
Leonhard Stiny

Aktive elektronische Bauelemente

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

3., überarbeitete Auflage

Mit 553 Abbildungen und 23 Tabellen

 Springer Vieweg

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	11
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	13
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik	15
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	22
2.4.1	Quanten und Wellen	22
2.4.2	Direkte Rekombination	24
2.4.3	Indirekte Rekombination	25
2.5	Eigenleitung	26
2.5.1	Eigenleitungsdichte	27
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	30
2.5.3	Beweglichkeit	31
2.6	Störstellenleitung	32
2.6.1	Dotieren	32
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell	34
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	35
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	36
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	38
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	41
3.1.3	Ladungsträgerdichte	42
3.1.4	Raumladungsdichte	44

3.1.5	Feldstärke und Diffusionsspannung	44
3.1.6	Sperrschichtbreite	48
3.1.7	Sperrschichtkapazität	49
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs	50
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	52
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung	52
3.2.1.1	Verbreiterung der Grenzschicht	52
3.2.1.2	Sperr sättigungsstrom	54
3.2.1.3	Sperrschichtweite und Sperrschichtkapazität	56
3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung	58
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang	61
3.3.1	Lawinendurchbruch	62
3.3.2	Zener-Durchbruch	63
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt	66
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch)	66
3.3.5	Durchgriff (punch-through)	67
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs	69
3.4.1	Einschaltvorgang	69
3.4.1.1	Kapazitives Verhalten	69
3.4.1.2	Induktives Verhalten	70
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang	70
3.4.2.1	Unterbrechen des Durchlassstromes	70
3.4.2.2	Umschalten von Fluss- in Sperrbetrieb	71
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs	72
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang	73
4	Halbleiterdioden	77
4.1	Ausführung	77
4.2	Aufbau	77
4.3	Elektrische Funktion	78
4.4	Bauarten	79
4.5	Verhalten einer Diode	80
4.5.1	Kennlinienbereiche	81
4.5.1.1	Durchlassbereich	82
4.5.1.2	Sperrbereich	83
4.5.1.3	Durchbruchbereich	83
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie	83
4.5.2.1	Näherung 0. Ordnung	84
4.5.2.2	Näherung 1. Ordnung	84
4.5.2.3	Näherung 2. Ordnung	84
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen	86
4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren	88

4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden	90
4.5.5.1	Arbeitspunkt	90
4.5.5.2	Gleichstromwiderstand	90
4.5.5.3	Wechselstromwiderstand – Differenzieller Widerstand	90
4.5.5.4	Wirkung des differentiellen Widerstandes	91
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden	93
4.5.6.1	Ideales Schaltverhalten	93
4.5.6.2	Umschalten von Sperr- in Flussrichtung	93
4.5.6.3	Umschalten von Fluss- in Sperrrichtung	95
4.5.6.4	Ein- und Ausschalten bei ohmsch-induktiver Last	96
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	97
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes	97
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung	98
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter	99
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden	100
4.7.1	Grenzspannungen	100
4.7.2	Grenzströme	101
4.7.3	Sperrstrom	101
4.7.4	Maximale Verlustleistung	101
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden	102
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148	102
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001... 1N 4007	106
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge	108
4.9.1	Legierungstechnik	108
4.9.2	Planartechnik	109
4.9.2.1	Diffusion	109
4.9.2.2	Epitaxie	110
4.9.2.3	Ionenimplantation	111
4.9.2.4	Kontaktierung	112
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden	112
4.10.1	Einzeldiode	112
4.10.1.1	Spitzendioden	112
4.10.1.2	Flächendioden	114
4.10.1.3	Leistungsdioden	115
4.10.1.4	Gehäuse	116
4.10.2	Integrierte Diode	117
4.11	Diodentypen	118
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode	118
4.11.2	Gleichrichterdiode	118
4.11.3	Schottky-Diode	118
4.11.4	Suppressordiode	119

