

Do original

INTEGRATED ELECTRONICS:  
Analog and Digital Circuits and Systems

Copyright © 1972 by McGraw-Hill, Inc.

Copyright © 1981 da Editora McGraw-Hill do Brasil

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, guardada pelo sistema "retrieval" ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, seja este eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação, ou outros, sem prévia autorização por escrito da Editora.

*Editor:* Laércio Bento  
*Coordenadora de Revisão:* Daisy Pereira Daniel  
*Supervisor de Produção:* Edson Sant'Anna

CIP-Brasil, Catalogação-na-Fonte  
Câmara Brasileira do Livro, SP

Millman, Jacob. 1911 -  
M594 e      Eletrônica: dispositivos e circuitos / Jacob Millman,  
v. 1      Christos C. Halkias; tradutor Elédio José Robalinho;  
revisor técnico Paulo Elyot Meirelles Villela. - São Paulo:  
McGraw-Hill do Brasil, 1981.

Bibliografia.

1. Aparelhos e dispositivos eletrônicos 2. Circuitos eletrônicos 3. Circuitos integrados 4. Eletrônica I. Halkias, Christos C. II. Título.

CDD - 621.381  
- 621.3815  
- 621.381173

80-1438

Índices para catálogo sistemático

1. Circuitos eletrônicos: Engenharia eletrônica 621.3815
2. Circuitos integrados: Microeletrônica 621.38173
3. Dispositivos: Engenharia eletrônica 621.3815
4. Eletrônica: Engenharia 621.381.

## Sumário

Prefácio, XI

### Capítulo 1 Bandas de Energia nos Sólidos, 1

- 1.1 Partículas Carregadas, 1
  - 1.2 Intensidade de Campo, Potencial, Energia, 2
  - 1.3 A Unidade de Energia eV, 4
  - 1.4 Natureza do Átomo, 5
  - 1.5 Níveis Atômicos de Energia, 7
  - 1.6 Estrutura Eletrônica dos Elementos, 11
  - 1.7 A Teoria de Bandas de Energia dos Cristais, 13
  - 1.8 Isolantes, Semicondutores e Metais, 15
- Referências, 17  
Exercícios de Revisão, 17

### Capítulo 2 Fenômenos de Transporte em Semicondutores, 18

- 2.1 Mobilidade e condutividade, 18
- 2.2 Elétrons e Lacunas em um Semicondutor Intrínseco, 21
- 2.3 Impurezas Doadoras e Aceitadoras, 23
- 2.4 Densidades de Carga em um Semicondutor, 26
- 2.5 Propriedades Elétricas do Ge e do Si, 27
- 2.6 O Efeito Hall, 30
- 2.7 Modulação da Condutividade, 31

- 2.8 Geração e Recombinação de Cargas, 34
- 2.9 Difusão, 36
- 2.10 A Equação da Condutividade, 38
- 2.11 Carga Injetada de Portadores Minoritários, 39
- 2.12 Variação de Potencial em um Semicondutor Gradualmente Dopado, 42
- 2.13 Recapitulação, 43
- Referências, 44
- Exercícios de Revisão, 45

### Capítulo 3 Características de um Díodo de Junção, 47

- 3.1 A Junção  $p-n$  em Circuito Aberto, 47
- 3.2 A Junção  $p-n$  como um Retificador, 50
- 3.3 Componentes de Corrente em um Díodo  $p-n$ , 52
- 3.4 Característica volt-ampère, 55
- 3.5 Dependência da Característica  $V/I$  com a Temperatura, 58
- 3.6 A Resistência do Díodo, 58
- 3.7 Capacitância  $C_T$  da Zona de Carga Espacial ou de Transição, 60
- 3.8 Descrição do Controle de Carga do Díodo, 64
- 3.9 Capacitância de Difusão, 65
- 3.10 Tempos de Chaveamento do Díodo de Junção, 68
- 3.11 Díodos Zener, 70
- 3.12 O Díodo-túnel, 73
- 3.13 O Fotodíodo Semicondutor, 75
- 3.14 Efeito Fotovoltaico, 77
- 3.15 Díodos Emissores de Luz (LEDS), 79
- Referências, 79
- Exercícios de Revisão, 80

### Capítulo 4 Circuitos Utilizando Díodos, 82

- 4.1 O Díodo como um Elemento de Circuito, 82
- 4.2 Conceito de Reta de Carga, 84
- 4.3 Modelo Linearizado do Díodo, 85
- 4.4 Circuitos Cortadores (Limitadores), 88
- 4.5 Circuitos Ceifadores em dois Níveis Independentes, 91
- 4.6 Comparadores, 94
- 4.7 Porta de Amostragem, 95
- 4.8 Retificadores, 97
- 4.9 Outros Circuitos de Retificação de Onda Completa, 102
- 4.10 Filtros com Capacitor, 104
- 4.11 Circuitos Adicionais com Díodos, 108
- Referências, 110
- Exercícios de Revisão, 110

### Capítulo 5 Características do Transistor, 112

- 5.1 Transistor de Junção, 112
- 5.2 As Componentes de Corrente de um Transistor, 115
- 5.3 O Transistor como Amplificador, 117
- 5.4 Construção do Transistor, 118
- 5.5 A Configuração Base Comum, 120
- 5.6 A Configuração Emissor Comum, 124
- 5.7 A Região de Corte em Emissor Comum, 128
- 5.8 A Região de Saturação em Emissor Comum, 130
- 5.9 Valores Típicos de Tensões de Junção para Transistores, 132
- 5.10 Ganho de Corrente em Emissor Comum, 136
- 5.11 A Configuração em Coletor Comum, 137
- 5.12 Expressões Analíticas para as Características do Transistor, 138
- 5.13 Máxima Tensão Nominal, 142
- 5.14 Fototransistor, 144
- Referências, 145
- Exercícios de Revisão, 146

