

Inhaltsverzeichnis

0 Einleitung	1
1 Passive lineare Grundbauelemente	5
1.1 Lineare Widerstände	5
1.1.1 Bauformen von technischen Widerständen	6
1.1.1.1 Schichtwiderstände	7
1.1.1.2 Drahtwiderstände	9
1.1.1.3 Festwiderstände	10
1.1.1.4 Dreh- oder Stellwiderstände	10
1.1.1.5 Ebene Dünnfilmmetallwiderstände	13
1.1.1.6 Ebene Dickfilmwiderstände	14
1.1.1.7 Chipwiderstände für SMD-Technik	14
1.1.2 Normen und Eigenschaften von Widerständen	16
1.1.2.1 Wertebereich, Kennzeichnung	16
1.1.2.2 Toleranz, Güteklaasse	17
1.1.2.3 Belastbarkeit, Nennlast	22
1.1.2.4 Temperaturkoeffizient	25
1.1.2.5 Spannungsabhängigkeit	26
1.1.2.6 Frequenzabhängigkeit	27
1.1.2.7 Rauschen	30
1.1.3 Anwendungshinweise für Widerstände	32
1.2 Kondensatoren	34
1.2.1 Allgemeine Eigenschaften von Kondensatoren	34

1.2.1.1	Spezifische Kapazität (Kapazität pro Volumeneinheit)	35
1.2.1.2	Ersatzschaltbild des Kondensators	36
1.2.1.3	Verluste im Kondensator	37
1.2.1.4	Eigenresonanz	39
1.2.1.5	Wertebereich, Kennzeichnung	39
1.2.1.6	Toleranz, Konstanz	40
1.2.1.7	Elektrische, thermische und klimatische Belastbarkeit	41
1.2.2	Bauformen von Kondensatoren	42
1.2.2.1	Vakuum- und Luftkondensatoren	45
1.2.2.2	Kondensatoren für die Leistungselektronik	45
1.2.2.3	Glimmerkondensatoren	45
1.2.2.4	Keramische Kondensatoren	46
1.2.2.5	Wickelkondensatoren	53
1.2.2.6	Vielschichtkondensatoren	59
1.2.2.7	Elektrolytkondensatoren mit flüssigen Elektrolyten	59
1.2.2.8	Elektrolytkondensatoren mit festem Elektrolyten	61
1.2.2.9	Elektrochemische Doppelschicht-Kondensatoren	63
1.2.2.10	Funk-Entstörkondensatoren	68
1.2.2.11	Drehkondensatoren, Trimmkondensatoren	69
1.2.2.12	Zusammenfassende Übersicht über Bauteilkondensatoren	71
1.3	Induktivitäten	73
1.3.1	Allgemeine Eigenschaften von Induktivitäten	73
1.3.1.1	Ersatzschaltbild der Induktivität	74
1.3.1.2	Verluste in der Spule	74
1.3.1.3	Eigenkapazität und Eigenresonanz	77
1.3.1.4	Elektrische und thermische Belastbarkeit von Induktivitäten	78
1.3.2	Bauformen von Induktivitäten	78

1.3.2.1	Luftspulen	78
1.3.2.2	Ferromagnetika für Spulen und Übertrager . . .	79
1.3.2.3	Offene Spulen mit Schraubkernen	86
1.3.2.4	Schalen- und Topfkernspulen	87
1.3.2.5	Ringkernspulen	88
1.3.2.6	Spulen und Übertrager mit Blechkernen	89
2	Elektrischer Leitungsmechanismus im Vakuum	91
2.1	Ladungsträger, Elektronen	91
2.2	Ablenkung von Elektronen durch elektrische Felder	93
2.3	Ablenkung von Elektronen durch Magnetfelder	94
2.4	Elektronenemission aus einem Leiter im Vakuum	94
2.5	Glühemission, Austrittsarbeit, Temperaturspannung	96
3	Elektrische Leitungsvorgänge in Festkörpern allgemein	99
3.1	Erscheinungsformen fester Materie	99
3.2	Elektronen- und Ionenstrom	101
4	Physik der Halbleiterbauelemente	103
4.1	Historisches	103
4.2	Abgrenzung: Leiter – Halbleiter – Nichtleiter	104
4.2.1	Leiter	104
4.2.2	Nichtleiter (Isolatoren)	105
4.2.3	Halbleiter	105
4.2.4	Atom- und Kristallaufbau von Germanium und Silizium (Bindungsmodelle)	107
4.2.4.1	Das Bohr'sche Atommodell	107
4.2.4.2	Germanium und Silizium	108
4.3	Energiebändermodell eines reinen Halbleiters	111
4.4	Eigenleitung im Halbleiter (intrinsic– Leitung)	113
4.5	Störstellenleitung im Halbleiter	114
4.5.1	Dotierung eines Halbleiters	114

