

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Optische Phänomene .....	1
1.2	Optische Koeffizienten .....	3
1.3	Komplexer Brechungsindex und Permittivität .....	7
1.4	Optische Materialien .....	11
1.4.1	Kristalline Isolatoren und Halbleiter .....	11
1.4.2	Gläser .....	15
1.4.3	Metalle .....	16
1.4.4	Molekulare Materialien .....	17
1.4.5	Dotierte Gläser und Isolatoren .....	19
1.5	Charakteristika der Optik von Festkörpern .....	21
1.5.1	Kristallsymmetrie .....	22
1.5.2	Elektronische Bänder .....	24
1.5.3	Vibronische Bänder .....	25
1.5.4	Die Zustandsdichte .....	26
1.5.5	Delokalisierte Zustände und kollektive Anregungen .....	26
1.6	Mikroskopische Modelle .....	27
	Zusammenfassung .....	29
	Weiterführende Literatur .....	30
	Aufgaben .....	31
<b>2</b>	<b>Klassische Propagation</b>	<b>37</b>
2.1	Propagation von Licht in optisch dichten Medien .....	37
2.1.1	Atomare Oszillatoren .....	38
2.1.2	Molekül- und Gitterschwingungen .....	41
2.1.3	Oszillationen freier Elektronen .....	42
2.2	Das Modell des oszillierenden Dipols .....	43
2.2.1	Der Lorentz-Oszillatator .....	43
2.2.2	Multiple Resonanzen .....	49
2.2.3	Vergleich mit experimentellen Daten .....	52
2.2.4	Lokalfeldkorrekturen .....	55
2.3	Die Kramers-Kronig-Relationen .....	56

2.4	Dispersion .....	58
2.5	Optische Anisotropie .....	61
2.5.1	Natürliche Anisotropie: Doppelbrechung .....	61
2.5.2	Induzierte optische Anisotropie .....	67
2.6	Optische Chiralität .....	69
	Zusammenfassung .....	71
	Weiterführende Literatur .....	72
	Aufgaben .....	73
<b>3</b>	<b>Interbandabsorption</b>	<b>81</b>
3.1	Interbandübergänge .....	81
3.2	Die Übergangsrate für die direkte Absorption .....	84
3.3	Bandkantenabsorption in Halbleitern mit direkter Bandlücke .....	88
3.3.1	Die Atomphysik von Interbandübergängen .....	88
3.3.2	Die Bandstruktur von III-V-Halbleitern mit direkter Bandlücke .....	90
3.3.3	Die gemeinsame Zustandsdichte .....	92
3.3.4	Die Frequenzabhängigkeit der Bandkantenabsorption .....	93
3.3.5	Der Franz-Keldysh-Effekt .....	95
3.3.6	Bandkantenabsorption im Magnetfeld .....	96
3.3.7	Spininjektion .....	98
3.4	Bandkantenabsorption in Halbleitern mit indirekter Bandlücke .....	101
3.5	Interbandabsorption über der Bandkante .....	105
3.6	Messung von Absorptionsspektren .....	108
3.7	Halbleiterphotodetektoren .....	111
3.7.1	Photodioden .....	111
3.7.2	Photoleiter .....	114
3.7.3	Photovoltaische Bauelemente .....	115
	Zusammenfassung .....	116
	Weiterführende Literatur .....	118
	Aufgaben .....	118
<b>4</b>	<b>Exzitonen</b>	<b>123</b>
4.1	Das Konzept der Exzitonen .....	123
4.2	Freie Exzitonen .....	125
4.2.1	Bindungsenergie und Radius .....	125
4.2.2	Exzitonische Absorption .....	127
4.2.3	Experimentelle Daten für freie Elektronen in GaAs .....	129

