

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage *XIX*

Vorwort zur zweiten Auflage *XXIII*

Teil I Optik *1*

- 1 Strahlenoptik** *3*
 - 1.1 Postulate der Strahlenoptik *4*
 - 1.1.1 Ausbreitung in einem homogenen Medium *5*
 - 1.2 Einfache optische Komponenten *6*
 - 1.2.1 Spiegel *6*
 - 1.2.2 Ebene Grenzflächen *8*
 - 1.2.3 Sphärische Grenzflächen und Linsen *10*
 - 1.2.4 Lichtleiter *13*
 - 1.3 Gradientenindexoptik *14*
 - 1.3.1 Die Strahlengleichung *14*
 - 1.3.2 Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex *15*
 - 1.3.3 Die Eikonalgleichung *18*
 - 1.4 Matrizenoptik *19*
 - 1.4.1 Die Strahltransfermatrix *19*
 - 1.4.2 Matrizen einfacher optischer Komponenten *20*
 - 1.4.3 Matrizen von hintereinander geschalteten optischen Komponenten *21*
 - 1.4.4 Periodische optische Systeme *23*
- 2 Wellenoptik** *29*
 - 2.1 Die Postulate der Wellenoptik *30*
 - 2.1.1 Die Wellengleichung *30*
 - 2.2 Monochromatische Wellen *31*
 - 2.2.1 Komplexe Darstellung und die Helmholtzgleichung *31*
 - 2.2.2 Einfache Wellen *32*
 - 2.2.3 Paraxiale Wellen *34*
 - 2.3 Die Beziehung zwischen Wellenoptik und Strahlenoptik *35*
 - 2.3.1 Die Eikonalgleichung *36*
 - 2.4 Einfache optische Komponenten *36*
 - 2.4.1 Reflexion und Brechung *36*
 - 2.4.2 Durchgang durch optische Komponenten *37*
 - 2.4.3 Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex *41*

vi | *Inhaltsverzeichnis*

2.5	Interferenz	42
2.5.1	Interferenz zweier Wellen	42
2.5.2	Vielwelleninterferenz	45
2.6	Polychromatisches und gepulstes Licht	49
2.6.1	Zeitliche und spektrale Beschreibung	49
2.6.2	Lichtschwebung	51
3	Optik von Strahlbündeln	57
3.1	Der Gaußstrahl	57
3.1.1	Die komplexe Amplitude eines Gaußstrahls	57
3.1.2	Eigenschaften von Gaußstrahlen	58
3.1.3	Die Qualität eines Strahlbündels	64
3.2	Durchgang durch optische Komponenten	64
3.2.1	Durchgang durch eine dünne Linse	64
3.2.2	Formung eines Strahlbündels	66
3.2.3	Reflexion an einem Kugelspiegel	67
3.2.4	Durchgang durch ein beliebiges optisches System	68
3.3	Hermite-Gauß-Strahlen	70
3.3.1	Die komplexe Amplitude	71
3.3.2	Intensitätsverteilung	71
3.4	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.1	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.2	Optische Wirbel	73
3.4.3	Ince-Gauß-Strahlen	73
3.5	Nichtbeugende Strahlen	74
3.5.1	Besselstrahlen	74
3.5.2	Airystrahlen	75
4	Fourieroptik	79
4.1	Lichtausbreitung im Vakuum	80
4.1.1	Räumliche harmonische Funktionen und ebene Wellen	80
4.1.2	Die Übertragungsfunktion des Vakuums	85
4.1.3	Die Impulsantwortfunktion des Vakuums	87
4.1.4	Huygens-Fresnel-Prinzip	88
4.2	Die optische Fouriertransformation	88
4.2.1	Fouriertransformation im Fernfeld	88
4.2.2	Fouriertransformation mithilfe einer Linse	89
4.3	Lichtbeugung	91
4.3.1	Fraunhoferbeugung	92
4.3.2	Fresnelbeugung	94
4.3.3	Nichtbeugende Wellen	97
4.4	Bildentstehung	98
4.4.1	Strahlenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	98
4.4.2	Wellenoptische Beschreibung eines $4f$ -Systems	99
4.4.3	Wellenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	101
4.4.4	Abbildung im Nahfeld	104
4.5	Holographie	105
4.5.1	Die holographische Codierung	106
4.5.2	Holographie außerhalb der optischen Achse	107
4.5.3	Fouriertransformations-Holographie	108
4.5.4	Holographische Ortsfilter	109
4.5.5	Die holographische Apparatur	109
4.5.6	Volumenholographie	110

