

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
2	Grundlagen der Halbleiter	21
2.1	Halbleiter im Periodensystem der Elemente	21
2.2	Halbleiter zwischen Nichtleiter und Leiter	23
2.3	Aufbau der Atome	23
2.3.1	Bohrsches Atommodell.....	24
2.3.2	Elektronenpaarbindung, Kristallgitter	25
2.3.3	Schalenmodell und Wechselwirkung	28
2.3.4	Bändermodell und Fermi-Statistik.....	29
2.4	Direkte und indirekte Halbleiter	36
2.4.1	Quanten und Wellen	36
2.4.2	Direkte Rekombination	38
2.4.3	Indirekte Rekombination	38
2.5	Eigenleitung	39
2.5.1	Eigenleitungsdichte	40
2.5.2	Ladungsträgerlebensdauer	43
2.5.3	Beweglichkeit	44
2.6	Störstellenleitung	45
2.6.1	Dotieren	45
2.6.2	Störstellenleitung im Bändermodell.....	47
2.6.3	Allgemeines zu dotierten Halbleitern	48
2.6.4	Einfluss der Temperatur auf dotierte Halbleiter	49
2.6.5	Auswirkung der Temperatur auf Halbleiterbauelemente	50
3	Der pn-Übergang.....	51
3.1	Der pn-Übergang ohne äußere Spannung	51
3.1.1	Der ideale abrupte pn-Übergang	51
3.1.2	Diffusion und Rekombination im pn-Grenzgebiet	52
3.1.3	Ladungsträgerdichte.....	53
3.1.4	Raumladungsdichte.....	55
3.1.5	Diffusionsspannung	55
3.1.6	Sperrschichtweite.....	57
3.1.7	Sperrschichtkapazität.....	58
3.1.8	Energiebänder-Modell des pn-Übergangs	58
3.2	Der pn-Übergang mit äußerer Spannung	59
3.2.1	Äußere Spannung in Sperrrichtung	59

8 Inhaltsverzeichnis

3.2.2	Äußere Spannung in Flussrichtung.....	64
3.3	Durchbruchmechanismen beim pn-Übergang.....	68
3.3.1	Lawinen-Durchbruch.....	68
3.3.2	Zener-Durchbruch.....	70
3.3.3	Überlappung von Lawinen- und Zener-Effekt.....	72
3.3.4	Thermischer Durchbruch (2. Durchbruch).....	72
3.3.5	Durchgriff (punch-through).....	73
3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs.....	75
3.4.1	Einschaltvorgang.....	75
3.4.2	Aus- und Umschaltvorgang.....	76
3.5	Gesamtkennlinie des pn-Übergangs.....	78
3.6	Halbleiter-Metall-Übergang.....	79
4	Halbleiterdioden.....	81
4.1	Ausführung.....	81
4.2	Aufbau.....	81
4.3	Elektrische Funktion.....	82
4.4	Bauarten.....	83
4.5	Verhalten einer Diode.....	84
4.5.1	Kennlinienbereiche.....	84
4.5.2	Näherungen für die Diodenkennlinie.....	87
4.5.3	Beschreibung durch Gleichungen.....	90
4.5.4	Bestimmung der Diodenparameter mit Regressionsverfahren.....	92
4.5.5	Kleinsignalverhalten von Dioden.....	94
4.5.6	Schaltverhalten von Dioden.....	97
4.6	Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter.....	101
4.6.1	Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes.....	101
4.6.2	Temperaturabhängigkeit der Durchlassspannung.....	102
4.6.3	Zusammenfassung: Temperaturabhängigkeit der Diodenparameter..	103
4.7	Kenn- und Grenzdaten von Dioden.....	103
4.7.1	Grenzspannungen.....	104
4.7.2	Grenzströme.....	104
4.7.3	Sperrstrom.....	104
4.7.4	Maximale Verlustleistung.....	105
4.8	Auszüge aus Datenblättern von Dioden.....	105
4.8.1	Silizium-Epitaxial-Planar-Diode 1N 4148.....	105
4.8.2	Silizium-Diffusions-Dioden 1N 4001...1N 4007.....	109
4.9	Herstellungsmethoden für pn-Übergänge.....	111
4.9.1	Legierungstechnik.....	111
4.9.2	Planartechnik.....	112
4.10	Aufbau von Halbleiterdioden.....	115
4.10.1	Einzeldiode.....	115
4.10.2	Integrierte Diode.....	120