4.3	Freie Exzitonen in externen Feldern .....	131
4.3.1	Elektrische Felder .....	132
4.3.2	Magnetische Felder .....	133
4.4	Freie Exzitonen bei hohen Dichten .....	134
4.5	Frenkel-Exzitonen .....	138
4.5.1	Edelgaskristalle .....	138
4.5.2	Alkalihalogenide .....	139
4.5.3	Molekulare Kristalle .....	140
	Zusammenfassung .....	141
	Weiterführende Literatur .....	142
	Aufgaben .....	142
<b>5</b>	<b>Lumineszenz</b>	<b>147</b>
5.1	Lichtemission in Festkörpern .....	147
5.2	Interbandlumineszenz .....	150
5.2.1	Materialien mit direkter Bandlücke .....	151
5.2.2	Materialien mit indirekter Bandlücke .....	152
5.3	Photolumineszenz .....	154
5.3.1	Anregung und Relaxation .....	154
5.3.2	Kleine Ladungsträgerdichten .....	156
5.3.3	Entartung .....	158
5.3.4	Optische Ausrichtung .....	160
5.3.5	Photolumineszenz-Spektroskopie .....	162
5.4	Elektrolumineszenz .....	163
5.4.1	Allgemeine Prinzipien .....	163
5.4.2	Leuchtdioden .....	167
5.4.3	Diodenlaser .....	168
5.4.4	Kathodolumineszenz .....	173
	Zusammenfassung .....	176
	Weiterführende Literatur .....	177
	Aufgaben .....	178
<b>6</b>	<b>Quantenbeschränkung</b>	<b>183</b>
6.1	Quantenbeschränkte Strukturen .....	183
6.2	Wachstum und Struktur von Quantentöpfen .....	187
6.3	Elektronische Niveaus .....	189
6.3.1	Separation der Variablen .....	189
6.3.2	Unendliche Potentialtöpfe .....	190
6.3.3	Endliche Potentialtöpfe .....	192

---

6.4	Absorption im Quantentopf und Exzitonen . . . . .	197
6.4.1	Auswahlregeln . . . . .	197
6.4.2	Zweidimensionale Absorption . . . . .	200
6.4.3	Experimentelle Daten . . . . .	203
6.4.4	Exzitonen in Quantentöpfen . . . . .	204
6.4.5	Spininjektion in Quantentöpfen . . . . .	205
6.5	Der quantenbeschränkte Stark-Effekt . . . . .	207
6.6	Optische Emission . . . . .	212
6.7	Intersubbandübergänge . . . . .	214
6.8	Quantenpunkte . . . . .	215
6.8.1	Quantenpunkte als künstliche Atome . . . . .	216
6.8.2	Kolloidale Quantenpunkte . . . . .	219
6.8.3	Selbstorganisierte Epitaxie von Quantenpunkten . . . . .	221
	Zusammenfassung . . . . .	224
	Weiterführende Literatur . . . . .	226
	Aufgaben . . . . .	227
<b>7</b>	<b>Freie Elektronen</b>	<b>235</b>
7.1	Plasmareflexion . . . . .	235
7.2	Leitung durch freie Ladungsträger . . . . .	238
7.3	Metalle . . . . .	241
7.3.1	Das Drude-Modell . . . . .	241
7.3.2	Interbandübergänge in Metallen . . . . .	245
7.4	Dotierte Halbleiter . . . . .	248
7.4.1	Reflexion und Absorption durch freie Ladungsträger . . . . .	249
7.4.2	Absorption durch Fremdteilchen . . . . .	253
7.5	Plasmonen . . . . .	256
7.5.1	Volumenplasmonen . . . . .	256
7.5.2	Oberflächenplasmonen . . . . .	261
7.6	Negative Brechung . . . . .	267
	Zusammenfassung . . . . .	270
	Weiterführende Literatur . . . . .	271
	Aufgaben . . . . .	272
<b>8</b>	<b>Molekulare Materialien</b>	<b>277</b>
8.1	Einführung: Organische Materialien . . . . .	277
8.2	Optische Spektren von Molekülen . . . . .	280
8.2.1	Elektronische Zustände und Übergänge . . . . .	280
8.2.2	Vibronische Kopplung . . . . .	282

