erros. No entanto, utilize as informações apresentadas nessas notas apenas como guia. Não nos responsabilizamos por erros eventualmente cometidos na preparação desse manuscrito.

Impresso no Brasil
Printed in Brazil



Editora Livraria da Física
Tel./Fax: +55 11 3459-4327 / 3936-3413
www.livrariadafisica.com.br



PREFÁCIO

O advento da eletrônica e das tecnologias a ela relacionadas foi um dos principais responsáveis pelas grandes transformações econômicas e sociais verificadas no final do Século XX. O desenvolvimento destas tecnologias resultou de um enorme investimento em pesquisa básica e aplicada nos países industrializados. Como consequência, estes países passaram a concentrar a maior parte do conhecimento científico e tecnológico e, por conseguinte, têm hoje grande vantagem competitiva em relação aos demais numa economia globalizada.

O Brasil custou a criar condições para dominar as tecnologias relacionadas à eletrônica. O primeiro curso de engenharia eletrônica só foi criado na década de 1950, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Em 1958, e portanto dez anos após a descoberta do transistor, havia no País menos de dez físicos do Estado Sólido, a área da ciência que mais contribuiu para o desenvolvimento da eletrônica. Todavia, a partir da década de 1960, foi desencadeado um grande esforço de desenvolvimento científico e tecnológico no País. Foram criados grupos de pesquisa e cursos de pós-graduação em todas as áreas do conhecimento. Isto resultou numa melhoria considerável nos cursos de ciências e engenharia e, conseqüentemente, na qualidade dos recursos humanos formados para as universidades, as empresas e a sociedade em geral. Na primeira década do século XXI houve grandes avanços no Sistema Nacional de Ciência e Tecnologia, porém a despeito do progresso recente, ainda é necessário investir muito em ciência e tecnologia no Brasil.

Este livro tem como objetivo contribuir para o aumento da competência do País na eletrônica, que sem dúvida é uma tecnologia estratégica para o século XXI. Sua proposta básica é introduzir os materiais e dispositivos eletrônicos no estágio inicial dos cursos de graduação de engenharia elétrica, eletrônica e de computadores, física, informática e outros cursos de ciências e engenharia. Todos sabemos que a compreensão da finalidade e da operação básica dos dispositivos é essencial para projetar equipamentos eletrônicos. Entretanto, as disciplinas de dispositivos, quando constam dos currículos, exigem inúmeros pré-requisitos que acarretam sua apresentação em estágio avançado dos cursos universitários. Este livro possibilita o ensino de materiais e dispositivos eletrônicos a partir do 4º semestre dos cursos, pois apresenta também os conceitos básicos de ondas e de mecânica quântica em nível acessível aos estudantes.

O livro tem caráter introdutório e não entra nos detalhes técnicos mais específicos dos dispositivos e dos métodos de fabricação de materiais. Preferi sacrificar o detalhe em favor da abrangência, apresentando dispositivos e materiais baseados numa grande variedade de fenômenos. A ênfase é na conceituação física das propriedades dos materiais e dos

princípios básicos de funcionamento dos dispositivos. Procurei fazer uma apresentação bastante didática, visando principalmente motivar estudantes, como também profissionais de outras áreas, pela eletrônica. Esta abordagem dá ao livro um caráter original.

O material é adequado para dois semestres tradicionais de aulas. Os três primeiros capítulos apresentam a introdução básica de materiais para eletrônica e a conceituação física necessária para a compreensão dos fenômenos que neles ocorrem. Nesta parte o conceito de onda é bastante explorado, pois ele desempenha papel fundamental na mecânica quântica e, por conseguinte, nas propriedades de elétrons nos átomos e nos materiais. O Capítulo 4 é dedicado ao estudo das principais propriedades dos elétrons nos materiais, sendo, portanto, também básico para os capítulos seguintes.

A partir do Capítulo 5 os temas tornam-se mais específicos. Neste capítulo são apresentados as principais características dos materiais semicondutores. Os Capítulos 6 e 7 são dedicados aos princípios de funcionamento dos dispositivos fabricados com estes materiais, diodos, transistores e dispositivos correlatos, que hoje existem numa grande variedade de tipos e categorias. O diodo de junção e o transistor de junção são estudados em maior detalhe, uma vez que suas equações podem ser inteiramente deduzidas a partir das leis e equações básicas, apresentadas nos capítulos iniciais.

