
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 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
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

VIII Inhaltsverzeichnis

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	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	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 MOSFET	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	Optoelektronische Bauelemente	139
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
6	Der Transistor als Verstärker	165
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

6.4.4 Verstärkerschaltungen mit Stromspiegel	192
6.4.5 Mehrstufige Verstärker	194
7 Transistorgrundschaltungen.....	199
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
8 Operationsverstärker	221
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
9 Frequenzverhalten analoger Schaltungen	247
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
10	Rückkopplung in Verstärkern	283
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 Polaupsplitzung	325
11	Logikschaltungen	329
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 ² MOS Logik	345
11.2.6 Domino-Logik	348
11.2.7 NORA-Logik	349
12 Herstellung integrierter Schaltungen in CMOS-Technik	351
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 Kathodenerstäubung	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
13 Rechnergestützter Schaltungsentwurf	387
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
A Anhang	411
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
Literatur	417
Sachverzeichnis	421