

学 位 論 文 題 名

A Study on Finite Element Modeling of Semiconductor Laser Diodes

(半導体レーザの有限要素モデリングに関する研究)

学位論文内容の要旨

光通信や光情報処理などの分野では、主として単体のデバイスが実用化されてきた。しかしながら、こうした分野においても、システム全体としての高信頼化、低コスト化に向けて、光デバイスの集積化、いわゆる光集積回路 (光 IC) として、光デバイスを一体集積化することが急務となっている。このため、新たな素子構造やプロセス技術の研究開発とともに、素子プロセス工程の期間や費用の増大に対処するための素子設計技術の向上も重要な課題となってきた。光デバイスよりも先に集積化が進んでいる電子デバイス、いわゆる超 LSI の世界では、計算機支援設計ツール (CAD) による設計が必須になっており、デバイスシミュレータや回路シミュレータなどを組み合わせた統合 LSI シミュレータが発達している。これに対して、光デバイスの世界では、電子と光の両面からシミュレーションを行う必要があるのと、量子井戸構造のような量子効果を含む新しい技術が一般化しているために、部分的な動作解析は行われているものの、総合的なデバイスシミュレーションの技術はほとんど発達していない。しかしながら、集積化は技術の流れの必然的な方向であり、今後、高集積化光デバイスを実用化していくためには、デバイスシミュレータや回路シミュレータの本格的な研究開発が必要不可欠である。

こうしたことから、特に、光通信や光情報処理の分野でのキーデバイスになっている半導体レーザのシミュレータ開発が従来から活発に行われてきた。これまで、半導体レーザのシミュレーションには、1 次元、あるいはこれを改良した擬 2 次元解析法が用いられてきたが、これでは実験結果を精度よく予測することに限界があり、より高精度なシミュレータ開発の必要性が高まっていた。最近になって、半導体レーザの諸特性を一度に直接 2 次元解析できるシミュレータが次々に開発され、半導体レーザの設計指針確立のための有効なツールとして利用され始めている。

ところで、半導体レーザでは、電気特性と光特性とが相互に密接に関係しているので、両者の解析プログラムを結合して、セルフコンシステントな計算ができるようにしなければならない。これまで、電気特性解析には、化合物半導体用 2 次元電子デバイスシミュレータが用いられてきた。これは、ポアソンの方程式、および電子と正孔の電流連続方程式からなる連立偏微分方程式を差分法により数値計算するものである。一方、光特性解析には、専用の 2 次元解析シミュレータがなかったために、等価屈折率法が伝統的に用いられてきた。等価屈折率法は簡便な方法ではあるが、直接 2 次元解析できるものではなく、活性層に垂直方向と横方向とに 1 次元解析を繰り返すものであるため、適用できる構造には制約があり、半導体レーザの高性能化、多機能化に向けて研究が活発化している量子効果構造やアレイ構造などを取り込むことは困難である。また、電気特性解析に用いられている 2 次元電子デバイスシミュレータは、多くの場合、スーパーコンピュータやメインフレーム上での使用を前提に開発されているため、計算機環境によってその利用は制限される。

本論文は、こうした状況のもとで、より汎用性の高い半導体レーザシミュレータを開発する

ことを目的として、電気特性解析、光特性解析の両者に全く同じ解析ツールを用いた半導体レーザの新しいモデリング法に関する研究成果をまとめたものである。ここでは、この解析ツールとして有限要素法を採用しているので、様々な構造の利得導波型、屈折率導波型半導体レーザに適用することができる。また、最新の有限要素法向け高速計算アルゴリズムを積極的に導入し、セルフコンシステントな計算をワークステーション上で実行することを可能としている。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、半導体レーザシミュレータの解析ツールとして採用する有限要素法、特に、光特性解析に利用実績が豊富なスカラ有限要素法について解説するとともに、半導体レーザの特性評価に必要な遠視野像と出射角の簡便な計算法を提示している。

第3章では、量子井戸構造を組み込んだチャネル光導波路、すなわち多重量子井戸構造コア光導波路の伝送特性を詳細に調査し、導波モードの実効屈折率、近視野像、スポットサイズ、遠視野像、出射角などの井戸層とバリア層との膜厚比依存性、井戸/バリア層数依存性を、コア幅の影響を考慮した形で、初めて明らかにしている。また、複雑な多重量子井戸構造コアを単純な単一コアに置き換え、解析を容易にするための等価屈折率ならびにモード閉じ込め係数を与える簡便な公式を新たに導出している。

第4章では、電気特性に関してはポアソンの方程式と電流連続方程式、光特性に関しては波動方程式、両者を結ぶものとしてレート方程式をセルフコンシステントに解くためのシミュレータを有限要素法に基づいて構築している。このとき、有限要素法向け高速計算アルゴリズムもあわせて考案している。具体的に、GaAlAs/GaAs系のCSP(channeled-substrate planar)レーザに適用し、本シミュレータの性能評価を、解の収束性、計算時間の観点から詳細に行っている。