4.11.5	Temperatursensoren	123
4.11.6	DIAC	123
4.11.6.1	Dreischichtdiode	124
4.11.6.2	Fünfschichtdiode	124
4.11.6.3	Vierschichtdiode	125
4.11.6.4	Anwendungen der Mehrschichtdioden	126
4.11.6.5	Kennwerte von Mehrschichtdioden	127
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode	127
4.11.8	Avalanchediode	129
4.11.9	Stromregeldiode	129
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED)	130
4.11.10.1	Grundsätzliches	130
4.11.10.2	Funktionsprinzip	131
4.11.10.3	Herstellung	131
4.11.10.4	Material und Farben, Spektrum	132
4.11.10.5	Technische Ausführung, Aufbau	135
4.11.10.6	Flächen- und Kantenstrahler	135
4.11.10.7	Wirkungsgrad	138
4.11.10.8	Eigenschaften	138
4.11.10.9	Kennwerte und Grenzwerte	141
4.11.10.10	Anwendungen und Einsatzbereiche	142
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED)	143
4.11.11.1	Vorteile	143
4.11.11.2	Nachteile	144
4.11.11.3	Organische Materialien	144
4.11.11.4	Aufbau	145
4.11.11.5	Funktionsweise	146
4.11.11.6	Aktivmatrix- und Passivmatrix-Displays	147
4.11.12	Laserdiode (LD)	148
4.11.12.1	Grundlagen	148
4.11.12.2	Realisierungsbedingungen für die Funktion der Laserdiode	151
4.11.12.3	Aufbau der Materialschichten	155
4.11.12.4	Aufbau des Laserresonators, DFB-, DBR-Laser	156
4.11.12.5	Kenngößen	158
4.11.12.6	Eigenschaften und Besonderheiten	160
4.11.12.7	Anwendungen	162
4.11.12.8	Beispiel für Datenblattangaben einer Laserdiode	162
4.11.13	Fotodiode	162
4.11.13.1	Funktionsweise	163
4.11.13.2	Betriebsarten	167
4.11.13.3	Aufbau	169

4.11.13.4	Eigenschaften	170
4.11.13.5	Ausführungsformen	171
4.11.13.6	Anwendungen	172
4.11.14	Solarzelle	172
4.11.14.1	Aufbau einer Silizium-Solarzelle	173
4.11.14.2	Solarzellentypen	174
4.11.14.3	Verluste in Solarzellen	175
4.11.14.4	Eigenschaften von Solarzellen	176
4.11.14.5	Kenndaten der Solarzelle	178
4.11.14.6	Ersatzschaltbild der Solarzelle	181
4.11.14.7	Bypass-Diode	182
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode)	182
4.11.15.1	Allgemeines	183
4.11.15.2	Funktionsweise und Eigenschaften	183
4.11.15.3	Ersatzschaltung, Güte	183
4.11.15.4	Grenzfrequenz f_c (cut-off-frequency)	185
4.11.15.5	Temperaturabhängigkeit	185
4.11.15.6	Anwendungen	186
4.11.16	pin-Diode	188
4.11.16.1	Funktion	189
4.11.16.2	Anwendungen der pin-Diode	190
4.11.17	Tunneldiode (Esaki-Diode)	191
4.11.17.1	Grundlegendes zur Quantenphysik	192
4.11.17.2	Tunneleffekt	192
4.11.17.3	Aufbau und Funktion der Tunneldiode	194
4.11.17.4	Ersatzschaltung	196
4.11.17.5	Anwendungen der Tunneldiode	198
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode)	198
4.11.19	Gunndiode	199
4.11.19.1	Gunn-Effekt	199
4.11.19.2	Aufbau der Gunndiode	200
4.11.19.3	Funktionsweise der Gunndiode	200
4.11.19.4	Anwendungen der Gunndiode	205
4.11.20	IMPATT-Diode	206
4.11.20.1	Funktionsweise der IMPATT-Diode	206
4.11.20.2	Anwendungen der IMPATT-Diode	209
4.11.21	TRAPATT-Diode	209
4.11.22	BARITT-Diode	210
4.11.23	DOVETT-Diode	211
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode	212

