
Aktive elektronische Bauelemente

Leonhard Stiny

Aktive elektronische Bauelemente

Aufbau, Struktur, Wirkungsweise,
Eigenschaften und praktischer Einsatz
diskreter und integrierter
Halbleiter-Bauteile

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 558 Abbildungen und 23 Tabellen

 Springer Vieweg

Leonhard Stiny
Haag a. d. Amper, Deutschland

ISBN 978-3-658-09152-1
DOI 10.1007/978-3-658-09153-8

ISBN 978-3-658-09153-8 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

Die erste Auflage erschien unter dem Titel "Handbuch aktiver elektronischer Bauelemente" im Franzis Verlag, 2009.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Dieses Buch stellt allen, ob in Ausbildung, Lehre, Studium oder Beruf, ein sowohl detailliertes als auch umfangreiches und in der Elektronikpraxis anwendbares Wissen über aktive elektronische Bauelemente zur Verfügung. Dabei werden nicht nur die im eigentlichen Sinne aktiven, sondern alle auf Halbleitern basierenden Bauteile behandelt. Das Werk vermittelt ausführliche Kenntnisse über Aufbau, Eigenschaften, Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten dieser Bauelemente. Es kann als Lehrbuch im Studium, in der beruflichen Fortbildung, zum Selbststudium und als Nachschlagewerk in der Laborpraxis verwendet werden. Das Buch bildet eine Brücke zwischen den physikalischen Grundlagen von Halbleiter-Bauelementen und deren ingenieurtechnischen Anwendungen in der Praxis der modernen Elektronik. Dabei werden auch neueste Bausteine der Computertechnologie behandelt.

Damit der Anwender elektronische Bauelemente in Schaltungen zu fehlerfreien und betriebssicheren Funktionseinheiten, Baugruppen oder Geräten zusammenfügen kann, muss er die Wirkungsweise dieser Bauelemente verstanden haben. Nur ein Wissen über ihre Kenngrößen und speziellen Eigenschaften ermöglicht es, entsprechend Datenblattangaben und Herstellerunterlagen die optimalen Bauteile für eine bestimmte Anwendung auszuwählen. Sowohl für die Analyse elektronischer Schaltungen als auch bei der Schaltungsdimensionierung sind Kenntnisse von Aufbau und Funktionsweise der eingesetzten Bauelemente der Halbleiterelektronik unbedingt erforderlich.

Die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik werden als Grundgerüst vermittelt. Auf dieser Basis werden für alle Halbleiter-Bauelemente Aufbau und Wirkungsweise erläutert, spezifische Merkmale, Daten, Kenngrößen und Charakteristiken angegeben und deren Bedeutung erklärt. Für die verschiedenen Typen von Bauteilen werden übersichtlich die Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungen aufgezeigt. Dabei werden alle technischen Aspekte von der Herstellung bis zum Einsatz betrachtet. Durch zahlreiche Abbildungen wird eine Vorstellung von Aufbau und Aussehen der Bauelemente vermittelt. Viele Tabellen und Beispiele mit Berechnungen unterstützen die Auswahl, Dimensionierung und Anwendung von elektronischen Halbleiter-Bauelementen. Einen in der Praxis verwertbaren Nutzen liefern in diesem Werk allgemein gehaltene, für jeden Einsatzfall gültige Beschreibungen, welche auf spezielle Ansätze leicht anpassbar und erweiterbar sind. So findet man Formeln für den täglichen Gebrauch in der

Laborpraxis, aber auch deren Herleitungen, um den theoretischen Hintergrund komplexer Sachverhalte verständlich zu machen.

Nach einer ersten Auflage bei einem anderen Verlag erscheint dieses Werk beim Springer-Verlag in zweiter, überarbeiteter Auflage.

An dieser Stelle sei noch auf mein Werk „Passive elektronische Bauelemente“ (Springer-Verlag) hingewiesen, welches alle Aspekte dieser großen Gruppe von Bauteilen der Elektronik behandelt.

