

Henning Fouckhardt

Halbleiterlaser

Henning Fouckhardt

Halbleiterlaser

unter Verwendung Fourier-optischer Methoden

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Prof. Dr. rer. nat. Henning Fouckhardt

1959 in Hannover geboren. 1978 Abitur an der Humboldtschule Hannover. 1979 bis 1984 Physikstudium an der Universität Göttingen (Diplom bei Prof. Dr. Werner Lauterborn). Dazwischen von 1981 bis 1982 Studium 'Electrical Engineering and Computer Sciences' (EECS) an der University of California San Diego (UCSD), USA. 1984 bis 1985 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Dritten Physikalischen Institut der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen. 1985 bis 1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochfrequenztechnik im Fachbereich Elektrotechnik der TU Braunschweig bei Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling; Forschungsarbeit über zeitliche optische Schalter (Modulatoren) aus III-V-Halbleitern. 1987 Promotion in Physik an der Universität Göttingen. 1988 bis 1989 Postdoc bei Bell Communications Research (Bellcore) Inc. in Red Bank, New Jersey, USA; Forschungsarbeit über nichtlinear-optische, räumliche optische Schalter (Richtkoppler) in Zweikernglasfasern. 1989 bis 1991 Mitarbeiter im Bereich Forschung und Entwicklung der Division Analytische Messtechnik der Hewlett-Packard GmbH in Waldbronn bei Karlsruhe in der damaligen Projektgruppe von Fred Strohmeier; Arbeiten über optische Detektoren für die Kapillarelektrophorese. 1991 bis 1996 Professor am Institut für Hochfrequenztechnik im Fachbereich Elektrotechnik der TU Braunschweig; Leiter der Abteilung Optoelektronik. Seit 1996 Leiter der Arbeitsgruppe Integrierte Optoelektronik und Mikrooptik im Fachbereich Physik der TU Kaiserslautern und damit Inhaber einer der Lehrstühle für Experimentalphysik und Technische Physik.

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ulrich Sandten | Kerstin Hoffmann

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik GmbH, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1721-1

Fred Strohmeier gewidmet

Vorwort und Danksagung

Seit 1962 haben Halbleiterlaser für eine stille Revolution gesorgt und auf ihrem Siegeszug schon andere Laserarten verdrängt. Aber es bedurfte zahlreicher Verbesserungen der Halbleitertechnologie (Epitaxie) und im Verständnis der Halbleiterlaser-Physik ('double heterojunction', Satz von Bernard und Duraffourg), bevor Anfang der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts eine rasante und sehr erfolgreiche Entwicklung einsetzen konnte.

Gleichwohl darf nicht übersehen werden, dass unter der Überschrift „Halbleiterlaser“ Laser mit sehr unterschiedlichen Kenndaten zusammengefasst werden - etwa so, als würde man einen Formel ITM-Rennwagen und ein Bobby-CarTM unter der Überschrift „Fahrzeug“ in einem Atemzug nennen. Welches Materialsystem zur Herstellung eines Halbleiterlasers verwendet wird, wird oft von der gewünschten Emissionswellenlänge bestimmt. Und je nach dem Material sind die Laserqualitäten sehr unterschiedlich. So können zum Beispiel im Materialsystem AlGaAs (Aluminium-Gallium-Arsenid) selbst *einfache* Laserstrukturen durchaus Durchschnittsausgangsleistungen im hohen Milliwatt-Bereich bei Emissionswellenlängen um 800 nm zeigen, während im Antimonid-Materialsystem AlInGaAsSb (Aluminium-Indium-Gallium-Arsen(id)-Antimonid) Leistungen von einigen Milliwatt bei Emissionswellenlängen um 2 μm durchaus positiv zu sehen sind.

Die geringeren Qualitäten bei einigen Lasermaterialien haben einerseits mit Problemen der Technologie (instabile Materialzusammensetzungen, Schwierigkeiten in der Handhabung) sowie geringerer Erfahrung mit den Materialien zu tun. Andererseits sind sie auch auf prinzipielle physikalische Probleme zurück zu führen, wie zum Beispiel eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Abgabe der Anregungsenergie der Ladungsträger *ohne* Aussendung von Licht (in nicht-strahlenden Rekombinationsprozessen).

