

Michael Reisch

Elektronische Bauelemente

Funktion, Grundschaltungen,
Modellierung mit SPICE

2., vollständig neu bearbeitete Auflage

Mit 1125 Abbildungen und 67 Tabellen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen	1
1.1 Elektrische Netzwerke, CAD-Werkzeuge	2
1.2 Ideale Netzwerkelemente	5
1.2.1 Widerstände	6
1.2.2 Kapazitäten	9
1.2.3 Induktivitäten	10
1.2.4 Unabhängige Quellen	11
1.2.5 Gesteuerte Quellen	11
1.3 Lineare Netzwerke	12
1.3.1 Impedanzen, Admittanzen	12
1.3.2 Darstellung in Frequenz- und Zeitbereich	15
1.3.3 Übertragungsfaktor	18
1.3.4 Der RC-Tiefpaß	23
1.3.5 Der RC-Hochpaß	30
1.3.6 RC-Bandpass	35
1.3.7 Der LRC-Reihenschwingkreis	38
1.4 Nichtlineare Netzwerke	45
1.4.1 Harmonische, Kompressionspunkt	45
1.4.2 Intermodulation, Mischprodukte	47
1.5 Literaturverzeichnis	50
2. Aktive Vierpole	51
2.1 Transistoren als Verstärker und Schalter	51
2.2 Kleinsignalanalyse, Vierpolkenngrößen	54
2.2.1 Leitwertparameter	54
2.2.2 Die Wahl des Bezugspunkts	58
2.2.3 Hybridparameter	60
2.2.4 Vierpoldarstellungen und Ersatzschaltungen	60
2.3 Kenngrößen beschalteter Vierpole	64
2.3.1 Eingangsimpedanz, Ausgangsimpedanz, Übertragungsfaktoren	65
2.3.2 Leistungsverstärkung	68
2.3.3 Stabilität, MAG, MSG	70
2.3.4 Reflexionskoeffizienten	71
2.4 S-Parameter	73
2.5 Verstärker	75
2.5.1 Gegenkopplung	76
2.5.2 Mitkopplung, Oszillatoren	83
2.6 Literaturverzeichnis	84

3. Rauschen	85
3.1 Grundlagen	85
3.1.1 Autokorrelation, Wiener-Khintchine-Relation	86
3.1.2 Rauschquellen	87
3.1.3 Korrelation	88
3.2 Rauschmechanismen	88
3.2.1 Schrotrauschen	90
3.2.2 Thermisches Rauschen	92
3.2.3 1/f-Rauschen	98
3.3 Analyse rauschender Netzwerke	99
3.4 Rauschende lineare Vierpole	101
3.4.1 Äquivalente Rauschbandbreite	103
3.4.2 Signal-Rausch-Verhältnis, Rauschzahl	103
3.5 Literaturverzeichnis	108
4. SPICE	109
4.1 Steuerdatei, Netzliste, Modellanweisungen	109
4.1.1 Die Netzliste	110
4.1.2 Die .MODEL-Anweisung	113
4.1.3 Die .SUBCKT-Anweisung	115
4.2 Ergebnisausgabe	116
4.2.1 Die .OUT-Datei	116
4.2.2 PROBE	117
4.3 Erste Schritte	119
4.3.1 Kennlinien, .DC-Analyse	119
4.3.2 Frequenzgänge, .AC-Analyse	121
4.3.3 Einschwingvorgänge, .TRAN-Analyse	122
4.4 Steuerbefehle	124
4.4.1 Gleichstromanalyse	125
4.4.2 Transientenanalyse	130
4.4.3 Frequenzanalyse	134
4.4.4 Weitere Steueranweisungen	136
4.5 Unabhängige Quellen V, I	138
4.5.1 Gleichquellen	139
4.5.2 Wechselquellen (AC)	139
4.5.3 Zeitabhängige Quellen	139
4.6 Gesteuerte Quellen	144
4.6.1 Lineare gesteuerte Quellen	144
4.6.2 Rauschquellen	146
4.6.3 Nichtlineare gesteuerte Quellen	148
4.6.4 Analog Behavioral Modeling	150
4.7 Literaturverzeichnis	152