4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode)	212
4.11.26	Magnetdiode	214
4.11.26.1	Aufbau	214
4.11.26.2	Funktionsweise	214
4.11.26.3	Eigenschaften und Anwendungen	215
5	Bipolare Transistoren	217
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren	217
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors	220
5.3	Richtungen von Strömen und Spannungen	221
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche)	222
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb)	222
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb)	223
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb)	223
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb)	224
5.5	Signaldynamik und Signalgröße	224
5.6	Funktionsweise	225
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors	230
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter	231
5.8.1	Verstärkerbetrieb	231
5.8.2	Schalterbetrieb	233
5.9	Kennlinien des Transistors	234
5.9.1	Eingangskennlinie	234
5.9.1.1	Verlauf der Eingangskennlinie	234
5.9.1.2	Differenzieller Eingangswiderstand	237
5.9.2	Ausgangskennlinie	238
5.9.2.1	Ausgangskennlinienfeld für Spannungs- und Stromsteuerung	238
5.9.2.2	Aktiver Bereich	239
5.9.2.3	Übersteuerungsbereich	240
5.9.2.4	Sperrbereich	241
5.9.2.5	Differenzieller Ausgangswiderstand	244
5.9.3	Steuerkennlinien	245
5.9.3.1	Strom-Steuerkennlinie	245
5.9.3.2	Spannungs-Steuerkennlinie	246
5.9.4	Rückwirkungskennlinie	247
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	248
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme	250
5.10.1	Durchbruch 1. Art	250
5.10.1.1	Basis-Emitter-Diode	250
5.10.1.2	Basis-Kollektor-Diode	250
5.10.1.3	Kollektor-Emitter-Strecke	251

5.10.2	Durchbruch 2.Art	252
5.10.3	Grenzströme	252
5.11	Maximale Verlustleistung	252
5.11.1	Statischer Betrieb	252
5.11.2	Pulsbetrieb	255
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	257
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor	258
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	258
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	260
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	269
5.13.3.1	Thermisches Rauschen (Widerstandsrauschen)	269
5.13.3.2	Schrotrauschen (Schottky-Rauschen)	270
5.13.3.3	$1/f$ -Rauschen	271
5.13.3.4	Popcorn-Rauschen	271
5.13.3.5	Generations-Rekombinations-Rauschen	272
5.13.3.6	Stromverteilungsrauschen	272
5.13.3.7	Avalanche-Rauschen	272
5.13.4	Rauschzahl	272
5.13.4.1	Definition und Eigenschaften	272
5.13.4.2	Bereich weißes Rauschen	274
5.13.4.3	Bereich $1/f$ -Rauschen	275
5.13.4.4	Bereich hoher Frequenzen	276
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	276
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung	277
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt	277
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschaltung	278
5.15.2.1	Stromverstärkung der Basisschaltung	278
5.15.2.2	Stromverstärkung der Emitterschaltung	280
5.15.2.3	Stromverstärkung der Kollektorschaltung	280
5.15.2.4	Umrechnung der Stromverstärkungen	281
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen	281
5.15.3.1	β -Grenzfrequenz	281
5.15.3.2	Transitfrequenz	282
5.15.3.3	Maximale Schwingfrequenz	284
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors	284
5.16.1	Schaltzeiten	285
5.16.1.1	Einschaltverzögerung t_d	285
5.16.1.2	Anstiegszeit t_r	285
5.16.1.3	Speicherzeit t_s	286
5.16.1.4	Abfallzeit t_f	287
5.16.1.5	Verkürzung der Schaltzeiten	287

