

# Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der verwendeten Symbole</b> .....	1
<b>1 Grundlagen der Halbleiterphysik</b> .....	7
1.1 Grundlegende Begriffe .....	7
1.1.1 Das Bändermodell .....	7
1.1.2 Silizium als Halbleiter .....	9
1.1.3 Das thermodynamische Gleichgewicht .....	11
1.1.4 Dotierte Halbleiter .....	13
1.2 Grundgleichungen der Halbleiterphysik .....	18
1.2.1 Berechnung der Ladungsträgerdichten .....	18
1.2.2 Bestimmung der Lage des Ferminiveaus .....	25
1.3 Ladungsträgertransport, Strom .....	28
1.3.1 Elektronen- und Löcherstrom .....	28
1.3.2 Driftstrom .....	28
1.3.3 Diffusionsstrom .....	30
1.3.4 Bänderdiagramm bei Stromfluss .....	31
1.4 Ausgleichsvorgänge im Halbleiter .....	33
1.4.1 Starke und schwache Injektion .....	33
1.4.2 Die Kontinuitätsgleichung .....	35
1.4.3 Temporäre Störung des Gleichgewichts .....	36
1.4.4 Lokale Störung des Gleichgewichts .....	39
<b>2 Diode</b> .....	45
2.1 Aufbau und Wirkungsweise der Diode .....	45
2.1.1 Diode im thermodynamischen Gleichgewicht .....	45
2.1.2 Diode bei Anlegen einer äußeren Spannung .....	49
2.2 Ableitung der Diodengleichung .....	50
2.2.1 Diode mit langen Abmessungen .....	50
2.2.2 Diode mit kurzen Abmessungen .....	55
2.2.3 Abweichung von der idealen Diodenkennlinie .....	55
2.2.4 Kapazitätsverhalten des pn-Übergangs .....	56

## VIII Inhaltsverzeichnis

2.3	Modellierung der Diode . . . . .	63
2.3.1	Großsignaltersatzschaltung der Diode . . . . .	63
2.3.2	Schaltverhalten der Diode . . . . .	63
2.3.3	Kleinsignaltersatzschaltung der Diode . . . . .	66
2.3.4	Durchbruchverhalten der Diode . . . . .	68
2.4	Bänderdiagrammdarstellung der Diode . . . . .	69
2.4.1	Regeln zur Konstruktion von Bänderdiagrammen . . . . .	69
2.4.2	Bänderdiagramm der Diode . . . . .	70
2.5	Metall-Halbleiter-Übergänge . . . . .	71
2.5.1	Elektronenaffinität und Austrittsarbeit . . . . .	72
2.5.2	Metall-Halbleiter-Übergang mit n-Halbleiter . . . . .	73
2.5.3	Metall-Halbleiter-Übergang mit p-Halbleiter . . . . .	78
<b>3</b>	<b>Bipolartransistor . . . . .</b>	<b>81</b>
3.1	Aufbau und Wirkungsweise des Bipolartransistors . . . . .	81
3.1.1	npn- und pnp-Transistor . . . . .	81
3.1.2	Funktion des Bipolartransistors . . . . .	82
3.2	Ableitung der Transistorgleichungen . . . . .	85
3.2.1	Transistor im normalen Verstärkerbetrieb . . . . .	85
3.2.2	Transistor im inversen Verstärkerbetrieb . . . . .	90
3.2.3	Transistor im Sättigungsbetrieb . . . . .	91
3.2.4	Ausgangskennlinienfeld des Transistors . . . . .	92
3.2.5	Basisweitenmodulation (Early-Effekt) . . . . .	93
3.3	Modellierung des Bipolartransistors . . . . .	95
3.3.1	Großsignaltersatzschaltbild des Bipolartransistors . . . . .	95
3.3.2	Schaltverhalten des Bipolartransistors . . . . .	99
3.3.3	Kleinsignaltersatzschaltbild des Bipolartransistors . . . . .	101
3.3.4	Frequenzverhalten des Transistors . . . . .	105
3.3.5	Durchbruchverhalten des Bipolartransistors . . . . .	107
3.4	Bänderdiagrammdarstellung des Bipolartransistors . . . . .	108
<b>4</b>	<b>Feldeffekttransistor . . . . .</b>	<b>111</b>
4.1	Aufbau und Wirkungsweise des Feldeffekttransistors . . . . .	111
4.1.1	n-Kanal MOS-Feldeffekttransistor . . . . .	111
4.1.2	p-Kanal MOS-Feldeffekttransistor . . . . .	113
4.1.3	Transistortypen und Schaltsymbole . . . . .	113
4.2	Ableitung der Transistorgleichungen . . . . .	115
4.2.1	Stromgleichung . . . . .	115
4.2.2	Ausgangskennlinienfeld . . . . .	118
4.2.3	Übertragungskennlinie . . . . .	121
4.2.4	Kanallängenmodulation . . . . .	121
4.3	Modellierung des MOSFET . . . . .	123
4.3.1	Großsignaltersatzschaltbild des MOSFET . . . . .	123
4.3.2	Schaltverhalten des MOSFET . . . . .	125
4.3.3	Kleinsignaltersatzschaltbild des MOSFET . . . . .	129

