

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *V*

Vorwort des Übersetzers *VII*

Biografien *XVII*

Einführung *XIX*

Teil I Halbleiterphysik *1*

- 1 Physik und Eigenschaften von Halbleitern – ein Überblick** *3*
- 1.1 Einleitung *3*
- 1.2 Kristallstrukturen *3*
- 1.2.1 Primitive Einheitszellen und Kristallebenen *3*
- 1.2.2 Das reziproke Gitter *6*
- 1.3 Energiebänder und Bandlücken *7*
- 1.4 Ladungsträgerkonzentrationen im thermischen Gleichgewicht *11*
- 1.4.1 Ladungsträgerkonzentration und Fermi-Niveau *12*
- 1.4.2 Donatoren und Akzeptoren *15*
- 1.4.3 Berechnung des Fermi-Niveaus *16*
- 1.5 Ladungsträgertransportphänomene *21*
- 1.5.1 Drift und Beweglichkeit *21*
- 1.5.2 Spezifischer Widerstand und Hall-Effekt *23*
- 1.5.3 Transport bei hohen elektrischen Feldern *28*
- 1.5.4 Rekombination, Generation und Ladungsträgerlebensdauer *32*
- 1.5.5 Diffusion *37*
- 1.5.6 Thermionische Emission *39*
- 1.5.7 Tunnelprozesse *39*
- 1.5.8 Raumladungseffekte *40*
- 1.6 Phononen, optische und thermische Eigenschaften *41*
- 1.6.1 Phononenspektren *41*
- 1.6.2 Optische Eigenschaften *43*
- 1.6.3 Thermische Eigenschaften *45*
- 1.7 Heteroübergänge und Nanostrukturen *47*
- 1.8 Halbleitergrundgleichungen und Anwendungsbeispiele *54*
- 1.8.1 Halbleitergrundgleichungen *54*
- 1.8.2 Anwendungsbeispiele *58*

Teil II Grundstrukturen der Halbleiter-Bauelemente *71*

- 2 *p-n*-Übergänge** *73*
- 2.1 Einleitung *73*
- 2.2 Raumladungszonen *73*
- 2.2.1 Abrupter *p-n*-Übergang *73*
- 2.2.2 Linearer *p-n*-Übergang *80*

2.2.3	Beliebige Dotierprofile	82
2.3	Strom-Spannungs-Kennlinien	83
2.3.1	Die Shockley-Gleichung	83
2.3.2	Generations- und Rekombinationsprozesse	89
2.3.3	Starke Injektion	91
2.3.4	Diffusionskapazität	93
2.4	p - n -Übergänge im Durchbruchsbereich	95
2.4.1	Thermische Instabilität	95
2.4.2	Tunneleffekt	96
2.4.3	Lawinenmultiplikation	97
2.5	Transientes Verhalten und Rauschen	107
2.5.1	Transientes Verhalten	107
2.5.2	Rauschen	109
2.6	Der p - n -Übergang als Bauelement	110
2.6.1	Gleichrichter	111
2.6.2	Zener-Diode	112
2.6.3	Varistor	112
2.6.4	Varaktor	112
2.6.5	Dioden mit kurzer Erholungszeit	114
2.6.6	Speicherschaltodiode	114
2.6.7	p - i - n -Diode	115
2.7	Heteroübergänge	117
2.7.1	Anisotyper Heteroübergang	117
2.7.2	Isotyper Heteroübergang	120
3	Metall-Halbleiter-Kontakte	127
3.1	Einleitung	127
3.2	Entstehung der Schottky-Barriere	127
3.2.1	Ideale Bedingungen	128
3.2.2	Raumladungszonen	129
3.2.3	Grenzflächenzustände	131
3.2.4	Reduktion der Barrierenhöhe durch Spiegelladungen	137
3.2.5	Beeinflussung der Barrierenhöhe	142
3.3	Transportprozesse	144
3.3.1	Thermionische Emissionstheorie	145
3.3.2	Diffusionstheorie	149
3.3.3	Thermionische Emissions-Diffusions-Theorie	150
3.3.4	Tunnelströme	153
3.3.5	Injektion vom Minoritätsladungsträgern	157
3.3.6	MIS-Tunneldioden	160
3.4	Bestimmung der Barrierenhöhe	162
3.4.1	Strom-Spannungs-Messung	162
3.4.2	Messung der Aktivierungsenergie	165
3.4.3	Kapazitäts-Spannungs-Messungen	166
3.4.4	Photoelektrische Messung	167
3.4.5	Gemessene Barrierenhöhen	169
3.5	Diodenstrukturen	171
3.6	Ohmsche Kontakte	177
4	Metall-Isolator-Halbleiter-Kondensatoren	187
4.1	Einleitung	187
4.2	Idealer MIS-Kondensator	187
4.2.1	Oberflächenraumladungszone	189