5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors	288
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung	289
5.17.1.1	Das Ebers-Moll-Modell	290
5.17.1.2	Transportmodell	293
5.17.1.3	Gummel-Poon-Modell	294
5.17.1.4	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	295
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	301
5.17.2.1	Allgemeines zum Vierpol	301
5.17.2.2	h -Parameter	303
5.17.2.3	Bestimmung der h -Parameter aus den Kennlinien	304
5.17.2.4	Umrechnung der h -Parameter zwischen Grundsaltungen	306
5.17.2.5	Umrechnung von h -Parametern für andere Arbeits- punkte	307
5.17.2.6	y -Parameter	309
5.17.2.7	Umrechnung zwischen y - und h -Parametern	310
5.17.2.8	s -Parameter	311
5.17.2.9	Vierpolparameter und physikalisches Ersatzschaltbild	314
5.17.2.10	Berechnung des Betriebsverhaltens	314
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	317
5.18	Aufbau und Herstellungsverfahren von Bipolartransistoren	318
5.18.1	Spitzentransistor	318
5.18.2	Legierungstransistor	319
5.18.3	Mesatransistor	319
5.18.4	Planartransistor	320
5.18.4.1	Herstellung von Einzeltransistoren, innerer Aufbau	321
5.18.4.2	Bauformen, Gehäuse von Einzeltransistoren	321
5.18.4.3	Integrierte Transistoren, Herstellung und innerer Aufbau	323
5.18.4.4	Herstellungsprozess am Beispiel eines npn-Transistors	324
5.18.4.5	Emitterrandverdrängung	326
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	327
5.20	Darlington-Transistor	330
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	332
5.20.1.1	Stromverstärkung im Bereich 1	332
5.20.1.2	Stromverstärkung im Bereich 2 und 3	333
5.20.2	Schaltverhalten	334
5.20.3	Kleinsignalverhalten	335
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors	336

6	Feldeffekttransistoren	337
6.1	Allgemeine Eigenschaften	337
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation	339
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren	341
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	343
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	344
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	345
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	345
6.4.2	U_{GS} variabel, U_{DS} klein und konstant	346
6.4.3	U_{DS} variabel, $U_{GS} = 0$	348
6.4.4	U_{DS} und U_{GS} variabel	349
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	351
6.4.5.1	Begriffe	351
6.4.5.2	Kennlinienarten	352
6.4.5.3	Übertragungskennlinie	352
6.4.5.4	Ausgangskennlinienfeld	353
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter	355
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs	357
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs	357
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal MOSFET	359
6.5.2.1	Anreicherungstyp	359
6.5.2.2	Verarmungstyp	360
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	362
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	366
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	368
6.5.5.1	n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp	368
6.5.5.2	n-Kanal MOSFET, Verarmungstyp	372
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	373
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	375
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors	377
6.6.1	Statisches Verhalten	377
6.6.2	Dynamisches Verhalten	378
6.6.3	Kleinsignalmodell	379
6.6.3.1	Gleichstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	379
6.6.3.2	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild	381
6.6.3.3	Grenzfrequenzen bei Kleinsignalbetrieb	383
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	384
6.7.1	Durchbruchspannungen	385
6.7.1.1	Gate-Durchbruch	385
6.7.1.2	Drain-Source-Durchbruch	385

6.7.2	Grenzströme	386
6.7.2.1	Drainstrom	386
6.7.2.2	Rückwärtsdiode	386
6.7.2.3	Gatestrom	386
6.7.3	Sperrströme	387
6.7.4	Maximale Verlustleistung	387
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	387
6.8	Der FET als Schalter	388
6.8.1	Schaltstufen mit FET	388
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	390
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor	391
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	392
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	392
6.10.1.1	Allgemeines, Vorteile, Einsatzgebiete	392
6.10.1.2	FET mit DMOS-Struktur	393
6.10.1.3	FET mit VMOS-Struktur	394
6.10.1.4	HEXFET	396
6.10.1.5	SIPMOS-Transistor	396
6.10.1.6	LDMOS-Transistor	397
6.10.1.7	FREDFET	398
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs	398
6.10.2.1	TEMPFET (Temperature Protected FET)	399
6.10.2.2	PROFET (Protected FET)	399
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs	399
6.10.3.1	Dual-Gate MOSFET	399
6.10.3.2	MESFET	400
6.10.3.3	HEMT (MODFET)	401
6.10.3.4	ISFET	403
6.10.3.5	ENFET	404
6.10.3.6	TFT-Transistor	405
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	405
6.11.1	Struktureller Aufbau	406
6.11.2	NPT- und PT-Struktur	406
6.11.3	Funktionsweise	409
6.11.4	IGBT Latch-Up	410
6.11.5	Kennlinien	412
6.11.5.1	Vorwärtssperrzustand	413
6.11.5.2	Durchlasszustand	413
6.11.5.3	Rückwärtsbetrieb	414