4.11	Diodentypen.....	121
4.11.1	Schaltdiode, Universaldiode.....	121
4.11.2	Gleichrichterdiode.....	121
4.11.3	Schottky-Diode.....	121
4.11.4	Suppressordiode.....	122
4.11.5	Temperatursensoren.....	125
4.11.6	DIAC.....	125
4.11.7	Zenerdiode, Z-Diode.....	129
4.11.8	Avalanchediode.....	131
4.11.9	Stromregeldiode.....	131
4.11.10	Leuchtdiode (Lumineszenzdiode, LED).....	132
4.11.11	Organische Leuchtdiode (OLED).....	144
4.11.12	Laserdiode (LD).....	149
4.11.13	Fotodiode.....	160
4.11.14	Solarzelle.....	170
4.11.15	Kapazitätsdiode (Varaktor-Diode).....	180
4.11.16	pin-Diode.....	186
4.11.17	Tunnelndiode (Esaki-Diode).....	189
4.11.18	Rückwärtsdiode (Backwarddiode).....	195
4.11.19	Gunndiode.....	196
4.11.20	IMPATT-Diode.....	202
4.11.21	TRAPATT-Diode.....	205
4.11.22	BARITT-Diode.....	206
4.11.23	DOVETT-Diode.....	207
4.11.24	Ladungsspeicherungsdiode.....	207
4.11.25	Speicherschaltodiode (Step-Recovery-Diode).....	208
4.11.26	Magnetdiode.....	209
5	Bipolare Transistoren.....	213
5.1	Definition und Klassifizierung von Transistoren.....	213
5.2	Grundsätzlicher Aufbau des Transistors.....	216
5.3	Richtung von Strömen und Spannungen.....	217
5.4	Betriebszustände (Arbeitsbereiche).....	218
5.4.1	Aktiver Zustand (Normalbetrieb, Vorwärtsbetrieb).....	218
5.4.2	Gesättigter Zustand (Sättigungsbetrieb).....	219
5.4.3	Gesperrter Zustand (Sperrbetrieb).....	219
5.4.4	Inverser Zustand (Inversbetrieb, Rückwärtsbetrieb).....	219
5.5	Signaldynamik und Signalgröße.....	220
5.6	Funktionsweise.....	220
5.7	Die drei Grundschaltungen des Bipolartransistors.....	226
5.8	Einsatz als Verstärker oder Schalter.....	226
5.8.1	Verstärkerbetrieb.....	227
5.8.2	Schalterbetrieb.....	228