O Capítulo 8 apresenta as propriedades básicas da interação da luz com a matéria e uma variedade de dispositivos usados na conversão da luz em corrente elétrica, ou vice-versa. Estes dispositivos são responsáveis pela viabilização da opto-eletrônica e suas aplicações em diversas áreas da ciência, da medicina e da engenharia. Nesta categoria encontram-se os fotodetetores, como os fotodiodos e as células solares, os diodos emissores de luz (LED) e os lasers. Os princípios básicos dos lasers de semicondutores e das fibras ópticas são estudados em mais detalhe, em virtude de sua importância nas comunicações ópticas.

O Capítulo 9 é dedicado a materiais e dispositivos magnéticos, que desempenham um papel fundamental na eletrônica e que normalmente não são apresentados nos livros de dispositivos. Ênfase especial é dada aos processos de gravação magnética, uma vez que esta tecnologia tem importância grande nos computadores e em inúmeras aplicações da vida diária. Os dispositivos de ferrite para utilização nos sistemas de micro-ondas também têm destaque neste capítulo.

Finalmente, o Capítulo 10 apresenta uma variedade de materiais com aplicações específicas, porém muito importantes na gama cada vez maior de dispositivos eletrônicos. Entre eles destacam-se os materiais piezoelétricos, os dielétricos usados na opto-eletrônica, os eletretos e os materiais empregados na fabricação de telas de vídeo, as cerâmicas fosforescentes, os cristais líquidos e os condutores orgânicos. A última seção apresenta as propriedades básicas dos materiais supercondutores, que têm algumas aplicações práticas e têm potencial de futuras aplicações em eletrônica.

Os materiais e dispositivos apresentados neste livro são essenciais para o funcionamento dos equipamentos eletrônicos da atualidade e provavelmente dos que serão utilizados nas próximas décadas. Ao decidir escrevê-lo, no início da década de 1990, a motivação principal era suprir uma lacuna na literatura técnica em língua portuguesa. A primeira edição

foi publicada pela Editora da UFPE em 1996, com o título *A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. Pela reação inicial positiva que percebi em professores e estudantes, fiquei otimista com a possibilidade de vê-lo adotado como livro texto em diversos cursos. Isto realmente aconteceu. Tenho conhecimento que ele foi adotado em pelo menos quinze universidades brasileiras e uma em Portugal. Isto exigiu que a primeira edição fosse reimpressa duas vezes.

Na segunda edição, publicada pela Livraria da Física, retirei a palavra Física do título, pois percebi que em algumas livrarias o livro não era colocado nas seções de Engenharia, mas apenas nas de Física. A segunda edição também teve diversas novidades, como exemplos numéricos em todos os capítulos, seções com material novo, principalmente nos últimos capítulos, além de uma revisão completa do texto, com melhoria de algumas explicações e extensa correção de pequenos erros. Em relação à anterior, esta edição tem pouco material adicional, mas sofreu uma revisão detalhada para corrigir erros e atualizar a bibliografia e a ortografia. Ela também tem uma diagramação bem melhor que a edição anterior.

É com satisfação que agradeço a colaboração de vários colegas professores do Departamento de Física da UFPE e de outras universidades, feita por meio de sugestões diversas, críticas e revisões de textos. Sou grato em particular a Anderson Gomes, Antônio Azevedo, Celso Melo, Belita Koiler, Cid Araújo, Fernando Machado, Flávio Aguiar, José Marcílio Ferreira e Sergio Mascarenhas. Sou muito grato a Gilvani Holanda pelo competente e dedicado trabalho de digitação, a Carlos Marrocos pela confecção das figuras e a José Roberto Marinho, da Editora Livraria da Física, pela diagramação desta edição. Minhas atividades de pesquisa, e portanto as condições para a realização deste livro, não seriam possíveis sem o apoio financeiro do CNPq, FINEP, CAPES, MCT, FACEPE e da UFPE. Desde já deixo os agradecimentos antecipados a todos aqueles que, futuramente, me enviarem críticas e sugestões para a melhoria do livro (rezende@df.ufpe.br).

Não posso perder a oportunidade de deixar registrado o reconhecimento a Leo e Elsa, meus pais, que me educaram e sempre souberam me estimular, e a Cláudia, Isabel e Marta, minhas filhas, que ao se tornarem adultas, compreenderam bem porque não dediquei a elas mais tempo quando eram crianças.