5. Praktischer Schaltungsaufbau	153
5.1 Leiterplatten	154
5.1.1 Substratmaterialien	154
5.1.2 Herstellung	155
5.1.3 Bedrahtete und oberflächenmontierte Bauteile (SMD)	157
5.1.4 Einlagen- und Mehrlagenleiterplatten	158
5.1.5 Layout	160
5.1.6 Montage der Bauteile	163
5.2 Hybridschaltungen	166
5.3 Verlustleistung und Eigenerwärmung	168
5.3.1 Temperaturabhängigkeit von Bauteilkenngrößen	168
5.3.2 Wärmewiderstand, thermische Zeitkonstante	169
5.3.3 Thermische Ersatzschaltung	172
5.3.4 Zulässige Verlustleistung und Wärmeabfuhr	173
5.3.5 Wärmeabtransport, Kühlkörper	177
5.3.6 Peltier-Kühler	183
5.4 Qualität und Zuverlässigkeit	188
5.4.1 Ausfallstatistik	189
5.4.2 Thermischer Streß, Arrhenius-Gesetz	192
5.4.3 Elektrostatische Entladungen	193
5.5 Literaturverzeichnis	197
6. Operationsverstärker	199
6.1 Prinzipien, Kenndaten	199
6.1.1 NF-Kenngrößen, NF-Ersatzschaltung	199
6.1.2 Frequenzverhalten und Kleinsignalmodell	205
6.1.3 Kenngrößen für transienten Großsignalbetrieb	208
6.1.4 Ausführungen	209
6.2 Lineare Grundschaltungen	211
6.2.1 Der invertierende Verstärker	211
6.2.2 Der nichtinvertierende Verstärker	221
6.2.3 Der Subtrahierer	224
6.2.4 Der Addierer	228
6.2.5 Der Integrierer	229
6.2.6 Der Differenzierer	231
6.2.7 Der Logarithmierer	232
6.2.8 Strom-Spannungs-Wandler	233
6.2.9 Negative Widerstände	233
6.2.10 Gesteuerte Quellen	234
6.2.11 Gyrator	235
6.2.12 Aktive Filter	237
6.3 Rückkopplung und Stabilität	242
6.3.1 Gegenkopplung, Stabilitätsanalyse	242
6.3.2 Frequenzgangkorrektur	249
6.4 Rauschen von Operationsverstärkern	253
6.4.1 Rauschersatzschaltung	253
6.4.2 Rauschen des nichtinvertierenden Verstärkers	253
6.5 Makromodelle für die Schaltungssimulation	258
6.6 Literaturverzeichnis	263

7. Widerstände	265
7.1 Physikalische Grundlagen	265
7.2 Ohmsche Widerstände	269
7.2.1 Kenngrößen und Ersatzschaltung realer Widerstände	269
7.2.2 Drahtwiderstände	280
7.2.3 Massewiderstände	281
7.2.4 Schichtwiderstände	281
7.2.5 Potentiometer	284
7.2.6 Modellierung ohmscher Widerstände in SPICE	285
7.3 Heißleiter	287
7.4 Keramische Kaltleiter (PTC-Widerstände)	293
7.5 PPTC-Widerstände (Poly Switch)	301
7.6 Sicherungen	302
7.6.1 Feinsicherungen	302
7.6.2 Überlastschutz mit keramischen Kaltleitern	303
7.7 Varistoren (VDR-Widerstände)	306
7.8 Edelgasgefüllte Überspannungsableiter	312
7.9 Literaturverzeichnis	313
8. Kondensatoren	315
8.1 Physikalische Grundlagen	315
8.1.1 Polarisationsmechanismen	316
8.1.2 Ionenleitung, Durchschlag	318
8.1.3 Dielektrische Absorption	319
8.1.4 Ferroelektrika	320
8.2 Bauformen	322
8.3 Kenngrößen und Ersatzschaltung des realen Kondensators	324
8.3.1 Kenndaten, Grenzwerte	324
8.3.2 Grenzspannungen, Pulsbelastbarkeit	325
8.3.3 Parallelersatzschaltung	327
8.3.4 Serienersatzschaltung	329
8.3.5 Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren	331
8.3.6 Modellierung von Kapazitäten in SPICE	332
8.3.7 Anwendung: Stütz- und Abblockkondensatoren	334
8.3.8 Zuverlässigkeit von Kondensatoren	336
8.4 Ausführungen	337
8.4.1 Metallpapierkondensatoren	337
8.4.2 Folienkondensatoren	337
8.4.3 Keramikkondensatoren	342
8.4.4 Glimmerkondensatoren	346
8.4.5 Elektrolytkondensatoren	346
8.4.6 Doppelschichtkondensatoren, Ultracaps	355
8.5 Literaturverzeichnis	356