Haag a. d. Amper, im Februar 2015

Leonhard Stiny

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Halbleiter	5
2.1	Halbleiter im Periodensystem der Elemente	5
2.2	Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter	7
2.3	Aufbau der Atome	8
2.3.1	Bohr'sches Atommodell	8
2.3.2	Elektronenpaarbindung, Kristallgitter	10
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	12
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik	13
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	21
2.4.1	Quanten und Wellen	21
2.4.2	Direkte Rekombination	23
2.4.3	Indirekte Rekombination	23
2.5	Eigenleitung	25
2.5.1	Eigenleitungsdichte	25
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	29
2.5.3	Beweglichkeit	29
2.6	Störstellenleitung	30
2.6.1	Dotieren	31
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell	33
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	34
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	35
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	36
3	Der pn-Übergang	39
3.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	39
3.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	39
3.1.2	Diffusion und Rekombination im pn-Grenzgebiet	40
3.1.3	Ladungsträgerdichte	42
3.1.4	Raumladungsdichte	43

3.1.5	Diffusionsspannung	44
3.1.6	Sperrschichtweite	46
3.1.7	Sperrschichtkapazität	47
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs	47
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	48
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung	48
3.2.1.1	Verbreiterung der Grenzschicht	48
3.2.1.2	Sperr sättigungsstrom	49
3.2.1.3	Sperrschichtweite und Sperrschichtkapazität	52
3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung	54
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang	58
3.3.1	Lawinendurchbruch	58
3.3.2	Zener-Durchbruch	60
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt	62
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch)	62
3.3.5	Durchgriff (punch-through)	63
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs	65
3.4.1	Einschaltvorgang	65
3.4.1.1	Kapazitives Verhalten (die Spannung steigt langsamer als der Strom)	66
3.4.1.2	Induktives Verhalten (Überschwingen der Spannung)	66
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang	67
3.4.2.1	Unterbrechen des Durchlassstromes	67
3.4.2.2	Umschalten von Fluss- in Sperrbetrieb	67
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs	68
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang	69
4	Halbleiterdioden	71
4.1	Ausführung	71
4.2	Aufbau	71
4.3	Elektrische Funktion	72
4.4	Bauarten	73
4.5	Verhalten einer Diode	74
4.5.1	Kennlinienbereiche	75
4.5.1.1	Durchlassbereich	76
4.5.1.2	Sperrbereich	77
4.5.1.3	Durchbruchbereich	77
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie	77
4.5.2.1	Näherung 0. Ordnung	78
4.5.2.2	Näherung 1. Ordnung	78
4.5.2.3	Näherung 2. Ordnung	78
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen	80

4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren . . .	82
4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden	84
4.5.5.1	Arbeitspunkt	84
4.5.5.2	Gleichstromwiderstand	84
4.5.5.3	Wechselstromwiderstand – Differenzieller Widerstand	84
4.5.5.4	Wirkung des differentiellen Widerstandes	85
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden	87
4.5.6.1	Ideales Schaltverhalten	87
4.5.6.2	Umschalten von Sperr- in Flussrichtung	87
4.5.6.3	Umschalten von Fluss- in Sperrrichtung	89
4.5.6.4	Ein- und Ausschalten bei ohmsch-induktiver Last . . .	90
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	91
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	91
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	92
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	93
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden	94
4.7.1	Grenzspannungen	94
4.7.2	Grenzströme	95
4.7.3	Sperrstrom	95
4.7.4	Maximale Verlustleistung	95
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden	96
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148	96
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001... 1N 4007	100
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge	102
4.9.1	Legierungstechnik	102
4.9.2	Planartechnik	103
4.9.2.1	Diffusion	103
4.9.2.2	Epitaxie	104
4.9.2.3	Ionenimplantation	105
4.9.2.4	Kontaktierung	106
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden	106
4.10.1	Einzeldiode	106
4.10.1.1	Spitzendioden	106
4.10.1.2	Flächendioden	108
4.10.1.3	Leistungsdioden	109
4.10.1.4	Gehäuse	110
4.10.2	Integrierte Diode	111
4.11	Diodentypen	112
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode	112
4.11.2	Gleichrichterdiode	112
4.11.3	Schottky-Diode	112

