

# Inhaltsverzeichnis

*Kursiv gekennzeichnete Abschnitte* können beim ersten Durcharbeiten überschlagen werden.

<b>1 Grundlagen der Mikrophysik .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Aussagen der Quantenmechanik .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1 Photonen als Teilchen .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2 Emission und Absorption von Licht.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.3 Elektronen als Wellen .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.4 Heisenbergsche Unschärferelation.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.5 Pauli-Prinzip.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Das Bohrsche Atommodell .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Freie Elektronen .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.1 Wie entstehen freie Elektronen? .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.2 Zur Energieeinheit Elektronenvolt .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.3 Zusammenhang Energie – Impuls/Wellenzahl.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Aufbau der Atome und Periodensystem .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Kristallstrukturen und Geometrie .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5.1 Bravais-Gitter und Elementarzellen .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5.2 Atomabstände und Packungsdichten.....</b>	<b>20</b>
<b>1.5.3 Kristallrichtungen und Millersche Indizes .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5.4 Massen und Dichten von Halbleiterstoffen.....</b>	<b>23</b>
<b>1.6 Chemische Bindung .....</b>	<b>25</b>
<b>1.6.1 Übersicht über die Bindungsarten .....</b>	<b>25</b>
<b>1.6.2 Verbreiterung der Energieniveaus zu Bändern .....</b>	<b>29</b>
<b>1.7 Halbleiter .....</b>	<b>31</b>
<b>1.7.1 Orientierung an der elektrischen Leitfähigkeit .....</b>	<b>31</b>
<b>1.7.2 Bindungen und Bänder in Halbleitern.....</b>	<b>32</b>
<b>1.7.3 Halbleitermaterialien .....</b>	<b>33</b>
<b>1.8 Einige Ergänzungen .....</b>	<b>35</b>
<b>Zusammenfassung zu Kapitel 1 .....</b>	<b>37</b>
<b>Aufgaben zu Kapitel 1 .....</b>	<b>39</b>

<b>2 Bänderstruktur und Ladungstransport .....</b>	<b>45</b>
2.1 Bändermodell .....	46
2.1.1 Eigenschaften des Leitungs- und Valenzbandes .....	46
2.1.2 Erzeugung „freier“ Elektronen und Löcher .....	50
2.2 Trägerdichte im Leitungs- und Valenzband .....	52
2.2.1 Zustandsdichte der Elektronen und Löcher .....	52
2.2.2 Fermi-Verteilung .....	55
2.2.3 Teilchenkonzentration in den Bändern .....	57
2.2.4 Bestimmung der Fermi-Energie.....	62
2.3 Halbleiter mit Störstellen .....	63
2.3.1 Donatoren und Akzeptoren .....	63
2.3.2 Bindungsenergie von Ladungsträgern an Störstellen .....	64
2.3.3 Ladungsträgerkonzentration bei Anwesenheit von Störstellen .....	66
2.4 Die Bewegung von Ladungsträgern .....	72
2.4.1 Drift.....	72
2.4.2 Anwendung: Widerstandsthermometer .....	77
2.4.3 Hall-Effekt .....	79
2.4.4 Diffusion .....	82
2.4.5 Einstein-Beziehung .....	84
2.4.6 Generation und Rekombination .....	85
2.4.7 Kontinuitätsgleichungen .....	89
2.4.8 Halbleiter im stationären Nichtgleichgewicht .....	90
2.5 Temperaturabhängigkeit von Energielücke und effektiver Masse.....	92
2.6 Halbleiter bei hohen Ladungsträgerdichten .....	93
2.6.1 Trägerkonzentration im Leitungsband .....	93
2.6.2 Gapschrumpfung .....	96
2.7 Einige Ergänzungen .....	101
2.7.1 Bandstruktur von Halbleitern .....	101
2.7.2 Ein- und zweidimensionale Halbleiter .....	104
2.7.3 Der Teilchenzoo der Halbleiterphysik .....	105
Zusammenfassung zu Kapitel 2 .....	106
Aufgaben zu Kapitel 2 .....	110
<b>3 pn-Übergänge .....</b>	<b>121</b>
3.1 Modell einer Halbleiterdiode .....	121
3.2 pn-Übergang ohne äußere Spannung .....	123
3.2.1 Qualitative Betrachtungen .....	123
3.2.2 Berechnung des Potentialverlaufs.....	125
3.2.3 Breite der Sperrsicht.....	127
3.2.4 Diffusionsspannung .....	127
3.3 pn-Übergang mit äußerer Spannung .....	131
3.3.1 Modell .....	131
3.3.2 Breite der Sperrsicht.....	132
3.3.3 Berechnung der Ströme .....	133