5	Elektromagnetische Optik	117
5.1	Die elektromagnetische Theorie des Lichts	118
5.1.1	Die maxwellschen Gleichungen im Vakuum	118
5.1.2	Die Wellengleichung	118
5.1.3	Die maxwellschen Gleichungen in Medien	119
5.1.4	Randbedingungen	120
5.1.5	Intensität, Leistung und Energie	120
5.1.6	Impuls	120
5.2	Elektromagnetische Wellen in Dielektrika	121
5.2.1	Definitionen	121
5.2.2	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	121
5.2.3	Nichtlineare, dispersive, inhomogene oder anisotrope Medien	122
5.3	Monochromatische elektromagnetische Wellen	124
5.3.1	Die maxwellschen Gleichungen in einem Medium	125
5.3.2	Intensität und Leistung	125
5.3.3	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	125
5.3.4	Inhomogene Medien	125
5.3.5	Dispersive Medien	125
5.4	Einfache elektromagnetische Wellen	126
5.4.1	Ebene, Dipol- und gaußsche elektromagnetische Wellen	126
5.4.2	Die Beziehung zwischen elektromagnetischer Optik und skalarer Wellenoptik	129
5.4.3	Vektor-Strahlbündel	130
5.5	Absorption und Dispersion	130
5.5.1	Absorption	130
5.5.2	Dispersion	132
5.5.3	Resonante Medien	134
5.6	Die Streuung elektromagnetischer Wellen	137
5.6.1	Die bornsche Näherung	138
5.6.2	Rayleighstreuung	138
5.6.3	Miestreuung	141
5.6.4	Dämpfung in einem streuenden Medium	142
5.7	Pulsausbreitung in dispersiven Medien	143
5.7.1	Die Gruppengeschwindigkeit	143
5.7.2	Die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit	144
6	Polarisationsoptik	151
6.1	Die Polarisation des Lichts	152
6.1.1	Die Polarisation	152
6.1.2	Die Matrixdarstellung der Polarisation	155
6.2	Reflexion und Brechung	159
6.2.1	TE-Polarisation	160
6.2.2	TM-Polarisation	161
6.3	Die Optik anisotroper Medien	163
6.3.1	Der Brechungsindex	163
6.3.2	Ausbreitung entlang einer Hauptachse	165
6.3.3	Ausbreitung entlang beliebiger Richtungen	166
6.3.4	Die Dispersionsrelation, Strahlen, Wellenfronten und Energietransport	168
6.3.5	Doppelbrechung	170
6.4	Optische Aktivität und Magnetooptik	172
6.4.1	Optische Aktivität	172
6.4.2	Magnetooptik: Der Faradayeffekt	174