8.2.3	Molekulare Konfigurationsdiagramme .....	284
8.2.4	Das Franck-Condon-Prinzip .....	286
8.2.5	Experimentelle Spektren .....	290
8.3	Konjugierte Moleküle .....	293
8.3.1	Kleine konjugierte Moleküle .....	293
8.3.2	Konjugierte Polymere .....	296
8.4	Organische Optoelektronik .....	299
8.5	Kohlenstoffnanostrukturen .....	303
8.5.1	Einführung .....	303
8.5.2	Graphen .....	304
8.5.3	Kohlenstoffnanoröhren .....	306
8.5.4	Fullerene .....	312
	Zusammenfassung .....	314
	Weiterführende Literatur .....	316
	Aufgaben .....	316
<b>9</b>	<b>Lumineszenzzentren</b>	<b>321</b>
9.1	Vibronische Absorption und Emission .....	321
9.2	Farbzentren .....	325
9.2.1	F-Zentren in Alkalihalogeniden .....	325
9.2.2	NV-Zentren in Diamant .....	328
9.3	Paramagnetische Beimengungen in ionischen Kristallen .....	331
9.3.1	Kristallfeldeffekt und vibronische Kopplung .....	331
9.3.2	Ionen der Seltenerdmetalle .....	333
9.3.3	Ionen der Übergangsmetalle .....	336
9.4	Festkörperlaser und optische Verstärker .....	338
9.5	Leuchtstoffe .....	342
	Zusammenfassung .....	344
	Weiterführende Literatur .....	345
	Aufgaben .....	346
<b>10</b>	<b>Phononen</b>	<b>351</b>
10.1	Infrarotaktive Phononen .....	351
10.2	Infrarotreflexion und -absorption in polaren Festkörpern .....	353
10.2.1	Das klassische Oszillatormodell .....	354
10.2.2	Die Lyddane-Sachs-Teller-Beziehung .....	357
10.2.3	Reststrahlen .....	358
10.2.4	Gitterabsorption .....	360

10.3	Polaritonen .....	363
10.4	Polaronen .....	364
10.5	Inelastische Lichtstreuung .....	368
10.5.1	Allgemeine Prinzipien .....	369
10.5.2	Raman-Streuung .....	370
10.5.3	Brillouin-Streuung .....	372
10.6	Phononlebensdauer .....	374
	Zusammenfassung .....	375
	Weiterführende Literatur .....	376
	Aufgaben .....	377
<b>11</b>	<b>Nichtlineare Optik</b>	<b>381</b>
11.1	Der nichtlineare Suszeptibilitätstensor .....	381
11.2	Zum physikalischen Ursprung optischer Nichtlinearitäten .....	385
11.2.1	Nichtresonante Nichtlinearitäten .....	385
11.2.2	Resonante Nichtlinearitäten .....	390
11.3	Nichtlinearitäten zweiter Ordnung .....	393
11.3.1	Nichtlineare Frequenzmischung .....	393
11.3.2	Einfluss der Kristallsymmetrie .....	396
11.3.3	Phasen-Matching .....	398
11.3.4	Elektrooptik .....	401
11.4	Nichtlineare Effekte dritter Ordnung .....	407
11.4.1	Überblick über Phänomene dritter Ordnung .....	407
11.4.2	Frequenzverdreifachung .....	408
11.4.3	Optischer Kerr-Effekt und nichtlinearer Brechungsindex .....	408
11.4.4	Stimulierte Raman-Streuung .....	412
11.4.5	Isotrope nichtlineare Medien dritter Ordnung .....	412
11.4.6	Nichtlineare Propagation in optischen Fasern und Solitonen .....	414
11.4.7	Resonante Nichtlinearitäten in Halbleitern .....	416
	Zusammenfassung .....	419
	Weiterführende Literatur .....	420
	Aufgaben .....	420
<b>A</b>	<b>Elektromagnetismus in Dielektrika</b>	<b>425</b>
A.1	Elektromagnetische Felder und Maxwell-Gleichungen .....	425
A.2	Elektromagnetische Wellen .....	429
	Weiterführende Literatur .....	436

<b>B</b>	<b>Quantentheorie der Strahlungsübergänge</b>	437
B.1	Einstein-Koeffizienten .....	437
B.2	Quantenübergangsraten .....	441
B.3	Auswahlregeln .....	446
	Weiterführende Literatur .....	448
<b>C</b>	<b>Der Drehimpuls in der Atomphysik</b>	449
C.1	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik .....	449
C.2	Notation für atomare Drehimpulszustände .....	450
C.3	Aufspaltung in Unterniveaus .....	452
	Weiterführende Literatur .....	453
<b>D</b>	<b>Bändertheorie</b>	455
D.1	Metalle, Halbleiter und Isolatoren .....	455
D.2	Modell quasifreier Elektronen .....	457
D.3	Bandstruktur: Beispiel .....	461
	Weiterführende Literatur .....	464
<b>E</b>	<b>Halbleiter-p-i-n-Dioden</b>	465
	Weiterführende Literatur .....	467
	<b>Lösungen zu den Aufgaben</b>	469
	<b>Literaturverzeichnis</b>	489
	<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	505
	<b>Index</b>	509