5.9	Kennlinien des Transistors.....	229
5.9.1	Eingangskennlinie	229
5.9.2	Ausgangskennlinie	233
5.9.3	Steuerkennlinien	239
5.9.4	Rückwirkungskennlinie.....	241
5.9.5	Vierquadranten-Kennlinienfeld	242
5.10	Durchbruchspannungen und Grenzströme.....	245
5.10.1	Durchbruch 1. Art.....	245
5.10.2	Durchbruch 2. Art.....	246
5.10.3	Grenzströme	247
5.11	Maximale Verlustleistung	247
5.11.1	Statischer Betrieb.....	247
5.11.2	Pulsbetrieb.....	250
5.12	Erlaubter Arbeitsbereich	251
5.13	Rauschen beim Bipolartransistor.....	252
5.13.1	Allgemeines zum Rauschen	252
5.13.2	Beschreibung stochastischer Signale	254
5.13.3	Rauschquellen beim Bipolartransistor	262
5.13.4	Rauschzahl.....	265
5.14	Beschreibung durch Gleichungen	268
5.15	Abhängigkeiten der Stromverstärkung.....	270
5.15.1	Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Arbeitspunkt.....	270
5.15.2	Abhängigkeit der Stromverstärkung von der Grundschialtung.....	271
5.15.3	Stromverstärkung in Abhängigkeit der Frequenz, Grenzfrequenzen ...	273
5.16	Dynamisches Schaltverhalten des Bipolartransistors.....	275
5.16.1	Schaltzeiten	276
5.17	Modelle und Ersatzschaltungen des Bipolartransistors.....	279
5.17.1	Die physikalische Ersatzschaltung.....	281
5.17.2	Die formale Ersatzschaltung	291
5.17.3	Wechselstrom-Kleinsignalersatzschaltbild.....	306
5.18	Aufbau und Herstellungserfahren von Bipolartransistoren	308
5.18.1	Spitzentransistor	308
5.18.2	Legierungstransistor.....	309
5.18.3	Mesatransistor	309
5.18.4	Planartransistor.....	310
5.19	Hetero-Bipolartransistor (HBT)	316
5.20	Darlington-Transistor.....	320
5.20.1	Verlauf der Stromverstärkung	321
5.20.2	Schaltverhalten	324
5.20.3	Kleinsignalverhalten.....	325
5.20.4	Weitere Besonderheiten des Darlington-Transistors.....	325

6	Feldeffekttransistoren.....	327
6.1	Allgemeine Eigenschaften.....	327
6.2	Funktionsprinzip und Klassifikation.....	328
6.2.1	Praxis mit Feldeffekttransistoren.....	332
6.2.2	Unterschiede zwischen unipolaren und bipolaren Transistoren	333
6.3	Die drei Grundsaltungen des Feldeffekttransistors	334
6.4	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des Sperrschicht-FET	335
6.4.1	JFET ohne äußere Spannung	335
6.4.2	U_{GS} variabel, U_{DS} klein und konstant	336
6.4.3	U_{DS} variabel, $U_{GS} = 0$	337
6.4.4	U_{DS} und U_{GS} variabel	339
6.4.5	Kennlinien des JFET, Beschreibung durch Gleichungen	340
6.4.6	Temperaturabhängigkeit der JFET-Parameter.....	345
6.5	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise des MOSFETs.....	346
6.5.1	MOS-Kondensator, Grundlagen des MOSFETs.....	346
6.5.2	Aufbau eines n-Kanal-MOSFETs	349
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal-MOSFETs, Anreicherungstyp.....	351
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal-MOSFETs, Verarmungstyp.....	355
6.5.5	Kennlinien des MOSFETs, Beschreibung durch Gleichungen	357
6.5.6	MOSFET als steuerbarer Widerstand	362
6.5.7	Temperaturabhängigkeit der MOSFET-Parameter	365
6.6	Modelle und Ersatzschaltungen des Feldeffekttransistors.....	367
6.6.1	Statisches Verhalten.....	367
6.6.2	Dynamisches Verhalten	368
6.6.3	Kleinsignalmodell.....	369
6.7	Grenzdaten und Sperrströme	374
6.7.1	Durchbruchspannungen	374
6.7.2	Grenzströme	375
6.7.3	Sperrströme.....	376
6.7.4	Maximale Verlustleistung	376
6.7.5	Erlaubter Arbeitsbereich	377
6.8	Der FET als Schalter	377
6.8.1	Schaltstufen mit FET	377
6.8.2	Dynamisches Verhalten von FET-Schaltstufen	379
6.9	Rauschen beim Feldeffekttransistor.....	380
6.10	Spezielle Bauformen von Feldeffekttransistoren	381
6.10.1	Leistungs-MOSFETs	381
6.10.2	Intelligente Leistungs-FETs.....	387
6.10.3	Weitere Bauformen von FETs.....	388
6.11	Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT).....	394
6.11.1	Struktureller Aufbau	395
6.11.2	NPT- und PT-Struktur.....	395
6.11.3	Funktionsweise.....	398