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 6.5 Optik von Flüssigkristallen 175
 - 6.5.1 Die Struktur von Flüssigkristallen 175
 - 6.5.2 Optische Eigenschaften von verdrehten nematischen Flüssigkristallen 176
- 6.6 Polarisierende Bauelemente 177
 - 6.6.1 Polarisatoren 177
 - 6.6.2 Retarder 178
 - 6.6.3 Polarisationsrotatoren 179
 - 6.6.4 Nichtreziproke polarisierende Bauelemente 179
- 7 Optik photonischer Kristalle 185**
 - 7.1 Optik von dielektrischen Schichtmedien 187
 - 7.1.1 Matrixtheorie der Optik von Schichtmedien 187
 - 7.1.2 Das Fabry-Pérot-Etalon 192
 - 7.1.3 Das Bragggitter 194
 - 7.2 Eindimensionale photonische Kristalle 200
 - 7.2.1 Blochmoden 201
 - 7.2.2 Matrizenoptik periodischer Medien 203
 - 7.2.3 Fourieroptik periodischer Medien 208
 - 7.2.4 Grenzflächen zwischen periodischen und homogenen Medien 210
 - 7.3 Zwei- und dreidimensionale photonische Kristalle 211
 - 7.3.1 Zweidimensionale photonische Kristalle 212
 - 7.3.2 Dreidimensionale photonische Kristalle 213
- 8 Optik von Metallen und Metamaterialien 221**
 - 8.1 Einfach- und doppelt-negative Medien 223
 - 8.1.1 Wellenausbreitung in einfach- und doppelt-negativen Medien 224
 - 8.1.2 Wellen an Grenzflächen zwischen DP-, EN- und DP-Medien 226
 - 8.1.3 Hyperbolische Medien 232
 - 8.2 Optik von Metallen: Plasmonik 234
 - 8.2.1 Die optischen Eigenschaften von Metallen 234
 - 8.2.2 Die Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum: Oberflächenplasmonpolaritonen 239
 - 8.2.3 Metallische Nanokugeln: Lokalisierte Oberflächenplasmonen 241
 - 8.2.4 Optische Antennen 244
 - 8.3 Optik von Metamaterialien 245
 - 8.3.1 Metamaterialien 246
 - 8.3.2 Metaoberflächen 251
 - 8.4 Transformationsoptik 253
 - 8.4.1 Transformationsoptik 253
 - 8.4.2 Tarnumhänge 255
- 9 Wellenleiteroptik 261**
 - 9.1 Wellenleiter aus ebenen Spiegeln 262
 - 9.1.1 Wellenleitermoden 262
 - 9.1.2 Ausbreitungskonstanten 263
 - 9.1.3 Feldverteilungen 264
 - 9.1.4 Die Zahl der Moden 265
 - 9.1.5 Die Dispersionsrelation 265
 - 9.1.6 Gruppengeschwindigkeiten 265
 - 9.1.7 TM-Moden 266
 - 9.1.8 Vielmodenfelder 267
 - 9.2 Ebene dielektrische Wellenleiter 267
 - 9.2.1 Wellenleitermoden 268

9.2.2	Feldverteilungen	270
9.2.3	Dispersionsrelation und Gruppengeschwindigkeiten	271
9.3	Zweidimensionale Wellenleiter	273
9.3.1	Der rechteckige Spiegelwellenleiter	273
9.3.2	Der rechteckige dielektrische Wellenleiter	274
9.3.3	Die Geometrie von Kanalwellenleitern	274
9.3.4	Materialien	275
9.4	Optische Kopplung in Wellenleitern	276
9.4.1	Einkopplung	276
9.4.2	Gekoppelte Wellenleiter	277
9.4.3	Wellenleiterarrays	281
9.5	Photonische Kristalle als Wellenleiter	282
9.5.1	Braggitter als Wellenleiter	282
9.5.2	Bragg-Gitterwellenleiter als photonischer Kristall mit einer Defektschicht	283
9.5.3	Zweidimensionale Wellenleiter aus photonischen Kristallen	283
9.6	Plasmonische Wellenleiter	283
10	Faseroptik	289
10.1	Geführte Strahlen	290
10.1.1	Stufenindexfasern	290
10.1.2	Gradientenindexfasern	292
10.2	Geführte Wellen	293
10.2.1	Helmholtzgleichung	293
10.2.2	Stufenindexfasern	294
10.2.3	Einmodenfasern	298
10.2.4	Quasi-ebene Wellen in Stufen- und Gradientenindexfasern	300
10.2.5	Mehrkernfasern und Faserkoppler	304
10.3	Dämpfung und Dispersion	306
10.3.1	Dämpfung	306
10.3.2	Dispersion	307
10.4	Hohlkernfasern und Fasern aus photonischen Kristallen	314
10.4.1	Führung durch effektiven Brechungsindex	314
10.4.2	Führung durch photonische Bandlücke	315
10.4.3	Anwendungen	315
10.5	Materialien für optische Fasern	316
10.5.1	Fasern für das mittlere Infrarot	316
10.5.2	Hybrid- und Multifunktionsfasern	317
11	Resonatoroptik	321
11.1	Resonatoren aus ebenen Spiegeln	323
11.1.1	Resonatormoden	323
11.1.2	Schief einfallende Resonatormoden	329
11.2	Kugelspiegelresonatoren	330
11.2.1	Strahleingrenzung	330
11.2.2	Gaußmoden	332
11.2.3	Resonanzfrequenzen	334
11.2.4	Hermite-Gauß-Moden	335
11.2.5	Endliche Blenden und Beugungsverluste	336
11.3	Zwei- und dreidimensionale Resonatoren	337
11.3.1	Zweidimensionale rechteckige Resonatoren	337
11.3.2	Kreisförmige Resonatoren und Flüstergaleriemoden	338
11.3.3	Dreidimensionale rechteckige Hohlraumresonatoren	339

x | *Inhaltsverzeichnis*

- 11.4 Mikro- und Nanoresonatoren 340
 - 11.4.1 Rechteckige Mikroresonatoren 341
 - 11.4.2 Mikrosäulen-, Mikrodisk- und Mikroringresonatoren 342
 - 11.4.3 Mikrokugeln 343
 - 11.4.4 Mikroresonatoren aus photonischen Kristallen 344
 - 11.4.5 Plasmonische Resonatoren: Metallische Nanodisks und Nanokugeln 345