4.11.4	Suppressordiode	113
4.11.5	Temperatursensoren	117
4.11.6	DIAC	117
4.11.6.1	Dreischichtdiode	118
4.11.6.2	Fünfschichtdiode	118
4.11.6.3	Vierschichtdiode	119
4.11.6.4	Anwendungen der Mehrschichtdioden	120
4.11.6.5	Kennwerte von Mehrschichtdioden	121
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	121
4.11.8	Avalanchediode	123
4.11.9	Stromregeldiode	123
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	124
4.11.10.1	Grundsätzliches	124
4.11.10.2	Funktionsprinzip	125
4.11.10.3	Herstellung	125
4.11.10.4	Material und Farben, Spektrum	126
4.11.10.5	Technische Ausführung, Aufbau	129
4.11.10.6	Flächen- und Kantenstrahler	129
4.11.10.7	Wirkungsgrad	132
4.11.10.8	Eigenschaften	132
4.11.10.9	Kennwerte und Grenzwerte	135
4.11.10.10	Anwendungen und Einsatzbereiche	136
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	137
4.11.11.1	Vorteile	137
4.11.11.2	Nachteile	138
4.11.11.3	Organische Materialien	138
4.11.11.4	Aufbau	139
4.11.11.5	Funktionsweise	140
4.11.11.6	Aktivmatrix- und Passivmatrix-Displays	141
4.11.12	Laserdiode (LD)	142
4.11.12.1	Grundlagen	142
4.11.12.2	Realisierungsbedingungen für die Funktion der Laserdiode	144
4.11.12.3	Aufbau der Materialschichten	147
4.11.12.4	Aufbau des Laserresonators, DFB-, DBR-Laser	149
4.11.12.5	Kenngößen	150
4.11.12.6	Eigenschaften und Besonderheiten	153
4.11.12.7	Anwendungen	154
4.11.12.8	Beispiel für Datenblattangaben einer Laserdiode	154
4.11.13	Fotodiode	155
4.11.13.1	Funktionsweise	155
4.11.13.2	Betriebsarten	159

4.11.13.3	Aufbau	161
4.11.13.4	Eigenschaften	162
4.11.13.5	Ausführungsformen	163
4.11.13.6	Anwendungen	164
4.11.14	Solarzelle	164
4.11.14.1	Aufbau einer Silizium-Solarzelle	165
4.11.14.2	Solarzellentypen	166
4.11.14.3	Verluste in Solarzellen	167
4.11.14.4	Eigenschaften von Solarzellen	168
4.11.14.5	Kenndaten der Solarzelle	170
4.11.14.6	Ersatzschaltbild der Solarzelle	173
4.11.14.7	Bypass-Diode	174
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	174
4.11.15.1	Allgemeines	175
4.11.15.2	Funktionsweise und Eigenschaften	175
4.11.15.3	Ersatzschaltung, Güte	175
4.11.15.4	Grenzfrequenz f_c (cut-off-frequency)	177
4.11.15.5	Temperaturabhängigkeit	177
4.11.15.6	Anwendungen	178
4.11.16	pin-Diode	180
4.11.16.1	Funktion	181
4.11.16.2	Anwendungen der pin-Diode	182
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	183
4.11.17.1	Grundlegendes zur Quantenphysik	184
4.11.17.2	Tunneleffekt	184
4.11.17.3	Aufbau und Funktion der Tunneldiode	186
4.11.17.4	Ersatzschaltung	188
4.11.17.5	Anwendungen der Tunneldiode	189
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	190
4.11.19	Gunndiode	191
4.11.19.1	Gunn-Effekt	191
4.11.19.2	Aufbau der Gunndiode	191
4.11.19.3	Funktionsweise der Gunndiode	192
4.11.19.4	Anwendungen der Gunndiode	196
4.11.20	IMPATT-Diode	197
4.11.20.1	Funktionsweise der IMPATT-Diode	197
4.11.20.2	Anwendungen der IMPATT-Diode	200
4.11.21	TRAPATT-Diode	201
4.11.22	BARITT-Diode	202
4.11.23	DOVETT-Diode	203
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	203