9. Spulen und Übertrager	357
9.1 Physikalische Grundlagen	357
9.2 Induktionskoeffizienten ausgewählter Leiterformen	362
9.3 Definition von Induktivitäten in SPICE	365
9.4 Spulen	366
9.4.1 Ersatzschaltung und elektrisches Verhalten	366
9.4.2 Drahtwiderstand, Kupferverluste	368
9.4.3 Kernverlustwiderstand	368
9.4.4 Effektive Permeabilität, Luftspalte	369
9.4.5 Wicklungskapazität	372
9.4.6 Spulengüte, Verlustfaktor	373
9.4.7 Temperaturkoeffizient	374
9.4.8 Kernformen	376
9.5 Dämpfungsperlen	380
9.6 Vormagnetisierung, Drosselspulen	382
9.7 Eigenschaften und Modellierung ferro- und ferrimagnetischer Kernmaterialien	387
9.7.1 Ferromagnetismus und Ferrimagnetismus	387
9.7.2 Magnetisierung	388
9.7.3 Beschreibung von Spulen mit Kern in PSPICE	391
9.7.4 Kernverluste	394
9.8 Transformatoren und Übertrager	398
9.8.1 Der verlustlose Übertrager	399
9.8.2 Unvollständige Kopplung	401
9.8.3 Übertragungsfaktor	403
9.8.4 Leistungsübertrager, Transformatoren	406
9.8.5 Beschreibung gekoppelter Spulen in SPICE	407
9.9 Literaturverzeichnis	408
10. Leitungen	409
10.1 Grundlagen	409
10.1.1 Leitungsgleichungen, Telegraphengleichung	410
10.1.2 Leitungswellen	411
10.1.3 Pulse auf Leitungen	413
10.1.4 Kurze Leitungen	414
10.1.5 Verlustlose Leitung	415
10.1.6 Leitung mit geringen Verlusten	415
10.2 Leitung mit Beschaltung	417
10.2.1 Reflexionsfaktor	417
10.2.2 Schaltvorgänge auf verlustlosen Leitungen	418
10.2.3 Eingangsimpedanz, Widerstandstransformation	421
10.2.4 Spannungsübertragungsfaktor	421
10.2.5 RC-Leitung	422
10.3 Modellierung der Leitung in SPICE	426
10.4 Leitungsformen	429

10.4.1 Zweidrahtleitung	429
10.4.2 Koaxialkabel	431
10.4.3 Streifenleiter	433
10.4.4 Geschirmte Leitungen, Triaxialkabel	435
10.5 Verkoppelte Leitungen	436
10.5.1 Ersatzschaltung	436
10.5.2 Simulation verkoppelter Leitungen	437
10.5.3 Wellen in zwei gekoppelten Leitungen	440
10.6 Literaturverzeichnis	445
11. Resonatoren und Filter	447
11.1 Resonatoren und Filter mit RLC-Kombinationen	447
11.2 Leitungsresonatoren	448
11.3 Schwingquarze und Quarzfilter	451
11.3.1 Der piezoelektrische Effekt	451
11.3.2 Schwingquarze	452
11.3.3 Quarzfilter	461
11.4 Oberflächenwellenbauelemente	464
11.5 Dielektrische Resonatoren und Filter	467
11.6 Literaturverzeichnis	470
12. Halbleiter	471
12.1 Halbleitermaterialien, Leitungsmechanismen	471
12.2 Grundelemente des Bändermodells	475
12.2.1 Energiebänder, Bandschema	475
12.2.2 Zur Bandstruktur	479
12.2.3 Bloch-Wellen	482
12.3 Halbleiter im thermischen Gleichgewicht	487
12.3.1 Massenwirkungsgesetz	487
12.3.2 Zustandsdichte und Besetzungswahrscheinlichkeit	489
12.3.3 Dotierung	492
12.3.4 Ladungsträgerdichten im dotierten Halbleiter	494
12.3.5 Lage der Fermi-Energie	496
12.3.6 Stark dotierte Halbleiter	497
12.4 Halbleiter im Nichtgleichgewicht	500
12.4.1 Driftstrom	500
12.4.2 Diffusionsstrom	509
12.4.3 Generation und Rekombination	511
12.4.4 Grundgleichungen der Drift-Diffusions-Theorie	520
12.4.5 Abschirmung	528
12.4.6 Quasi-Fermipotentiale	530
12.4.7 Thermoelektrische Effekte	532
12.4.8 Galvanomagnetische Effekte	533
12.4.9 Piezoresistiver Effekt	536
12.5 Eigenschaften ausgewählter Halbleiter	538