Finalmente, meu maior agradecimento é para Adélia, que sempre me incentivou nesta empreitada, ajudou a esclarecer inúmeras dúvidas ortográficas e acompanhou com grande interesse cada uma das fases da elaboração das três edições do livro.

O AUTOR

Recife, 3 de outubro de 2013



NOTA SOBRE O AUTOR

Sergio Machado Rezende é formado em Engenharia Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1963) e tem os títulos de Mestre (1965) e de Doutor (1967) em Electrical Engineering-Materials Science, pelo Massachusetts Institute of Technology. Foi professor associado na PUC/RJ em 1968-1971, professor titular na UNICAMP em 1971 e desde 1972 é professor titular no Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco. Trabalha em pesquisa na área de Física de Materiais, com ênfase em Materiais Magnéticos e Propriedades Magnéticas, atuando em física experimental e física teórica, principalmente nos seguintes temas: magnetismo, magneto-óptica, materiais magnéticos, multicamadas magnéticas, materiais nanoestruturados e spintrônica. Orientou 36 teses de mestrado e de doutorado e publicou mais de 230 artigos científicos em revistas de circulação internacional. Em gestão de C&T foi Chefe do Departamento de Física e Diretor do Centro de Ciências Exatas e da Natureza da UFPE, Diretor Científico da FACEPE durante sua implantação, em 1990-1993, e Secretário de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco de 1995 a 1998 no Governo de Miguel Arraes. No período 2001-2002 foi Secretário do Patrimônio, Ciência e Cultura da Prefeitura de Olinda, cargo que deixou em Janeiro de 2003 para assumir a Presidência da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), do Ministério da Ciência e Tecnologia. Em julho de 2005 deixou a Presidência da FINEP para assumir o cargo de Ministro da Ciência e Tecnologia, cargo que exerceu até 31 de dezembro de 2010 quando encerrou o segundo mandato de Luiz Inácio Lula da Silva na Presidência da República. É membro da Academia Brasileira de Ciências, da Academia de Ciência dos Países em Desenvolvimento, da Sociedade Brasileira de Física, da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, da American Physical Society, e do Institute for Electrical and Electronic Engineers. Por suas atividades acadêmicas e científicas, recebeu em 1988 a ordem do Mérito Educativo concedida pelo Ministério da Educação; em 1995 foi agraciado com a Comenda da Ordem do Mérito Científico, categoria Grã-Cruz, concedida pelo Presidente da República; em 2001 recebeu, também do Presidente da República, o Prêmio Anísio Teixeira da CAPES; em 2006 recebeu o prêmio Bunge; em 2009 foi o único físico brasileiro escolhido pela American Physical Society para receber o “Outstanding Referee Award”; e em 2013 recebeu o prêmio de Ciência da Fundação Conrad Wessel.