4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	203
4.11.26	Magnetdiode	205
4.11.26.1	Aufbau	205
4.11.26.2	Funktionsweise	206
4.11.26.3	Eigenschaften und Anwendungen	206
5	Bipolare Transistoren	207
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	207
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors	210
5.3	Richtungen von Strömen und Spannungen	211
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche)	212
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb)	212
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb)	213
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb)	213
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb)	214
5.5	Signaldynamik und Signalgröße	214
5.6	Funktionsweise	215
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors	220
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter	221
5.8.1	Verstärkerbetrieb	221
5.8.2	Schalterbetrieb	223
5.9	Kennlinien des Transistors	224
5.9.1	Eingangskennlinie	224
5.9.1.1	Verlauf der Eingangskennlinie	224
5.9.1.2	Differenzieller Eingangswiderstand	227
5.9.2	Ausgangskennlinie	228
5.9.2.1	Ausgangskennlinienfeld für Spannungs- und Stromsteuerung	228
5.9.2.2	Aktiver Bereich	229
5.9.2.3	Übersteuerungsbereich	230
5.9.2.4	Sperrbereich	231
5.9.2.5	Differenzieller Ausgangswiderstand	234
5.9.3	Steuerkennlinien	235
5.9.3.1	Strom-Steuerkennlinie	235
5.9.3.2	Spannungs-Steuerkennlinie	236
5.9.4	Rückwirkungskennlinie	237
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	238
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme	240
5.10.1	Durchbruch 1. Art	240
5.10.1.1	Basis-Emitter-Diode	240
5.10.1.2	Basis-Kollektor-Diode	240
5.10.1.3	Kollektor-Emitter-Strecke	241

5.10.2	Durchbruch 2.Art	242
5.10.3	Grenzströme	242
5.11	Maximale Verlustleistung	242
5.11.1	Statischer Betrieb	242
5.11.2	Pulsbetrieb	245
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	247
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor	248
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	248
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	250
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	259
5.13.3.1	Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	259
5.13.3.2	Schrotrauschen (Schottky-Rauschen)	260
5.13.3.3	$1/f$ -Rauschen	261
5.13.3.4	Popcorn-Rauschen	261
5.13.3.5	Generations-Rekombinations-Rauschen	262
5.13.3.6	Stromverteilungsrauschen	262
5.13.3.7	Avalanche-Rauschen	262
5.13.4	Rauschzahl	262
5.13.4.1	Definition und Eigenschaften	262
5.13.4.2	Bereich weißes Rauschen	264
5.13.4.3	Bereich $1/f$ -Rauschen	265
5.13.4.4	Bereich hoher Frequenzen	266
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	266
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	267
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt	267
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschaltung	268
5.15.2.1	Stromverstärkung der Basisschaltung	268
5.15.2.2	Stromverstärkung der Emitterschaltung	270
5.15.2.3	Stromverstärkung der Kollektorschaltung	270
5.15.2.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	271
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	271
5.15.3.1	β -Grenzfrequenz	271
5.15.3.2	Transitfrequenz	272
5.15.3.3	Maximale Schwingfrequenz	274
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors	274
5.16.1	Schaltzeiten	275
5.16.1.1	Einschaltverzögerung t_d	275
5.16.1.2	Anstiegszeit t_r	275
5.16.1.3	Speicherzeit t_s	276
5.16.1.4	Abfallzeit t_f	277
5.16.1.5	Verkürzung der Schaltzeiten	277