- 12 Statistische Optik 349**
 - 12.1 Statistische Eigenschaften von stochastischem Licht 350
 - 12.1.1 Optische Intensität 350
 - 12.1.2 Zeitliche Kohärenz und Spektrum 351
 - 12.1.3 Räumliche Kohärenz 355
 - 12.1.4 Longitudinale Kohärenz 358
 - 12.2 Interferenz von partiell kohärentem Licht 359
 - 12.2.1 Interferenz zweier partiell kohärenter Wellen 359
 - 12.2.2 Interferometrie und zeitliche Kohärenz 360
 - 12.2.3 Interferometrie und räumliche Kohärenz 362
 - 12.3 Transmission von partiell kohärentem Licht durch optische Systeme 364
 - 12.3.1 Ausbreitung von partiell kohärentem Licht 364
 - 12.3.2 Bildentstehung mit inkohärentem Licht 365
 - 12.3.3 Verstärkung der räumlichen Kohärenz durch Ausbreitung 367
 - 12.4 Partielle Polarisierung 370
 - 12.4.1 Die Kohärenzmatrix 371
 - 12.4.2 Stokesparameter und Poincarékugeldarstellung 371
 - 12.4.3 Unpolarisiertes Licht 372
 - 12.4.4 Polarisiertes Licht 372

- 13 Photonenoptik 377**
 - 13.1 Das Photon 378
 - 13.1.1 Licht in einem Resonator 378
 - 13.1.2 Die Energie eines Photons 379
 - 13.1.3 Die Polarisierung von Photonen 380
 - 13.1.4 Der Ort eines Photons 382
 - 13.1.5 Der Impuls eines Photons 383
 - 13.1.6 Die Interferenz von Photonen 384
 - 13.1.7 Die Zeit eines Photons 385
 - 13.2 Photonenströme 387
 - 13.2.1 Der Photonenstrom 387
 - 13.2.2 Stochastische Eigenschaften des Photonenflusses 389
 - 13.2.3 Photonenstatistik 390
 - 13.2.4 Die zufällige Aufteilung von Photonenströmen 394
 - 13.3 Quantenzustände des Lichts 396
 - 13.3.1 Quantentheorie des harmonischen Oszillators 396
 - 13.3.2 Die Analogie zwischen einer optischen Mode und einem harmonischen Oszillator 397
 - 13.3.3 Kohärente Zustände 397
 - 13.3.4 Quadraturgequetschtes Licht 398
 - 13.3.5 Photonenanzahlgequetschtes Licht 399
 - 13.3.6 Zweiphotonenlicht 400

Teil II Photonik 411**14 Licht und Materie 413**

- 14.1 Energieniveaus 413
 - 14.1.1 Atome 414
 - 14.1.2 Ionen und dotierte Dielektrika 418
 - 14.1.3 Moleküle 422
 - 14.1.4 Festkörper 424
- 14.2 Die Besetzung von Energieniveaus 428
 - 14.2.1 Die Boltzmannverteilung 428
 - 14.2.2 Die Fermi-Dirac-Verteilung 429
- 14.3 Die Wechselwirkung von Photonen mit Atomen 430
 - 14.3.1 Die Wechselwirkung von Einmodenlicht mit einem Atom 430
 - 14.3.2 Spontane Emission 432
 - 14.3.3 Induzierte Emission und Absorption 433
 - 14.3.4 Linienverbreiterung 436
 - 14.3.5 Verstärkte spontane Emission 439
 - 14.3.6 Laserkühlung, Einschluss von Atomen und Atomoptik 440
- 14.4 Thermisches Licht 443
 - 14.4.1 Das thermische Gleichgewicht zwischen Photonen und Atomen 443
 - 14.4.2 Das Spektrum des schwarzen Strahlers 444
- 14.5 Lumineszenz und Lichtstreuung 446
 - 14.5.1 Formen der Lumineszenz 447
 - 14.5.2 Photolumineszenz 448
 - 14.5.3 Lichtstreuung 451