第4章で開発したシミュレータは厳密な理論に基づいて開発されたものであるが、アレイ構造などを組み込んだ複雑な半導体レーザに適用しようとする、ワークステーション程度のコンピュータでは収束解を得るのにかなりの計算時間を要する。そこで第5章では、より簡易な方法として、ラプラスの方程式、キャリアのレート方程式、光波の波動方程式、そしてフォトンのレート方程式を基本式として、これらをセルフコンシステントに解く方法を新たに開発している。具体的に、InGaAs/InP系のリッジ型レーザに適用し、この簡易シミュレータの妥当性、優位性について評価、検討を行っている。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 小 川 恭 孝

学 位 論 文 題 名

A Study on Finite Element Modeling of Semiconductor Laser Diodes

(半導体レーザの有限要素モデリングに関する研究)

光通信や光情報処理の分野でのキーデバイスになっている半導体レーザのシミュレータ開発が、従来から活発に行われてきた。これまで、導体レーザのシミュレーションには、1次元、あるいはこれを改良した擬2次元的な解析法が用いられてきたが、これでは実験結果を精度よく予測することに限界があり、より高精度なシミュレータ開発の必要性が高まっていた。最近になって、半導体レーザの諸特性を一度に直接2次元解析できるシミュレータが次々に開発され、半導体レーザの設計指針確立のための有効なツールとして利用され始めている。

ところで、半導体レーザでは、電気特性と光特性とが相互に密接に関係しているので、両者の解析プログラムを結合して、セルフコンシステントな計算ができるようにしなければならない。これまで、電気特性解析には、化合物半導体用2次元電子デバイスシミュレータが用いられてきた。これは、ポアソンの方程式、および電子と正孔の電流連続方程式からなる連立偏微分方程式を差分法により数値計算するものである。一方、光特性解析には、専用の2次元解析シミュレータがなかったために、等価屈折率法が伝統的に用いられてきた。等価屈折率法は簡便な方法ではあるが、直接2次元解析できるものではなく、活性層に垂直方向と横方向とに1次元解析を繰り返すものであるため、適用できる構造には制約があり、半導体レーザの高性能化、多機能化に向けて研究が活発化している量子効果構造やアレイ構造などを取り込むことは困難である。また、電気特性解析に用いられている2次元電子デバイスシミュレータは、多くの場合、スーパーコンピュータやメインフレーム上での使用を前提に開発されているため、計算機環境によってその利用は制限される。

本論文は、こうした状況のもとで、より汎用性の高い半導体レーザシミュレータを開発することを目的として、電気特性解析、光特性解析の両者に全く同じ解析ツールを用いた半導体レーザの新しいモデリング法に関する研究の成果をまとめたものである。以下に、本論文の研究成果を各章ごとにとりまとめる。

第2章では、半導体レーザシミュレータの解析ツールとして採用する有限要素法、特に、光特性解析に利用実績が豊富なスカラー有限要素法について説明するとともに、半導体レーザの特性評価に必要な遠視野像と出射角の簡便な計算法を提示している。

第3章では、量子井戸構造を組み込んだチャネル光導波路、すなわち多重量子井戸構造コア光導波路の伝送特性を詳細に調査し、導波モードの実効屈折率、近視野像、スポットサイズ、遠視野像、出射角などの井戸層とバリア層との膜厚比依存性、井戸/バリア層数依存性を、コア幅の影響を考慮した形で、初めて明らかにしている。また、複雑な多重量子井戸構造コアを

単純な単一コアに置き換え、解析を容易にするための等価屈折率ならびにモード閉じ込め係数を与える簡便な公式を新たに導出している。

第4章では、電気特性に関してはポアソンの方程式と電流連続方程式、光特性に関しては波動方程式、両者を結ぶものとしてレート方程式をセルフコンシステントに解くためのシミュレータを有限要素法に基づいて構築している。このとき、有限要素法向け高速計算アルゴリズムもあわせて考案している。具体的に、GaAlAs/GaAs系のCSP(channeled-substrate planar)レーザに適用し、本シミュレータの性能評価を、解の収束性、計算時間の観点から詳細に行っている。

第5章では、より簡便な方法として、ラプラスの方程式、キャリアのレート方程式、光波の波動方程式、そしてフォトンのレート方程式を基本式として、これらをセルフコンシステントに解く方法を新たに開発している。具体的に、InGaAs/InP系のリッジ型レーザに適用し、この簡易シミュレータの妥当性、優位性について評価、検討を行っている。

これを要するに、著者は、半導体レーザの高性能化、多機能化に対応できる新しいモデリング法を開発するとともに、半導体レーザシミュレータの構築ならびに多重量子井戸構造中の光波伝搬現象に関する有益な新知見を得たものであり、光・波動エレクトロニクスに対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。