

# **Grundlagen der optoelektronischen Halbleiterbauelemente**

Von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Günther Wagemann  
und Dipl.-Ing. Andreas Schmidt  
Technische Universität Berlin



B. G. Teubner Stuttgart 1998

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole</b>	<b>9</b>
<b>1 Grundbegriffe der Strahlungsphysik und Lichttechnik</b>	<b>15</b>
1.1 Strahlungsphysikalische Größen	15
1.2 Lichttechnische Größen	16
1.2.1 Der Aufbau des menschlichen Auges	17
1.2.2 Definition lichttechnischer Größen und ihrer Einheiten	19
<b>2 Elektromagnetische Strahlung</b>	<b>24</b>
2.1 Entstehung elektromagnetischer Strahlung	24
2.2 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	29
2.2.1 Beschreibung ebener Wellen	30
2.2.2 Ausbreitung ebener Wellen in einem absorbierenden Medium	32
2.2.3 Superposition von ebenen Wellen	34
2.2.4 Natürliche Strahlungsquellen	39
2.3 Der Schwarze Körper	45
2.3.1 Definition des Schwarzen Körpers	45
2.3.2 Berechnung der Energiedichte des Schwarzen Körpers nach Rayleigh-Jeans	48
2.3.3 Berechnung der Energiedichte des Schwarzen Körpers nach Planck	54
2.4 Die Quantentheorie der elektromagnetischen Strahlung	62
<b>3 Das Wellenbild des Festkörpers</b>	<b>65</b>
3.1 Schrödinger Gleichung	65
3.1.1 Zeitabhängige Schrödinger Gleichung	65
3.1.2 Normierungsbedingung	68
3.1.3 Zeitfreie Schrödinger Gleichung	69
3.2 Das Elektron im Kristallgitter	70
3.2.1 Der eindimensionale Potentialkasten	72
3.2.2 Das Kronig-Penney-Modell	76
3.2.3 Das reale Energie-Impuls-Diagramm	90

<b>4 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Festkörper</b>	<b>98</b>
4.1 Erhaltungssätze	98
4.2 Absorptionskoeffizient	102
<b>5 Fotowiderstand</b>	<b>114</b>
5.1 Funktionsprinzip	114
5.2 Kenngrößen des Foto Widerstands	119
5.3 Kriterien zur Materialauswahl	120
5.3.1 Diskussion der Anregungshöhe An/no	121
5.3.2 Diskussion der Summe der Heil-Beweglichkeiten	123
5.4 Mathematische Beschreibung des Foto Widerstands	125
5.4.1 Berechnung des Ladungsträgerprofils	125
5.4.2 Berechnung der spektralen Foto-Leitfähigkeit	135
5.4.3 Berechnung des Gewinns	136
5.5 Technische Realisierung	138
<b>6 Fotodiode, Solarzelle</b>	<b>141</b>
6.1 Fotodiode	144
6.1.1 Wirkungsweise der Fotodiode	144
6.1.2 Geschwindigkeit der Fotodiode	150
6.1.3 Rauschen einer Fotodiode	152
6.1.4 Kenndaten einer Fotodiode	153
6.2 Solarzelle	156
6.2.1 Solarkonstante und terrestrische Bestrahlungsstärke AMX	156
6.2.2 Photovoltaischer Grenzwirkungsgrad $\eta_{\text{ult}}$ und Materialwahl	157
6.2.3 Generator-Kennlinie der Solarzelle	159
6.2.4 Optimierung der Leistungswandlung durch Anpassung des Lastwiderstands	161
<b>7 Lumineszenz-Dioden</b>	<b>166</b>
7.1 Übersicht über den Begriff	166
7.2 Lumineszenz	166
7.3 Rekombinationsmechanismen bei direkten und indirekten Halbleitern	168
7.4 Kovalente Bindung und Dotierung von Verbindungshalbleitern	171
7.5 Die Systeme der III-V-Halbleiterverbindungen	173
7.6 Hetero-Übergänge	178
7.7 Strahlende Rekombination beim direkten Halbleitermaterial	183

## Inhaltsverzeichnis

7.8	Strahlende Rekombination beim indirekten Halbleitermaterial Paarspektren	183
7.9	Strahlende Rekombination von Exzitonen an isoelektrischen Störstellen	184
7.10	Herstellung von Lumineszenz-Dioden (LED)	189
7.10.1	Herstellung des $A^{III}B^V$ -Ausgangsmaterials	189
7.10.2	Epitaxieverfahren	192
7.11	Beispiele industriell-gefertigter Lumineszenz-Dioden	194
<b>8</b>	<b>Laser</b>	<b>198</b>
8.1	Der Rubin-Laser	198
8.2	Besetzungsinversion beim Halbleiter-Laser	202
8.3	Der Halbleiterdioden-Laser	206
8.4	Bauprinzipien von Dioden-Lasern mit Hetero-Übergang	210
8.5	Ausführungsformen von Halbleiter-Injektionslasern	212
<b>9</b>	<b>Optische Nachrichtentechnik</b>	<b>219</b>
<b>Anhang</b>		<b>223</b>
A 1	Herleitung des Wienschen Verschiebungsgesetzes	223
A 2	Berechnung der Stefan-Boltzmann-Konstante	224
A 3	Näherung des $W(k)$ -Diagramms	225
A 4	Optische Konstanten von Silizium	227
A 5	Optische Konstanten von Galliumarsenid	228
A 6	Ausgewählte Daten einiger Halbleiter	232
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>238</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>240</b>