

Gerhard K. Grau

Quantenelektronik

Optik und Laser

Mit 77 Abbildungen

Vieweg

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Grau, Gerhard K.

Quantenelektronik: Optik u. Laser. – 1. Aufl. –

Braunschweig: Vieweg, 1978.

ISBN 978-3-663-01911-4

ISBN 978-3-663-01910-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-01910-7

1978

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1978

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1978

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

ISBN 978-3-663-01911-4

Meinem Lehrer
Herrn Professor Dr. *Herbert W. König*
zu seinem 70. Geburtstag
in Dankbarkeit gewidmet

Inhalt

Einleitung	9
Physikalische Konstanten	14
Energie-Umrechnungstabelle	15
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Symbole und mathematischen Zeichen	16
1. Elektromagnetische Wellen und Schallwellen (klassische Behandlung)	57
1.1. Grundgleichungen elektromagnetischer Felder	57
1.1.1. Der Zusammenhang zwischen Polarisierung und Feldstärke	57
1.1.2. Die Grundgleichungen des unmagnetischen, ladungsfreien Dielektrikums	72
1.1.3. Polarisierbarkeit und lokale Feldstärke. Der strahlende Dipol	76
1.2. Moden des elektromagnetischen Strahlungsfeldes	83
1.2.1. Die Grundgleichungen des Strahlungsfeldes	83
1.2.2. Die Moden des Strahlungsfeldes im Würfel	86
1.2.3. Die Zerlegung des Strahlungsfeldes in ebene Wellen	92
1.2.4. Abzählen der Moden des Strahlungsfeldes	99
1.3. Moden des Schallfeldes	106
1.3.1. Grundbegriffe	106
1.3.2. Longitudinale Schwingungen der einatomigen Kette	110
1.3.3. Longitudinale Schwingungen der zweiatomigen Kette	122
1.3.4. Schwingungsmoden des dreidimensionalen Kristalls. Der "Impuls" von Gitterschwingungen	142
1.4. Kopplung von Moden	156
1.4.1. Normalmoden in homogenen Wellenleitern (allgemein)	156
1.4.2. Kopplung von Normalmoden (allgemein)	163
1.4.3. Moden homogener Wellenleiter für elektromagnetische Wellen	173
1.4.4. Modenanregung und Modenkopplung in Wellenleitern für elektromagnetische Wellen	194

1.4.5.	Kopplung des elektromagnetischen Feldes mit dem Schallfeld. Polaritonen	200
1.5.	Ebene Wellen im homogenen, isotropen Dielektrikum	208
1.5.1.	Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen. Goos-Hänchen-Effekt	208
1.5.2.	Anwendung auf optische Wellenleiter. Gekrümmte Grenzflächen	221
1.6.	Ebene Wellen in Kristallen	231
1.6.1.	Felder und Brechungsindizes ebener Wellen	231
1.6.2.	Reflexion und Brechung. Phasenanpassung	244
1.7.	Wellen in inhomogenen, isotropen Medien	250
1.7.1.	Geometrische Optik. Lichtstrahlen	250
1.7.2.	Skalare Optik. Evaneszente Felder	259
1.7.3.	Beugung in homogenen und inhomogenen Medien	269
1.8.	Abbildungen und paraxiale Lichtstrahlen	278
1.8.1.	Abbildungen. Die Strahlmatrix	278
1.8.2.	Das Liouvillesche Theorem. Abbildungen mit Paraxialstrahlen. Das Beugungsintegral	285
1.9.	Gaußsche Strahlen	302
1.9.1.	Definition und Eigenschaften Gaußscher Strahlen	302
1.9.2.	Die Transformation Gaußscher Strahlen durch optische Systeme	314
1.9.3.	Linsenartige Medien	319
1.9.4.	Entwicklung nach $TEM_{m\ell}$ -Moden. Anpassung	324
1.9.5.	Vektorielle Gaußsche Strahlen	326
1.10.	Optische Resonatoren und periodische Leitungen	329
1.10.1.	Eigenmoden von Resonatoren und periodischen Leitungen	329
1.10.2.	Stabile Resonatoren	335
1.10.3.	Instabile Resonatoren	344
1.10.4.	Die Integralgleichung optischer Resonatoren	351
1.11.	Nichtlineare Optik	357
1.11.1.	Nichtlineare Polarisierungen für Felder mit diskretem Frequenzspektrum	357

1.11.2.	Der lineare elektrooptische Effekt	364
1.11.3.	Die Differentialgleichungen der nichtlinearen Optik	367
1.11.4.	Erzeugung der zweiten Harmonischen	369
1.11.5.	Parametrische Effekte	378
1.11.6.	Raman- und Brillouineffekt. Polaritonen	384
2.	Quantentheorie der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie	391
2.1.	Quantisierung der freien Felder	391
2.1.1.	Quantisierung des elektromagnetischen Strahlungsfeldes	391
2.1.2.	Kohärente Zustände des Strahlungsfeldes	396
2.1.3.	Quantisierung des Schallfeldes	403
2.2.	Operatoren für die Wechselwirkung von Feldern mit Ladungen	405
2.2.1.	Die Wechselwirkung zwischen Elektronen und elektromagnetischem Feld	405
2.2.2.	Die Wechselwirkung zwischen Elektron und elektromagnetischem Feld in Dipolnäherung	408
2.2.3.	Die Wechselwirkung von Elektronen mit Schallfeldern	414
2.3.	Störungsrechnung	417
2.3.1.	Diracsche Störungstheorie	417
2.3.2.	Störungsrechnung erster Ordnung	419
2.3.3.	Störungsrechnung höherer Ordnung. Graphen	423
2.3.4.	Störungsrechnung mit der Dichtematrix	430
2.4.	Emission und Absorption von Licht durch Ladungen	437
2.4.1.	Emission und Absorption durch freie Ladungen	437
2.4.2.	Emission durch bewegte gebundene Ladungen: Doppler-Effekt	438
2.4.3.	Induzierte Emission und spontane Emission	441
2.4.4.	Induzierte und spontane Emission in einen Modus	445
2.4.5.	Beziehung zu den Einstein-Koeffizienten	450
2.4.6.	Der ideale Photodetektor	454