3.3.4 Strom-Spannungs-Kennlinie .....	137
3.3.5 Lawinen- und Zener-Effekt .....	140
3.4 Kapazität eines pn-Übergangs .....	142
3.4.1 Sperrsichtkapazität.....	142
3.4.2 Diffusionskapazität.....	145
3.5 Differentieller Widerstand und Leitwert .....	146
3.6 Esaki- oder Tunneldiode .....	147
3.7 Einige Ergänzungen zu pn-Übergängen .....	149
Zusammenfassung zu Kapitel 3 .....	150
Aufgaben zu Kapitel 3 .....	152
<b>4 Optoelektronische Bauelemente .....</b>	<b>161</b>
4.1 Lumineszenz-Bauelemente .....	161
4.1.1 Lichtemission an pn-Übergängen .....	161
4.1.2 Lumineszenzmaterialien.....	162
4.1.3 Spektralabhängigkeit der Lumineszenz bei Band-Band-Übergängen .....	167
4.1.4 Aufbau und Technologie von Lumineszenzdioden.....	169
4.1.5 Entwicklungstendenzen bei Lumineszenzdioden.....	175
4.2 Einiges über Halbleiterlaser .....	176
4.2.1 Übersicht .....	176
4.2.2 Grundsätzliches zur Funktionsweise .....	177
4.2.3 Optischer Einschluss (Confinement).....	178
4.2.4 Besetzungsinversion und Gewinn .....	180
4.2.5 Bilanzgleichungen für Elektronen und Photonen.....	182
4.3 Absorptions-Bauelemente .....	186
4.3.1 Physikalische Grundlagen der Absorption .....	186
4.3.2 Photoleiter .....	191
4.3.3 Photodioden und weitere Photodetektoren.....	192
4.3.4 Materialien für optische Empfänger .....	197
4.3.5 Entwicklungstendenzen bei Photodetektoren.....	199
4.4 Solarzellen – Photovoltaik .....	199
Zusammenfassung zu Kapitel 4 .....	204
Aufgaben zu Kapitel 4 .....	206
<b>5 Bipolartransistoren und Thyristoren .....</b>	<b>211</b>
5.1 Einfaches Transistormodell .....	211
5.2 Abschätzung der Verstärkungswirkung .....	215
5.2.1 Definition verschiedener Verstärkungsfaktoren .....	215
5.2.2 Diffusionsstrom in der Basis .....	217
5.2.3 Größenordnung der Stromverstärkung.....	220
5.3 Ebers-Moll-Gleichungen .....	222
5.3.1 Relativ einfache Herleitung .....	222
5.3.2 Zusammenfassung der Herleitung.....	226

