



Doctoral Thesis

## **Physics and simulation of semiconductor lasers Statistic and dynamic characteristics**

**Author(s):**

Odermatt, Stefan

**Publication Date:**

2006

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005173400> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16484

# Physics and Simulation of Semiconductor Lasers: Static and Dynamic Characteristics

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
STEFAN ODERMATT  
Dipl. El.-Ing. ETH  
born 18.04.1978  
citizen of Dallenwil NW, Switzerland

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Bernd Witzigmann, examiner  
Prof. Dr. Heinz Jäckel, co-examiner

2006

# Abstract

The computational simulation of semiconductor lasers has matured to an indispensable tool for the design and development of integrated systems. It allows device manufacturers to speed up product cycles and to reduce costs in the device design process. Furthermore, simulation tools are becoming increasingly popular in the manufacturing line for advanced process control targeting parametric product yield for specific designs.

This doctoral thesis deals with the physics and simulation of semiconductor lasers. Particular emphasis is set on the static, dynamic and noise characteristics. The goal of the thesis is to provide a comprehensive simulation tool that is suitable for applications in an industrial environment.

Physics-based multidimensional models for semiconductor lasers are derived having only the device topology and microscopic material parameters as input. The electro-opto-thermal models are formulated in a semiclassical thermodynamic framework.

The optical processes are described by a classical vectorial wave equation for the optical field in the slowly varying envelope approximation. Expansion of the optical field into modes leads to a separation of space and time, where the time evolution of the optical field is governed by integral modal photon rate and photon phase equations.

The electronic description comprises a Poisson equation and a drift-diffusion model for charge carrier transport. Thermal effects are modeled by a thermodynamic continuity equation for the heat flux. The interaction between carriers and the optical field is governed by the adiabatic microscopic polarization based on Heisenberg's equation of motion. This allows to rigorously include advanced bandstructure

models and many-body effects in a quantum mechanical description. A novel noise model using spatially distributed Langevin noise sources completes the electro-opto-thermal description.

The models have been implemented into the commercial circuit and device simulator DESSIS from Synopsys. The simulation capabilities of DESSIS for semiconductor lasers originally included static and transient characteristics.

In the work presented here, the simulator DESSIS has been extended by integral modal photon phase equations to cover spectral effects of the lasing modes. The noise implementation comprises the evaluation of the correlation functions in the frequency domain. Furthermore, it takes into account the full multidimensional electro-opto-thermal description. This allows for the first time that noise characteristics such as relative intensity noise, phase noise and spectral lineshape can be simulated self-consistently in a multidimensional microscopic framework. In order to improve the dynamic simulation capabilities of DESSIS, a small-signal model to simulate both, intensity modulation and frequency chirp, has been implemented. Quasi-periodic large-signal modulation is governed by a harmonic balance implementation, which enables the analysis of distortion effects.

The capabilities of the models and features implemented in this work are illustrated by various examples. Different sets of static, dynamic and noise characteristics have been simulated and compared to measurements. The practical use of the simulator in an industrial environment is demonstrated by a yield analysis for vertical-cavity surface-emitting lasers.

# Zusammenfassung

Die computerbasierte Simulation von Halbleiter-Lasern ist in den letzten Jahren zu einem unersetzbaren Werkzeug für das Design und die Entwicklung von integrierten Systemen gereift. Simulationen erlauben den Bauteil-Herstellern ihre Produktzyklen zu verkürzen und Kosten zu reduzieren. Desweiteren werden Simulationswerkzeuge im Herstellungsprozess zusehends beliebt für fortgeschrittene Prozesskontrolle um parametrischen Produktertrag für spezifische Designs zu ermöglichen.

Die vorliegende Doktorarbeit befasst sich mit den physikalischen Prozessen und der Simulation von Halbleiterlasern. Der Schwerpunkt ist hierbei auf statische, dynamische und Rauscheigenschaften gelegt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein umfassendes Simulationswerkzeug bereitzustellen, das in einer industriellen Umgebung benutzt werden kann.

Multidimensionale physik-basierte Modelle für Halbleiterlaser werden hergeleitet, welche nur die Bauteil-Topologie und mikroskopische Materialparameter als Eingangsparameter benötigen. Die elektro-opto-thermischen Modelle sind in einem thermodynamischen Rahmen formuliert.

Die optischen Prozesse werden mittels einer klassischen vektoriellem Wellengleichung für das langsam variierende optische Feld beschrieben. Eine Entwicklung des optischen Feldes in Moden führt zu einer Separation von Raum und Zeit, wobei die Zeitentwicklung mittels integralen Photonraten- und Photonenphasengleichungen beschrieben wird.

Die elektronische Beschreibung beinhaltet eine Poissongleichung und ein Drift-Diffusions Modell für Ladungsträgertransport. Thermi-

sche Effekte werden mittels einer thermodynamischen Kontinuitätsgleichung für Wärme modelliert.

Die Wechselwirkung zwischen Ladungsträgern und optischem Feld wird mit der adiabatischen mikroskopischen Polarisation basierend auf Heisenbergs Bewegungsgleichung beschrieben. Dies erlaubt die rigorose Behandlung von fortgeschrittenen Bandstrukturmodellen und Vielteilcheneffekten in einer quantenmechanischen Beschreibung. Desweiteren wurde ein neues Rauschmodell basierend auf räumlich verteilten Langevin Rauschquellen entwickelt, wodurch die elektro-opto-thermische Beschreibung vervollständigt wird.

Die Modelle wurden in das kommerzielle Schaltkreis und Bauelement Simulationsprogramm DESSIS von Synopsys implementiert. Ursprünglich enthielt DESSIS Simulationsmöglichkeiten für statische und transiente Kennlinien.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Simulationsprogramm DESSIS um integrale Photonenphasengleichungen erweitert um spektrale Effekte der Lasermoden abzudecken. Die Rauschimplementation beinhaltet die Auswertung der Korrelationsfunktionen im Frequenzraum. Desweiteren sind die Rauschmodelle gänzlich in die multidimensionale elektro-opto-thermische Beschreibung integriert. Dies erlaubt erstmals, dass Rauschcharakteristika wie relatives Intensitätsrauschen, Phasenrauschen und die Form des Spektrums selbstkonsistent in einer multidimensionalen mikroskopischen Umgebung simuliert werden können. Um die dynamischen Simulationsmöglichkeiten zu verbessern wurde ein Kleinsignalmodell implementiert, das die Betrachtung von Intensitätsmodulation und Frequenzmodulation erlaubt. Quasiperiodische Grosssignalmodulation wird mit einer sogenannten harmonischen Balance-Implementation abgedeckt, was die Betrachtung von Signalverformungseffekten ermöglicht.

Die Möglichkeiten der Modelle und Funktionen, die in dieser Arbeit implementiert wurden, sind mit verschiedenen Beispielen illustriert. Verschiedene Gruppen von statischen, dynamischen und Rauschkennlinien sind simuliert und mit Messungen verglichen worden. Der praktische Gebrauch des Simulationsprogramm in einer industriellen Umgebung wird mittels einer Ertragsanalyse für einen oberflächene-mittierenden Laser mit vertikaler Kavität demonstriert.