6.11.6	Schaltverhalten	415
6.11.6.1	Übersicht	415
6.11.6.2	Ein- und Ausschalten im Detail, Vergleich MOSFET – IGBT	415
6.11.7	Trench-IGBT	418
7	Thyristoren	421
7.1	Einteilung der Thyristoren	421
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	422
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	423
7.2.2	Aufbau	424
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	426
7.2.3.1	Betrieb in Sperrrichtung	426
7.2.3.2	Betrieb in (Vorwärts-)Blockierrichtung	427
7.2.4	Der Zündvorgang	429
7.2.4.1	Erläuterung des Zündvorgangs mit Hilfe des Zweittransistormodells	429
7.2.4.2	Die Zündbedingung	430
7.2.4.3	Zündung ohne Steuerstrom ($I_G = 0$)	432
7.2.4.4	Zündung durch den Steuerstrom	432
7.2.5	Löschen des Thyristors	435
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	435
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	436
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	437
7.2.8.1	Kritische Spannungsanstiegsgeschwindigkeit du/dt	437
7.2.8.2	Kritische Stromanstiegsgeschwindigkeit di/dt	437
7.2.8.3	Einschaltverhalten	438
7.2.8.4	Ausschaltverhalten	439
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	440
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	442
7.2.10.1	Funktionsweise der Phasenanschnittsteuerung	442
7.2.10.2	Berechnung der Änderung der Leistungsaufnahme	444
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	445
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	445
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	446
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	446
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	448
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	449
7.3.3.1	Rückwärts leitender Thyristor (RCT)	449
7.3.3.2	Asymmetrisch sperrender Thyristor (ASCR)	449

7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	450
7.3.4.1	Übersicht	450
7.3.4.2	Halbleiterstruktur	450
7.3.4.3	Stationäre Strom-Spannungskennlinie	451
7.3.4.4	Vorgang beim Abschalten	451
7.3.4.5	Zusammenfassung der Eigenschaften des GTO	452
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	452
7.3.5.1	Übersicht	452
7.3.5.2	Halbleiterstruktur	453
7.3.5.3	Schalteigenschaften des p-MCT	454
7.3.5.4	Zusammenfassung der Eigenschaften von MCTs	455
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT)	455
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT)	456
7.3.7.1	Übersicht	456
7.3.7.2	Schalteigenschaften des FCT	456
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT)	457
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT)	458
7.3.9.1	Wirkungsweise	458
7.3.9.2	Anwendung	460
8	Operationsverstärker	463
8.1	Allgemeines, Überblick	463
8.2	Schaltymbol, Anschlüsse	464
8.3	Ausführungsformen	465
8.4	Betriebsspannungen	466
8.5	Operationsverstärker-Typen	468
8.5.1	Normaler Operationsverstärker	468
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker	469
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker	470
8.5.4	Strom-Verstärker	471
8.6	Der normale Operationsverstärker	471
8.6.1	Begriffsdefinitionen	472
8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung V_0	474
8.6.3	Übertragungskennlinie	474
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	476
8.6.5	Eingangswiderstände	478
8.6.5.1	Differenzeingangswiderstand	479
8.6.5.2	Gleichtakteingangswiderstand	479
8.6.6	Ausgangswiderstand	480
8.6.7	Eingangsströme	481
8.6.7.1	Eingangsruhestrom	481
8.6.7.2	Offsetstrom (Eingangsfehlstrom)	482

8.6.8	Offsetspannung	483
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung	486
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt	487
8.6.10.1	Frequenzgang der Leerlaufverstärkung	487
8.6.10.2	Erhöhung der Bandbreite durch Gegenkopplung	489
8.6.11	Frequenzgangkorrektur	490
8.6.11.1	Mehrstufiger Verstärker	490
8.6.11.2	Schwingbedingung	491
8.6.11.3	Amplituden- und Phasenrand	494
8.6.11.4	Prinzip der Frequenzgangkorrektur	495
8.6.11.5	Frequenzgangkorrektur am Operationsverstärker	496
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme	500
8.6.13	Temperaturbereich	500
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit	500
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung	502
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time)	503
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast	504
8.6.18	Rauschen	504
8.7	Der ideale Operationsverstärker	507
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern	508
8.8.1	Übersicht	508
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker)	509
8.8.2.1	Grundschialtung des Differenzverstärkers	510
8.8.2.2	Realisierung der Konstantstromquelle	512
8.8.2.3	Übertragungskennlinie des npn-Differenzverstärkers	513
8.8.2.4	Übertragungskennlinie des n-Kanal MOSFET-Differenzverstärkers	514
8.8.3	Die Koppelstufe	514
8.8.4	Die Ausgangsstufe	516
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern	516
9	Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen	519
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen	519
9.1.1	Definition und Arten der Integration	519
9.1.1.1	Hybride Integration	520
9.1.1.2	Monolithische Integration	524
9.1.1.3	Multi Chip Module	525
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen	525
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen	526
9.1.3.1	Integrationsgrad	526
9.1.3.2	Befestigungsart auf der Leiterplatte	527
9.1.3.3	Technologie	527