5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors	278
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung	279
5.17.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	280
5.17.1.2	Transportmodell	283
5.17.1.3	Gummel-Poon-Modell	284
5.17.1.4	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	285
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	291
5.17.2.1	Allgemeines zum Vierpol	291
5.17.2.2	h -Parameter	293
5.17.2.3	Bestimmung der h -Parameter aus den Kennlinien	294
5.17.2.4	Umrechnung der h -Parameter zwischen Grundsaltungen	296
5.17.2.5	Umrechnung von h -Parametern für andere Arbeits- punkte	297
5.17.2.6	y -Parameter	299
5.17.2.7	Umrechnung zwischen y - und h -Parametern	300
5.17.2.8	s -Parameter	301
5.17.2.9	Vierpolparameter und physikalisches Ersatzschaltbild	304
5.17.2.10	Berechnung des Betriebsverhaltens	304
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	307
5.18	Aufbau und Herstellungsverfahren von Bipolartransistoren	308
5.18.1	Spitzentransistor	308
5.18.2	Legierungstransistor	309
5.18.3	Mesatransistor	309
5.18.4	Planartransistor	310
5.18.4.1	Herstellung von Einzeltransistoren, innerer Aufbau	311
5.18.4.2	Bauformen, Gehäuse von Einzeltransistoren	311
5.18.4.3	Integrierte Transistoren, Herstellung und innerer Aufbau	313
5.18.4.4	Herstellungsprozess am Beispiel eines npn-Transistors	314
5.18.4.5	Emitterrandverdrängung	316
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	317
5.20	Darlington-Transistor	320
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	322
5.20.1.1	Stromverstärkung im Bereich 1	322
5.20.1.2	Stromverstärkung im Bereich 2 und 3	323
5.20.2	Schaltverhalten	324
5.20.3	Kleinsignalverhalten	325
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors	326

6	Feldeffekttransistoren	327
6.1	Allgemeine Eigenschaften	327
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation	329
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren	331
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	333
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	334
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	335
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	335
6.4.2	U_{GS} variabel, U_{DS} klein und konstant	336
6.4.3	U_{DS} variabel, $U_{GS} = 0$	338
6.4.4	U_{DS} und U_{GS} variabel	339
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	341
6.4.5.1	Begriffe	341
6.4.5.2	Kennlinienarten	342
6.4.5.3	Übertragungskennlinie	342
6.4.5.4	Ausgangskennlinienfeld	343
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter	345
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs	347
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs	347
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal MOSFET	349
6.5.2.1	Anreicherungstyp	349
6.5.2.2	Verarmungstyp	350
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	352
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	356
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	358
6.5.5.1	n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	358
6.5.5.2	n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	362
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	363
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	365
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors	367
6.6.1	Statisches Verhalten	367
6.6.2	Dynamisches Verhalten	368
6.6.3	Kleinsignalmodell	369
6.6.3.1	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	369
6.6.3.2	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	371
6.6.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	373
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	374
6.7.1	Durchbruchspannungen	375
6.7.1.1	Gate-Durchbruch	375
6.7.1.2	Drain-Source-Durchbruch	375
6.7.2	Grenzströme	376
6.7.2.1	Drainstrom	376

6.7.2.2	Rückwärtsdiode	376
6.7.2.3	Gatestrom	376
6.7.3	Sperrströme	377
6.7.4	Maximale Verlustleistung	377
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	377
6.8	Der FET als Schalter	378
6.8.1	Schaltstufen mit FET	378
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	380
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor	381
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	382
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	382
6.10.1.1	Allgemeines, Vorteile, Einsatzgebiete	382
6.10.1.2	FET mit DMOS-Struktur	383
6.10.1.3	FET mit VMOS-Struktur	384
6.10.1.4	HEXFET	386
6.10.1.5	SIPMOS-Transistor	387
6.10.1.6	LDMOS-Transistor	387
6.10.1.7	FREDFET	388
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs	388
6.10.2.1	TEMPFET (Temperature Protected FET)	389
6.10.2.2	PROFET (Protected FET)	389
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs	389
6.10.3.1	Dual-Gate MOSFET	389
6.10.3.2	MESFET	390
6.10.3.3	HEMT (MODFET)	391
6.10.3.4	ISFET	393
6.10.3.5	ENFET	394
6.10.3.6	TFT-Transistor	394
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	395
6.11.1	Struktureller Aufbau	396
6.11.2	NPT- und PT-Struktur	396
6.11.3	Funktionsweise	399
6.11.4	IGBT Latch-Up	400
6.11.5	Kennlinien	402
6.11.5.1	Vorwärtssperrzustand	403
6.11.5.2	Durchlasszustand	403
6.11.5.3	Rückwärtsbetrieb	404
6.11.6	Schaltverhalten	405
6.11.6.1	Übersicht	405
6.11.6.2	Ein- und Ausschalten im Detail, Vergleich MOSFET – IGBT	405
6.11.7	Trench-IGBT	408

