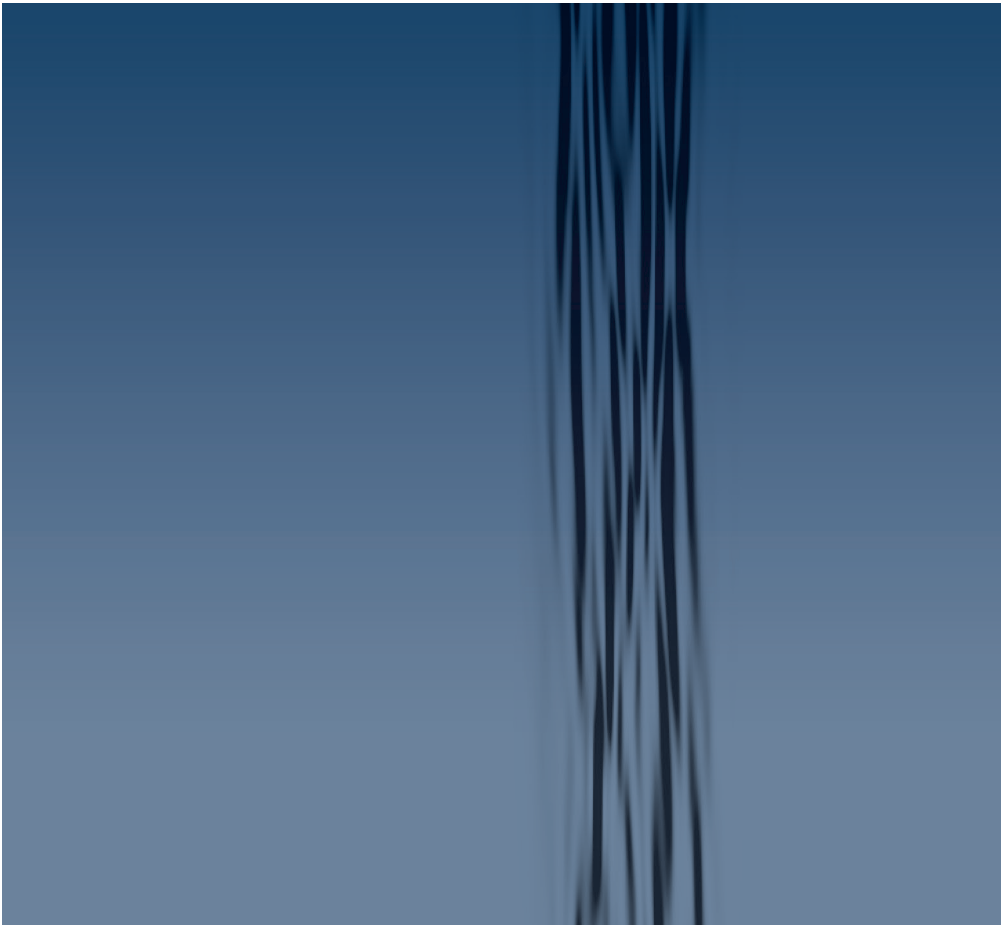

Modeling of the Lateral Emission Characteristics of High-Power Edge-Emitting Semiconductor Lasers

Carlo Holly

Fraunhofer ILT

LLT Chair for Laser Technology

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Modeling of the Lateral Emission Characteristics of High-Power Edge-Emitting Semiconductor Lasers

Modellierung der lateralen Abstrahlcharakteristik von Hochleistungsdiodenlaser-Kantenemittern

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Carlo Holly

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle

Tag der mündlichen Prüfung: 15. April 2019

Berichte aus der Lasertechnik

Carlo Holly

Modeling of the Lateral Emission Characteristics of High-Power Edge-Emitting Semiconductor Lasers

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6923-5
ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgements

The initiative for this work, and for the development of numerical models for the design and analysis of semiconductor lasers was given at the Fraunhofer-Institute for Laser Technology (ILT) and the Chair of Laser Technology (LLT) at the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen University in the scope of the projects *SpektraLas* (Contract 13N9729) and *FreeLas* (Contract 13N10849), which where both supported by the German Federal Ministry of Education and Research (German: Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF). In close cooperation between TRUMPF Photonics Inc., the Chair of Laser Technology (LLT-RWTH), and the Fraunhofer ILT the simulation software was further extended with the goal to reproduce and predict lateral emission characteristics for industrial high-power semiconductor lasers. I continued the development and finished this dissertation at TRUMPF Photonics Inc. in Cranbury (New Jersey) in parallel to my role as Semiconductor Laser Design Engineer. I would like to thank my colleagues at TRUMPF Photonics Inc., my former colleagues at the Chair of Laser Technology (LLT-RWTH), and Fraunhofer ILT for the friendly work environment and inspiration for this thesis.

I would like to express my sincere gratitude to Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe for the supervision of this thesis, his trust in my research- and teaching-activities, and his positive, inspiring guidance. In addition, I thank Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Günther Tränkle for taking over the role as the second reader, and his insightful comments to this work, and to Univ.-Prof. Ph. D. Marek Behr for taking over the role of the chair of the dissertation committee.

My sincere thanks also goes to Dr. rer. nat. Hagen Zimer, Dr. Stewart McDougall, and Dr. rer. nat. Stefan Heinemann for their support, the opportunity to continue the work on this thesis and semiconductor laser modeling at TRUMPF Photonics Inc., and for hours of valuable scientific and technical discussions, which greatly pushed me and this thesis forward.