15 Laserverstärker 457

- 15.1 Theorie der Laserverstärkung 459
 - 15.1.1 Gewinn und Bandbreite 459
 - 15.1.2 Phasenverschiebung 460
- 15.2 Pumpen des Verstärkers 461
 - 15.2.1 Geschwindigkeitsgleichungen 462
 - 15.2.2 Pumpschemata 464
- 15.3 Verbreitete Laserverstärker 468
 - 15.3.1 Rubin 469
 - 15.3.2 Neodymdotiertes Glas 470
 - 15.3.3 Erbiumdotierte Quarzglasfasern 472
 - 15.3.4 Raman-Faserverstärker 474
 - 15.3.5 Die Eigenschaften ausgewählter Laserübergänge 475
- 15.4 Die Nichtlinearität von Verstärkern 476
 - 15.4.1 Der Gewinn bei Sättigung in homogen verbreiterten Medien 476
 - 15.4.2 Gewinn bei Sättigung in inhomogen verbreiterten Medien 478
- 15.5 Verstärkerrauschen 480
 - 15.5.1 Photonenstatistik nach Verstärkung 481

16 Laser 485

- 16.1 Theorie der Laseroszillation 486
 - 16.1.1 Optische Verstärkung und Rückkopplung 486
 - 16.1.2 Bedingungen für die Laseroszillation 488
- 16.2 Die Eigenschaften der Laserstrahlung 490
 - 16.2.1 Leistung 490
 - 16.2.2 Die spektrale Verteilung 493

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 16.2.3 Räumliche Verteilung und Polarisation 497
- 16.2.4 Modenselektion 498
- 16.3 Bauarten von Lasern 500
 - 16.3.1 Festkörperlaser 501
 - 16.3.2 Faserlaser 506
 - 16.3.3 Raman-Faserlaser 510
 - 16.3.4 Chaotische Laser 512
 - 16.3.5 Gas- und Farbstofflaser 513
 - 16.3.6 Röntgen- und Freie-Elektronen-Laser 515
 - 16.3.7 Tabelle ausgewählter Eigenschaften 523
- 16.4 Gepulste Laser 523
 - 16.4.1 Methoden zur Erzeugung von Laserpulsen 525
 - 16.4.2 Die Analyse von Einschwingvorgängen 526
 - 16.4.3 Die Gütemodulation 528
 - 16.4.4 Modenkopplung 531
 - 16.4.5 Optische Frequenzkämme 535

- 17 Halbleiteroptik 543**
 - 17.1 Halbleiter 544
 - 17.1.1 Energiebänder und Ladungsträger 544
 - 17.1.2 Halbleitermaterialien 547
 - 17.1.3 Die Konzentrationen von Elektronen und Löchern 554
 - 17.1.4 Erzeugung, Rekombination und Injektion 559
 - 17.1.5 Halbleiterübergänge 561
 - 17.1.6 Heteroübergänge 564
 - 17.1.7 Quantenbeschränkte Strukturen 565
 - 17.2 Wechselwirkungen von Photonen mit Ladungsträgern 569
 - 17.2.1 Photonenwechselwirkungen in Volumenhalbleitern 570
 - 17.2.2 Interbandübergänge in Volumenhalbleitern 571
 - 17.2.3 Absorption, Emission und Gewinn in Volumenhalbleitern 574
 - 17.2.4 Photonenwechselwirkungen in quantenbeschränkten Strukturen 578
 - 17.2.5 Quantenpunkt-Einzelphotonenemitter 579
 - 17.2.6 Der Brechungsindex 580

- 18 LED und Laserdioden 585**
 - 18.1 Lichtemittierende Dioden (LED) 586
 - 18.1.1 Injektionselektrolumineszenz 586
 - 18.1.2 Die Eigenschaften von LED 590
 - 18.1.3 Materialien und Aufbau von Bauelementen 596
 - 18.1.4 Siliciumphotonik 600
 - 18.1.5 Organische LED 601
 - 18.1.6 LED-Beleuchtungen 603
 - 18.2 Optische Halbleiterverstärker 607
 - 18.2.1 Gewinn und Bandbreite 608
 - 18.2.2 Der Pumpvorgang 612
 - 18.2.3 Heterostrukturen 613
 - 18.2.4 Quantenschichtstrukturen 614
 - 18.2.5 Superlumineszenzdioden 617
 - 18.3 Laserdioden 618
 - 18.3.1 Verstärkung, Rückkopplung und Schwingung 618
 - 18.3.2 Leistung und Wirkungsgrad 621
 - 18.3.3 Spektrale und räumliche Eigenschaften von Laserdioden 624