12.5.1 Germanium	538
12.5.2 Silizium-Germanium	538
12.5.3 Siliziumkarbid (SiC)	541
12.5.4 III-V-Verbindungshalbleiter	543
12.6 Literaturverzeichnis	545
13. Herstellung von Halbleiterbauelementen	549
13.1 Herstellung von Silizium-Einkristallen, Wafer	549
13.2 Thermische Oxidation von Silizium	552
13.3 Schichtabscheidung	555
13.3.1 Abscheidung isolierender Schichten	555
13.3.2 Abscheiden von Siliziumschichten	556
13.4 Dotierung	558
13.4.1 Störstellendiffusion	558
13.4.2 Ionenimplantation	560
13.5 Strukturübertragung	563
13.5.1 Belichtung	564
13.5.2 Ätztechnik	567
13.6 Metallisierung	568
13.7 Layout, Design Rules	574
13.8 Integration passiver Bauelemente	576
13.8.1 Widerstände	576
13.8.2 Kondensatoren	579
13.8.3 Integrierte Induktivitäten	580
13.9 Kontaktierung und Packaging	582
13.9.1 Kontaktierung	582
13.9.2 Gehäuse	584
13.10 Literaturverzeichnis	585
14. Kontakte	587
14.1 PN-Übergang: Gleichbetrieb	587
14.1.1 Thermisches Gleichgewicht	587
14.1.2 Flußpolung	593
14.1.3 Diodenkennlinie, Parameterbestimmung	602
14.1.4 Arbeitspunkt bei Spannungssteuerung	605
14.1.5 Temperaturabhängigkeit	607
14.1.6 Sperrpolung, Durchbruch	611
14.1.7 Low-High Übergänge, Epitaxialdioden	617
14.2 PN-Übergänge: Speicherladungen, Schaltverhalten	620
14.2.1 Sperrsichtkapazität	620
14.2.2 Minoritätsspeicherladung, Diffusionskapazität	625
14.2.3 Schaltverhalten, Ladungssteuerungstheorie	627
14.3 PN-Übergänge: Kleinsignalmodell und Rauschverhalten	632
14.3.1 Quasistatische Beschreibung	632
14.3.2 HF-Diodenleitwert	636

14.3.3 Rauschen der pn-Diode	639
14.4 Großsignalmodell der pn-Diode	640
14.4.1 Ersatzschaltung und Modellanweisung	640
14.4.2 Modellgleichungen	642
14.4.3 Modellgenauigkeit und Bauteiltoleranzen	646
14.5 Heteroübergänge	648
14.5.1 Thermisches Gleichgewicht	649
14.5.2 Flusßpolung	651
14.5.3 Sperrsichtkapazität	653
14.6 Metall-Halbleiter-Kontakte	654
14.6.1 Schottky-Kontakte im thermischen Gleichgewicht	654
14.6.2 Flusß- und Sperrpolung	657
14.6.3 Niederohmige Kontakte	660
14.6.4 Peltier-Effekt	662
14.7 MOS-Kondensatoren	663
14.7.1 Thermisches Gleichgewicht	664
14.7.2 Akkumulation	666
14.7.3 Inversion	667
14.7.4 Tiefe Verarmung (Deep Depletion)	673
14.7.5 Die Kapazität des MOS-Kondensators	674
14.7.6 Stromfluß durch das Gateoxid	675
14.8 Literaturverzeichnis	677
15. Halbleiterdioden	679
15.1 Gleichrichterdioden	679
15.1.1 Aufbau und elektrische Eigenschaften	679
15.1.2 Kenndaten, Grenzwerte	681
15.1.3 Parallel- und Reihenschaltung von Gleichrichterdioden	683
15.1.4 Einweggleichrichter	685
15.1.5 Zweipulsige Brückenschaltung	688
15.1.6 Spannungsvervielfacher	689
15.1.7 Spannungsbegrenzung, Freilaufdioden	690
15.1.8 Schalten induktiver Lasten	691
15.2 PIN-Dioden	692
15.2.1 Lange PIN-Dioden, Leistungsgleichrichter	693
15.2.2 Kurze PIN-Dioden	699
15.3 Schottky-Dioden	705
15.3.1 Ersatzschaltung	705
15.3.2 Schottky-Dioden für kleine Leistungen	707
15.3.3 Schottky-Dioden für große Leistungen	708
15.4 Z-Dioden	710
15.4.1 Kenngrößen, Modellierung	710
15.4.2 Spannungsstabilisierung, Spannungsreferenz	715
15.4.3 Überspannungsschutz	717
15.5 Varaktoren	719