7	Thyristoren	411
7.1	Einteilung der Thyristoren	411
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	412
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	413
7.2.2	Aufbau	414
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	416
7.2.3.1	Betrieb in Sperrrichtung	416
7.2.3.2	Betrieb in (Vorwärts-)Blockierrichtung	417
7.2.4	Der Zündvorgang	419
7.2.4.1	Erläuterung des Zündvorgangs mit Hilfe des Zweittransistormodells	419
7.2.4.2	Die Zündbedingung	420
7.2.4.3	Zündung ohne Steuerstrom ($I_G = 0$)	422
7.2.4.4	Zündung durch den Steuerstrom	422
7.2.5	Löschen des Thyristors	425
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	425
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	426
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	427
7.2.8.1	Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	427
7.2.8.2	Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	427
7.2.8.3	Einschaltverhalten	428
7.2.8.4	Ausschaltverhalten	429
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	430
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	432
7.2.10.1	Funktionsweise der Phasenanschnittsteuerung	432
7.2.10.2	Berechnung der Änderung der Leistungsaufnahme	434
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	435
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	435
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	436
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	436
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	438
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	439
7.3.3.1	Rückwärts leitender Thyristor (RCT)	439
7.3.3.2	Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR)	439
7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	440
7.3.4.1	Übersicht	440
7.3.4.2	Halbleiterstruktur	440
7.3.4.3	Stationäre Strom-Spannungskennlinie	441
7.3.4.4	Vorgang beim Abschalten	441
7.3.4.5	Zusammenfassung der Eigenschaften des GTO	442
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	442
7.3.5.1	Übersicht	442

7.3.5.2	Halbleiterstruktur	443
7.3.5.3	Schalteigenschaften des p-MCT	444
7.3.5.4	Zusammenfassung der Eigenschaften von MCTs	445
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT)	445
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT)	446
7.3.7.1	Übersicht	446
7.3.7.2	Schalteigenschaften des FCT	446
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT)	447
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT)	448
7.3.9.1	Wirkungsweise	448
7.3.9.2	Anwendung	450
8	Operationsverstärker	453
8.1	Allgemeines, Überblick	453
8.2	Schaltsymbol, Anschlüsse	454
8.3	Ausführungsformen	455
8.4	Betriebsspannungen	456
8.5	Operationsverstärker-Typen	458
8.5.1	Normaler Operationsverstärker	458
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker	459
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker	460
8.5.4	Strom-Verstärker	461
8.6	Der normale Operationsverstärker	461
8.6.1	Begriffsdefinitionen	462
8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung V_0	464
8.6.3	Übertragungskennlinie	464
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	466
8.6.5	Eingangswiderstände	468
8.6.5.1	Differenzeingangswiderstand	469
8.6.5.2	Gleichtakteingangswiderstand	469
8.6.6	Ausgangswiderstand	470
8.6.7	Eingangsströme	471
8.6.7.1	Eingangsruhestrom	471
8.6.7.2	Offsetstrom (Eingangsfehlstrom)	472
8.6.8	Offsetspannung	473
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung	476
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt	477
8.6.10.1	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung	477
8.6.10.2	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung	479
8.6.11	Frequenzgangkorrektur	480
8.6.11.1	Mehrstufiger Verstärker	480
8.6.11.2	Schwingbedingung	481