- 18.4 Quanteneinschlusslaser 627
 - 18.4.1 Einfach- und Mehrfachquantenschichtlaser 628
 - 18.4.2 Quantendraht- und Mehrfachquantendrahtlaser 631
 - 18.4.3 Quantenpunkt- und Mehrfachquantenpunktlaser 632
 - 18.4.4 Quantenkaskadenlaser 633
- 18.5 Mikroresonatorlaser 636
 - 18.5.1 Oberflächenemitter 637
 - 18.5.2 Mikrodisk- und Mikroringlaser 640
 - 18.5.3 Mikroresonatorlaser aus photonischen Kristallen 641
- 18.6 Nanoresonatorlaser 642

- 19 Photodetektoren 651**
 - 19.1 Photodetektoren 652
 - 19.1.1 Äußerer und innerer Photoeffekt 652
 - 19.1.2 Allgemeine Eigenschaften 655
 - 19.2 Photoleiter 660
 - 19.2.1 Intrinsische Materialien 660
 - 19.2.2 Dotierte Materialien 661
 - 19.2.3 Heterostrukturen 662
 - 19.3 Photodioden 663
 - 19.3.1 Die pn-Photodiode 663
 - 19.3.2 Die pin-Photodiode 665
 - 19.3.3 Heterostrukturen 666
 - 19.4 Lawinenphotodioden 669
 - 19.4.1 Konventionelle Lawinenphotodioden 669
 - 19.4.2 Dioden mit positions- und verlaufsabhängigen Parametern 675
 - 19.4.3 Einzelphotonen- und photonenzahlauflösende Detektoren 676
 - 19.5 Arraydetektoren 679
 - 19.5.1 Photodetektoren 679
 - 19.5.2 Ausleseelektronik 680
 - 19.6 Rauschen in Photodetektoren 681
 - 19.6.1 Photoelektronenrauschen 682
 - 19.6.2 Gewinnrauschen 685
 - 19.6.3 Schaltungsrauschen 690
 - 19.6.4 Signal/Rausch-Verhältnis und Empfindlichkeit analoger Empfänger 692
 - 19.6.5 Bitfehlerrate und Empfindlichkeit digitaler Empfänger 696

- 20 Akustooptik 705**
 - 20.1 Die Wechselwirkung von Licht und Schall 706
 - 20.1.1 Braggsche Beugung 706
 - 20.1.2 Die Theorie gekoppelter Wellen 711
 - 20.1.3 Braggsche Beugung von Strahlen 712
 - 20.2 Akustooptische Bauelemente 714
 - 20.2.1 Modulatoren 715
 - 20.2.2 Scanner 716
 - 20.2.3 Räumliche Schalter 718
 - 20.2.4 Filter, Frequenzschieber und Isolatoren 720
 - 20.3 Akustooptik von anisotropen Medien 721
 - 20.3.1 Akustische Wellen in anisotropen Materialien 721