4.3.4	Durchbruchverhalten . . . . .	131
4.4	Bänderdiagrammdarstellung des MOSFET . . . . .	132
4.4.1	Bänderdiagramm der MOS-Struktur . . . . .	132
4.4.2	Bänderdiagramm des MOSFET . . . . .	135
4.4.3	Wirkungsweise des Transistors im Bänderdiagramm . . . . .	136
4.4.4	Substratsteuereffekt . . . . .	137
4.4.5	Kurzkanaleffekt . . . . .	137
<b>5</b>	<b>Optoelektronische Bauelemente . . . . .</b>	<b>139</b>
5.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	139
5.1.1	Kenngrößen optischer Strahlung . . . . .	139
5.1.2	Ladungsträgergeneration und Fotoeffekt . . . . .	142
5.1.3	Direkte und indirekte Halbleiter . . . . .	144
5.2	Fotowiderstand . . . . .	148
5.2.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	148
5.2.2	Stromgleichung . . . . .	149
5.2.3	Kenngrößen . . . . .	150
5.3	Fotodiode . . . . .	152
5.3.1	Aufbau und Funktion . . . . .	152
5.3.2	Stromgleichung . . . . .	153
5.3.3	Kenngrößen . . . . .	154
5.3.4	Betriebsarten der Fotodiode . . . . .	155
5.4	Solarzelle . . . . .	156
5.4.1	Funktion und Beschaltung . . . . .	156
5.4.2	Kenngrößen . . . . .	157
5.5	Fototransistor . . . . .	159
5.6	Lumineszenzdiode . . . . .	160
5.6.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	160
5.6.2	Kenngrößen . . . . .	161
<b>6</b>	<b>Der Transistor als Verstärker . . . . .</b>	<b>165</b>
6.1	Grundlegende Begriffe und Konzepte . . . . .	165
6.1.1	Übertragungskennlinie und Verstärkung . . . . .	165
6.1.2	Arbeitspunkt und Betriebsarten . . . . .	167
6.1.3	Gleichstromersatzschaltung . . . . .	169
6.2	Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk . . . . .	170
6.2.1	Arbeitspunkteinstellung beim Bipolartransistor . . . . .	170
6.2.2	Arbeitspunkteinstellung beim MOSFET . . . . .	173
6.3	Arbeitspunkteinstellung mit Stromspiegeln . . . . .	176
6.3.1	Stromspiegel . . . . .	176
6.3.2	Dimensionierung des Stromspiegels . . . . .	180
6.4	Wechselstromanalyse von Verstärkern . . . . .	181
6.4.1	Kleinsignalersatzschaltung . . . . .	181
6.4.2	Verstärkerschaltungen mit Bipolartransistor . . . . .	183
6.4.3	Verstärkerschaltungen mit MOSFET . . . . .	188