SUMÁRIO

1. MATERIAIS PARA ELETRÔNICA 17

1.1 – Eletrônica e Física do Estado Sólido 17

1.2 – Ligações Atômicas 20

1.3 – Materiais Cristalinos 22

1.3.1 – Redes Cristalinas 22

1.3.2 – Estruturas Cristalinas Simples 25

1.4 – Materiais para Dispositivos Eletrônicos 26

1.4.1 – Monocristais 27

1.4.2 – Cerâmicas e Vidros 29

1.4.3 – Polímeros 30

1.4.4 – Cristais Líquidos 30

1.4.5 – Filmes Finos e Multicamadas 31

1.4.6 – Grafeno e Nanotubos de Carbono 34

Referências 35

Problemas 35

2. ONDAS E PARTÍCULAS NA MATÉRIA 37

2.1 – Ondas Eletromagnéticas 37

2.2 – Ondas Elásticas em Sólidos 42

2.3 – Efeito Fotoelétrico - Ondas e Partículas 46

2.4 – O Elétron como uma Onda - Princípio da Incerteza 51

2.5 – Fônons e outras Excitações Elementares em Sólidos 54

Referências 55

Problemas 55

3. MECÂNICA QUÂNTICA: O ELÉTRON NO ÁTOMO 59

3.1 – Os Postulados da Mecânica Quântica 59

3.1.1 – A Função de Onda 60

3.1.2 – Operadores Quânticos 60

3.1.3 – Valor Esperado de uma Grandeza 62

3.1.4 – A Equação de Schroedinger 62

3.2 – A Equação de Schroedinger Independente do Tempo 63

3.3 – Aplicações Simples da Mecânica Quântica 64

3.3.1 – Elétron Livre 64

3.3.2 – Elétron num Poço de Potencial Infinito 66

3.3.3 – Barreira de Potencial-Efeito Túnel 69

3.4 – Elétron no Átomo de Hidrogênio 73

3.5 – Átomos de Muitos Elétrons 81

Referências 83

Problemas 83

12 • MATERIAIS E DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

4. ELÉTRONS EM CRISTAIS	87
4.1 – Bandas de Energia em Cristais	87
4.2 – Condutores, Isolantes e Semicondutores	92
4.3 – Massa Efetiva	94
4.4 – Comportamento dos Elétrons em $T > 0$ Distribuição de Fermi-Dirac	95
4.5 – O Mecanismo da Corrente Elétrica em Metais	101
Referências	105
Problemas	106
5. MATERIAIS SEMICONDUCTORES	107
5.1 – Semicondutores	107
5.2 – Elétrons e Buracos em Semicondutores Intrínsecos	110
5.2.1 – Massa Efetiva de Elétrons e Buracos	110
5.2.2 – Criação e Recombinação de Pares Elétron-Buraco	112
5.2.3 – Concentração de Portadores em Equilíbrio Térmico	114
5.3 – Semicondutores Extrínsecos	120
5.3.1 – Nível de Energia de Impureza num Cristal	121
5.3.2 – Concentração de Portadores em Semicondutores Extrínsecos	124
5.4 – Dinâmica de Elétrons e Buracos em Semicondutores	128
5.4.1 – Corrente de Condução	128
5.4.2 – Movimento em Campo Magnético - Efeito Hall	132
5.4.3 – Corrente de Difusão	134
5.4.4 – Injeção de Portadores: Difusão com Recombinação.	139
Referências	141
Problemas	142
6. DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES: DIODOS	145
6.1 – A Junção $p-n$	145
6.1.1 – Fabricação da Junção $p-n$	146
6.1.2 – A Barreira de Potencial na Junção $p-n$	147
6.1.3 – Carga e Campo na Junção em Equilíbrio	151
6.2 – Corrente na Junção Polarizada	155
6.3 – Heterojunções	160
6.3.1 – Junção Metal-Semicondutor	161
6.3.2 – Heterojunções de Semicondutores	163
6.4 – Diodo de Junção	165
6.4.1 – Aplicações	167
6.5 – Diodo de Barreira Schottky	169
6.6 – Ruptura na Polarização Reversa: Diodo Zener	170
6.7 – Outros Tipos de Diodos	172
6.7.1 – Varactor	172
6.7.2 – Diodo Túnel	173
6.7.3 – Diodo IMPATT	175
6.7.4 – Diodo Gunn	176
Referências	178
Problemas	179

7. TRANSISTORES E OUTROS DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES 183

- 7.1 – O Transistor 183**
- 7.2 – O Transistor Bipolar 185**
- 7.3 – Correntes no Transistor Bipolar 190**
 - 7.3.1 – Cálculo das Correntes no Modelo Unidimensional 190
 - 7.3.2 – Corrente de Base 195
 - 7.3.3 – Parâmetros do Transistor 196
 - 7.3.4 – Curvas Características *I-V* 198
- 7.4 – Aplicações de Transistores 200**
- 7.5 – Transistores de Efeito de Campo 203**
 - 7.5.1 – O Transistor de Efeito de Campo de Junção 203
 - 7.5.2 – Característica do Transistor JFET 204
 - 7.5.3 – O Transistor de Efeito de Campo Metal-Semicondutor 208
- 7.6 – O Transistor MOSFET 210**
 - 7.6.1 – O Capacitor MOS 211
 - 7.6.2 – A Tensão Crítica de Inversão 215
 - 7.6.3 – A Característica *I-V* do Transistor MOSFET 219
 - 7.6.4 – Aplicações de Transistores MOSFET 221
- 7.7 – Dispositivos de Controle de Potência: SCR e TRIAC 223**
 - 7.7.1 – O Retificador Controlado de Silício - SCR 223
 - 7.7.2 – O TRIAC 225
- 7.8 – Circuitos Integrados 227**
 - 7.8.1 – Conceitos Básicos e Técnicas de Fabricação 228
 - 7.8.2 – Dispositivos de Memória de Semicondutor 230
- Referências 235**
- Problemas 236**