4.5.1.1 N-Dotierung (N-Halbleiter), Donator (P, Sb, As)	116
4.5.1.2 P-Dotierung (P-Halbleiter), Akzeptor (In, Ga, B)	118
4.5.2 Neutralitätsbedingungen	121
4.5.3 N-, P- und I-Zonen	122
4.5.4 Majoritäts- und Minoritätsträgerstrom	123
4.6 Elektrische Stromleitung in Halbleitern allgemein	123
4.7 Physik der Sperrsicht	125
4.7.1 Der PN-Übergang	125
4.7.2 Diffusion an den Grenzen der Zonen, Raumladung	127
4.7.3 Diffusionsspannung als Folge der Diffusion	128
4.7.4 Verhalten der Majoritäts- und Minoritätsträgerströme an der Grenzschicht	128
4.7.5 Lebensdauer von Majoritäts- und Minoritätsträgern	129
4.7.6 Quantitative Beschreibung der Diffusion am PN- Übergang	130
4.7.7 Der PN-Übergang im Bändermodell	133
4.7.8 Der PN-Übergang unter verschiedenen äußeren Bedingungen	134
4.7.8.1 Äußere leitende Verbindung (Kurzschluß)	134
4.7.8.2 PN-Übergang in Sperrichtung vorgespannt	135
4.7.8.3 PN-Übergang in Flußrichtung vorgespannt	136
4.8 Der Hall-Effekt im Halbleiter	137
4.9 Thermoelektrische Effekte	141
4.9.1 Der Seebeck-Effekt	141
4.9.2 Der Peltier-Effekt	142
4.9.3 Der Thomson-Effekt	142

5 Bauelemente auf nichteinkristalliner Basis	143
5.1 Thermoelektrische Halbleiterbauelemente	144
5.1.1 Das Halbleiter-Thermoelement (Seebeck- Element)	144
5.1.2 Das Halbleiter-Peltier-Element	146
5.2 Temperaturabhängige Widerstände (Thermistoren)	147
5.2.1 Heißleiter (NTC-Widerstand)	147
5.2.1.1 Herstellung und Bauformen von NTC-Widerständen	148
5.2.1.2 Temperaturabhängigkeit der Kenngrößen	148
5.2.1.3 Linearisierung und Anpassung von Widerstandskennlinien	151
5.2.2 Kaltleiter (PTC-Widerstand)	151
5.2.2.1 Herstellung und Bauformen von PTC-Widerständen	152
5.2.2.2 Temperaturabhängigkeit des Widerstands	152
5.2.2.3 Spannungsabhängigkeit des Widerstands	152
5.2.2.4 Frequenzabhängigkeit des Widerstands	152
5.2.2.5 Anwendungen für PTC-Widerstände	153
5.2.3 Spannungsabhängiger Widerstand (SAW), Varistor (VDR)	155
5.2.3.1 Herstellung und Bauformen	155
5.2.3.2 Strom/Spannungsabhängigkeit des Widerstands	155
5.3 Photoelektrische Bauelemente	156
5.3.1 Bauelemente für die Elektrophotographie	157
5.3.2 Photowiderstand	159
5.3.3 Schalt- und Speicherelemente	160
5.3.4 Halbleiter-Bildsensoren	161
5.3.5 Galvanomagnetische Bauelemente	161
5.3.5.1 Hallgenerator	161
5.3.5.2 Feldplatte	163