### Capítulo 6 Circuitos Digitais, 148

- 6.1 Operação Digital (Binária) de um Sistema, 148
- 6.2 A Porta OU, 151
- 6.3 A Porta E, 153
- 6.4 O Circuito Não ou Inversor, 155
- 6.5 Tempos de Chaveamento de um Transistor, 158
- 6.6 A Operação Inibir (Habilitar), 161
- 6.7 O Circuito OU Exclusivo, 162
- 6.8 Leis de DeMorgan, 164
- 6.9 Portas Lógicas Díodo-Transistor (LDT)  $NE$  e  $NOU$ , 166
- 6.10 Portas LDT Modificadas (Circuito Integrado), 169
- 6.11 Porta Lógica de Alto Limiar (LAU), 174
- 6.12 Porta Lógica-Transistor-Transistor (LTT), 175
- 6.13 Estágios de Saída, 176
- 6.14 Lógica de Resistor-Transistor (LRT) e Lógica de Transistor Diretamente Acoplado (LTDA), 179
- 6.15 Comparação das Famílias de Lógica, 182
- Referências, 183
- Exercícios de Revisão, 184

### Capítulo 7 Circuitos Integrados: Fabricação e Características, 186

- 7.1 Tecnologia de Circuitos Integrados, 186
- 7.2 Circuitos Integrados Monolíticos Básicos, 187

- 7.3 Crescimento Epitaxial, 191
- 7.4 Mascaramento e Ataque Químico, 193
- 7.5 Difusão de Impurezas, 193
- 7.6 Transístores para Circuitos Monolíticos, 198
- 7.7 Díodos Monolíticos, 203
- 7.8 Resistores Integrados, 205
- 7.9 Capacitores e Indutores Integrados, 207
- 7.10 Configuração de Circuitos Monolíticos, 209
- 7.11 Métodos Adicionais de Isolação, 212
- 7.12 Integração em Larga e Média Escala (ILE e IME), 215
- 7.13 Contato Metal-Semicondutor, 215
- Referências, 217
- Exercícios de Revisão, 218

#### Capítulo 8 O Transistor em Baixas Frequências, 220

- 8.1 Análise Gráfica da Configuração Emissor Comum (EC), 220
- 8.2 Dispositivos Quadripolos e Modelo Híbrido, 224
- 8.3 Modelo Híbrido para o Transistor, 225
- 8.4 Os Parâmetros  $h$ , 227
- 8.5 Fórmulas de Conversão para os Parâmetros das três Configurações do Transistor, 230
- 8.6 Análise de um Circuito Amplificador Transistorizado Utilizando Parâmetros  $h$ , 232
- 8.7 Teoremas de Thévenin e de Norton e seus Corolários, 236
- 8.8 O Seguidor de Emissor, 238
- 8.9 Comparação das Configurações dos Amplificadores a Transistor, 239
- 8.10 Análise Linear de um Circuito a Transistor, 241
- 8.11 Teorema de Miller e seu Dual, 242
- 8.12 Amplificadores Transistorizados em Cascata, 244
- 8.13 Modelo Híbrido Simplificado para Configuração Emissor Comum, 249
- 8.14 Cálculos Simplificados para a Configuração Coletor Comum, 251
- 8.15 O Amplificador Emissor Comum com uma Resistência de Emissor, 254
- 8.16 Circuitos Transistorizados com Alta Resistência de Entrada, 259
- Referências, 264
- Exercícios de Revisão, 265

#### Capítulo 9 Polarização de Transístores e Estabilização Térmica, 267

- 9.1 O Ponto de Operação, 267
- 9.2 Estabilidade da Polarização, 270
- 9.3 Autopolarização ou Polarização de Emissor, 272
- 9.4 Estabilização Contra Variações em  $I_{CO}$ ,  $V_{BE}$  e  $\beta$ , 274

- 9.5 Observações Gerais sobre a Estabilidade da Corrente de Coletor, 279
- 9.6 Compensação de Polarização, 283
- 9.7 Técnicas de Polarização para Circuitos Integrados Lineares, 285
- 9.8 Compensação com Termistor e Sensistor, 286
- 9.9 Disparo Térmico, 287
- 9.10 Estabilidade Térmica, 290
- Referências, 292
- Exercícios de Revisão, 293

#### Capítulo 10 Transístores de Efeito de Campo, 294

- 10.1 O Transistor de Efeito de Campo de Junção, 295
- 10.2 Tensão de Construção  $V_P$ , 298
- 10.3 As Características volt-ampère do TECJ, 299
- 10.4 Modelo de Pequenos Sinais para um TEC, 302
- 10.5 O TEC Metal-Óxido-Semicondutor (TECMOS), 305
- 10.6 Circuitos Digitais com TECMOS, 311
- 10.7 Os Amplificadores de Baixa Potência nas Configurações Fonte Comum e Dreno Comum, 315
- 10.8 Polarização do TEC, 318
- 10.9 O TEC com um Resistor Variável com a Tensão (VVR), 322
- 10.10 O Amplificador na Configuração Fonte Comum em Altas Frequências, 323
- 10.11 O Amplificador em Configuração Dreno Comum em Altas Frequências, 327
- Referências, 328
- Exercícios de Revisão, 329

- Apêndice A, 331
- Apêndice B, 332
- Apêndice C-1, 333

Índice Analítico, 406