

# 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        |
| <b>3</b> | <b>Metall-Halbleiter-Kontakte</b>                 | <b>127</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Metall-Isolator-Halbleiter-Kondensatoren</b>   | <b>187</b> |
| 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 vergrabenen 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    | Feldefeffekttransistoren mit negativer Kapazität              | 380        |
| 6.7.2    | Tunnelfeldefeffekttransistoren                                | 382        |
| 6.8      | Der Einzelelektronentransistor                                | 385        |
| <b>7</b> | <b>Nicht flüchtige Speicher</b>                               | <b>405</b> |
| 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        |
| <b>8</b> | <b>JFETs, MESFETs und MODFETs</b>                             | <b>455</b> |
| 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-V*-Kennlinien 482
- 8.3.3 Ersatzschaltkreise und Mikrowellenverhalten 485
- 8.3.4 Moderne Bauelementstrukturen 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-V*-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 *p-i-n*- und *p-n*-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  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Si}_3\text{N}_4$**  867

**Anhang K Kompaktmodelle von Bipolartransistoren** 869

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

**Stichwortverzeichnis** 879