

Holger Göbel

Einführung in die Halbleiter- Schaltungstechnik

3., bearbeitete und erweiterte Auflage

Unter Mitwirkung von Henning Siemund

Mit 436 Abbildungen und CD-ROM

 Springer

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole	1
1 Grundlagen der Halbleiterphysik	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 Fermi-niveaus	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
2 Diode	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

2.3	Modellierung der Diode	63
2.3.1	Großsignalersatzschaltung der Diode	63
2.3.2	Schaltverhalten der Diode	63
2.3.3	Kleinsignalersatzschaltung 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
3	Bipolartransistor	81
3.1	Aufbau und Wirkungsweise des Bipolartransistors	81
3.1.1	nnp- 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	Großsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors	95
3.3.2	Schaltverhalten des Bipolartransistors	99
3.3.3	Kleinsignalersatzschaltbild des Bipolartransistors	101
3.3.4	Frequenzverhalten des Transistors	105
3.3.5	Durchbruchverhalten des Bipolartransistors	107
3.4	Bänderdiagrammdarstellung des Bipolartransistors	108
4	Feldeffekttransistor	111
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 MOSEET	123
4.3.1	Großsignalersatzschaltbild des MOSFET	123
4.3.2	Schaltverhalten des MOSFET	125
4.3.3	Kleinsignalersatzschaltbild 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
5	Der Transistor als Verstärker	139
5.1	Grundlegende Begriffe und Konzepte	139
5.1.1	Übertragungskennlinie und Verstärkung	139
5.1.2	Arbeitspunkt und Betriebsarten	141
5.1.3	Gleichstromersatzschaltung	143
5.2	Arbeitspunkteinstellung mit 4-Widerstandsnetzwerk	144
5.2.1	Arbeitspunkteinstellung beim Bipolartransistor	144
5.2.2	Arbeitspunkteinstellung beim MOSFET	147
5.3	Arbeitspunkteinstellung mit Stromspiegeln	150
5.3.1	Stromspiegel	150
5.3.2	Dimensionierung des Stromspiegels	154
5.4	Wechselstromanalyse von Verstärkern	155
5.4.1	Kleinsignalersatzschaltung	155
5.4.2	Verstärkerschaltungen mit Bipolartransistor	157
5.4.3	Verstärkerschaltungen mit MOSFET	162
5.4.4	Verstärkerschaltungen mit Stromspiegel	166
5.4.5	Mehrstufige Verstärker	168
6	Transistorgrundschaltungen	173
6.1	Emitterschaltung, Sourceschaltung	173
6.1.1	Wechselstromersatzschaltbild der Emitterschaltung	173
6.1.2	Spannungsverstärkung der Emitterschaltung	175
6.1.3	Eingangswiderstand der Emitterschaltung	177
6.1.4	Ausgangswiderstand der Emitterschaltung	178
6.2	Kollektorschaltung, Drainschaltung	181
6.2.1	Wechselstromersatzschaltbild der Kollektorschaltung	181
6.2.2	Spannungsverstärkung der Kollektorschaltung	182
6.2.3	Eingangswiderstand der Kollektorschaltung	183
6.2.4	Ausgangswiderstand der Kollektorschaltung	184
6.3	Basisschaltung, Gateschaltung	185
6.3.1	Spannungsverstärkung der Basisschaltung	187
6.3.2	Eingangswiderstand der Basisschaltung	189
6.3.3	Ausgangswiderstand der Basisschaltung	189
6.4	Push-Pull Ausgangsstufe	191

7	Operationsverstärker	195
7.1	Der einstufige Differenzverstärker	195
7.1.1	Funktion des Differenzverstärkers	195
7.1.2	Gleichstromanalyse des Differenzverstärkers	196
7.1.3	Kleinsignalanalyse des Differenzverstärkers	196
7.2	Mehrstufige Differenzverstärker	202
7.2.1	CMOS Differenzeingangsstufe	202
7.2.2	Verbesserte Differenzeingangsstufe	206
7.2.3	Mehrstufiger Differenzverstärker	208
7.2.4	Vom Differenzverstärker zum Operationsverstärker	210
7.3	Schaltungen mit idealen Operationsverstärkern	213
7.3.1	Invertierender Verstärker	213
7.3.2	Nichtinvertierender Verstärker	215
7.3.3	Addierer	216
7.3.4	Subtrahierer	217
7.3.5	Filterschaltungen	218
8	Frequenzverhalten analoger Schaltungen	221
8.1	Grundlegende Begriffe	221
8.1.1	Amplituden- und Phasengang	221
8.1.2	Die komplexe Übertragungsfunktion	226
8.1.3	Verhalten im Zeitbereich	230
8.2	Übertragungsfunktionen von Verstärkerschaltungen	233
8.2.1	Komplexe Übertragungsfunktion und Grenzfrequenz	233
8.2.2	Berechnung der Grenzfrequenzen	235
8.3	Grenzfrequenz von Verstärkergrundschaltungen	240
8.3.1	Emitterschaltung	241
8.3.2	Miller-Effekt	243
8.3.3	Emitterschaltung mit Gegenkopplungswiderstand	244
8.3.4	Kollektorschaltung	246
8.3.5	Basisschaltung	249
8.4	Methoden zur Abschätzung der Grenzfrequenzen	251
8.4.1	Kurzschluss-Zeitkonstanten-Methode	251
8.4.2	Leerlauf-Zeitkonstanten-Methode	253
9	Rückkopplung in Verstärkern	257
9.1	Grundlegende Begriffe	257
9.1.1	Prinzip der Gegenkopplung	257
9.1.2	Rückkopplung und Verzerrungen	258
9.1.3	Rückkopplung und Frequenzgang	259
9.1.4	Rückkopplungsarten	261
9.2	Serien-Parallel-Rückkopplung (Spannungsverstärker)	262
9.2.1	Spannungsverstärker mit idealer Rückkopplung	262
9.2.2	Spannungsverstärker mit realer Rückkopplung	265
9.3	Parallel-Parallel-Rückkopplung (Transimpedanzverstärker)	271