9.1.3.4	Schaltzeiten	527
9.1.3.5	Temperaturbereiche	529
9.1.3.6	Schaltungsart	529
9.1.3.7	Anwendungsbereich	529
9.1.3.8	Programmierbare Logik	531
9.1.3.9	Zugänglichkeit	531
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise	532
9.2.1	Betriebsspannung	532
9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen	532
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand	533
9.2.4	Lastfaktoren	535
9.2.5	Ausgangsstufen	536
9.2.6	Schaltzeiten	536
9.2.7	Verlustleistung	537
9.3	Logikbaureihen	538
9.3.1	Übersicht Bipolare Schaltkreisfamilien	538
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien	539
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien	540
9.4.1	RTL	540
9.4.2	DTL	540
9.4.3	ECL	542
9.4.4	I ² L	545
9.4.5	TTL	546
9.4.5.1	Funktion	546
9.4.5.2	TTL-Ausgangsschaltungen	548
9.4.5.3	TTL-Schaltungsvarianten	551
9.4.5.4	TTL-kompatible High-Speed-CMOS-Logik	557
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	560
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	560
9.5.2	PMOS-Technologie	561
9.5.3	NMOS-Technologie	561
9.5.4	CMOS-Technologie	563
9.5.4.1	Allgemeine Eigenschaften	563
9.5.4.2	Statische CMOS-Logik	563
9.5.4.3	CMOS-Inverter	565
9.5.4.4	CMOS-Gatter	567
9.5.4.5	Prinzipieller Aufbau von CMOS-Bauelementen	568
9.5.4.6	Eingangs-Schutzschaltung	568
9.5.4.7	Latch-up-Effekt	569
9.5.4.8	Transmissionsgatter	570
9.5.4.9	Dynamische CMOS-Logik	570
9.5.5	BICMOS-Logik	572

10 Halbleiterspeicher	575
10.1 Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	575
10.2 Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	577
10.2.1 Speicherorganisation	577
10.2.2 Der Adressdekoder	580
10.2.3 Die Speicherzelle	581
10.2.4 Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	582
10.2.5 Busleitungen, Steuersignale	582
10.2.6 Kenndaten	583
10.2.6.1 Kapazität und Organisation eines Speicherbausteines	583
10.2.6.2 Zeitverhalten von Speichern	584
10.3 Einteilung der Tabellenspeicher	585
10.4 Einteilung der Festwertspeicher	585
10.4.1 Masken-ROM	586
10.4.2 Mit Programmiergerät programmierbare PROMs	587
10.4.2.1 PROM, ein Mal programmierbar	587
10.4.2.2 EPROM, löschar und mehrfach programmierbar	588
10.4.3 In der Schaltung löschar- und programmierbare PROMs	592
10.4.3.1 EEPROM (E ² PROM, Electrically Erasable PROM)	592
10.4.3.2 Flash-EEPROM	596
10.4.4 MRAM (Magnetic Random Access Memory)	603
10.4.4.1 Grundlagen, magnetoresistive Effekte	603
10.4.4.2 Funktionsweise	604
10.4.4.3 Lese- und Schreibvorgang	605
10.4.5 FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)	606
10.4.5.1 Grundlagen, Ferroelektrika	606
10.4.5.2 Aufbau und Funktionsweise	607
10.4.5.3 Lese- und Schreibvorgang	608
10.4.5.4 OUM (Ovonic Unified Memory)	609
10.5 Einteilung der flüchtigen Speicher	610
10.5.1 Statisches RAM (SRAM)	611
10.5.1.1 Die SRAM-Speicherzelle	611
10.5.1.2 Die SRAM-Speichermatrix	613
10.5.1.3 Spezielle Typen statischer RAM	615
10.5.2 Dynamisches RAM (DRAM)	616
10.5.2.1 Die Ein-Transistor-DRAM-Zelle	616
10.5.2.2 Architektur und interne Steuerung	617
10.5.2.3 Lesevorgang	620
10.5.2.4 Schreibvorgang	621
10.5.2.5 Refresh-Arten	622
10.5.2.6 Organisationsarten und Typen von DRAMs	623