6 Die Halbleiterdiode (Bauelement mit einem PN-Übergang)	167
6.1 Kennlinie der Halbleiterdiode	168
6.1.1 U_d liegt in der Nähe von 0	171
6.1.2 $U_d > 0,1$ V	172
6.1.3 $U_d < -0,1$ V (Sättigungsgebiet)	172
6.1.4 Durchbruchgebiet (bei hohen Sperrspannungen)	172
6.2 Sperrsichtweite w und Sperrsichtkapazität	175
6.3 Diffusionskapazität	176
6.4 Bahnwiderstände	177
6.5 Differentieller Leitwert, differentieller Widerstand	178
6.6 Ersatzschaltbild der Diode	179
6.7 Dynamisches Verhalten der Diode	179
6.8 Ausführungsformen von Dioden	181
6.8.1 Spitzendiode (Punktkontakt-Diode)	181
6.8.2 Flächendiode	182
6.8.3 Kupferoxidulgleichrichter	184
6.8.4 Selengleichrichter	185
6.8.5 Z-Diode (ältere Bezeichnung Zenerdiode)	185
6.8.6 Kapazitätsdiode (Varicapdiode, Varactordiode)	191
6.8.7 Photodiode	195
6.8.8 Photoelement (Solarzelle)	198
6.8.9 Lumineszenz- Dioden	200
6.8.10 Laser-Diode	204
6.8.11 Tunnneldiode (Esaki-Diode), Backwarddiode	205
6.8.12 Schottky-Diode (Metall-Halbleiterkontakt, hot carrier diode)	206
6.8.13 PIN-Dioden	208
6.8.14 Lawinenlaufzeit-Diode (Impatt-Diode)	209
6.8.15 Doppelbasis-Diode (Unijunction-Transistor)	209
6.8.16 Magnetdiode	211

7 Transistoren	213
7.1 Der Bipolar-Transistor (Bauteil mit 2 PN-Übergängen)	213
7.1.1 PNP- und NPN-Transistoren, Bezeichnung der Spannungs- und Stromrichtungen	214
7.1.2 Wirkungsweise des Bipolartransistors	216
7.1.3 Bipolar-Transistormodell nach Ebers/Moll und Gummel/Poon für Großsignalbetrieb	220
7.1.4 Bipolartransistorgrundschaltungen	222
7.1.5 Bipolartransistor-Kennlinienfelder	224
7.1.6 Der Early-Effekt (Sperrschichtweiten-Modulation)	232
7.1.7 Temperaturabhängigkeit der Transistorparameter	233
7.1.8 Der Gleichstromarbeitspunkt im Kennlinienfeld, die Arbeitsgerade	234
7.1.8.1 Beachtung der Grenzdaten	234
7.1.8.2 Die Gleichstromarbeitsgerade (Widerstandsgerade)	235
7.1.8.3 Emitterschaltung mit instabilem Arbeitspunkt	236
7.1.8.4 Emitterschaltung mit stabilem Arbeitspunkt .	240
7.1.8.5 Dimensionierung des Basisspannungsteilers .	243
7.1.9 Kenngrößen des Transistors	244
7.1.9.1 Gleichstromkenngrößen	244
7.1.9.2 Kleinsignalkenngrößen	247
7.1.9.3 Frequenzkenngrößen	252
7.1.9.4 Rauschkenngroßen	256
7.1.9.5 Erwärmungskenngrößen	261
7.1.9.6 Transistor-Grenzdaten	264
7.1.10 Transistor-Ersatzschaltbilder	266
7.1.10.1 Transistorersatzschaltbild für tiefe Frequenzen	267
7.1.10.2 Vollständiges Ersatzschaltbild für tiefe und hohe Frequenzen	268
7.1.11 Transistor-Vierpol- oder Zweitorparameter	269
7.1.11.1 Die z-Parameter	270