15.5.1 Kapazitätsdioden, Eigenschaften	719
15.5.2 Anwendungen	724
15.5.3 Speichervaraktoren, Step-recovery-Dioden	726
15.6 Tunneldioden	728
15.6.1 Kennlinie der Esaki-Diode	728
15.6.2 Kleinsignalbetrachtung	730
15.6.3 Oszillatoren mit Tunneldioden	731
15.6.4 Resonante Tunneldioden	733
15.7 Laufzeitdioden	735
15.7.1 IMPATT-Dioden	735
15.7.2 BARITT-Dioden	739
15.8 Gunn-Elemente	741
15.9 Literaturverzeichnis	745
16. Bipolartransistoren	747
16.1 Einführung	747
16.2 Großenignalbeschreibung	754
16.2.1 Transferstrom, Basistransitzeit	755
16.2.2 Stromverstärkung	758
16.2.3 Elementares Großenignalmodell	759
16.2.4 Die Gummel'sche Transferstrom-Beziehung	764
16.2.5 SPICE-Modellanweisung	767
16.2.6 Kennlinien	767
16.2.7 Das Ebers-Moll-Modell	774
16.2.8 Temperaturabhängigkeit	775
16.2.9 Hochinjektion	778
16.3 Kleinsignalbeschreibung	785
16.3.1 Das elementare Kleinsignalmodell	785
16.3.2 NF-Hybridparameter	789
16.3.3 T-Ersatzschaltung	792
16.3.4 Transistorkapazitäten und Grenzfrequenzen	794
16.4 Rauschverhalten	806
16.4.1 Effektive Rauschquellen	807
16.4.2 Rauschzahl, Rauschampassung	811
16.5 Sperrverhalten, Grenzdaten	812
16.5.1 Restströme	812
16.5.2 Grenzspannungen, Durchbrüche	813
16.5.3 Der sichere Arbeitsbereich	817
16.6 Heterostruktur-Bipolartransistoren (HBTs)	819
16.7 Einzeltransistoren	826
16.8 Integrierte Bipolartransistoren	831
16.8.1 Isolation der Kollektorbahngebiete	832
16.8.2 Herstellung von Emitter- und Basisbahngebiet	834
16.9 Literaturverzeichnis	842

17. Grundschaltungen mit Bipolartransistoren	845
17.1 Emitterschaltung	845
17.1.1 Arbeitspunkt, Verlustleistung, Gegenkopplung	845
17.1.2 Verlustleistung und Wirkungsgrad	850
17.1.3 Frequenzgang	851
17.1.4 Schaltbetrieb	855
17.1.5 Verzerrungen	863
17.1.6 Rauschen	865
17.1.7 Darlington-Schaltung	868
17.2 Kollektorschaltung (Emitterfolger)	870
17.2.1 Übertragungsfaktor, Ein- und Ausgangswiderstand	871
17.2.2 Frequenzgang	872
17.2.3 Komplementäre Endstufe	876
17.3 Basisschaltung	878
17.3.1 Kaskode	879
17.4 Diodenschaltung	880
17.5 Stromquellen	882
17.5.1 Einfache Stromspiegel	883
17.5.2 Wilson-Stromspiegel	885
17.5.3 Aktive Last	886
17.6 Differenzverstärker	888
17.6.1 Übertragungskennlinie	888
17.6.2 Differenz- und Gleichtaktverstärkung	891
17.6.3 Analog-Multiplizierer	893
17.6.4 Schmitt-Trigger	895
17.7 Bandabstandsreferenzen	897
17.8 Digitalschaltungen	899
17.8.1 TTL-Schaltungen	899
17.8.2 Emitter-Coupled Logic (ECL)	901
17.9 Literaturverzeichnis	908
18. CAD-Modelle für Bipolartransistoren	909
18.1 Gummel-Poon Modell	909
18.1.1 Ersatzschaltung und Modellanweisung	909
18.1.2 Transferstrom, Gummel-Poon-Ansatz	914
18.1.3 Stromverstärkung	916
18.1.4 Temperaturabhängigkeit	918
18.1.5 Bahnwiderstände	919
18.1.6 Parameterbestimmung	924
18.2 Komplexere Modelle für integrierte Bipolartransistoren	928
18.3 Literaturverzeichnis	932

19. Thyristoren	933
19.1 Rückwärtssperrende Thyristoren	934
19.1.1 Aufbau und Wirkungsweise	935
19.1.2 Herstellung von Thyristoren	938
19.1.3 Spannungs- und Stromgrenzwerte	940
19.1.4 Sperrvermögen	941
19.1.5 Zünden des Thyristors, Durchlaßzustand	944
19.1.6 Löschen des Thyristors	950
19.1.7 Parallel- und Reihenschaltung von Thyristoren	954
19.1.8 Phasenanschnittsteuerung mit Thyristoren	955
19.2 Sonderformen des Thyristors	956
19.2.1 Asymmetrisch sperrende Thyristoren, RCTs	956
19.2.2 Gate Turn-Off Thyristoren (GTO)	957
19.2.3 Überspannungsschutz mit Thyristoren	959
19.3 Modellierung von Thyristoren in PSPICE	960
19.4 DIACs und TRIACs	965
19.4.1 DIACs	965
19.4.2 TRIACs	966
19.5 Unijunctiontransistoren	969
19.6 Literaturverzeichnis	972
20. MOS-Feldeffekttransistoren	973
20.1 Einführung	973
20.1.1 MOSFET-Typen	974
20.1.2 Gegenüberstellung von Bipolartransistor und MOSFET	976
20.2 Der MOSFET in einfacher Näherung	978
20.2.1 Drainstrom	979
20.2.2 Geschwindigkeitssättigung	984
20.2.3 Substratsteuereffekt	987
20.2.4 Kennlinien im LEVEL1-Modell	989
20.2.5 NF-Kleinsignalbeschreibung	992
20.2.6 Transistorkapazitäten, Transitfrequenz	993
20.2.7 Der n-Kanal-MOSFET als Schalter	995
20.2.8 P-Kanal-MOSFETs	999
20.2.9 Temperaturverhalten	1002
20.3 Kanalimplantation, Buried-channel-MOSFETs	1004
20.3.1 Einstellen der Einsatzspannung	1004
20.3.2 Buried-channel-MOSFETs	1005
20.4 Mehr zur Physik des MOSFET	1009
20.4.1 Die Charge-sheet Näherung	1009
20.4.2 Langkanal-MOSFETs, Gradual-channel Näherung	1011
20.5 Elektrisches Verhalten von Kurzkanal-MOSFETs	1020
20.5.1 Einsatzspannung, Kurzkanaleffekte	1020
20.5.2 Kanallängenmodulation, Ausgangsleitwert	1022
20.5.3 Bahnwiderstände	1022