11	Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine	627
11.1	Einsatz von ASICs	627
11.2	Einteilung von ASICs	628
11.2.1	Full-Custom-ASIC	629
11.2.2	Standardzellen-ASIC	629
11.2.3	Gate Array	630
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine	631
11.3	Entwurfsablauf eines ASIC	632
11.3.1	Vorüberlegungen	632
11.3.1.1	Infrastruktur	632
11.3.1.2	Technologie	633
11.3.1.3	Entwurfsstrategie	633
11.3.1.4	Stückzahlen, Kosten, Zeit	634
11.3.2	Schaltungsentwicklung	634
11.3.2.1	Entwurfsschritte	634
11.3.2.2	Handrechnung	637
11.3.3	Schaltungseingabe	637
11.3.3.1	Schaltplaneingabe	638
11.3.3.2	Hardwarebeschreibungssprachen	639
11.3.3.3	Schaltungssynthese	639
11.3.4	Simulation	640
11.3.4.1	Grundlagen	640
11.3.4.2	Parameterstreuungsabschätzung	640
11.3.5	Layout	641
11.3.5.1	Layerbezeichnungen	642
11.3.5.2	Schematic Driven Layout	642
11.3.5.3	Automatische Platzierung und Verdrahtung	642
11.3.5.4	Mixed-Mode Layoutregeln	643
11.3.5.5	Dummysstrukturen zur Nachkorrektur	643
11.3.5.6	Testpads	644
11.3.6	Entwurfsprüfung	644
11.3.6.1	ERC	644
11.3.6.2	DRC	644
11.3.6.3	LVS	644
11.3.7	Fertigung	645
11.3.7.1	Allgemeines	645
11.3.7.2	Maskenerstellung	645
11.3.7.3	Single Run	645
11.3.7.4	MPW-Run	646
11.3.7.5	Backup-Wafer	646

11.3.8	Mechanischer Aufbau	646
11.3.8.1	Bonddrähte	646
11.3.8.2	Mechanische Spannungen im Substrat	647
11.3.9	Test	647
11.3.9.1	Anforderungen und Fehlerarten	647
11.3.9.2	Teststrategie	648
11.3.9.3	Fehlermodelle	649
11.3.9.4	Prüfpfadtechnik	649
11.3.9.5	Boundary Scan	649
11.3.9.6	Testarten	650
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine	651
11.4.1	Übersicht und Begriffe	651
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise	653
11.4.2.1	Kurzdarstellung von Verbindungsstrukturen	653
11.4.2.2	Elementare kombinatorische Schaltkreise	653
11.4.2.3	Grundsätzliches zur Architektur	655
11.4.2.4	Technologien	658
11.4.2.5	Wichtige Kennwerte	658
11.4.3	PAL	659
11.4.3.1	Kombinatorische PALs	659
11.4.3.2	Sequenzielle (Registered) PALs	659
11.4.4	GAL	663
11.4.5	CPLD	666
11.4.6	FPGA	670
11.4.6.1	Interne Struktur eines FPGA	670
11.4.6.2	Vorteile von FPGAs, Anwendungsgebiete	670
11.4.6.3	Aufbau eines FPGA	671
11.4.6.4	Architektur und Verdrahtung	673
11.4.6.5	Wahl eines FPGA	673
11.4.6.6	Programmiertechnologien	674
	Liste verwendeter Formelzeichen	677
	Literatur	685
	Sachverzeichnis	689