8. MATERIAIS E DISPOSITIVOS OPTO-ELETRÔNICOS 239

- 8.1 – Propriedades Ópticas dos Materiais 240**
 - 8.1.1 – Ondas Eletromagnéticas em Materiais 241
 - 8.1.2 – Refletividade de Materiais 244
- 8.2 – Interação da Radiação com a Matéria-Modelo Clássico 247**
 - 8.2.1 – Contribuição dos Elétrons Livres em Metais 247
 - 8.2.2 – Contribuição de Elétrons Ligados 251
- 8.3 – Teoria Quântica da Interação Radiação-Matéria 255**
 - 8.3.1 – Transições entre Níveis Discretos 255
 - 8.3.2 – Absorção de Luz e Luminescência 258
 - 8.3.3 – Absorção e Emissão de Luz em Isolantes e Semicondutores 260
 - 8.3.4 – Absorção e Emissão de Luz em Materiais com Impurezas 265
- 8.4 – Fotodetetores 267**
 - 8.4.1 – Fotorresistores 269
 - 8.4.2 – Fotodiodos 272
 - 8.4.3 – Células Solares 276
 - 8.4.4 – Sensor de Imagem CCD 278
- 8.5 – Diodo Emissor de Luz (LED) 281**
- 8.6 – Emissão Estimulada e Lasers 285**
 - 8.6.1 – O Mecanismo de Amplificação por Emissão Estimulada. 286

14 • MATERIAIS E DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS

8.6.2 – Lasers de Sólidos com Impurezas 289

8.6.3 – Lasers a Gás 293

8.7 – O Laser de Diodo Semicondutor 2948.7.1 – O Laser de Diodo de Junção *p-n* 295

8.7.2 – Lasers de Heterojunções 298

8.7.3 – Laser de Poço Quântico 301

8.8 – Aplicações dos Lasers de Diodo 304

8.8.1 – Comunicações Ópticas 305

8.8.2 – Gravação e Reprodução em Discos Compactos 309

Referências 310**Problemas 311****9. MATERIAIS E DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS****313****9.1 – Magnetismo e Materiais Magnéticos 313****9.2 – Propriedades Magnéticas da Matéria 317**

9.2.1 – Origem do Momento Magnético do Elétron 317

9.2.2 – Momento Magnético de Átomos e Íons 319

9.2.3 – Paramagnetismo 321

9.3 – Materiais Magnéticos 324

9.3.1 – Magnetização Espontânea e Temperatura de Curie 325

9.3.2 – O Modelo de Campo Molecular 326

9.3.3 – A Interação de Intercâmbio 328

9.3.4 – Materiais Ferrimagnéticos e Ferrites 330

9.3.5 – Curva de Magnetização: Domínios Magnéticos 333

9.4 – Materiais para Aplicações Tradicionais 337

9.4.1 – Ímãs Permanentes 337

9.4.2 – Materiais de Alta Permeabilidade 341

9.5 – Gravação Magnética 344

9.5.1 – Conceitos Básicos 345

9.5.2 – Análise Quantitativa 347

9.5.3 – Materiais Apropriados 351

9.5.4 – Novas Tecnologias com Filmes Finos e Nanoestruturas 353

9.6 – Dispositivos de Ferrite para Micro-Ondas 357

9.6.1 – O Movimento de Precessão da Magnetização 357

9.6.2 – Susceptibilidade Dinâmica de um Ferrite 359

9.6.3 – Ondas Eletromagnéticas em Ferrites 361

9.6.4 – Dispositivos de Ferrites 365

Referências 370**Problemas 370****10. OUTROS MATERIAIS IMPORTANTES PARA A ELETRÔNICA****373****10.1 – Materiais Dielétricos 374**

10.1.1 – A Polarização dos Materiais 374

10.1.2 – Capacitores 377

10.1.3 – Materiais Piezoelétricos 379

10.1.4 – Materiais Ferroelétricos 383

10.1.5 – Eletretos 385

10.2 – Materiais Dielétricos para Opto-Eletrônica	386
10.2.1 – Efeitos Eletro-Ópticos e Elasto-Ópticos	387
10.2.2 – Materiais Ópticos Não Lineares	389
10.2.3 – Dispositivos Eletro-Ópticos de Guias de Onda	390
10.3 – Materiais para Mostradores e Telas de Vídeo	394
10.3.1 – Materiais Cerâmicos Fosforescentes	394
10.3.2 – Cristais Líquidos	400
10.3.3 – Materiais Orgânicos Condutores	404
10.3.4 – Telas Sensíveis ao Toque	411
10.4 – Materiais Supercondutores	412
10.4.1 – Propriedades Magnéticas dos Supercondutores	414
10.4.2 – A Física da Supercondutividade	416
10.4.3 – Junções com Supercondutores	421
10.4.4 – Aplicações	423
Referências	425
Problemas	426