For the scientific freedom and trust to start the modeling activities and their support in initiation and acquisition of the initial diode laser modeling project, my sincere thanks to Dipl.-Ing. Hans-Dieter Hoffmann and Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Martin Traub. In addition, I thank M. Sc. Martin Adams, M. Sc. Florian Rackerseder, Dipl.-Phys. Thomas Schwarz, and M. Sc. Simon Rauch for their great scientific contributions and many stimulating discussions about simulation of diode lasers.

For their constant support and encouragement I would like to sincerely thank my parents, and my sisters. I express my deep gratitude to my wife - Thank you for moving halfway around the world to support me.

New York, April 2019 Carlo Holly

Abstract

In this work, numerical methods for the simulation of broad-area edge-emitting semiconductor lasers are presented. Frequency-domain and time-domain models are employed to predict the propagation of the filamented optical field in the semiconductor laser and determine emission characteristics including near-field and far-field profiles, beam width, divergence angle, and power over current. The models utilize wave-optical beam propagation and account for the interaction of the optical field with the spatial (and temporal) varying carrier and temperature distributions inside the semiconductor laser cavity. Once calibrated, the frequency-domain model is utilized to predict emission characteristics of single emitters and laser arrays, which differ in geometrical properties (contact width, cavity length or emitter pitch), epitaxial structure or facet reflectivity. By comparison with experimental data for eight laser designs, which include single-emitter and laser arrays it is demonstrated that the frequency-domain model allows computation of lateral far-field angles and near-field widths as a function of current and thermal state for edge-emitting diode lasers.

An opto-mechanical model is derived to compute the degree of polarization for packaged single emitter or laser arrays. The mechanical strains, induced by the soldering process, heating of the device during operation and intrinsic lattice mismatch in the device, are considered. The ratio of the shear strain and the lateral (and vertical) strain component(s) determines the degree of polarization.

In addition to the frequency-domain model, a time-domain model based on the traveling-wave method is implemented and employed to compute the optical propagation in the QW-plane of an edge-emitting diode laser, including carrier- and temperature-induced refractive index changes. The evolution of the optical field along the cavity is computed iteratively for transverse slices. Alongside with the optical propagation, the carrier diffusion equation and an auxiliary equation for the material polarization are solved. The results obtained with the time-domain model obey similar filamented field profiles like the ones obtained with the frequency-domain model.

In summary, the numerical model acts as a *digital-twin* of the real device and with the simulation tools presented in this work the lateral emission characteristics for edge-emitting laser devices can be predicted to the extent needed to make design decisions.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden numerische Methoden zur Simulation von Breitstreifen-Kantenemitter Halbleiterlasern entwickelt und untersucht. Dazu werden Modelle in der Frequenz-Domäne und in der Zeit-Domäne herangezogen, um die Propagation des filamentierten optischen Feldes im Halbleiterlaser vorherzusagen und Abstrahlcharakteristiken, wie Nah- und Fernfeldprofile, Strahlbreite, Divergenzwinkel und Ausgangsleistung über Betriebsstrom zu bestimmen. Für die Modelle werden wellenoptische Propagationsmethoden eingesetzt und die Kopplung des optischen Feldes mit dem räumlich (und zeitlich) variierenden Ladungsträger- und Temperatur-Verteilungen in der Kavität des Halbleiterlasers berechnet. Nach Kalibration werden, basierend auf dem Model in der Frequenz-Domäne, Abstrahlcharakteristiken von Einzelemittern und von Emittern aus Laserbarren berechnet, die sich in geometrischen Eigenschaften (Injektionskontaktbreite, Kavitätslänge oder Emitterabstand), der epitaktischen Struktur oder der Facettenreflektivität unterscheiden. Durch Vergleich mit experimentellen Daten von acht unterschiedlichen Diodenlasern wird demonstriert, dass das Model in der Frequenz-Domäne die Vorhersage von lateralen Fernfeldwinkeln und Nahfeldbreiten in Abhängigkeit des Betriebsstroms und der Temperatur des Kantenemitters erlaubt.

Um den Polarisationsgrad von Einzelemittern oder Laserbarren zu berechnen, wird ein opto-mechanisches Model entwickelt. Unter denen in Betracht gezogenen mechanischen Einflüssen sind Verspannungen durch den Lötprozess, Aufheizen des Lasers im Betrieb und durch unterschiedliche Gitterkonstanten im Halbleiter. Das Verhältnis von Scherspannung zu lateralen (und vertikalen) Spannungskomponenten bestimmt den Polarisationsgrad des emittierten Feldes.

Zusätzlich zum Model in der Frequenz-Domäne, wird basierend auf der *traveling-wave* Methode ein Zeit-Domänen Model implementiert und angewendet, um die räumliche und zeitliche Entwicklung des optischen Feldes in der Quantengraben-Ebene eines Halbleiterlaser-Kantenemitters zu berechnen. Dabei umfassen die Berechnungen die durch Ladungsträger und Temperatur induzierten Brechungsindexvariationen. Die Evolution des optischen Feldes entlang der Laserkavität erfolgt iterativ für transversale Querschnitte. Die Ergebnisse, die mit dem Model in der Zeit-Domäne berechnet werden, gleichen denen des Frequenz-Domänen Modells im Hinblick auf Filamentierung des optischen Feldes.

Zusammenfassend agiert das numerische Modell als *Digitaler-Zwilling* des realen optoelektronischen Bauteils. Mit den Simulationswerkzeugen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden, können die lateralen Abstrahlcharakteristiken von Hochleistungsdiodenlaser-Kantenemittern so präzise vorhergesagt werden, dass in Zukunft Entscheidungen für neue Designs aus der Simulation abgeleitet werden können.

Contents