## X Inhaltsverzeichnis

6.4.4	Verstärkerschaltungen mit Stromspiegel . . . . .	192
6.4.5	Mehrstufige Verstärker . . . . .	194
<b>7</b>	<b>Transistorgrundschaltungen . . . . .</b>	<b>199</b>
7.1	Emitterschaltung, Sourceschaltung . . . . .	199
7.1.1	Wechselstromersatzschaltbild der Emitterschaltung . . . . .	199
7.1.2	Spannungsverstärkung der Emitterschaltung . . . . .	201
7.1.3	Eingangswiderstand der Emitterschaltung . . . . .	203
7.1.4	Ausgangswiderstand der Emitterschaltung . . . . .	204
7.2	Kollektorschaltung, Drainschaltung . . . . .	207
7.2.1	Wechselstromersatzschaltbild der Kollektorschaltung . . . . .	207
7.2.2	Spannungsverstärkung der Kollektorschaltung . . . . .	208
7.2.3	Eingangswiderstand der Kollektorschaltung . . . . .	209
7.2.4	Ausgangswiderstand der Kollektorschaltung . . . . .	210
7.3	Basisschaltung, Gateschaltung . . . . .	211
7.3.1	Spannungsverstärkung der Basisschaltung . . . . .	213
7.3.2	Eingangswiderstand der Basisschaltung . . . . .	215
7.3.3	Ausgangswiderstand der Basisschaltung . . . . .	216
7.4	Push-Pull Ausgangsstufe . . . . .	217
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker . . . . .</b>	<b>221</b>
8.1	Der einstufige Differenzverstärker . . . . .	221
8.1.1	Funktion des Differenzverstärkers . . . . .	221
8.1.2	Gleichstromanalyse des Differenzverstärkers . . . . .	222
8.1.3	Kleinsignalanalyse des Differenzverstärkers . . . . .	222
8.2	Mehrstufige Differenzverstärker . . . . .	228
8.2.1	CMOS Differenzeingangsstufe . . . . .	228
8.2.2	Verbesserte Differenzeingangsstufe . . . . .	232
8.2.3	Mehrstufiger Differenzverstärker . . . . .	234
8.2.4	Vom Differenzverstärker zum Operationsverstärker . . . . .	237
8.3	Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern . . . . .	239
8.3.1	Invertierender Verstärker . . . . .	239
8.3.2	Nichtinvertierender Verstärker . . . . .	241
8.3.3	Addierer . . . . .	243
8.3.4	Subtrahierer . . . . .	243
8.3.5	Filterschaltungen . . . . .	244
<b>9</b>	<b>Frequenzverhalten analoger Schaltungen . . . . .</b>	<b>247</b>
9.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	247
9.1.1	Amplituden- und Phasengang . . . . .	247
9.1.2	Die komplexe Übertragungsfunktion . . . . .	252
9.1.3	Verhalten im Zeitbereich . . . . .	256
9.2	Übertragungsfunktionen von Verstärkerschaltungen . . . . .	259
9.2.1	Komplexe Übertragungsfunktion und Grenzfrequenz . . . . .	259
9.2.2	Berechnung der Grenzfrequenzen . . . . .	261

9.3	Grenzfrequenz von Verstärkergrundschaltungen . . . . .	266
9.3.1	Emitterschaltung . . . . .	267
9.3.2	Miller-Effekt . . . . .	269
9.3.3	Emitterschaltung mit Gegenkopplungswiderstand . . . . .	270
9.3.4	Kollektorschaltung . . . . .	272
9.3.5	Basisschaltung . . . . .	275
9.4	Methoden zur Abschätzung der Grenzfrequenzen . . . . .	277
9.4.1	Kurzschluss-Zeitkonstanten-Methode . . . . .	277
9.4.2	Leerlauf-Zeitkonstanten-Methode . . . . .	279
<b>10</b>	<b>Rückkopplung in Verstärkern . . . . .</b>	<b>283</b>
10.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	283
10.1.1	Prinzip der Gegenkopplung . . . . .	283
10.1.2	Rückkopplung und Verzerrungen . . . . .	284
10.1.3	Rückkopplung und Frequenzgang . . . . .	285
10.1.4	Rückkopplungsarten . . . . .	286
10.2	Serien-Parallel-Rückkopplung (Spannungsverstärker) . . . . .	288
10.2.1	Spannungsverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	288
10.2.2	Spannungsverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	291
10.3	Parallel-Parallel-Rückkopplung (Transimpedanzverstärker) . . . . .	297
10.3.1	Transimpedanzverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	297
10.3.2	Transimpedanzverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	299
10.4	Parallel-Serien-Rückkopplung (Stromverstärker) . . . . .	304
10.4.1	Stromverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	304
10.4.2	Stromverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	305
10.5	Serien-Serien-Rückkopplung (Transadmittanzverstärker) . . . . .	307
10.5.1	Transadmittanzverstärker mit idealer Rückkopplung . . . . .	307
10.5.2	Transadmittanzverstärker mit realer Rückkopplung . . . . .	308
10.6	Rückkopplung und Oszillatoren . . . . .	310
10.6.1	Übertragungsfunktion der rückgekoppelten Anordnung .	310
10.6.2	Schwingbedingung . . . . .	314
10.6.3	Schleifenverstärkung der rückgekoppelten Anordnung .	315
10.7	Stabilität und Kompensation von Verstärkerschaltungen . . . . .	317
10.7.1	Bode-Diagramm des Operationsverstärkers . . . . .	318
10.7.2	Stabilitätskriterium . . . . .	320
10.7.3	Kompensation durch Polverschiebung . . . . .	322
10.7.4	Kompensation durch Polaupsplittung . . . . .	325
<b>11</b>	<b>Logikschaltungen . . . . .</b>	<b>329</b>
11.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	329
11.1.1	Dioden-Transistor-Logik (DTL) . . . . .	331
11.1.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL) . . . . .	332
11.2	MOS-Logikschaltungen . . . . .	333
11.2.1	n-MOS-Inverterschaltungen . . . . .	334
11.2.2	CMOS-Komplementärinverter . . . . .	334