A. TEORIA DE PERTURBAÇÃO	427
B. CONSTANTES FÍSICAS E TABELA DE CONVERSÃO DE ENERGIA	431
C. TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS	433
ÍNDICE REMISSIVO	435

1

MATERIAIS PARA ELETRÔNICA

1.1	Eletrônica e Física do Estado Sólido	17
1.2	Ligações Atômicas	20
1.3	Materiais Cristalinos	22
	1.3.1 Redes Cristalinas	22
	1.3.2 Estruturas Cristalinas Simples	25
1.4	Materiais para Dispositivos Eletrônicos	26
	1.4.1 Monocristais	27
	1.4.2 Cerâmicas e Vidros	29
	1.4.3 Polímeros	30
	1.4.4 Cristais Líquidos	30
	1.4.5 Filmes Finos e Multicamadas	31
	1.4.6 Grafeno e Nanotubos de Carbono	34
	Referências	35
	Problemas	35

1.1

ELETRÔNICA E FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO

A Eletrônica é o ramo da tecnologia mais marcante do Século XX. Ela surgiu em 1906 com a invenção por Lee De Forest, nos Estados Unidos, da válvula triodo, um dispositivo que tornou possível a amplificação de sinais elétricos. A válvula triodo consiste de um tubo a vácuo contendo três eletrodos: o catodo, que aquecido emite elétrons, o anodo, no qual os elétrons são recebidos, e a grade, situada entre o catodo e o anodo, que serve para controlar o fluxo de elétrons e possibilitar a amplificação de sinais. Além do triodo, há outros tipos de válvulas, como o diodo, que tem dois eletrodos (apenas catodo e anodo), os pentodos com cinco, entre outras. O funcionamento de todas as válvulas é baseado no controle do movimento dos **elétrons** entre os eletrodos por meio da ação de um campo elétrico sobre sua carga elétrica. Esta é a origem do nome **Eletrônica**.

O principal produto da Eletrônica na primeira metade do século XX foi o rádio, que possibilitou a comunicação e a difusão de informações à distância através da voz e da música. Mais tarde foi desenvolvido o sistema para a transmissão à distância de imagens em movimento, a televisão. Depois vieram os computadores e também uma grande variedade de equipamentos para diversas finalidades. Porém, a Eletrônica baseada nas válvulas a vácuo tinha grandes limitações e inconvenientes. As válvulas eram

grandes, frágeis, aqueciam muito, tinham vida curta e fabricação dispendiosa, além de várias desvantagens técnicas. Por esta razão, desde antes da segunda Grande Guerra procurava-se um dispositivo que pudesse substituir as válvulas nos equipamentos eletrônicos. O grande passo nesta direção foi dado em 1947 por J. Bardeen, W. Brattain e W. Shockley, três físicos dos laboratórios da Bell Telephone que estudavam propriedades de condução eletrônica em semicondutores. Naquele ano eles descobriram o **transistor**, um dispositivo de três elementos que possibilitava o controle da corrente elétrica no interior de um material semicondutor, e que poderia substituir a válvula triodo. Durante a década de 1950 o transistor foi aperfeiçoado, tornando-se um dispositivo confiável, com aplicações nos mais diversos equipamentos eletrônicos e com custos de fabricação cada vez mais baixos. Na década de 1960 assistimos à miniaturização da eletrônica, com o desenvolvimento dos **circuitos integrados**, contendo inúmeros transistores e diodos, interligados com resistores e capacitores, fabricados na mesma pastilha de semicondutor. A fabricação dos circuitos integrados com elementos de dimensões da ordem de alguns micrômetros (10^{-6} metros) deu origem à tecnologia da **microeletrônica**. Com a crescente miniaturização dos componentes, surgiram na década de 1970 os **microprocessadores**, com os quais foi possível fabricar os microcomputadores. A produção de circuitos integrados e microprocessadores cada vez mais rápidos e com maior número de elementos está produzindo uma constante evolução na Eletrônica. Isto provocou uma enorme mudança nos costumes da sociedade, proporcionada pelos modernos sistemas de comunicação, a ampla utilização dos computadores, a automação dos meios de produção e os mais variados equipamentos utilizados em nossa vida diária. Por esta razão, a Eletrônica tornou-se um dos principais fatores de desenvolvimento do final do século XX e continua sendo uma tecnologia estratégica no século XXI.