12 Inhaltsverzeichnis

6.11.4	IGBT Latch-Up	400
6.11.5	Kennlinien	402
6.11.6	Schaltverhalten	404
6.11.7	Trench-IGBT	407
7	Thyristoren	409
7.1	Einteilung der Thyristoren	409
7.2	Einrichtungs-Thyristortriode (Thyristor)	410
7.2.1	Grundlagen der Funktionsweise	410
7.2.2	Aufbau	412
7.2.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	414
7.2.4	Der Zündvorgang	417
7.2.5	Löschen des Thyristors	422
7.2.6	Kennlinie des Steuerkreises	422
7.2.7	Temperaturabhängigkeit	424
7.2.8	Dynamische Eigenschaften	424
7.2.9	Spannungs- und Stromgrenzwerte	429
7.2.10	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor	429
7.2.11	Zusammenfassung der Eigenschaften von Thyristoren	432
7.2.12	Vergleich von Thyristor und mechanischem Schalter	432
7.3	Spezielle Bauformen des Thyristors	433
7.3.1	Zweirichtungs-Thyristordiode (TRIAC)	433
7.3.2	Einrichtungs-Thyristortetrode	436
7.3.3	Asymmetrisch sperrende Thyristoren	436
7.3.4	Gate Turn-Off Thyristor (GTO)	437
7.3.5	MOS-gesteuerter Thyristor (MCT)	440
7.3.6	Lichtgesteuerter Thyristor (LTT)	442
7.3.7	Feldgesteuerter Thyristor (FCT)	443
7.3.8	Gate-Commutated Thyristor (GCT, IGCT)	444
7.3.9	Unijunction-Transistor (UJT)	445
8	Operationsverstärker	449
8.1	Allgemeines, Überblick	449
8.2	Schaltsymbol, Anschlüsse	450
8.3	Ausführungsformen	451
8.4	Betriebsspannungen	452
8.5	Operationsverstärker-Typen	453
8.5.1	Normaler Operationsverstärker	454
8.5.2	Transkonduktanz-Verstärker	455
8.5.3	Transimpedanz-Verstärker	456
8.5.4	Strom-Verstärker	456
8.6	Der normale Operationsverstärker	457
8.6.1	Begriffsdefinitionen	457

8.6.2	Differenzverstärkung, Leerlaufspannungsverstärkung V_0	459
8.6.3	Übertragungskennlinie	460
8.6.4	Gleichtaktverstärkung, Gleichtaktunterdrückung	461
8.6.5	Eingangswiderstände	463
8.6.6	Ausgangswiderstand	465
8.6.7	Eingangsströme.....	466
8.6.8	Offsetspannung.....	468
8.6.9	Verstärkungseinstellung durch Gegenkopplung.....	471
8.6.10	Verstärkungs-Bandbreiteprodukt.....	472
8.6.11	Frequenzgangkorrektur.....	474
8.6.12	Spannungsbereich und Stromaufnahme.....	487
8.6.13	Temperaturbereich	488
8.6.14	Anstiegsgeschwindigkeit	488
8.6.15	Maximale Ausgangsspannung	490
8.6.16	Einschwingzeit (Settling Time)	490
8.6.17	Zeitverzögerung nach Überlast.....	491
8.6.18	Rauschen	491
8.7	Der ideale Operationsverstärker	494
8.8	Interner Aufbau von Operationsverstärkern.....	495
8.8.1	Übersicht.....	495
8.8.2	Die Eingangsstufe (Differenzverstärker)	496
8.8.3	Die Koppelstufe	501
8.8.4	Die Ausgangsstufe.....	502
8.9	Tipps zum praktischen Einsatz von Operationsverstärkern.....	503
9	Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen	505
9.1	Allgemeines zu integrierten Schaltungen	505
9.1.1	Definition und Arten der Integration	505
9.1.2	Vor- und Nachteile integrierter Schaltungen.....	511
9.1.3	Einteilung integrierter Schaltungen.....	512
9.2	Kenngrößen digitaler Schaltkreise	517
9.2.1	Betriebsspannung	517
9.2.2	Pegelbereiche und Übertragungskennlinie logischer Schaltungen.....	518
9.2.3	Spannungspegel, Störabstand.....	519
9.2.4	Lastfaktoren	521
9.2.5	Ausgangsstufen.....	521
9.2.6	Schaltzeiten	522
9.2.7	Verlustleistung	523
9.3	Logikbaureihen.....	524
9.3.1	Übersicht bipolare Schaltkreisfamilien	524
9.3.2	Übersicht MOS-Schaltkreisfamilien.....	524
9.4	Bipolare Schaltkreisfamilien.....	525
9.4.1	RTL	525

