

包括的な VCSEL モデリングを支援する TCAD ソフトウェア

Z. Q.(レオ)・リー、アーメッド・ナシェッド、サイモン・リー

TCAD (Technology Computer Aided Design) ソフトウェアによって、垂直共振器面発光レーザー (VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser) などの複雑な光電子デバイスの動作を最適化および予測することができる。それに基づいて、材料や設計をどのように改変すれば機能的パラメータが改善されるかを予測することができる。

光学ストレージ、光ネットワークにおける高速データ伝送、レーザープリントに広く用いられる VCSEL は、小さい値電流が低く、円形で対称的なビームを照射し、変調速度が速いという特長を備える。また、高出力用途向けに 2次元 (2D) アレイでバッチ製造可能で、垂直出力であるためにオンウエハ試験がしやすいことから、測定時間が大幅に短縮され、製造コストが低い。

光出力と波長範囲 (340~2600nm) の増加にともない、VCSEL は、従来の端面発光レーザーの応用分野にまで進出しつつある。また、VCSEL の性能は近年著しく進歩したにもかかわらず、基本構造を改良してさらに高い出力パワーと変調速度を達成するための研究が、引き続き精力的に進められている。

標準的な VCSEL は、端面発光レーザーよりも複雑な構造をしている (図 1)。

上下にある分布ブラッグ反射器 (DBR : Distributed Bragg Reflector)、中央にある複数の量子井戸を持つアクティブ領域、そしてキャリア輸送と光パワーを閉じ込める酸化層を基に、時間とコストをかければ、より複雑なさまざまな構造を実験的に製造して試験することができる。しかし、コストと所要時間を削減する新しい代替手段は、カナダのクロスライト・ソフトウェア社 (Crosslight Software) が開発したような TCAD を使用することである。

モデリング・ソリューション

TCAD を使用すれば、新規デバイスを製造する前でも VCSEL 設計を解析および特性評価することができる。その初期設計からの測定結果を用いてモデルのパラメータを修正し、設計工程を繰り返す。そうすることで、デバイ

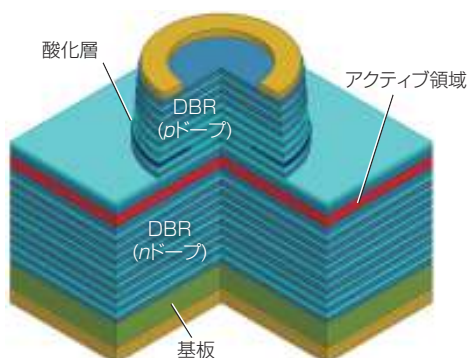
ス動作の予測精度が徐々に高まり、プロトタイプ製作の繰り返し回数が減る。

VCSEL のファブレス設計には、マルチフィジックスモデルと正確な材料パラメータを備える、堅牢で信頼性の高いソフトウェアが必須である。クロスライト社の VCSEL シミュレーションソフトウェアは、包括的な電気モデル、光学モデル、熱モデルを組み合わせた。この 10 年間で、主要な VCSEL メーカーと連携して、理論的モデルの改良と材料パラメータの校正に取り組んできた。「PICS3D」ソフトウェアパッケージは、電流-電圧 (I-V) 特性、出力-電流 (L-I) 特性、温度分布、マルチモードの遠方場または近接場パターン、大小の信号-周波数変調応答など、各メーカーの VCSEL 構造の特性評価に大いに活用されている。

このような基本パラメータ以外にも、キャリア分布、電界、バンド図構造、量子井戸または量子ドットの閉じ込め状態といった、より詳細な情報を把握することができる。このような情報は、新しい VCSEL 構造の設計において非常に重要なものである。

デバイスの電気、光学、熱効果の間には強い相互作用があるため、ソフトウェアは、関連するすべての方程式をつじつまの合う形で解く必要がある。たとえば、電気成分について、ソフトウェアはいわゆる半導体のドリフトと拡散の関係式を解き、2D/3D 有限要素法 (FEM : Finite Element Method) を用いてキャリア濃度と電位分布を導出する。それと同時に、往復利得に基

図 1 VCSEL は一般的に、端面発光レーザーよりも複雑な構造をしており、複数の量子井戸を持つアクティブ領域の上下には、分布ブラッグ反射器 (DBR) が配置されている。



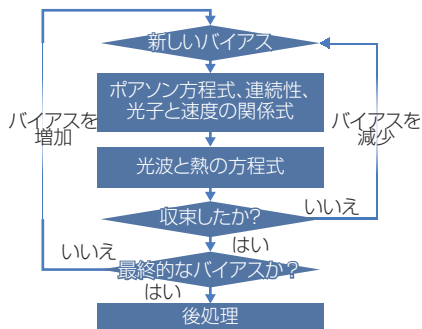


図2 VCSELデバイスの電気パラメータ、光学パラメータ、熱パラメータの間の相互作用を管理するために、クロスライト社のモデリングソフトウェアは、このフローチャートに示すように一貫した一連の手順をたどる。