Além dos diodos, transistores, circuitos integrados e microprocessadores, cuja operação é baseada nas propriedades de transporte eletrônico dos semicondutores, existe um grande número de outros dispositivos que dão à eletrônica uma enorme variedade de aplicações. Eles são baseados em diversas propriedades de materiais sólidos, ópticas, magnéticas, térmicas, etc. A descoberta desses dispositivos só foi possível graças ao conhecimento acumulado com as atividades de pesquisa em **Física do Estado Sólido**. Esta é a área da Física que investiga as propriedades e os fenômenos que ocorrem em materiais sólidos, e que ganhou um grande impulso com a descoberta do transistor. Até a década de 1950, os trabalhos nesta área estavam concentrados nos sólidos cristalinos, que são aqueles cujos átomos ou íons constituintes têm um arranjo ordenado periódico. Nesses sólidos ocorrem fenômenos que não existem em materiais amorfos. Além disso, como eles têm estrutura cristalina com propriedades de simetria bem definidas, os fenômenos podem ser interpretados pelas leis da Física com mais facilidade. Com o progresso das técnicas experimentais e teóricas de investigação, esta área se estendeu a materiais mais complexos, como vidros, polímeros orgânicos diversos, ligas amorfas e até mesmo os líquidos, passando a ser conhecida como **Física da Matéria Condensada**. Nesta área da Física trabalham atualmente mais de 40% dos físicos em todo o mundo e a cada ano surgem novas linhas de pesquisa, impulsionadas pela descoberta de novas propriedades, novos fenômenos e novos materiais artificiais. Estes, por sua vez, abrem o potencial para o

desenvolvimento de novos dispositivos que encontram aplicações nos mais variados segmentos tecnológicos, e cujo interesse econômico impulsiona as pesquisas básica e aplicada. Foram as descobertas em Física da Matéria Condensada que possibilitaram o desenvolvimento do transistor, dos circuitos integrados e de inúmeros dispositivos que revolucionaram a eletrônica e os computadores. Os lasers encontraram inúmeras aplicações na indústria e na medicina e propiciaram o advento das comunicações ópticas. Os materiais magnéticos novos são os responsáveis pela melhoria de dispositivos e de processos de gravação, que estão tendo enorme impacto nos meios de comunicação e nos computadores.

Entretanto, não foi apenas por causa de sua importância tecnológica que a nova área se desenvolveu rapidamente. A enorme variedade de fenômenos que os elétrons e os núcleos apresentam coletivamente em sólidos deu origem a descobertas fundamentais excitantes. Esta é uma das razões para que mais de 40% dos prêmios Nobel nos últimos 40 anos tenham sido dados a físicos que trabalharam nesta área. Foram eles J. Bardeen, L.N. Cooper e J.R. Schrieffer (1972 - teoria de supercondutividade), L. Esaki, I. Giaever e B. Josephson (1973 - efeito de tunelamento em sólidos), P.W. Anderson, N.F. Mott e J.H. Van Vleck (1977 - estudos de sólidos amorfos e propriedades magnéticas da matéria), P. Kaptisa (1978 - estudos em baixas temperaturas), N. Bloembergen, A.L. Schawlow e K.M. Siegbahn (1981 - espectroscopia com lasers e de fotoelétrons), K.G. Wilson (1982 - teoria de grupo de renormalização e transições de fase), K. von Klitzing (1985 - efeito Hall quântico), G. Binnig, H. Rohrer e E. Ruska (1986 - invenção do microscópio de tunelamento e do microscópio eletrônico), K.A. Müller e G. Bednorz (1987 - descoberta da supercondutividade em altas temperaturas, P. de Gennes (1991 - estudos de polímeros e cristais líquidos), B.N. Brockhouse e C.G. Shull (1994 - desenvolvimento de técnicas de espalhamento de nêutrons para o estudo de materiais), D.M. Lee, D.D. Osheroff e R.C. Richardson (1996 - descoberta da superfluidez em Helio 3), R.B. Laughlin, H.L. Stormer e D.C. Tsui (1998 - descoberta de fluido quântico com excitações de carga fracionária), e no ano 2000, Z.I. Alferov e H. Kroemer pelo desenvolvimento de heteroestruturas de semicondutores, juntamente com Jack Kilby, um dos maiores responsáveis pela invenção dos circuitos integrados. Assim, o prêmio Nobel de Física da virada do milênio marcou a importância da área para o desenvolvimento da eletrônica. Foi interessante, também, o fato de o prêmio Nobel de Química em 2000 ter sido agraciado aos físicos A. Heeger, A. MacDiarmid e H. Shirakawa, pela descoberta e desenvolvimento dos polímeros condutores, materiais que começam a ter aplicações comerciais na eletrônica.

