

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Halbleiter .....</b>	<b>21</b>
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	Eigenleitungsichte .....	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
<b>3</b>	<b>Der pn-Übergang .....</b>	<b>51</b>
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
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
<b>4</b>	<b>Halbleiterdioden .....</b>	<b>81</b>
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	Ladungsspeicherndiode .....	207
4.11.25	Speicherschaltndiode (Step-Recovery-Diode) .....	208
4.11.26	Magnetndiode .....	209
<b>5</b>	<b>Bipolare Transistoren .....</b>	<b>213</b>
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 Grundschtaltung .....	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 Herstellungsverfahren von Bipolartransistoren .....	308
5.18.1	Spitzen transistor .....	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
<b>6</b>	<b>Feldeffekttransistoren .....</b>	<b>327</b>
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 Grundschtaltungen 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 MOSFET .....	349
6.5.3	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, Anreicherungstyp .....	351
6.5.4	Wirkungsweise des n-Kanal MOSFET, 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
6.11.4	IGBT Latch-Up.....	400
6.11.5	Kennlinien.....	402
6.11.6	Schaltverhalten.....	404
6.11.7	Trench-IGBT.....	407
<b>7</b>	<b>Thyristoren.....</b>	<b>409</b>
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
<b>8</b>	<b>Operationsverstärker.....</b>	<b>449</b>
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
<b>9</b>	<b>Grundlagen integrierter Halbleiterschaltungen.....</b>	<b>505</b>
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
9.4.2	DTL.....	526
9.4.3	ECL .....	527
9.4.4	I <sup>2</sup> 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
<b>10</b>	<b>Halbleiterspeicher .....</b>	<b>561</b>
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 lösch- 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
<b>11</b>	<b>Anwendungsspezifische Integrierte Bausteine.....</b>	<b>611</b>
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
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>661</b>
<b>13</b>	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>665</b>