

Diss. ETH No. 14694

Modeling the Optical Processes in Semiconductor Lasers

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Science

presented by

ANDREAS WITZIG

Dipl. El.-Ing. ETH

born 26 10 1973

citizen of Laufen-Uhwiesen, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Wolfgang Fichtner, examiner
Prof. Dr. Hans Melchior, co-examiner

2002

Abstract

In modern telecommunication systems, semiconductor lasers are key components. This doctoral thesis presents a physics-based approach to simulate active optoelectronic devices. It covers the analysis of a broad range of devices, including Edge-Emitting Lasers (EELs) and Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs). A numerical solver for the optical field has been implemented, and an interface to an electro-thermal device simulator has been built. Contributions have been made in the formulation of the physical models, and in the coupling scheme between electronics and optics.

For EELs, the optical field can be separated into transverse waveguide modes and longitudinal cavity modes. The transverse eigenmodes have been solved in 2D applying a general but efficient finite-element method. The longitudinal modes have been calculated using the transfer-matrix method. For VCSELs, a separation into transverse and longitudinal direction is not possible. Instead, the fields can be expanded into a Fourier series and the eigenmodes are solved in 2D.

In addition to the finite-element solution of the optical eigenvalue problem, the finite-difference time-domain method has been applied for the calculation of the electromagnetic wave propagation. In a post-processing step, the optical eigenmodes of general VCSELs have been obtained. Furthermore, the spontaneous emission coupling factor is calculated rigorously by a full-3D treatment of an EEL structure.

The work presented here has to be seen in the context of the activities of the Optoelectronics Modeling Group at the Integrated Systems Laboratory (IIS) of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich, Switzerland. In a joint effort, this group is building a com-

prehensive physics-based device simulation tool for optoelectronics.

Optoelectronic device simulation is a scientific challenge. Numerous questions need to be answered both on the theory of numerical modeling and on the applied device physics. In addition, two aspects have been important for the successful implementation of the laser simulator: First, a close collaboration with device manufacturers has allowed to share detailed device specifications as well as measurement results. With this data, the simulator could be validated and calibrated. The industrial device designers, in return, have got access to the simulator at an early stage of the software development. Second, a professional software environment is essential for both the development and the application of the laser models. The simulator developed in the Optoelectronics Modeling Group is built as an extension to the general device and circuit simulator DESSIS-ISE. The work of many PhD theses has provided the scientific basis of this simulator. Since the spin-off of ISE Integrated Systems Engineering AG from IIS in 1993, the computer program has been commercialized. In consequence, the new laser simulator is readily equipped with state-of-the-art tools for geometry editing, mesh generation, and visualization.

In numerous discussions with project partners and users of device simulation software, the gap between numerics and industrial device design became evident. This work bridges theory and application. It provides an effective means for the numerical calculation of the optical fields in laser cavities and incorporates them into a versatile device simulator. The laser extension of DESSIS-ISE has been attested a high utility for the design of advanced optoelectronic devices.

Zusammenfassung

In der modernen Telekommunikation sind Halbleiterlaser Schlüsselkomponenten. Die vorliegende Doktorarbeit befasst sich mit der rigorosen Simulation dieser aktiven optoelektronischen Bauelemente. Dabei werden kantenemittierende Laser ('edge-emitting lasers') sowie oberflächenemittierende Laser mit vertikalen Resonatoren ('vertical-cavity surface-emitting lasers') abgedeckt. Es wurde eine numerische Lösung für das optische Feld implementiert und ein Interface erstellt zwischen dem Optik-Löser und einem bestehenden elektrothermischen Simulator. Die Beiträge zur Kopplung zwischen Optik und Elektronik bestehen in der Formulierung der physikalischen Modelle sowie im Kopplungsschema und der praktischen Implementierung.

Das optische Feld in kantenemittierenden Lasern kann in transversale und longitudinale Moden separiert werden. Die transversalen Moden wurden mit der Methode der Finiten Elemente in 2D gelöst. Für die longitudinalen Moden wurde die Transfer-Matrix-Methode verwendet. Für oberflächenemittierende Laser ist eine Separation in transversale und longitudinale Richtung nicht möglich. Die Felder können jedoch in eine Fourier-Reihe entwickelt werden, und die Eigenmoden werden in 2D gelöst.

Zusätzlich zur Lösung der Eigenmoden mit der Methode der Finiten Elemente wurde die Wellenausbreitung mit Finiten Differenzen im Zeitbereich ('finite-difference time-domain') berechnet. Aus diesen Resultaten konnten die optischen Moden von allgemeinen oberflächenemittierenden Lasern bestimmt werden. Ausserdem konnte mit einer voll-vektoriellen 3D-Rechnung die Kopplung der spontanen Emission in kantenemittierenden Lasern rigoros bestimmt werden.

Die vorliegende Arbeit muss im Zusammenhang gesehen werden mit der Tätigkeit der 'Optoelectronics Modeling'-Gruppe des Instituts für Integrierte Systeme (IIS) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Gemeinsam wird daran gearbeitet, ein Simulations-Werkzeug für die Optoelektronik bereitzustellen, das beim industriellen Bauelement-Entwurf nützlich ist.

Optoelektronik-Bauteilsimulation ist eine wissenschaftliche Herausforderung, welche Fragestellungen aus der numerischen Modellierung und der Physik der Bauteile einschliesst. Für die erfolgreiche Implementierung eines Bauteil-Simulators sind zwei zusätzliche Aspekte erforderlich: Erstens erlaubte die enge Zusammenarbeit mit Bauelement-Herstellern den Zugang zu detaillierten Bauteil-Spezifikationen und zu Messdaten. Damit konnten die Simulationen überprüft und Unsicherheiten in den Materialparametern eliminiert werden. Als Gegenleistung haben die Bauteil-Entwickler den Simulator schon in einem frühen Stadium zur Lösung ihrer Probleme verwenden können. Zweitens ist eine professionelle Software-Umgebung essentiell für die Entwicklung und Anwendung der Software. Der Laser-Simulator wurde als Erweiterung des Bauteil- und Schaltungs-Simulators DESSIS-ISE entwickelt. Die wissenschaftliche Basis dieses Simulators wurde in etlichen Doktorarbeiten am IIS geschaffen. Mit der Gründung der Firma ISE Integrated Systems Engineering AG, einer Spin-Off des IIS, wurde das Programm kommerzialisiert. Da sie Laser-Modelle direkt in DESSIS-ISE eingebaut wurden, standen von Anfang an moderne Software-Werkzeuge für das Erstellen der Geometrie, die Erzeugung eines Gitters sowie für die Visualisierung zur Verfügung.

In den vielen Diskussionen mit den Projektpartnern und Anwender von Bauteil-Simulatoren wurde klar, dass immer noch ein Graben besteht zwischen den numerischen Problemen einerseits und dem industriellen Bauteil-Design andererseits. Die vorliegende Arbeit soll eine Brücke schlagen zwischen Theorie und Praxis. Es wurde ein exakter und effizienter Löser für die optischen Felder in Laser-Resonatoren erstellt und in einen vielseitigen Bauelement-Simulator eingebaut. Die Laser-Erweiterung von DESSIS-ISE wurde bereits erfolgreich für das Design von hochentwickelten Optoelektronischen Komponenten eingesetzt und von den Anwendern als nützliches Werkzeug eingestuft.