8.6.11.3	Amplituden- und Phasenrand	484
8.6.11.4	Prinzip der Frequenzgangkorrektur	485
8.6.11.5	Frequenzgangkorrektur am Operationsverstärker	486
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme	492
8.6.13	Temperaturbereich	493
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit	493
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung	495
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time)	495
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast	496
8.6.18	Rauschen	497
8.7	Der ideale Operationsverstärker	500
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	501
8.8.1	Übersicht	501
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker)	502
8.8.2.1	Grundschtaltung des Differenzverstärkers	503
8.8.2.2	Realisierung der Konstantstromquelle	505
8.8.2.3	Übertragungskennlinie des npn-Differenzverstärkers	506
8.8.2.4	Übertragungskennlinie des n-Kanal MOSFET-Differenzverstärkers	507
8.8.3	Die Koppelstufe	507
8.8.4	Die Ausgangsstufe	509
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern	509
9	Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen	513
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen	513
9.1.1	Definition und Arten der Integration	513
9.1.1.1	Hybride Integration	514
9.1.1.2	Monolithische Integration	518
9.1.1.3	Multi Chip Module	519
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	519
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen	520
9.1.3.1	Integrationsgrad	520
9.1.3.2	Befestigungsart auf der Leiterplatte	521
9.1.3.3	Technologie	521
9.1.3.4	Schaltzeiten	521
9.1.3.5	Temperaturbereiche	523
9.1.3.6	Schaltungsart	523
9.1.3.7	Anwendungsbereich	523
9.1.3.8	Programmierbare Logik	525
9.1.3.9	Zugänglichkeit	525
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise	526
9.2.1	Betriebsspannung	526

9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen	526
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand	527
9.2.4	Lastfaktoren	529
9.2.5	Ausgangsstufen	530
9.2.6	Schaltzeiten	530
9.2.7	Verlustleistung	531
9.3	Logikbaureihen	532
9.3.1	Übersicht Bipolare Schaltkreisfamilien	532
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien	533
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien	534
9.4.1	RTL	534
9.4.2	DTL	534
9.4.3	ECL	536
9.4.4	I ² L	539
9.4.5	TTL	540
9.4.5.1	Funktion	540
9.4.5.2	TTL-Ausgangsschaltungen	542
9.4.5.3	TTL-Schaltungsvarianten	545
9.4.5.4	TTL-kompatible High-Speed-CMOS-Logik	551
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	554
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	554
9.5.2	PMOS-Technologie	555
9.5.3	NMOS-Technologie	555
9.5.4	CMOS-Technologie	557
9.5.4.1	Allgemeine Eigenschaften	557
9.5.4.2	Statische CMOS-Logik	557
9.5.4.3	CMOS-Inverter	559
9.5.4.4	CMOS-Gatter	561
9.5.4.5	Prinzipieller Aufbau von CMOS-Bauelementen	562
9.5.4.6	Eingangs-Schutzschaltung	562
9.5.4.7	Latch-up-Effekt	563
9.5.4.8	Transmissionsgatter	564
9.5.4.9	Dynamische CMOS-Logik	564
9.5.5	BICMOS-Logik	566
10	Halbleiterspeicher	569
10.1	Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	569
10.2	Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	571
10.2.1	Speicherorganisation	571
10.2.2	Der Adressdekoder	574
10.2.3	Die Speicherzelle	575
10.2.4	Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	576

10.2.5	Busleitungen, Steuersignale	576
10.2.6	Kenndaten	577
10.2.6.1	Kapazität und Organisation eines Speicherbausteines	577
10.2.6.2	Zeitverhalten von Speichern	578
10.3	Einteilung der Tabellenspeicher	579
10.4	Einteilung der Festwertspeicher	579
10.4.1	Masken-ROM	580
10.4.2	Mit Programmiergerät programmierbare PROMs	581
10.4.2.1	PROM, ein Mal programmierbar	581
10.4.2.2	EPROM, löschar und mehrfach programmierbar	582
10.4.3	In der Schaltung löschar- und programmierbare PROMs	586
10.4.3.1	EEPROM (E ² PROM, Electrically Erasable PROM)	586
10.4.3.2	Flash-EEPROM	590
10.4.4	MRAM (Magnetic Random Access Memory)	597
10.4.4.1	Grundlagen, magnetoresistive Effekte	597
10.4.4.2	Funktionsweise	598
10.4.4.3	Lese- und Schreibvorgang	599
10.4.5	FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)	600
10.4.5.1	Grundlagen, Ferroelektrika	600
10.4.5.2	Aufbau und Funktionsweise	601
10.4.5.3	Lese- und Schreibvorgang	602
10.4.5.4	OUM (Ovonic Unified Memory)	603
10.5	Einteilung der flüchtigen Speicher	604
10.5.1	Statisches RAM (SRAM)	605
10.5.1.1	Die SRAM-Speicherzelle	605
10.5.1.2	Die SRAM-Speichermatrix	607
10.5.1.3	Spezielle Typen statischer RAM	609
10.5.2	Dynamisches RAM (DRAM)	610
10.5.2.1	Die Ein-Transistor-DRAM-Zelle	610
10.5.2.2	Architektur und interne Steuerung	611
10.5.2.3	Lesevorgang	614
10.5.2.4	Schreibvorgang	615
10.5.2.5	Refresh-Arten	616
10.5.2.6	Organisationsarten und Typen von DRAMs	617
11	Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine	621
11.1	Einsatz von ASICs	621
11.2	Einteilung von ASICs	622
11.2.1	Full-Custom-ASIC	623
11.2.2	Standardzellen-ASIC	623
11.2.3	Gate Array	624
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine	625