20.5.4 Gate Leakage, TDDB	1023
20.5.5 Source-Drain-Durchbruch	1025
20.5.6 Gate-Induced Drain Leakage (GIDL)	1028
20.5.7 Unterschwellströme, Drainreststrom	1029
20.6 Kleinsignalbeschreibung des MOSFET	1032
20.6.1 Kleinsignalersatzschaltung	1032
20.6.2 Rauschen	1037
20.7 MOSFETs in integrierten Schaltungen	1040
20.7.1 Herstellung integrierter CMOS-Bausteine	1040
20.7.2 Latchup	1044
20.7.3 Die Idee der Skalierung	1046
20.7.4 Degradation	1049
20.7.5 LDD-MOSFETs	1051
20.7.6 Gatedielektrikum	1053
20.7.7 Dotierstoffverteilung, Kurzkanaleffekte, Piezowiderstandseffekt	1054
20.7.8 SOI-MOSFETs, FinFETs	1056
20.8 Literaturverzeichnis	1060
21. Grundschaltungen mit MOSFETs	1063
21.1 Grundschatungen mit n-Kanal MOSFETs	1063
21.1.1 Sourceschaltung und nMOS-Inverter	1063
21.1.2 Drainschaltung (Sourcefolger) mit n-Kanal-MOSFET	1068
21.2 Statische CMOS-Logik	1071
21.2.1 Der CMOS-Inverter	1071
21.2.2 Logische Verknüpfungen in CMOS	1080
21.2.3 Transfergate	1083
21.2.4 Pseudo-nMOS-Logik	1087
21.2.5 Tristate-Treiber	1089
21.2.6 Treiben großer kapazitiver Lasten	1090
21.2.7 Flipflops	1091
21.2.8 Schmitt-Trigger	1094
21.3 Current-Mode Logik (MCML)	1096
21.4 Dynamische CMOS-Logik	1098
21.5 Stub-Series-Terminated Logic (SSTL)	1100
21.6 ESD-Schutzschaltungen	1101
21.7 Analogschaltungen	1102
21.7.1 Konstantstromquelle	1102
21.7.2 Stromspiegel, Konstantstromquellen	1103
21.7.3 Steuerbarer Widerstand	1105
21.7.4 Differenzverstärker mit Stromspiegellast	1106
21.8 BiCMOS	1111
21.9 Literaturverzeichnis	1113

22. Speicherbausteine	1115
22.1 SRAMs	1118
22.1.1 Single-port-SRAMs	1118
22.1.2 Schreib-Lese-Schaltung	1121
22.1.3 Dual-port-SRAMs	1122
22.1.4 CAM, Assoziativspeicher	1122
22.2 DRAMs	1124
22.2.1 Wortleitungstreiber (Boost-Schaltung)	1125
22.2.2 Dynamischer Leseverstärker	1128
22.2.3 Alpha-Teilchen, Störsicherheit	1130
22.2.4 Zur Technologie von DRAM-Bausteinen	1131
22.2.5 Refresh	1135
22.2.6 Adressierung, Zugriffszeiten	1136
22.2.7 Maßnahmen zur Verbesserung der Zugriffszeit	1137
22.3 ROM, PROM	1138
22.4 EPROMs, EEPROMs, Flash-Memory	1140
22.4.1 MOSFETs mit Floating Gate	1143
22.4.2 EPROMs, EEPROMs	1145
22.4.3 Flash-EPROMs	1147
22.4.4 Zur Schaltungstechnik	1148
22.5 Alternative Speicherkonzepte	1151
22.5.1 FRAM	1152
22.5.2 MRAM	1155
22.5.3 PRAM	1156
22.6 Literaturverzeichnis	1158
23. MOS-Leistungsbauelemente	1161
23.1 Vertikale Leistungs-MOSFETs	1162
23.1.1 Bauformen Vertikaler Leistungs-MOSFETs	1162
23.1.2 Einschaltwiderstand	1165
23.1.3 Kompensationsbauelemente, CoolMOS	1167
23.1.4 Eigenschaften, Kenndaten, Anwendungshinweise	1170
23.1.5 Schaltbetrieb	1171
23.2 Laterale DMOSFETs	1178
23.3 IGBTs	1180
23.4 MOS-gesteuerte Thyristoren (MCTs)	1186
23.5 Integration, Smart-Power ICs	1187
23.5.1 Hochvolt-CMOS-Prozeß	1187
23.5.2 BCDMOS-Prozeß	1188
23.5.3 SOI-Technologien	1189
23.6 Literaturverzeichnis	1189