XIV | Inhaltsverzeichnis

- 21 Elektrooptik 727**
 - 21.1 Grundlagen der Elektrooptik 728
 - 21.1.1 Pockels- und Kerreffekt 728
 - 21.1.2 Elektrooptische Modulatoren und Schalter 729
 - 21.1.3 Scanner 732
 - 21.1.4 Richtkoppler 733
 - 21.1.5 Räumliche Lichtmodulatoren 735
 - 21.2 Elektrooptik anisotroper Medien 737
 - 21.2.1 Kristalloptik: Eine kurze Wiederholung 737
 - 21.2.2 Pockels- und Kerreffekt 737
 - 21.2.3 Modulatoren 741
 - 21.3 Elektrooptik von Flüssigkristallen 742
 - 21.3.1 Phasenschieber und Modulatoren 742
 - 21.3.2 Räumliche Lichtmodulatoren und Displays 746
 - 21.4 Photorefraktivität 749
 - 21.4.1 Vereinfachte Theorie der Photorefraktion 750
 - 21.5 Elektroabsorption 753
- 22 Nichtlineare Optik 759**
 - 22.1 Nichtlineare optische Medien 760
 - 22.1.1 Die nichtlineare Wellengleichung 762
 - 22.2 Nichtlineare Optik zweiter Ordnung 763
 - 22.2.1 Frequenzverdopplung und Gleichrichtung 763
 - 22.2.2 Der elektrooptische Effekt 765
 - 22.2.3 Dreiwellenmischung 766
 - 22.2.4 Phasenbedingung und Abstimmungskurven 769
 - 22.2.5 Quasi-Phasen Anpassung 773
 - 22.3 Nichtlineare Optik dritter Ordnung 775
 - 22.3.1 Die Erzeugung der dritten Harmonischen und der optische Kerreffekt 775
 - 22.3.2 Selbstphasenmodulation, Selbstfokussierung und räumliche Solitonen 776
 - 22.3.3 Kreuzphasenmodulation 778
 - 22.3.4 Vierwellenmischung 778
 - 22.3.5 Optische Phasenkonjugation 780
 - 22.4 Nichtlineare Optik zweiter Ordnung: Die Theorie gekoppelter Wellen 782
 - 22.4.1 Die Gleichungen gekoppelter Wellen 782
 - 22.4.2 Frequenzverdopplung 784
 - 22.4.3 Optische Frequenzkonversion 786
 - 22.4.4 Optische parametrische Verstärkung und Oszillation 787
 - 22.5 Nichtlineare Optik dritter Ordnung: Die Theorie gekoppelter Wellen 789
 - 22.5.1 Vierwellenmischung 789
 - 22.5.2 Dreiwellenmischung und Erzeugung der dritten Harmonischen 791
 - 22.5.3 Optische Phasenkonjugation 792
 - 22.6 Anisotrope nichtlineare Medien 794
 - 22.6.1 Dreiwellenmischung in anisotropen nichtlinearen Medien zweiter Ordnung 795
 - 22.7 Dispersive nichtlineare Medien 796
 - 22.7.1 Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Integraltransformation 796
 - 22.7.2 Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Differentialgleichung 797

23	Ultraschnelle Optik	803
23.1	Eigenschaften von Pulsen	804
23.1.1	Zeitliche und spektrale Eigenschaften	804
23.1.2	Gaußpulse und gechirpte Gaußpulse	807
23.1.3	Räumliche Eigenschaften	808
23.2	Pulsformung und Kompression	810
23.2.1	Chirpfilter	810
23.2.2	Ausführungen von Chirpfiltern	816
23.2.3	Pulskompression	819
23.2.4	Pulsformung	819
23.3	Pulsausbreitung in optischen Fasern	821
23.3.1	Die optische Faser als Chirpfilter	821
23.3.2	Ausbreitung eines Gaußpulses in einer optischen Faser	823
23.3.3	Diffusionsgleichung für langsam variierende Einhüllende	827
23.3.4	Analogie zwischen Dispersion und Beugung	828
23.4	Ultraschnelle lineare Optik	831
23.4.1	Strahlenoptik	831
23.4.2	Wellen- und Fourieroptik	832
23.4.3	Optik von Strahlbündeln	834
23.5	Ultraschnelle nichtlineare Optik	838
23.5.1	Gepulste parametrische Prozesse	838
23.5.2	Optische Solitonen	842
23.5.3	Superkontinuumslicht	848
23.5.4	Die Erzeugung höherer Harmonischer und Attosekundenoptik	850
23.6	Pulsdetektion	854
23.6.1	Die Messung der Intensität	854
23.6.2	Die Messung der spektralen Intensität	858
23.6.3	Die Messung der Phase	859
23.6.4	Messung des Spektrogramms	861
24	Optische Verbindungen und Schalter	869
24.1	Optische Verbindungen	871
24.1.1	Die Verbindungsmatrix	871
24.1.2	Nichtreziproke Verbindungen: Isolatoren und Zirkulatoren	872
24.1.3	Brechende und beugende Verbindungen im freien Raum	873
24.1.4	Wellenleiterverbindungen	875
24.1.5	Nichtreziproke optische Verbindungen	876
24.1.6	Optische Verbindungen in Mikroelektronik und Computertechnik	876
24.2	Passive optische Router	881
24.2.1	Wellenlängenbasierte Router	881
24.2.2	Polarisations-, phasen- und intensitätsbasierte Router	885
24.3	Photonische Schalter	887
24.3.1	Ausführungen von räumlichen Schaltern	887
24.3.2	Realisierungen von photonischen räumlichen Schaltern	889
24.3.3	Volloptische räumliche Schalter	895
24.3.4	Wellenlängenempfindliche Schalter	902
24.3.5	Zeitbereichsschalter	904
24.3.6	Code- oder Paketschalter	906
24.4	Photonische Logikgatter	908
24.4.1	Bistabile Systeme	908
24.4.2	Das Prinzip der optischen Bistabilität	910
24.4.3	Bistabile optische Bauelemente	912