11.3 Entwurfsablauf eines ASIC	626
11.3.1 Vorüberlegungen	626
11.3.1.1 Infrastruktur	626
11.3.1.2 Technologie	627
11.3.1.3 Entwurfsstrategie	627
11.3.1.4 Stückzahlen, Kosten, Zeit	628
11.3.2 Schaltungsentwicklung	628
11.3.2.1 Entwurfsschritte	628
11.3.2.2 Handrechnung	631
11.3.3 Schaltungseingabe	631
11.3.3.1 Schaltplaneingabe	632
11.3.3.2 Hardwarebeschreibungssprachen	633
11.3.3.3 Schaltungssynthese	633
11.3.4 Simulation	634
11.3.4.1 Grundlagen	634
11.3.4.2 Parameterstreuungsabschätzung	634
11.3.5 Layout	635
11.3.5.1 Layerbezeichnungen	636
11.3.5.2 Schematic Driven Layout	636
11.3.5.3 Automatische Platzierung und Verdrahtung	636
11.3.5.4 Mixed-Mode Layoutregeln	637
11.3.5.5 Dummystrukturen zur Nachkorrektur	637
11.3.5.6 Testpads	638
11.3.6 Entwurfsprüfung	638
11.3.6.1 ERC	638
11.3.6.2 DRC	638
11.3.6.3 LVS	638
11.3.7 Fertigung	639
11.3.7.1 Allgemeines	639
11.3.7.2 Maskenerstellung	639
11.3.7.3 Single Run	639
11.3.7.4 MPW-Run	640
11.3.7.5 Backup-Wafer	640
11.3.8 Mechanischer Aufbau	640
11.3.8.1 Bonddrähte	640
11.3.8.2 Mechanische Spannungen im Substrat	641
11.3.9 Test	641
11.3.9.1 Anforderungen und Fehlerarten	641
11.3.9.2 Teststrategie	642
11.3.9.3 Fehlermodelle	643
11.3.9.4 Prüfpfadtechnik	643

11.3.9.5	Boundary Scan	643
11.3.9.6	Testarten	644
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine	645
11.4.1	Übersicht und Begriffe	645
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise	647
11.4.2.1	Kurzdarstellung von Verbindungsstrukturen	647
11.4.2.2	Elementare kombinatorische Schaltkreise	647
11.4.2.3	Grundsätzliches zur Architektur	649
11.4.2.4	Technologien	652
11.4.2.5	Wichtige Kennwerte	652
11.4.3	PAL	653
11.4.3.1	Kombinatorische PALs	653
11.4.3.2	Sequenzielle (Registered) PALs	653
11.4.4	GAL	657
11.4.5	CPLD	660
11.4.6	FPGA	664
11.4.6.1	Interne Struktur eines FPGA	664
11.4.6.2	Vorteile von FPGAs, Anwendungsgebiete	664
11.4.6.3	Aufbau eines FPGA	665
11.4.6.4	Architektur und Verdrahtung	667
11.4.6.5	Wahl eines FPGA	667
11.4.6.6	Programmiertechnologien	668
	Liste verwendeter Formelzeichen	671
	Literatur	679
	Sachverzeichnis	683