2.5.	Verstärkung elektromagnetischer Wellen in Lasermedien	458
2.5.1.	Wellenfortpflanzung in gepumpten Medien	458
2.5.2.	Homogene Linien	464
2.5.3.	Inhomogene Linien	467
2.5.4.	Bilanzgleichungen	472
2.6.	Kohärente Wechselwirkungen	476
2.6.1.	Wechselwirkung eines 2-Niveau-Systems mit einem starken elektromagnetischen Feld	476
2.6.2.	Superstrahlung	480
2.6.3.	Das Photonenecho	485
2.6.4.	Kohärente Fortpflanzung	488
2.7.	Nichtlineare Optik	494
2.7.1.	Erzeugung der zweiten Harmonischen	494
2.7.2.	Der Ramaneffekt in nichtkristallinen Substanzen	501
3.	Generatoren für kohärente Strahlung	513
3.1.	Grundlagen des Laseroszillators	513
3.1.1.	Die Anschlagbedingung	514
3.1.2.	Die Schwingfrequenzen des Lasers	516
3.1.3.	Maximale Ausgangsleistung des Lasers	518
3.1.4.	Abhängigkeit der Leistung von der Inversion	521
3.1.5.	Die Linienbreite der Emission	524
3.1.6.	Laseroszillator mit verteilter Rückkopplung	527
3.2.	Beeinflussung der Dynamik von Lasern	533
3.2.1.	Die Bilanzgleichungen	533
3.2.2.	Güteschaltung von Lasern	534
3.2.3.	Relaxationsschwingungen. Lichtmodulation über die Pumpe	539
3.2.4.	Kopplung der Moden eines Lasers mit inhomogener Linie	543
3.2.5.	Modenkopplung in Lasern mit homogener Linie	550
3.3.	Spezielle Laser	553
3.3.1.	Der He-Ne-Laser	553

3.3.2.	Der CO ₂ -Laser	559
3.3.3.	Der Neodym-Laser	565
3.3.4.	Der Farbstoff-Laser	571
3.3.5.	Der Halbleiterlaser	575
3.4.	Laser mit interner Frequenzumsetzung	591
3.4.1.	Laser mit interner Frequenzverdopplung	591
3.4.2.	Der parametrische Oszillator	594
3.4.2.	Der Ramanoszillator	607
4.	Eigenschaften, Modulation und Detektion von Laserlicht	610
4.1.	Eigenschaften von Laserlicht	610
4.1.1.	Korrelationstensoren des elektromagnetischen Feldes	610
4.1.2.	Der Polarisationszustand elektromagnetischer Felder	619
4.1.3.	Die statistischen Operatoren einiger wichtiger Felder	625
4.2.	Lichtmodulation	631
4.2.1.	Der lineare elektrooptische Effekt	631
4.2.2.	Der elastooptische Effekt	641
4.2.3.	Lichtmodulatoren für hohe Modulationsbandbreiten	651
4.3.	Empfang von Lichtsignalen	660
4.3.1.	Die gleichzeitige Messung nichtkommutierender Observabler	661
4.3.2.	Die Verteilung der Photoelektronen eines makroskopischen Detektors	668
4.3.3.	Das Leistungsspektrum des Photostroms	678
4.3.4.	Die äquivalente Rauschleistung einiger Empfangsverfahren	683
Anhänge		
A.1.	Schreibweise von Vektoren	688
A.2	Analytische Signale. Harmonische Analyse von Funktionen des Ortes und der Zeit	690

A.3.	Die Bewegungsgleichungen nach Lagrange und Hamilton. Poissonklammern	701
A.4.	Schemata der $d_{i\ell}$ -Koeffizienten der nichtlinearen Optik	708
A.5.	Zusammenstellung von Formeln aus der Quantentheorie	714
A.5.1.	Unitärer Vektorraum	714
A.5.2.	Orts- und Impulsoperator	719
A.5.3.	Dynamik von Quantensystemen	721
A.5.4.	Der harmonische Oszillator	726
A.5.5.	Fermionenoperatoren	727
A.5.6.	Drehimpulsoperatoren	729
A.6.	Anregung und Kopplung von Resonatormoden	731
A.7.	Elektronen im Kristall	733
A.7.1.	Eigenfunktionen und Eigenwerte des Energieoperators	733
A.7.2.	Induzierte und spontane Übergänge zwischen zwei Bändern	738
A.8.	Korrelationsfunktion und Leistungsspektrum	742
	Literaturverzeichnis	746
	Sachwortverzeichnis	774