Neste século o prêmio Nobel já foi concedido quatro vezes a físicos trabalhando com matéria condensada. São eles: A.A. Abrikosov, V.L. Ginzburg e A.J. Leggett (2003 - contribuições à teoria da supercondutividade e superfluidez), A. Fert e P. Gruenberg (2007 - descoberta da magneto-resistência gigante), C.K.Kao, W.S. Boyle e G.E. Smith (2009 - desenvolvimento de fibras ópticas para comunicações e invenção do sensor CCD), e A. Geim e K. Novoselov (2010 - experiências pioneiras com grafeno).

Os materiais sólidos investigados na Física da Matéria Condensada ou utilizados em dispositivos eletrônicos, em geral não são encontrados

na natureza. Eles são produzidos artificialmente a partir de compostos químicos com alto grau de pureza, através de processos diversos. Os processos de fabricação de materiais estão tornando-se cada vez mais sofisticados, possibilitando a obtenção de estruturas artificiais não imagináveis há poucas décadas. É possível, por exemplo, utilizando diversas técnicas depositar camadas atômicas individuais, uma sobre a outra, formando uma multicamada ou super-rede cristalina, com espessuras da ordem de alguns nanômetros (10^{-9} m). Estas estruturas têm possibilitado a descoberta de fenômenos e aplicações inteiramente novos, dando origem a nanociência e **nanotecnologia** em Física da Matéria Condensada e para a fabricação de dispositivos eletrônicos. A compreensão dos fenômenos que ocorrem nos sólidos requer o domínio de vários conceitos fundamentais que serão apresentados a partir da próxima seção. Vamos iniciar discutindo uma questão básica: por que e como os átomos dos diversos elementos formam materiais sólidos?

1.2

LIGAÇÕES ATÔMICAS

Vamos considerar inicialmente o caso de sólido do tipo do cloreto de sódio, NaCl . Por razões conhecidas da química, e que são explicadas em detalhe pela mecânica quântica, um átomo de cloro, com seus 17 elétrons, tende a capturar outro elétron extra para completar sua terceira “camada” eletrônica e tornar-se estável. Por outro lado, um átomo de sódio com 11 elétrons tende a perder seu único elétron da terceira camada para que as duas camadas interiores formem um núcleo fechado. Então, quando um átomo de cloro está próximo de outro de sódio, este passa seu elétron para o de cloro, dando origem a dois íons com cargas elétricas opostas, que se atraem devido à interação eletrostática. Em outras palavras, os átomos de cloro e de sódio juntos formam um sistema que tem **menor energia** do que quando estão longe um do outro. Entretanto, quando os dois íons se aproximam muito, a repulsão entre os elétrons mais externos faz com que a energia aumente impedindo uma maior aproximação. A Fig.1.1

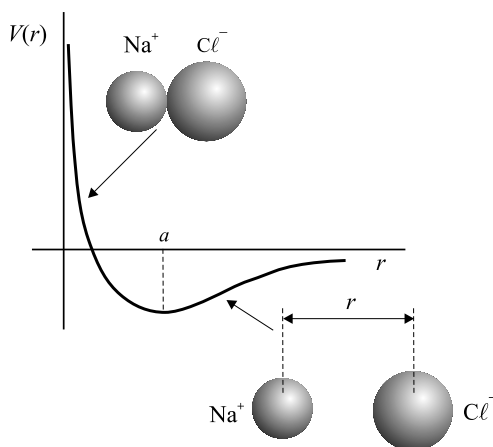


FIGURA 1.1 Energia de interação efetiva entre um íon Na^+ e um íon Cl^- em função da distância entre seus núcleos.