Diese wenigen Erklärungen zeigen bereits, dass viele physikalische, aber auch zahlreiche technologische Aspekte die Thematik Halbleiterlaser bestimmen. Beide Seiten sollen im Teil II den Kern des vorliegenden Buches bilden. Unter Halbleiterlaser-Technologie sollen sowohl die epitaktische als auch die lithografische Präparation der Laser verstanden werden. Beispiele sind dabei nicht immer nur auf Halbleiterlaser, sondern manchmal auch auf andere Bauelemente der integrierten Optoelektronik, wie etwa Fotodioden, bezogen.

Innerhalb des Themenkomplexes dieses Buchs sowie innerhalb der gesamten Physik sind als oft unterschätzte Werkzeuge die Konzepte im Umfeld der Fourier-Transformation, Fourier-Optik, Raumfrequenzen, Raumfrequenzfilterung an vielen Stellen fast unerlässlich. Daher wird diese Thematik als Teil I vorangestellt.

Der vorliegende Text entstand im Wesentlichen aus den Notizen zu meiner vierstündigen Vorlesung „Fourier-Optik und integrierte Optoelektronik“ und anderen meiner Spezialvorlesungen im Fachbereich Physik der Technischen Universität Kaiserslautern, wobei

Vorwort und Danksagung

die Vorlesungen nicht vollständig abgebildet werden können. Manche Unterthemen werden im Buch vollständig oder fast vollständig ausgespart: etwa organische Halbleiter, die Herstellung von anorganischen Halbleitersubstraten aus Mineralien der Erdkruste, Halbleiter-Laserverstärker oder das dynamische Verhalten von Halbleiterlasern im GHz-Bereich, dessen Verständnis für die optische Nachrichtentechnik relevant ist, ein zwar wichtiges Anwendungsfeld, aber doch nur eines. Auch leuchtendes Silizium und Silizium-Raman-Laser finden keinen Eingang in dieses Buch. Der Autor hofft, durch diese „schlanke“ Darstellungsweise auch Einsteigern in das Gebiet einen anschaulichen Weg zu ebnet.

Einige Textpassagen und von Andreas Schürmann angefertigte Abbildungen aus meinem früheren im Teubner-Verlag erschienenen Buch „Photonik“ sind für das vorliegende Buch modifiziert übernommen worden.

Zahlreiche Menschen haben zu der Entstehung dieses Buches beigetragen. Ihnen allen sei sehr herzlich gedankt. Insbesondere möchte ich Udo Schmittat, Birgit Krupp, Dr. Roland Freye, Dr. Sandra Wolff, Dr. Christoph Döring, Dr. Goetz Hoffmann, Dr. Dirk Hoffmann, Dipl.-Phys. Thomas Löber (bei Drucklegung dieses Buchs im Endspurt seiner Promotionszeit), Dr. Spheh Paul und Dr. Jan Oliver Drumm für ihre Arbeiten danken, die teilweise in diesem Buch Erwähnung finden. Aber auch allen anderen ehemaligen und jetzigen Mitarbeitern/innen der Gruppe, deren Arbeiten nicht im Umfeld von Halbleiterlasern liegen, möchte ich für ihr Engagement danken. Es hat sich eine tolle Arbeitsgruppe gebildet, die 'team work' in jeder Hinsicht lebt.

Ganz besonders möchte ich mich bei Prof. em. Dr. Wolfgang Demtröder bedanken, der sich - trotz seiner zahlreichen Aktivitäten und Verpflichtungen - Zeit genommen hat, den Text dieses Buches korrekturlesen.

Mein Dank gilt auch Kerstin Hoffmann und Ulrich Sandten vom Lektorat „Naturwissenschaften - Informatik - Energie&Umwelt“ des Vieweg+Teubner-Verlags, Wiesbaden, sowie Ulrike Klein, freie Lektorin in Berlin, für ihre unbürokratische Abwicklung des Projekts und freundliche Unterstützung.

'And last, but by no means least': Meiner Familie, Barbara und Lea sowie Katze Lilly, möchte ich für die regelmäßige Erinnerung daran, dass es noch Wichtigeres als die Uni gibt, und für ihre Sicht der Welt und des Lebens danken.