24. CAD-Modelle für MOSFETs	1191
24.1 Einführung	1191
24.2 LEVEL 1- Modell	1193
24.3 LEVEL 3- Modell	1197
24.3.1 Einsatzspannung	1198
24.3.2 Effektive Beweglichkeit, Sättigungsgeschwindigkeit	1201
24.3.3 Sättigungsspannung	1203
24.3.4 Kanallängenmodulation	1203
24.3.5 Subthresholdstrom	1204
24.3.6 Transistorkapazitäten	1205
24.4 Weiterentwickelte MOS-Modelle	1209
24.4.1 Die BSIM-Modelle	1209
24.4.2 Charge-sheet Modelle	1210
24.5 Literaturverzeichnis	1214
25. Sperrsichtfeldeffekttransistoren	1215
25.1 Sperrsichtfeldeffekttransistoren (JFETs)	1215
25.1.1 Kennlinien des JFET	1216
25.1.2 Großsignalmodell, Beschreibung in SPICE	1221
25.1.3 Kleinsignalbeschreibung des JFET	1224
25.1.4 Verstärkerstufe mit n-Kanal-JFET in Sourceschaltung	1226
25.2 GaAs-MESFETs	1229
25.2.1 Anwendungen	1231
25.2.2 Dual-Gate-MESFETs	1233
25.2.3 SPICE-Modelle für MESFETs	1233
25.3 MODFETs	1236
25.4 Literaturverzeichnis	1240
26. Grundlagen Optoelektronik	1241
26.1 Licht	1241
26.1.1 Photonen	1242
26.1.2 Gruppengeschwindigkeit, Materialdispersion	1244
26.2 Strahlungsgrößen	1246
26.2.1 Radiometrische Strahlungsgrößen	1247
26.2.2 Fotometrische Strahlungsgrößen	1249
26.2.3 Das fotometrische Grundgesetz	1253
26.2.4 Brechung und Reflexion	1254
26.3 Farbsehen und Farbmimetrik	1256
26.4 Absorption und Dämpfung	1259
26.5 Lichtwellenleiter	1261
26.5.1 Dämpfung in Glasfasern	1262
26.5.2 Bandbreite-Länge-Produkt von Lichtwellenleitern	1263
26.5.3 Multimodefaser	1265
26.5.4 Gradientenfaser	1267
26.5.5 Monomodefaser	1268
26.6 Wärmestrahlung	1270
26.7 Literaturverzeichnis	1272

27. Detektoren für optische Strahlung	1273
27.1 Kenngrößen für Fotodetektoren	1273
27.2 Fotowiderstände (LDR)	1275
27.2.1 Mechanismen der Fotoleitung	1275
27.2.2 Leitwert und Empfindlichkeit	1276
27.2.3 Ansprechgeschwindigkeit und Rauschen	1278
27.2.4 Beispiele	1279
27.3 pin-Fotodioden	1283
27.3.1 Strom-Spannungs-Kennlinie und Empfindlichkeit	1283
27.3.2 Fotometrische Strahlungsmessung mit pin-Diode	1286
27.3.3 Beiträge zum Fotostrom, Quantenwirkungsgrad	1288
27.3.4 Ersatzschaltung der pin-Diode	1289
27.3.5 Ansprechgeschwindigkeit, Grenzfrequenz	1290
27.3.6 Realisierung von pin-Fotodioden	1292
27.3.7 Rauschen von pin-Fotodioden	1293
27.3.8 Unitravelling-carrier Fotodioden	1298
27.4 Avalanche-Fotodioden (APDs)	1299
27.5 Schottky-Fotodioden, MSM-Fotodioden	1303
27.6 Fotodioden mit lateraler Ortsauflösung	1304
27.7 Fototransistoren	1306
27.7.1 Frequenzverhalten	1308
27.7.2 Rauschen	1311
27.7.3 Heterostruktur-Fototransistoren	1312
27.8 Pyroelektrische IR-Detektoren	1312
27.9 Photomultiplier	1318
27.10 Farbsensoren	1319
27.11 Literaturverzeichnis	1319
28. Solarzellen	1321
28.1 Sonneneinstrahlung	1322
28.1.1 Direkte, Diffuse und Globale Sonneneinstrahlung	1323
28.2 Spektrale Empfindlichkeit	1328
28.3 Kenngrößen und Ersatzschaltung	1333
28.4 Einkristalline Solarzellen	1337
28.5 Polykristalline Siliziumsolarzellen	1347
28.6 Dünnschichtsolarzellen	1347
28.6.1 Amorphe Siliziumsolarzellen	1348
28.6.2 Heterostruktur-Dünnschicht-Solarzellen	1350
28.7 Solarzellenarrays	1353
28.8 Literaturverzeichnis	1355