5.3.3 Allgemeine Form der Ebers-Moll-Gleichungen .....	228
5.3.4 Verschiedene Näherungen für die Ebers-Moll-Gleichungen.....	229
5.4 <i>Herleitung der Ebers-Moll-Gleichungen aus den Diffusionsgleichungen</i> .....	232
5.4.1 <i>Ansätze für die Diffusionsströme</i> .....	232
5.4.2 <i>Lösungen der Diffusionsgleichungen</i> .....	233
5.5 Kennlinienfelder .....	235
5.5.1 Kennlinienfelder in Basisschaltung .....	235
5.5.2 Kennlinienfelder in Emitterschaltung.....	237
5.5.3 Early-Effekt .....	241
5.6 <i>Ergänzungen zu Bipolartransistoren. Tendenzen</i> .....	242
5.7 Thyristoren und Triacs .....	242
5.7.1 Modell eines Thyristors. Thyristorkennlinie .....	242
5.7.2 Gleichungen für den Vorwärtsstrom.....	246
5.7.3 Triacs .....	248
Zusammenfassung zu Kapitel 5 .....	249
Aufgaben zu Kapitel 5 .....	250
 <b>6 Metall-Halbleiter-Kontakte und Feldeffekt-Transistoren .....</b>	<b>257</b>
6.1 Metall-Halbleiter-Kontakte .....	257
6.1.1 Schottky-Dioden .....	257
6.1.2 Ohmsche Kontakte.....	262
6.2 Einführung in Feldeffekttransistoren .....	263
6.2.1 Die verschiedenen Typen von Feldeffekttransistoren .....	263
6.2.2 Einfaches Modell .....	266
6.3 Detailliertere Beschreibung des MOSFET .....	270
6.3.1 Ladungszustände eines MOS-Kondensators .....	270
6.3.2 Quantitative Betrachtung der Inversionsbedingung .....	273
6.3.3 Ladungen, Kapazität und Sperrsichttbreite am MOS-Kondensator .....	275
6.3.4 Verfeinerte Herleitung der Kennliniengleichung.....	279
6.3.5 <i>MOS-Kondensator mit Berücksichtigung         der beweglichen Ladungsträger</i> .....	283
6.4 MOSFETs in der digitalen Schaltungstechnik .....	287
6.4.1 Binäre Schaltungen .....	287
6.4.2 MOSFET als Inverter.....	288
6.4.3 MOSFET als Lastwiderstand .....	289
6.4.4 MOSFET als Logikgatter.....	290
6.4.5 CMOS-Inverter und CMOS-Logikgatter.....	291
6.4.6 Bipolartransistoren in integrierten Schaltungen .....	293
6.5 Speicherschaltkreise .....	294
6.5.1 RAM-Speicher .....	294
6.5.2 ROMs.....	294
6.5.3 EPROMs und EEPROMs .....	294

6.6 CCD-Bauelemente .....	296
6.7 Sperrschiicht-Feldeffekt-Transistoren .....	297
6.8 Zur Zukunft der MOS-Technologie .....	299
Zusammenfassung zu Kapitel 6 .....	301
Aufgaben zu Kapitel 6 .....	303
<b>7 Halbleitertechnologie .....</b>	<b>307</b>
7.1 Vom Sand zum Chip: Fertigungsschritte im Überblick .....	307
7.2 Herstellung von Silizium-Einkristallen .....	308
7.2.1 Rohsilizium .....	308
7.2.2 Trichlorsilan und Polysilizium .....	308
7.2.3 Herstellung von Einkristallen .....	311
7.3 Herstellung von Einkristallen anderer Halbleiter .....	313
7.3.1 Germanium .....	313
7.3.2 Besonderheiten bei der Herstellung von Verbindungshalbleitern..	313
7.4 Herstellung und Bearbeitung der Halbleiterscheiben .....	314
7.4.1 Übersicht .....	314
7.4.2 Oxidation .....	317
7.4.3 Dotieren .....	319
7.4.4 Epitaxieverfahren .....	322
7.4.5 Metallisierung durch Aufdampfen und Sputtern.....	325
7.4.6 Ätzen .....	327
7.4.7 Reinigen.....	329
7.5 Lithographie .....	329
7.6 Reinraumtechnik .....	333
7.7 Ein Beispiel für die Technik integrierter Schaltungen .....	337
7.8 Tendenzen der Halbleitertechnologie .....	340
Zusammenfassung zu Kapitel 7 .....	342
Aufgaben zu Kapitel 7 .....	345
<b>Anhang: Daten- und Formelsammlung .....</b>	<b>349</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>373</b>
<b>Verzeichnis der Internet-Dateien .....</b>	<b>377</b>
<b>Verwendete Formelzeichen.....</b>	<b>383</b>
<b>Index .....</b>	<b>391</b>
<b>Personenindex .....</b>	<b>407</b>