4.2.2	Ideale MIS-Kapazitätskurven	193
4.3	Der Silizium-MOS-Kondensator	200
4.3.1	Grenzflächenzustände	203
4.3.2	Bestimmung der Dichte von Grenzflächenzuständen	205
4.3.3	Oxidladungen und Differenz der Austrittsarbeit	212
4.3.4	Dicke der Akkumulations- und Inversionsschicht	217
4.4	Ladungsträgertransport in MOS-Kondensatoren	224
4.4.1	Ladungsträgertransport	224
4.4.2	Nichtgleichgewicht und Lawineneffekte	230
4.4.3	Dielektrischer Zusammenbruch	233
	Teil III Transistoren	243
5	Bipolartransistoren	245
5.1	Einleitung	245
5.2	Statische Eigenschaften	246
5.2.1	Grundlegende Beziehungen zwischen Strom und Spannung	246
5.2.2	Stromverstärkung	251
5.2.3	Ausgangskennlinien	256
5.2.4	Nicht ideale Effekte	259
5.3	Kompaktmodelle von Bipolartransistoren	263
5.3.1	Das Ebers-Moll-Modell	264
5.3.2	Das Gummel-Poon-Modell	266
5.3.3	Die Modelle MEXTRAM und VBIC	268
5.3.4	Das HICUM und andere Modelle	271
5.4	Mikrowelleneigenschaften	273
5.4.1	Grenzfrequenz	273
5.4.2	Kleinsignalcharakterisierung	277
5.4.3	Schaltverhalten	281
5.4.4	Geometrie und Leistung der Bauelemente	283
5.5	Leistungstransistoren und Logikschaltungen	285
5.5.1	Leistungstransistoren	285
5.5.2	Einfache Logikschaltungen mit Bipolartransistoren	289
5.6	Heterobipolartransistoren	290
5.6.1	Doppelheterobipolartransistor	293
5.6.2	Bipolartransistor mit abgestufter Bandlücke	294
5.6.3	Hot-Electron-Transistor	295
5.7	Selbsterhitzungseffekte	296
6	MOSFETs	305
6.1	Einleitung	305
6.1.1	Der MOSFET-Stammbaum	306
6.1.2	Kategorisierung von Feldeffekttransistoren	308
6.2	Grundlegende Bauteilcharakteristiken	309
6.2.1	Die Inversionsladung im Kanal	311
6.2.2	Strom-Spannungs-Kennlinien	315
6.2.3	Schwellspannung	326
6.2.4	Der Unterschwellenbereich	327
6.2.5	Beweglichkeitsverhalten	331
6.2.6	Temperaturabhängigkeit des MOSFET	333
6.3	Bauelemente mit inhomogener Dotierung und vergrabenen Kanal	335
6.3.1	Das Hoch-Niedrig-Dotierprofil	337

6.3.2	Das Niedrig-Hoch-Dotierprofil	342
6.3.3	Bauelemente mit vergrabem Kanal	343
6.4	Bauelementeskalierung und Kurzkanaleffekte	346
6.4.1	Skalierung von Bauelementen	348
6.4.2	Ladungsbeitrag von Source und Drain	351
6.4.3	Kanallängenmodulation	353
6.4.4	Draininduzierte Barrierenabsenkung (DIBL)	353
6.4.5	Charakteristische Fluktuationen	356
6.4.6	Lawinendurchbruch und Oxidzuverlässigkeit	358
6.5	MOSFET-Strukturen	363
6.5.1	Dotierprofil des Ladungsträgerkanals	363
6.5.2	Gatestapel	363
6.5.3	Source-Drain-Design	365
6.5.4	SOI und TFT	368
6.5.5	Dreidimensionale Strukturen	372
6.5.6	Leistungs-MOSFETs	374
6.6	Schaltungsanwendungen	375
6.6.1	Kompaktmodelle von MOSFETs	375
6.6.2	Ersatzschaltkreise und Mikrowelleneigenschaften	376
6.6.3	Grundlegende Schaltungsblöcke	378
6.7	NCFET und TFET	380
6.7.1	Feldeffekttransistoren mit negativer Kapazität	380
6.7.2	Tunnelfeldeffekttransistoren	382
6.8	Der Einzelelektronentransistor	385
7	Nicht flüchtige Speicher	405
7.1	Einleitung	405
7.2	Das Konzept des Floating-Gate	406
7.3	Speicherstrukturen	411
7.3.1	Der Floating-Gate-Speicher	411
7.3.2	Der Floating-Trap- oder Charge-Trapping-Speicher	414
7.4	Kompaktmodelle von Floating-Gate-Speicherzellen	417
7.4.1	Das klassische kapazitive Modell	417
7.4.2	Das Ladungsbilanzmodell	419
7.5	Mehrstufige Zellen und dreidimensionale Strukturen	420
7.5.1	Multilevelzellen	420
7.5.2	Dreidimensionale (3-D) Strukturen	423
7.6	Herausforderungen bei der Skalierung	432
7.7	Alternative Speicherstrukturen	437
7.7.1	FeRAM	438
7.7.2	PCRAM	439
7.7.3	ReRAM	441
7.7.4	Magnetisches Spin-Transfer-Torque-RAM (STT-MRAM)	443
8	JFETs, MESFETs und MODFETs	455
8.1	Einleitung	455
8.2	JFET und MESFET	456
8.2.1	I - V -Kennlinien	457
8.2.2	Beliebige Dotierprofile und Bauelemente im Anreicherungsmodus	469
8.2.3	Mikrowelleneigenschaften	472
8.2.4	MESFET-Strukturen	477
8.3	MODFET	479