29. Lichtemittierende Dioden	1357
29.1 Leuchtdioden (LEDs)	1357
29.1.1 Wirkungsweise und Kenndaten	1357
29.1.2 Modulation des ausgestrahlten Lichts	1362
29.1.3 Bauformen	1363
29.2 Laserdioden	1371
29.2.1 Prinzip des Lasers und Schwellenbedingung	1371
29.2.2 Abgestrahlte Leistung, Optischer Gewinn	1374
29.2.3 Temperaturabhängigkeit und Abstrahlcharakteristik	1376
29.2.4 Alterung	1378
29.2.5 Bilanzgleichungen, Großsignalmodell	1379
29.2.6 Kleinsignalbetrieb, Modulationsgrenzfrequenz	1384
29.2.7 Bauformen kantenemittierender Laserdioden	1387
29.2.8 VCSELs, Oberflächenemittierende Laserdioden	1389
29.3 Optokoppler	1391
29.3.1 Kenngrößen	1391
29.3.2 Frequenzverhalten, Ansprechgeschwindigkeit	1393
29.3.3 Galvanische Trennung	1396
29.3.4 Lichtschranken	1399
29.3.5 Modellierung in PSPICE	1400
29.4 Literaturverzeichnis	1402
30. Displays	1403
30.1 Flüssigkristall-Anzeigen (LCDs)	1403
30.1.1 Flüssigkristalle	1403
30.1.2 TN-Zelle	1405
30.1.3 STN-Zelle	1408
30.1.4 Reflektive Zellen	1409
30.1.5 Ansteuerung in Matrix-Displays	1410
30.1.6 Hintergrundbeleuchtung	1412
30.2 Plasma-Displays	1412
30.3 Vakuum-Fluoreszenz- und Field-Emission Displays	1415
30.4 OLED-Displays	1417
30.5 Literaturverzeichnis	1418
31. Bildwandler	1419
31.1 Charge Coupled Devices	1419
31.1.1 Surface Channel CCDs (SCCDs)	1419
31.1.2 Buried-channel CCDs (BCCDs)	1424
31.1.3 Ladungsbewertung	1427
31.1.4 CCD-Sensoren, Eigenschaften und Kenngrößen	1428
31.1.5 Bauformen und Beispiele	1433
31.2 CMOS-Bildwandler	1437
31.3 Bildwandler für Farbbilder	1440
31.4 Literaturverzeichnis	1441

32. Sensorbauelemente	1443
32.1 Temperatursensoren	1443
32.1.1 Widerstands-Temperatursensoren	1443
32.1.2 Temperaturmessung mit Heißleitern	1448
32.1.3 Halbleiter-Temperatursensoren	1449
32.1.4 Thermoelemente	1450
32.1.5 Thermopiles	1452
32.2 Magnetfeldsensoren	1453
32.2.1 Hall-Sensoren	1453
32.2.2 Magnetowiderstandssensoren	1455
32.3 Dehnungsmeßstreifen	1459
32.3.1 Metallfolien-DMS, Dünnschicht-DMS	1460
32.3.2 Halbleiter-DMS	1461
32.3.3 Brückenschaltung	1461
32.4 Drucksensoren	1462
32.4.1 DMS-Drucksensoren	1462
32.4.2 Piezoresistive Silizium-Drucksensoren	1463
32.4.3 Kapazitive Drucksensoren	1463
32.5 Kapazitive Feuchtesensoren	1464
32.6 Detektoren für Ionisierende Strahlung	1465
32.6.1 Ionisationskammern, Zählrohre	1466
32.6.2 Halbleiterdetektoren	1467
32.7 Literaturverzeichnis	1468
33. Batterien und Akkumulatoren	1469
33.1 Elektrochemische Zellen	1469
33.1.1 Grundprinzipien	1469
33.1.2 Elektrodenprozesse	1472
33.1.3 Kenngrößen, Spezifische Energie, Leistungsabgabe	1476
33.1.4 Reihen- und Parallelschaltung	1480
33.1.5 Betrieb mit Solarzellen	1482
33.2 Ultracaps	1482
33.3 Brennstoffzellen	1485
33.4 Literaturverzeichnis	1487