

# **Optoelektronische Halbleiterbauelemente**

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhold Paul  
Technische Universität Hamburg-Harburg

2., überarbeitete und erweiterte Auflage  
Mit 244 Bildern und 41 Tafeln



B. G. Teubner Stuttgart 1992

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Optoelektronische Halbleiterbauelemente	11
1 Physikalische Grundlagen optoelektronischer Halbleiterbauelemente	17
1.1 Wellen- und Teilchencharakter des Lichtes	17
1.1.1 Wellenauffassung	17
1.1.2 Teilchenauffassung des Lichtes	23
1.2 Elektromagnetische Wellen	29
1.2.1 Wellenausbreitung im ungestörten Raum	29
1.2.2 Reflexion und Brechung von Wellen an ebenen Grenzflächen	36
1.2.3 Interferenz und Kohärenz	47
1.2.4 Geometrische Optik	52
1.3 Strahlungserzeugung	52
1.3.1 Temperaturstrahlung	53
1.3.2 Lumineszenzstrahlung	60
1.4 Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung und Festkörper. Emission und Absorption	64
1.4.1 Grundprozesse	64
1.4.2 Absorption und Emission	67
1.4.3 Physikalische Absorptionsmechanismen	74
1.4.3.1 Fundamentalabsorption	76
1.4.3.2 Weitere Absorptionsmechanismen	81
1.4.4 Stimulierte Emission	84
1.4.5 Die optischen Konstanten	90
1.5 Größen zur Kennzeichnung von Strahlung	93
1.5.1 Strahlungsphysikalische Größen	93
1.5.2 Lichttechnische Größen	95
2 Halbleiterstrahlungsquellen	98
2.1 Lumineszenzdiode	98
2.1.1 Wirkprinzip	99
2.1.2 Eigenschaften und Kennwerte von LEDs	103
2.1.3 Materialien, Herstellungs- und Bauformen	116
2.1.4 Anwendungen. Grundsaltungen	131
2.1.5 Weitere Strahlungsquellen	134
2.1.5.1 Schottky-Diode	134
2.1.5.2 MOS-Diode	135
2.2 Anzeigeeinheiten	137
2.2.1 Übersicht	137
2.2.2 Digitale LED-Anzeigen	142
2.2.2.1 Anzeigeelemente	142

2.2.2.2 Ansteuerschaltungen	145
2.2.3 Flüssigkeitsanzeigen, LCD-Anzeige	151
2.2.3.1 Anzeigeelemente	151
2.2.3.2 Ansteuerschaltungen	155
2.2.4 Weitere Digitalanzeigen	156
2.2.4.1 Vakuumfluoreszenzanzeige	157
2.2.4.2 Elektrolumineszenzanzeigen	157
2.2.4.3 Weitere Anzeigetechniken	159
2.2.5 Quasianaloganzeigen	160
2.3 Laserdioden	162
2.3.1 Wirkprinzip	163
2.3.2 Eigenschaften realer Laserdioden	169
2.3.2.1 Bilanzgleichungen	169
2.3.2.2 Stationäre Lösungen der Bilanzgleichungen	172
2.3.2.3 Strahlungskennlinie. Ausgangsleistung	179
2.3.2.4 Dynamische Lösungen der Bilanzgleichungen	187
2.3.3 Bauformen	192
2.3.3.1 Materialien	193
2.3.3.2 Bauformen	195
2.3.3.3 Potentialtopflaserdioden	206
2.3.4 Anwendungen	210
3 Strahlungsempfänger	213
3.1 Fotoleiter	221
3.1.1 Wirkprinzip und Eigenschaften	222
3.1.2 Bauformen, Materialien, Anwendungen	230
3.2 Fotodiode	232
3.2.1 Fotodiode mit PN-Übergang	233
3.2.1.1 Wirkprinzip	233
3.2.1.2 Kennlinie. Eigenschaften der Fotodiode	237
3.2.1.3 Dynamische Eigenschaften	243
3.2.1.4 Materialeinfluß	246
3.2.2 PIN-Fotodioden	248
3.2.3 Schottky-Fotodioden	252
3.2.4 Lawinen-Fotodiode	254
3.2.5 Fotodioden mit Heterostrukturen	266
3.2.5.1 Fenstereffekt	267
3.2.5.2 Hetero-Lawinenfotodioden	268
3.2.5.2.1 Hetero-Lawinenfotodioden mit ge-	
trennter Lawinen- und Absorptionszone	268
3.2.6 Weitere Fotodetektoren	272
3.2.7 Schaltungstechnik	277
3.3 Fototransistoren, Fotothyristoren	279