8.3.1	Grundlegende HEMT-Strukturen	481
8.3.2	<i>I-V</i> -Kennlinien	482
8.3.3	Ersatzschaltkreise und Mikrowellenverhalten	485
8.3.4	Moderne Bauelementestrukturen	486
8.3.5	GaN-HEMTs	488
	Teil IV Bauelemente mit negativem Widerstand und Leistungsbauelemente	505
9	Tunnelbauelemente	507
9.1	Einleitung	507
9.2	Tunneldioden	508
9.2.1	Tunnelwahrscheinlichkeit und Tunnelstrom	511
9.2.2	Strom-Spannungs-Kennlinien	517
9.2.3	Die Tunneldiode als Oszillator	519
9.3	Verwandte Tunnelbauelemente	522
9.3.1	Die Rückwärtsdiode	522
9.3.2	MIS-Tunnelstrukturen	524
9.3.3	MIS-Schaltdiode	531
9.3.4	MIM-Tunneldiode	534
9.3.5	Der Hot-Electron-Transistor	536
9.4	Resonante Tunneldioden	540
10	IMPATT-Dioden, TE- und RST-Devices	553
10.1	Einleitung	553
10.2	IMPATT-Dioden	554
10.2.1	Elektrische Eigenschaften	554
10.2.2	Leistung, Effizienz und Rauschen	565
10.2.3	Eigenschaften von IMPATT-Dioden	574
10.2.4	BARITT- und TUNNETT-Dioden	576
10.3	Transferred Electron Devices	582
10.3.1	Transferred-Electron-Effekt	583
10.3.2	Eigenschaften und Funktionen von Gunn-Dioden	592
10.4	Real-Space-Transfer Devices	602
10.4.1	Real-Space-Transfer (RST)-Diode	602
10.4.2	Real-Space-Transfer-Transistor	604
11	Thyristoren und Leistungsbauelemente	615
11.1	Einleitung	615
11.2	Thyristorkennlinien	616
11.2.1	Blockierverhalten in Rückwärtsrichtung	618
11.2.2	Blockierverhalten in Vorwärtsrichtung	621
11.2.3	Einschaltmechanismen	624
11.2.4	Leitfähigkeit in Vorwärtsrichtung	627
11.2.5	Statische <i>I-V</i> -Kurven	632
11.2.6	Einschalt- und Ausschaltzeiten	633
11.3	Thyristorvarianten	636
11.3.1	Thyristor mit Gateabschaltung	636
11.3.2	Diac und Triac	639
11.4	Andere Leistungsbauelemente	642
11.4.1	Bipolarer Transistor mit isoliertem Gate	642
11.4.2	Elektrostatischer Influenztransistor	647
11.4.3	Statischer Influenzthyristor	651