Henning Fouckhardt
Kaiserslautern, 11.4.2011

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	VII
I. FOURIER-OPTIK	1
1. Grundlagen der Wellenoptik	3
1.1. Hintergrund und Motivation, Huygenssches Prinzip und Fourier-Zerlegung	3
1.2. Darstellung realer Wellen	6
1.3. Maxwell-Gleichungen, Wellengleichung, Fresnelsche Formeln	7
1.3.1. Maxwellsche Gleichungen und Wellengleichung	7
1.3.2. Fresnelsche Formeln	9
1.4. Gaußsche Strahlenbündel/Wellen	19
2. Kirchhoffsches Beugungsintegral, Raumfrequenzen	23
2.1. Von der skalaren zur vektoriellen Theorie, Helmholtz-Gleichung	23
2.2. Greensches Theorem, Helmholtz-Kirchhoff-Integraltheorem	25
2.3. Sommerfeldsche Strahlungsbedingung	27
2.4. Fresnel-Kirchhoffsche Beugungsgleichung	29
2.5. Feldverteilung im Fernfeld	31
3. Beugung	37
3.1. Vorbemerkungen, Fern- und Nahfeld	37
3.2. Beugung am Spalt und an anderen Hindernissen	38
3.3. Beugungsscheibchen, Beugungsbegrenztheit	42
3.4. Fernfeld- versus Nahfeld-Beugung	44
3.5. Kohärenz, Kontrast, partiell kohärentes Licht	44
3.6. Nanooptische Überwindung der Beugungsbegrenztheit	50
3.6.1. Einordnung der Möglichkeiten nach Beleuchtungs-/Detektionsort .	50
3.6.2. Plasmonen-Sensorik	53
4. Fourier-Transformation	55
4.1. Eindimensionale (1D-) Fourier-Transformation	55
4.1.1. Gleichungen	55
4.1.2. Wiener-Khinchin-Theorem	55
4.1.3. FTIR-Spektrometer	56
4.2. Zweidimensionale (2D-) Fourier-Transformation in der Optik	57
4.2.1. Gleichungen	57
4.2.2. Eigenschaften der 2D-Fourier-Transformation, wichtige Operationen	58

4.2.3. Einige Beispiele für 2D-Fourier-Transformierte	60
4.3. Dreidimensionale (3D-) Fourier-Transformation	61
4.3.1. Gleichungen	61
4.3.2. Der k -Raum in der Röntgen-Kristallgitter-Strukturanalyse	62
4.3.3. Laue- und Bragg-Beugungsbedingungen; Ewald-Kugel-Konstruktion	62
4.3.4. Laue-, Drehkristall-, Pulververfahren und Röntgen-Diffraktometrie	64
4.3.5. Kristallstrukturanalyse durch Elektronenbeugung	68
5. Kohärente Fourier-optische Filterung	73
5.1. Abbildung versus $4f$ -Aufbau, Raumfrequenzfilterungen	73
5.2. Ergebnisse aus der Theorie linearer Systeme	77
5.3. Optische Transferfunktion	79
5.4. Dunkelfeld-, Phasenkontrast- und Schlierenverfahren	80
II. HALBLEITERLASER	85
6. Überleitung von der Fourier-Optik zu Halbleiterlasern	87
6.1. Kurzer Überblick über die Thematik Halbleiterlaser	87
6.2. Was nützen Fourier-optische Methoden hier?	88
7. Materialien, Verstärkung	91
7.1. Vorbemerkungen	91
7.2. Absorption, stimulierte und spontane Emission	92
7.3. Absorption und Brechung, Kramers-Kronig-Relationen	96
7.3.1. Dielektrische Polarisierbarkeiten	96
7.3.2. Kramers-Kronig-Relationen	100
7.3.3. Absorption in Halbleitern	103
7.4. Energiebänder, Zustandsdichte, Fermi-Verteilung, Ladungsträgerdichte	104
7.5. Ladungsträgerverluste in Halbleitern	106
7.6. Verspannte Halbleiter	109
7.7. AlGaAs, InGaAsP, AlInGaN, AlGaInAsSb, GaInNAs(Sb)	110
7.8. Fabry-Perot-Resonator und Verstärkung	113
7.9. Ladungsträgergeneration/-rekombination in der aktiven Zone	116
7.10. Spontane Photonenerzeugung und Leuchtdioden	118
7.11. Die Laserratengleichungen allgemein	119
7.12. Halbleiterlaser-Ratengleichungen und Verstärkungskoeffizient	123
8. Heteroübergänge und Doppelheterostrukturen, pn-Übergänge	125
8.1. Heteroübergänge	125
8.2. Dotierung und pn-Übergänge	125
8.3. Hetero-pn-Übergänge und Doppelheterostrukturen; Historie	129
8.4. BH-Laser - 'carrier, current, photon confinement'	132
8.5. Satz/Bedingung von Bernard und Duraffourg	134