づく光子と速度の関係式も解いて、レーザ共振器の光子密度を求める。

量子井戸を光源として持つレーザ構造の場合は、シュレーディンガー方程式とポアソン方程式を解くことによって、量子の閉じ込め状態を明らかにできる可能性がある。光強度は、適切な境界条件の下でマクスウェル方程式から求められる。

VCSELに対するマクスウェルの方程式をより簡単に解く方法は、レーザ共振器内の光場が平面波であるという仮定に基づくスカラー近似を利用することである。この方法は、共振器サイズがレーザ波長よりも格段に大きい一般的なVCSEL構造に対して高速で、VCSEL構造の最適化に広く利用されている。しかし、研究者らは現在、開口サイズを利用して、しきい値電流を引き下げ、シングルモード動作を維持することに取り組んでいる。

高次の横モードを抑制するために、表面レリーフ構造も発明されている。スカラー光学手法がもはや有効ではないこのようなケースに対し、当社は、より複雑ではある(100倍の演算時間を要する)が有効な、ベクトル光学手法を提供している。そこでは、電界と磁界の両方のすべての成分の結合解法

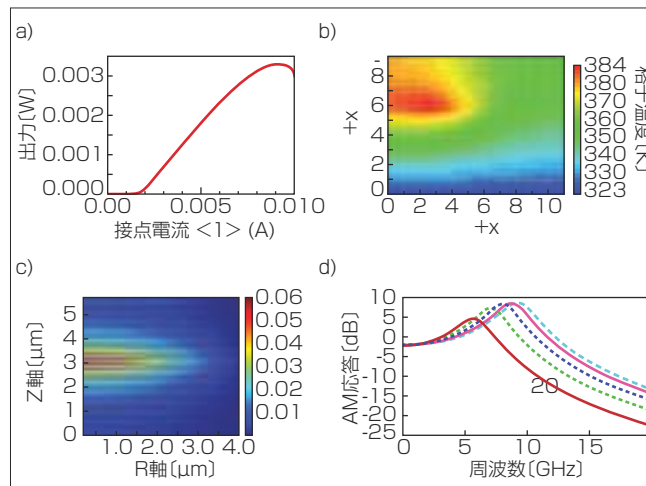


図3 クロスライト社のソフトウェアシミュレーション結果のうち、VCSEL設計者が興味を持つ項目としては、(a)高電流注入時のレーザ出力の熱的飽和を示すL-I曲線、(b)温度分布(ここでは、pドープ領域の温度がかなり高い様子が示されている)、(c)ベクトル光学モード解法から得られた基本横モードの光波強度、(d)小信号AC解析から計算されたデバイスの周波数応答などがある。

が必要になる。

VCSELは共振器サイズが小さく、電流が集中するため、自己加熱効果が重要である。多数の材料インターフェースを持つ高ドープのDBR領域は、バルク材料よりも熱伝導率が低い。そのため、温度分布はかなり不均一となる。これは、デバイスの性能にとって重要な性質である。

VCSELの共振器内には、注入電流の増加にともなって自己加熱効果に寄与する複数の熱源がある。熱流束に最も寄与するのは、キャリア輸送によって生成されるジュール熱である。再結合熱、トムソン熱、放射熱などの他の熱源も、熱伝導の方程式に含まれる。これらの熱パラメータと、前述のVCSELの電気パラメータや光学パラメータとの間の相互作用を管理するために、モデリングソフトウェアは一貫した一連の手順をたどる(図2)。

ソフトウェアのフローチャート

デバイスの接点にバイアスのない平衡状態から開始して、まずはドリフトと拡散の関係式を解き、光子と速度の関係式を加味して、キャリア密度と電位を求める。

続いて、マクスウェル方程式と熱方

程式を解いて、光波強度と温度分布を求める。温度依存の材料パラメータ、モード利得、屈折率が、次の繰り返しに向けて更新される。この工程を、必要なバイアスに達するまで繰り返したあと、結果を後処理することによってデバイスの特性を得る。

VCSEL設計者が興味を持つシミュレーション結果としては、高電流注入時のレーザ出力の熱的飽和を示すL-I曲線、デバイスの温度分布、ベクトル光学モード解法から得られた基本横モードの光波強度などがある(図3)。マルチモード特性や遠方場特性に加えて、小信号交流(AC: Alternating Current)解析から計算されたデバイスの周波数応答も得られる。

クロスライト社は主要なレーザメーカーとの協力の下、信頼性の高い次世代VCSEL構造の開発を支援するために、引き続きPICS3Dソフトウェアの改良に取り組んでいく。

著者紹介

Z. Q. (レオ)・リー(Z. Q. (Leo) Li)は、カナダのクロスライト・ソフトウェア社(Crosslight Software)のエンジニアリング担当副社長、アームッド・ナッシュド(Ahmed Nashed)は同社研究エンジニア、サイモン・リー(Simon Li)は同社創設者でCEO。
e-mail: zqli@crosslight.com
URL: www.crosslight.com.