

Frank Thuselt

Physik der Halbleiterbauelemente

Einführendes Lehrbuch
für Ingenieure und Physiker

Mit 181 Abbildungen

 Springer

Inhaltsverzeichnis

Kursiv gekennzeichnete Abschnitte können beim ersten Durcharbeiten überschlagen werden.

- 1 Grundlagen der Mikrophysik 1**
 - 1.1 Aussagen der Quantenmechanik 1
 - 1.1.1 Photonen als Teilchen..... 2
 - 1.1.2 Emission und Absorption von Licht..... 4
 - 1.1.3 Elektronen als Wellen..... 5
 - 1.1.4 Heisenbergsche Unschärferelation 6
 - 1.1.5 Pauli-Prinzip 7
 - 1.2 Das Bohrsche Atommodell 7
 - 1.3 Freie Elektronen 12
 - 1.3.1 Wie entstehen freie Elektronen? 12
 - 1.3.2 Zur Energieeinheit Elektronenvolt 13
 - 1.3.3 Zusammenhang Energie – Impuls/Wellenzahl..... 14
 - 1.4 Aufbau der Atome und Periodensystem 15
 - 1.5 Kristallstrukturen und Geometrie 18
 - 1.5.1 Bravais-Gitter und Elementarzellen 18
 - 1.5.2 Atomabstände und Packungsdichten 20
 - 1.5.3 Kristallrichtungen und Millersche Indizes 22
 - 1.5.4 Massen und Dichten von Halbleitersubstanzen..... 24
 - 1.6 Chemische Bindung 26
 - 1.6.1 Übersicht über die Bindungsarten 26
 - 1.6.2 Verbreiterung der Energieniveaus zu Bändern..... 30
 - 1.7 Halbleiter 32
 - 1.7.1 Orientierung an der elektrischen Leitfähigkeit 32
 - 1.7.2 Bindungen und Bänder in Halbleitern 33
 - 1.7.3 Halbleitermaterialien 35
 - 1.8 Einige Ergänzungen 36*
 - Zusammenfassung zu Kapitel 1 38
 - Aufgaben zu Kapitel 1 41

2 Bänderstruktur und Ladungstransport	47
2.1 Bändermodell	48
2.1.1 Eigenschaften des Leitungs- und Valenzbandes	48
2.1.2 Erzeugung „freier“ Elektronen und Löcher	52
2.2 Trägerdichte im Leitungs- und Valenzband	54
2.2.1 Zustandsdichte der Elektronen und Löcher	54
2.2.2 Fermi-Verteilung	56
2.2.3 Teilchenkonzentration in den Bändern	59
2.2.4 Bestimmung der Fermi-Energie	63
2.3 Halbleiter mit Störstellen	64
2.3.1 Donatoren und Akzeptoren	64
2.3.2 Bindungsenergie von Ladungsträgern an Störstellen	65
2.3.3 Ladungsträgerkonzentration bei Anwesenheit von Störstellen	68
2.4 Die Bewegung von Ladungsträgern	73
2.4.1 Drift	74
2.4.2 Anwendung: Widerstandsthermometer	79
2.4.3 Hall-Effekt	80
2.4.4 Diffusion	84
2.4.5 Einstein-Beziehung	86
2.4.6 Generation und Rekombination	88
2.4.7 Kontinuitätsgleichungen	91
2.4.8 Halbleiter im stationären Nichtgleichgewicht	92
2.5 Temperaturabhängigkeit von Bandgap und effektiver Masse	94
2.6 Halbleiter bei hohen Ladungsträgerdichten	95
2.6.1 Trägerkonzentration im Leitungsband	95
2.6.2 Gapschrumpfung	98
2.7 Einige Ergänzungen	102
2.7.1 Bandstruktur von Halbleitern	102
2.7.2 Ein- und zweidimensionale Halbleiter	106
2.7.3 Der Teilchenzoo der Halbleiterphysik	107
Zusammenfassung zu Kapitel 2	109
Aufgaben zu Kapitel 2	112
 3 pn-Übergänge	 123
3.1 Modell einer Halbleiterdiode	123
3.2 pn-Übergang ohne äußere Spannung	125
3.2.1 Qualitative Betrachtungen	125
3.2.2 Berechnung des Potentialverlaufs	127
3.2.3 Breite der Sperrschicht	129
3.2.4 Diffusionsspannung	129
3.3 pn-Übergang mit äußerer Spannung	133
3.3.1 Modell	133
3.3.2 Breite der Sperrschicht	135
3.3.3 Berechnung der Ströme	135