xvi | *Inhaltsverzeichnis*

25	Faseroptische Kommunikation	919
25.1	Faseroptische Komponenten	920
25.1.1	Optische Fasern	920
25.1.2	Quellen für optische Sender	925
25.1.3	Optische Verstärker	926
25.1.4	Detektoren für optische Empfänger	928
25.1.5	Integriert-photonische Schaltkreise	930
25.2	Faseroptische Nachrichtensysteme	931
25.2.1	Entwicklungsgeschichte faseroptischer Nachrichtensysteme	932
25.2.2	Die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Systemen	935
25.2.3	Dämpfungs- und dispersionsbegrenzte Systeme	937
25.2.4	Kompensation und Management von Dämpfung und Dispersion	942
25.2.5	Solitonoptische Kommunikation	944
25.3	Modulation und Multiplexing	945
25.3.1	Modulation	945
25.3.2	Multiplexing	947
25.3.3	Wellenlängenmultiplexing	948
25.3.4	Raummultiplexing	950
25.4	Kohärente optische Kommunikation	952
25.4.1	Der Heterodyndetektor	953
25.4.2	Der symmetrische Homodyndetektor	954
25.4.3	Kohärente Systeme	955
25.5	Faseroptische Netze	958
25.5.1	Netztopologien und Vielfachzugriff	958
25.5.2	Wellenlängenmultiplexnetze	961
	Anhang A Die Fouriertransformation	969
A.1	Die eindimensionale Fouriertransformation	969
A.1.1	Eigenschaften der Fouriertransformation	969
A.1.2	Beispiele	970
A.2	Zeitliche und spektrale Breite	970
A.2.1	Die quadratisch gemittelte Breite	970
A.2.2	Die leistungäquivalente Breite	972
A.2.3	1/e-, Halbwerts- und 3-dB-Breite	973
A.3	Die zweidimensionale Fouriertransformation	973
A.3.1	Eigenschaften	974
	Anhang B Lineare Systeme	977
B.1	Eindimensionale lineare Systeme	977
B.1.1	Lineare Systeme	977
B.2	Zweidimensionale lineare Systeme	979
	Anhang C Die Moden linearer Systeme	981
C.1	Die Moden eines diskreten linearen Systems	982
C.2	Die Moden eines kontinuierlichen durch einen Integraloperator beschriebenen Systems	982
C.2.1	Translationssymmetrie und harmonische Moden	983
C.3	Die Moden eines durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschriebenen Systems	983
C.4	Die Moden eines durch eine partielle Differentialgleichung beschriebenen Systems	984
C.4.1	Die Moden des Feldes/der Welle in einem homogenen Medium mit Randbedingungen	984
C.4.2	Moden von Feldern/Wellen in einem periodischen Medium	985

	Lösungen zu den Übungen	987
1	Strahlenoptik	987
2	Wellenoptik	992
3	Optik von Strahlbündeln	994
4	Fourieroptik	996
5	Elektromagnetische Optik	998
6	Polarisationsoptik	998
7	Optik photonischer Kristalle	999
9	Wellenleiteroptik	999
10	Faseroptik	1000
11	Resonatoroptik	1002
12	Statistische Optik	1003
13	Photonenoptik	1004
14	Licht und Materie	1005
15	Laserverstärker	1006
16	Laser	1008
17	Halbleiteroptik	1010
18	LED und Laserdioden	1012
19	Photodetektoren	1014
20	Akustooptik	1015
21	Elektrooptik	1016
22	Nichtlineare Optik	1016
23	Ultraschnelle Optik	1020
24	Optische Verbindungen und Schalter	1020
	Stichwortverzeichnis	1023