7.1.11.2	Die y-Parameter	271
7.1.11.3	Die h-Parameter	272
7.1.12	Der Transistor im inversen Betrieb	277
7.1.13	Der Photo-Transistor	278
7.2	Der Feldeffekt-Transistor (FET, Unipolartransistor)	280
7.2.1	Arten von Feldeffekttransistoren, Übersicht	281
7.2.2	Der Sperrschiicht-FET (PN- und MESFET)	283
7.2.2.1	Der N-Kanal-Sperrschiicht-FET, Aufbau und Wirkungsweise	283
7.2.2.2	Kennlinien und Kenngrößen des Sperrschiicht-FET	287
7.2.2.3	Der P-Kanal-Sperrschiicht-FET	294
7.2.2.4	Ersatzschaltbilder des Sperrschiicht-FET	294
7.2.2.5	Geometrie des Sperrschiicht-FET	296
7.2.3	Feldeffekttransistor mit isoliertem Gate (IGFET, MIS-FET oder MOSFET)	297
7.2.3.1	Wirkungsweise und schematischer Aufbau des MOSFET	298
7.2.3.2	Kennlinien und Kenngrößen des MOSFET, Vergleich mit dem Sperrschiicht-FET	299
7.2.3.3	MOSFET mit 2 Gates (MOSFET-Tetrode, Dual-Gate-MOSFET)	303
7.2.4	FET-Grundschaltungen	303
7.2.4.1	Sourceschaltung	304
7.2.4.2	Drainschaltung (Sourcefolger)	305
7.2.4.3	Gateschaltung	305
7.2.5	Wahl und Einstellung des Arbeitspunktes	306
7.2.5.1	Allgemeines	306
7.2.5.2	PN-FET	307
7.2.5.3	Selbstsperrender MOSFET	309
7.2.5.4	Selbstleitender MOSFET	309
7.2.6	Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit FETs	309
7.2.7	Anwendungsspektrum der verschiedenen FET-Typen . .	310

8 Thyristoren	311
8.1 Die Thyristordiode (Vierschichtdiode)	312
8.2 Die Thyristortriode (Thyristor im herkömmlichen Sinn)	313
8.2.1 Schematischer Aufbau und Kennlinien	313
8.2.2 Der Thyristor in Sperrichtung.	313
8.2.3 Der Thyristor in Durchlaßrichtung	314
8.2.4 Arten der Zündung eines Thyristors	317
8.2.5 Zünddiagramm	318
8.2.6 Zündzeit t_{gt}	319
8.2.7 Freiwerdezeit t_q	319
8.2.8 Kritische Spannungssteilheit	320
8.2.9 Kritische Stromsteilheit	320
8.3 Der GTO-Thyristor	320
8.3.1 Thyristoren mit Feldeffektsteuerung	321
8.3.2 Feldeffektthyristor mit isoliertem Gate	321
8.3.3 Feldgesteuerter Thyristor (FCTh)	322
8.4 Die Thyristortetrode	322
8.5 Bidirektionale (Zweiweg-) Thyristoren	323
8.5.1 Bidirektionale Thyristordiode	323
8.5.2 Bidirektionale Thyristortriode (Triac), Zweiwegthyristor	324
8.6 Triggerdiode (Diac)	325
9 Einführung in die Halbleitertechnologie	327
9.1 Herstellung von Einkristallen	329
9.1.1 Das Drehziehverfahren	329
9.1.2 Zonenziehverfahren	330
9.1.3 Die Legierungstechnik	331
9.1.4 Die Mesa-Technik und der Mesa-Transistor	333
9.1.5 Die Planar-Technik, der Planar-Transistor	334
9.1.6 PNIP- und NPIN-Transistoren	337
9.1.7 Die Epitaxie, Epitaxial-Transistoren	337

9.1.8	Der Annular-Transistor	339
9.1.9	Ionen-Implantation	340
9.1.10	Kontaktierungstechnik	341
9.1.11	Realisierung einzelner Grundkomponenten	342
9.1.12	Prozeßarchitekturen	343
9.1.12.1	Bipolar-Technik	344
9.1.12.2	MOS-Technik (PMOS, NMOS, CMOS)	344
9.1.12.3	BICMOS-Technik	346
Literaturverzeichnis		349
Index		357