9. Optische Wellenleitung	137
9.1. Wellenleitung durch Totalreflexion	137
9.1.1. Grundlagen	137
9.1.2. Filmwellenleitung, effektiver Brechungsindex	137
9.1.3. Filmlinsen und Streifenwellenleitung	146
9.1.4. Wellenleiterkrümmungen und -knicke	148
9.2. EIM und FFT-BPM	149
9.2.1. Effektiv-Index-Methode (EIM)	149
9.2.2. 'Fast Fourier transform beam propagation method' (FFT-BPM)	150
9.3. Wellenleitung in photonischen Kristallen (PC)	154
9.3.1. ARROW-Wellenleiter	154
9.3.2. Grundlagen photonischer Kristalle	156
9.3.3. PC-Wellenleitung	164
10. Technologie	167
10.1. Epitaxie (Vertikalstrukturierung)	167
10.1.1. Molekularstrahlepitaxie mit Elektronenbeugung	168
10.1.2. Kritische epitaktische Schichtdicke	169
10.1.3. Reflexionsanisotropie-Spektroskopie	171
10.2. Lithografie (Transversalstrukturierung)	173
10.2.1. Fotolithografie	173
10.2.2. Bemerkungen zur Elektronenstrahlolithografie	175
11. Halbleiterlaser-Resonatoren	177
11.1. Laserresonatorstabilität	177
11.2. Transmissionsmatrix	178
11.3. Laserschwellbedingung	180
11.4. Kanten-/Facettenemittierende Laser	183
11.4.1. Überblick	183
11.4.2. Laser mit verteilter Rückkopplung (DFB- und DBR-Laser)	184
11.5. Oberflächenemittierende DBR-Laser	187
11.5.1. ... mit zwei integrierten Bragg-Spiegeln (VCSEL)	187
11.5.2. ... optisch gepumpt mit einem externen Spiegel (VECSEL)	189
12. Lasereigenschaften	191
12.1. Laserkennlinien und charakteristische Laserparameter	191
12.2. Die „Ingenieursgleichung“ des Laserdesigns	195
12.3. Hinweise zur Modulation von Halbleiterlasern	197
13. Aktive Zonen mit quantenmechanischer Einengung	201
13.1. Schrödinger-Gleichung, Bloch-Theorem, Einhüllende	201
13.2. Quantenstrukturen	204
13.3. Quantenfilme	205
13.4. Fermis Goldene Regel	209

13.5. Übergangsmatrixelement, Impulsmatrixelement	215
13.6. Übergitter und Minibänder	217
13.7. Quantenfilme für eine Ladungsträgerart - Übergitter sonst	222
13.8. Quantendrähte und Quantenpunkte	224
13.9. Stranski-Krastanov-(GaAsSb-)Quantenpunkt-Wachstum	226
14. Quantenkaskadenlaser	235
14.1. Grundidee der Intraband- (Typ I-) Quantenkaskadenlaser	235
14.2. Grundidee der Interband- (Typ II-) Quantenkaskadenlaser	237
14.3. Weitere Details zu (Typ I-) Quantenkaskadenlasern	239
14.3.1. Übergitter für die aktiven Schichten und Injektor-lose Strukturen	239
14.3.2. Terahertz-Emitter und Plasmonen-Wellenleiter	240
15. Hochleistungs-Halbleiterlaser	243
15.1. Überblick	243
15.2. Breitstreifenlaser	243
15.2.1. Grundeigenschaften, Verstärkungsfilamentation	243
15.2.2. Fourier-optische Transversalmodenselektion (FO-TMS)	244
15.2.3. Longitudinal-Modenkopplung mit FO-TMS	249
15.3. Einige Hinweise zu Laserdiodenarrays	250
16. Literaturverzeichnis	253
Index	261