11.2.3 Entwurf von CMOS-Gattern .....	341
11.2.4 Dimensionierung von CMOS-Gattern .....	342
11.2.5 C <sup>2</sup> MOS Logik.....	345
11.2.6 Domino-Logik.....	348
11.2.7 NORA-Logik .....	349
<b>12 Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik .....</b>	<b>351</b>
12.1 Einführung .....	351
12.1.1 Die CMOS-Technologie .....	352
12.1.2 Grundsätzlicher Prozessablauf .....	353
12.2 Schichttechnik .....	354
12.2.1 Gasphasenabscheidung .....	355
12.2.2 Epitaxie.....	355
12.2.3 Thermische Oxidation .....	356
12.2.4 Kathodenersteräubung.....	357
12.2.5 Ionenimplantation .....	357
12.2.6 Schleuderbeschichtung .....	358
12.3 Ätztechnik.....	358
12.3.1 Nassätzen .....	359
12.3.2 Physikalisches Trockenätzen .....	359
12.3.3 Chemisches Trockenätzen .....	360
12.3.4 Chemisch physikalisches Trockenätzen.....	360
12.3.5 Chemisch mechanisches Polieren.....	360
12.4 Lithografie.....	361
12.4.1 Prinzip der Fotolithografie .....	361
12.4.2 Kenngrößen der Fotolithografie.....	361
12.5 Der CMOS-Prozess .....	361
12.5.1 Prozessablauf .....	361
12.6 Layout von CMOS-Schaltungen .....	369
12.6.1 Herstellungsebenen und Masken .....	369
12.6.2 CMOS-Inverter .....	370
12.6.3 2-fach NOR-Gatter .....	371
12.7 Elektrische Eigenschaften der Entwurfsebenen .....	372
12.7.1 Metallebene .....	372
12.7.2 Kontakte und Vias .....	376
12.7.3 Polysiliziumebene .....	377
12.7.4 Implantationsebene .....	378
12.7.5 Wannen .....	378
12.8 Parasitäre Bauelemente .....	380
12.8.1 Dickoxidtransistor .....	380
12.8.2 Parasitärer Bipolartransistor .....	380
12.8.3 Parasitärer Thyristor .....	381
12.9 ASIC .....	384
12.9.1 Gate Arrays .....	384
12.9.2 Standardzellen .....	384

12.9.3 PLD .....	385
<b>13 Rechnergestützter Schaltungsentwurf .....</b>	<b>387</b>
13.1 Einführung .....	387
13.1.1 Entwurfsablauf .....	387
13.1.2 Simulationswerkzeuge für den Schaltungsentwurf .....	389
13.1.3 Simulationsarten .....	389
13.2 Aufbau eines Schaltungssimulators .....	392
13.2.1 Schaltungseingabe und Netzliste .....	392
13.2.2 Modellgleichungen und Parameterübergabe .....	393
13.3 Aufstellen der Netzwerkgleichungen bei der Schaltungssimulation .....	395
13.3.1 Netzwerk mit Stromquellen .....	395
13.3.2 Netzwerk mit Spannungsquellen .....	399
13.3.3 Berücksichtigung gesteuerter Quellen .....	401
13.3.4 Berücksichtigung nichtlinearer Bauelemente .....	403
13.3.5 Berücksichtigung von Induktivitäten und Kapazitäten .....	406
<b>A Anhang .....</b>	<b>411</b>
A.1 Äquivalente Zweipole .....	411
A.1.1 Bestimmung von Ersatzspannungsquellen .....	411
A.1.2 Bestimmung von Ersatzstromquellen .....	412
A.2 Ein- und Ausgangswiderstand von Verstärkern .....	413
A.2.1 Bestimmung des Eingangswiderstandes .....	413
A.2.2 Bestimmung des Ausgangswiderstandes .....	413
A.3 Vierpolparameter .....	414
A.3.1 Darstellung von Vierpolen mit $g$ -Parametern .....	414
A.3.2 Darstellung von Vierpolen mit $h$ -Parametern .....	415
A.3.3 Darstellung von Vierpolen mit $y$ -Parametern .....	415
A.3.4 Darstellung von Vierpolen mit $z$ -Parametern .....	416
<b>Literatur .....</b>	<b>417</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>421</b>