3.3.4 Strom-Spannungs-Kennlinie	139
3.3.5 Lawinen- und Zener-Effekt	143
3.4 Kapazität eines pn-Übergangs	145
3.4.1 Sperrschichtkapazität	145
3.4.2 Diffusionskapazität	147
3.5 Differentieller Widerstand und Leitwert	149
3.6 Esaki- oder Tunneldiode	150
3.7 Einige Ergänzungen zu pn-Übergängen	152
Zusammenfassung zu Kapitel 3	153
Aufgaben zu Kapitel 3	155
4 Optoelektronische Bauelemente	165
4.1 Lumineszenz-Bauelemente	165
4.1.1 Lichtemission an pn-Übergängen	165
4.1.2 Lumineszenzmaterialien	166
4.1.3 Spektralabhängigkeit der Lumineszenz bei Band-Band-Übergängen	171
4.1.4 Aufbau und Technologie von Lumineszenzdiode	173
4.2 Einiges über Halbleiterlaser	179
4.2.1 Übersicht	179
4.2.2 Grundsätzliches zur Funktionsweise	179
4.2.3 Optischer Einschluss (Confinement)	180
4.2.4 Besetzungsinversion und Gewinn	182
4.2.5 Bilanzgleichungen für Elektronen und Photonen	184
4.3 Absorptions-Bauelemente	188
4.3.1 Physikalische Grundlagen der Absorption	188
4.3.2 Photoleiter	193
4.3.3 Photodioden und weitere Photodetektoren	195
4.3.4 Materialien für optische Empfänger	199
4.4 Solarzellen – Photovoltaik	202
4.5 Tendenzen der Optoelektronik	204
4.5.1 Lichtemittierende Bauelemente	204
4.5.2 Photodetektoren	206
4.5.3 Photovoltaik	207
Zusammenfassung zu Kapitel 4	208
Aufgaben zu Kapitel 4	210
5 Bipolartransistoren	215
5.1 Einfaches Transistormodell	215
5.2 Abschätzung der Verstärkungswirkung	219
5.2.1 Definition verschiedener Verstärkungsfaktoren	219
5.2.2 Diffusionsstrom in der Basis	221
5.2.3 Größenordnung der Stromverstärkung	224

5.3 Ebers-Moll-Gleichungen	227
5.3.1 Relativ einfache Herleitung	227
5.3.2 Zusammenfassung der Herleitung	231
5.3.3 Allgemeine Form der Ebers-Moll-Gleichungen.....	232
5.3.4 Verschiedene Näherungen für die Ebers-Moll-Gleichungen	234
5.4 Herleitung der Ebers-Moll-Gleichungen aus den Diffusionsgleichungen ..	237
5.4.1 Ansätze für die Diffusionsströme	237
5.4.2 Lösungen der Diffusionsgleichungen	238
5.5 Kennlinienfelder	241
5.5.1 Kennlinienfelder in Basisschaltung	241
5.5.2 Kennlinienfelder in Emitterschaltung.....	243
5.5.3 Early-Effekt	246
5.6 Ergänzungen zu Bipolartransistoren. Tendenzen	246
Zusammenfassung zu Kapitel 5	247
Aufgaben zu Kapitel 5	248

6 Metall-Halbleiter-Kontakte und Feldeffekt-Transistoren 255

6.1 Metall-Halbleiter-Kontakte	255
6.1.1 Schottky-Dioden	255
6.1.2 Ohmsche Kontakte	261
6.2 Einführung in Feldeffekttransistoren	261
6.2.1 Die verschiedenen Typen von Feldeffekttransistoren	261
6.2.2 Einfaches Modell.....	264
6.3 Detailliertere Beschreibung des MOSFET	269
6.3.1 Ladungszustände eines MOS-Kondensators	269
6.3.2 Quantitative Betrachtung der Inversionsbedingung	271
6.3.3 Ladungen, Kapazität und Sperrschichtbreite am MOS-Kondensator	273
6.3.4 Verfeinerte Herleitung der Kennliniengleichung	278
6.3.5 MOS-Kondensator mit Berücksichtigung <i>der beweglichen Ladungsträger</i>	282
6.4 MOSFETs in der digitalen Schaltungstechnik	286
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	292
6.5 Speicherschaltkreise	293
6.5.1 RAM-Speicher	293
6.5.2 ROMs	294
6.5.3 EPROMs und EEPROMs.....	294

6.6 CCD-Bauelemente 295

6.7 Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren 297

6.8 Zur Zukunft der MOS-Technologie 299

Zusammenfassung zu Kapitel 6 301

Aufgaben zu Kapitel 6 303

7 Halbleitertechnologie 307

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 310

7.3 Herstellung von Einkristallen anderer Halbleiter 312

7.3.1 Germanium 312

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 318

7.4.3 Dotieren 319

7.4.4 Epitaxieverfahren..... 323

7.4.5 Metallisierung durch Aufdampfen und Sputtern 326

7.4.6 Ätzen..... 328

7.4.7 Reinigen..... 330

7.5 Lithographie 331

7.6 Reinraumtechnik 334

7.7 Ein Beispiel für die Technik integrierter Schaltungen 339

7.8 Tendenzen der Halbleitertechnologie 342

Zusammenfassung zu Kapitel 7 344

Aufgaben zu Kapitel 7 347

Literaturverzeichnis 351

Verzeichnis der Internet-Dateien 355

Verwendete Formelzeichen..... 361

Tabellenverzeichnis 369

Index..... 371

Personenindex 387