3.3.1	Fotobipolartransistor	279
3.3.2	Fotofeldeffekttransistoren	285
3.3.3	Fotothyristor	288
3.4	Weitere Fotoempfänger	291
3.4.1	Spezielle Fotodetektoren	291
3.4.2	Halbleiterfotokatoden	295
3.5	Rauschverhalten von Strahlungsempfängern	298
3.5.1	Rauschquellen in Strahlungsempfängern	298
3.5.2	Empfindlichkeit. Detektivität	308
3.5.3	Betriebsarten von Strahlungsempfängern	310
3.6	Solarzelle	312
3.6.1	PN-Solarzelle	313
3.6.1.1	Kennliniengleichung. Grundeigenschaften	313
3.6.1.2	Bauformen. Materialeinfluß	319
3.6.2	Weitere Strukturen	324
3.7	Bildaufnahmeeinheiten, integrierte Fotosensoren	327
3.7.1	Bildaufnahmeröhre mit Fotodiodenmatrix	328
3.7.2	Integrierte Festkörper	330
3.7.3	Ladungsinjektionssensoren	336
3.7.4	Ladungstransfersensoren	338
4	Optokoppler	346
4.1	Wirkprinzip und Eigenschaften	348
4.2	Grundsaltungen	357
4.3	Anwendungen	365
5	Optische Übertragungssysteme	368
5.1	Übertragungsstrecken optischer Systeme. Lichtwellenleiter	374
5.1.1	Freie (atmosphärische) Übertragungsstrecke	374
5.1.2	Lichtwellenleitersystem	376
5.1.2.1	Wirkprinzip und Eigenschaften von Glasfaserwellenleitern	377
5.1.2.2	Übertragungseigenschaften	384
5.1.3	Schichtwellenleiter	391
5.1.4	Rechteckwellenleiter	400
5.1.5	Zylindrische Wellenleiter. Glasfaserkabel	405
5.2	Komponenten optischer Systeme. Integrierte optische Schaltungen	408
5.2.1	Komponenten optischer Systeme	409
5.2.1.1	Koppler	409
5.2.1.2	Modulatoren	412
5.2.1.2.1	Elektrophysikalische Effekte und ihre Anwendung in Modulatoren	415

5.2.1.2.2 Optisch gesteuerte Modulatoren	423
5.2.1.3 Schalter	424
5.2.2 Integrierte Optoelektronik	425
5.2.2.1 Hybride integrierte optische Schaltungen	428
5.2.2.2 Monolithisch integrierte optische Schaltungen	428
5.2.3 Photonik	432
5.2.3.1 Nichtlineare optische Materialeigenschaften. Optische Bistabilität	435
5.2.3.2 Optische Verstärker	439
5.2.3.3 Optische Schalter und Digitalelemente	442
5.3 Optische Übertragungssysteme	444
5.3.1 Modulation, Demodulation	445
5.3.2 Optische Übertragungssysteme	448
5.3.2.1 Optische Quellen und ihre Anpassung	449
5.3.2.2 Optische Detektoren	453
5.3.2.3 Übertragungslänge	455
Literaturverzeichnis	461
Sachwortverzeichnis	470