14 Inhaltsverzeichnis

9.4.2	DTL	526
9.4.3	ECL	527
9.4.4	I ² L	530
9.4.5	TTL	531
9.5	MOS-Schaltkreisfamilien	547
9.5.1	Vorteile von MOSFETs in integrierten Schaltungen	547
9.5.2	PMOS-Technologie	547
9.5.3	NMOS-Technologie	547
9.5.4	CMOS-Technologie	549
9.5.5	BICMOS-Logik	558
10	Halbleiterspeicher	561
10.1	Einteilung digitaler Halbleiterspeicher	561
10.2	Allgemeiner Aufbau der Speicherbausteine	562
10.2.1	Speicherorganisation	563
10.2.2	Der Adressdekoder	565
10.2.3	Die Speicherzelle	567
10.2.4	Aufbau von Speicherbausteinen, Zusammenfassung	567
10.2.5	Busleitungen, Steuersignale	568
10.2.6	Kenndaten	569
10.3	Einteilung der Tabellenspeicher	571
10.4	Einteilung der Festwertspeicher	571
10.4.1	Masken-ROM	571
10.4.2	Mit Programmiergerät programmierbare PROMs	573
10.4.3	In der Schaltung löscht- und programmierbare PROMs	578
10.4.4	MRAM (Magnetic Random Access Memory)	587
10.4.5	FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)	591
10.5	Einteilung der flüchtigen Speicher	595
10.5.1	Statisches RAM (SRAM)	596
10.5.2	Dynamisches RAM (DRAM)	600
11	Anwendungsspezifische integrierte Bausteine	611
11.1	Einsatz von ASICs	611
11.2	Einteilung von ASICs	612
11.2.1	Full-Custom-ASIC	612
11.2.2	Standardzellen-ASIC	613
11.2.3	Gate Array	614
11.2.4	Programmierbare Logikbausteine	614
11.3	Entwurfsablauf eines ASIC	616
11.3.1	Vorüberlegungen	616
11.3.2	Schaltungsentwicklung	618
11.3.3	Schaltungseingabe	620
11.3.4	Simulation	622

11.3.5	Layout	624
11.3.6	Entwurfsprüfung	626
11.3.7	Fertigung	627
11.3.8	Mechanischer Aufbau	628
11.3.9	Test	629
11.4	Einteilung programmierbarer Logikbausteine.....	634
11.4.1	Übersicht und Begriffe	634
11.4.2	Architektur anwenderprogrammierbarer Logikschaltkreise.....	635
11.4.3	PAL.....	640
11.4.4	GAL.....	645
11.4.5	CPLD.....	648
11.4.6	FPGA.....	653
12	Literaturverzeichnis	661
	Stichwortverzeichnis.....	665