9.3.1	Transimpedanzverstärker mit idealer Rückkopplung	271
9.3.2	Transimpedanzverstärker mit realer Rückkopplung	273
9.4	Parallel-Serien-Rückkopplung (Stromverstärker)	278
9.4.1	Stromverstärker mit idealer Rückkopplung	278
9.4.2	Stromverstärker mit realer Rückkopplung	279
9.5	Serien-Serien-Rückkopplung (Transadmittanzverstärker)	281
9.5.1	Transadmittanzverstärker mit idealer Rückkopplung	281
9.5.2	Transadmittanzverstärker mit realer Rückkopplung	282
9.6	Rückkopplung und Oszillatoren	284
9.6.1	Übertragungsfunktion der rückgekoppelten Anordnung	284
9.6.2	Schwingbedingung	288
9.6.3	Schleifenverstärkung der rückgekoppelten Anordnung	289
9.7	Stabilität und Kompensation von Verstärkerschaltungen	291
9.7.1	Bode-Diagramm des Operationsverstärkers	292
9.7.2	Stabilitätskriterium	294
9.7.3	Kompensation durch Polverschiebung	296
9.7.4	Kompensation durch Polaufspaltung	299
10	Logikschaltungen	303
10.1	Grundlegende Begriffe	303
10.1.1	Dioden-Transistor-Logik (DTL)	305
10.1.2	Transistor-Transistor-Logik (TTL)	306
10.2	MOS-Logikschaltungen	307
10.2.1	n-MOS-Inverterschaltungen	308
10.2.2	CMOS-Komplementärinverter	308
10.2.3	Entwurf von CMOS-Gattern	315
10.2.4	Dimensionierung von CMOS-Gattern	316
10.2.5	C ² MOS Logik	319
10.2.6	Domino-Logik	322
10.2.7	NORA-Logik	323
11	Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik	325
11.1	Einführung	325
11.1.1	Die CMOS-Technologie	326
11.1.2	Grundsätzlicher Prozessablauf	327
11.2	Schichttechnik	328
11.2.1	Gasphasenabscheidung	329
11.2.2	Epitaxie	329
11.2.3	Thermische Oxidation	330
11.2.4	Kathodenzerstäubung	331
11.2.5	Ionenimplantation	331
11.2.6	Schleuderbeschichtung	332
11.3	Ätztechnik	332
11.3.1	Nassätzen	333
11.3.2	Physikalisches Trockenätzen	333

11.3.3	Chemisches Trockenätzen	334
11.3.4	Chemisch physikalisches Trockenätzen	334
11.3.5	Chemisch mechanisches Polieren	334
11.4	Lithografie	335
11.4.1	Prinzip der Fotolithografie	335
11.4.2	Kenngrößen der Fotolithografie	335
11.5	Der CMOS-Prozess	335
11.5.1	Prozessablauf	335
11.6	Layout von CMOS-Schaltungen	343
11.6.1	Herstellungsebenen und Masken	343
11.6.2	CMOS-Inverter	344
11.6.3	2-fach NOR-Gatter	345
11.7	Elektrische Eigenschaften der Entwurfsebenen	346
11.7.1	Metallebene	346
11.7.2	Kontakte und Vias	350
11.7.3	Polysiliziumebene	351
11.7.4	Implantationsebene	352
11.7.5	Wannen	352
11.8	Parasitäre Bauelemente	354
11.8.1	Dickoxidtransistor	354
11.8.2	Parasitärer Bipolartransistor	354
11.8.3	Parasitärer Thyristor	355
11.9	ASIC	358
11.9.1	Gate Arrays	358
11.9.2	Standardzellen	358
11.9.3	PLD	359
12	Rechnergestützter Schaltungsentwurf	361
12.1	Einführung	361
12.1.1	Entwurfsablauf	361
12.1.2	Simulationswerkzeuge für den Schaltungsentwurf	363
12.1.3	Simulationsarten	363
12.2	Aufbau eines Schaltungssimulators	366
12.2.1	Schaltungseingabe und Netzliste	366
12.2.2	Modellgleichungen und Parameterübergabe	367
12.3	Aufstellen der Netzwerkgleichungen bei der Schaltungssimulation	369
12.3.1	Netzwerk mit Stromquellen	369
12.3.2	Netzwerk mit Spannungsquellen	373
12.3.3	Berücksichtigung gesteuerter Quellen	375
12.3.4	Berücksichtigung nichtlinearer Bauelemente	377
12.3.5	Berücksichtigung von Induktivitäten und Kapazitäten	380

A Anhang	385
A.1 Äquivalente Zweipole	385
A.1.1 Bestimmung von Ersatzspannungsquellen	385
A.1.2 Bestimmung von Ersatzstromquellen	386
A.2 Ein- und Ausgangswiderstand von Verstärkern	387
A.2.1 Bestimmung des Eingangswiderstandes	387
A.2.2 Bestimmung des Ausgangswiderstandes	387
A.3 Vierpolparameter	388
A.3.1 Darstellung von Vierpolen mit g -Parametern	388
A.3.2 Darstellung von Vierpolen mit h -Parametern	389
A.3.3 Darstellung von Vierpolen mit y -Parametern	389
A.3.4 Darstellung von Vierpolen mit z -Parametern	390
Literatur	391
Sachverzeichnis	393