Teil V Photonische Bauelemente und Sensoren 661

12	LEDs und Laser	663
12.1	Einleitung	663
12.2	Strahlende Übergänge	664
12.2.1	Emissionsspektren	665
12.2.2	Methoden der Anregung	667
12.3	Lichtemittierende Dioden (LEDs)	668
12.3.1	LED-Strukturen	670
12.3.2	Materialauswahl	671
12.3.3	Definitionen der Wirkungsgrade	674
12.3.4	Weißlicht-LEDs	679
12.3.5	Frequenzgang	681
12.4	Laserphysik	682
12.4.1	Stimulierte Emission und Besetzungsinversion	683
12.4.2	Optischer Resonator und optische Verstärkung	686
12.4.3	Wellenleiter	687
12.5	Laserbetrieb	691
12.5.1	Lasermaterialien und Laserstrukturen	691
12.5.2	Schwellstrom	697
12.5.3	Emissionsspektren und Wirkungsgrade	700
12.5.4	Fernfeldmuster	701
12.5.5	Einschaltverzögerung und Modulationsverhalten	704
12.5.6	Wellenlängenabstimmung	706
12.5.7	Alterungsprozesse in Halbleiterlasern	707
12.6	Spezielle Laser	708
12.6.1	Quantentopf-, Quantendraht- und Quantenpunktlaser	708
12.6.2	Oberflächenemittierende Laser mit vertikalem Resonator (VCSEL)	710
12.6.3	Quantenkaskadenlaser	711
12.6.4	Optischer Halbleiterverstärker	712
13	Photodetektoren und Solarzellen	721
13.1	Einleitung	721
13.2	Photoleiter	725
13.3	Photodioden	728
13.3.1	Allgemeine Betrachtungen	728
13.3.2	<i>p-i-n</i> - und <i>p-n</i> -Photodioden	730
13.3.3	Heterostrukturphotodioden	735
13.3.4	Metall-Halbleiter-Photodioden	735
13.4	Lawinenphotodioden	738
13.4.1	Lawinenverstärkung	738
13.4.2	Lawinenmultiplikationsrauschen	740
13.4.3	Signal-Rausch-Verhältnis	742
13.4.4	Designaspekte von Lawinenphotodioden	743
13.5	Phototransistoren	748
13.6	Charge-Coupled Devices (CCDs)	751
13.6.1	CCD-Bildsensor	751
13.6.2	CCD-Schieberegister	756
13.6.3	CMOS-Bildsensoren	762
13.7	Metall-Halbleiter-Metall-Photodetektoren	764
13.8	Quantum-Well-Infrarotphotodetektoren (QWIPs)	767
13.9	Solarzellen	771

13.9.1	Einleitung	771
13.9.2	Sonneneinstrahlung und idealer Umwandlungswirkungsgrad	773
13.9.3	Photostrom und spektrale Empfindlichkeit	778
13.9.4	Solarzellenkonfigurationen	782
14	Sensoren	799
14.1	Einleitung	799
14.2	Thermische Sensoren	801
14.2.1	Thermistor	801
14.2.2	Temperaturmessdiode	802
14.2.3	Temperaturmesstransistor	803
14.2.4	Thermosensoren aus alternativen Materialien	803
14.2.5	Äquivalente Rauschleistung und Gütezahl thermischer Sensoren	805
14.3	Mechanische Sensoren	807
14.3.1	Dehnungsmessstreifen	807
14.3.2	Interdigitalwandler	811
14.3.3	Kapazitiver Sensor	815
14.4	Magnetische Sensoren	816
14.4.1	Hall-Platte	817
14.4.2	Magnetowiderstand	820
14.4.3	Magnetdiode	821
14.4.4	Magnettransistor	822
14.4.5	Magnetfeldempfindlicher Feldeffekttransistor	823
14.4.6	Magnetfeldsensor mit Ladungsträgerdomänen	825
14.5	Chemische Sensoren	825
14.5.1	Metalloxidsensoren	826
14.5.2	Ionenempfindlicher Feldeffekttransistor	827
14.5.3	Katalytische Metallsensoren	829
14.6	Biosensoren	830
	Anhang A Liste der Symbole	839
	Anhang B Internationales Einheitensystem	847
	Anhang C Einheitenpräfixe	849
	Anhang D Das griechische Alphabet	851
	Anhang E Physikalische Konstanten	853
	Anhang F Eigenschaften der wichtigsten Halbleiter	855
	Anhang G Das Bloch-Theorem und die Energiebänder im reziproken Gitter	857
	Anhang H Eigenschaften von Si und GaAs	859

Anhang I Die Boltzmann-Transportgleichung und das hydrodynamische Modell 861

Anhang J Eigenschaften von SiO_2 und Si_3N_4 867

Anhang K Kompaktmodelle von Bipolartransistoren 869

Anhang L Die Entdeckung des Floating-Gate-Speicher-Effekts 877

Stichwortverzeichnis 879