

# 光半導体デバイスシミュレータ

Device Simulators for Optical Semiconductor Devices

波多腰 玄一

HATAKOSHI Gen-ichi

光半導体デバイスの設計,特性解析に用いる汎用デバイスシミュレータを開発した。半導体レーザ(LD)や発光ダイオード(LED)の光学特性,電気的特性及び温度特性をパソコン(PC)上で容易に解析できる。グラフィック環境を利用した構造入力,結果の表示をはじめ,汎用性と使いやすさを考慮したシミュレータであり,様々な光半導体デバイスの設計・解析に有用なツールとして適用可能である。

Toshiba has developed device simulators for optical semiconductor devices. Optical, electrical, and thermal characteristics can be analyzed on a standard personal computer with a graphical user interface providing easy operation for general-purpose use. These device simulators are useful for the design and analysis of optical semiconductor devices such as laser diodes and light-emitting diodes.

## 1 まえがき

LDやLEDをはじめとする光半導体デバイスの構造設計では,光学的特性,電気的特性,温度特性など様々なシミュレーション解析が必要となる<sup>(1)</sup>。これらをPC上で容易に実行できる光半導体デバイスシミュレータを開発した。

数値計算シミュレーションでは,デバイス動作の適切なモデル化はもちろんであるが,それに加えて計算の高速化や汎用性,使いやすさが要求される。大きな行列計算を含むシミュレーションは,従来大型計算機やワークステーションを用いても多大な計算時間がかかり,必ずしも手軽に利用できるものではなかった。しかし,最近PCの性能が大幅に向上しており,従来スーパーコンピュータで実行していたような計算も手もとでできるようになってきている。

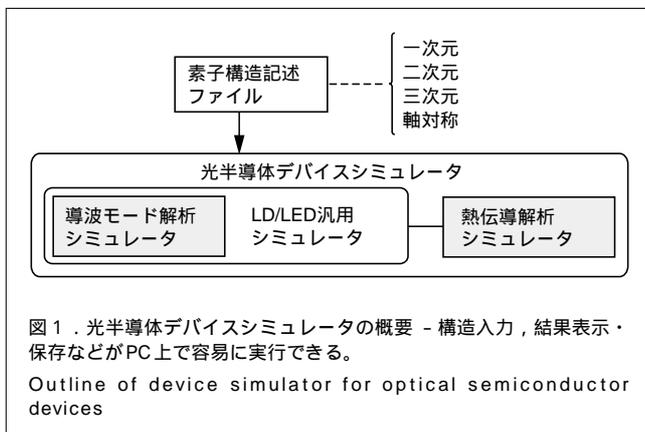
今回開発したシミュレータは,PCのビジュアル環境で動作

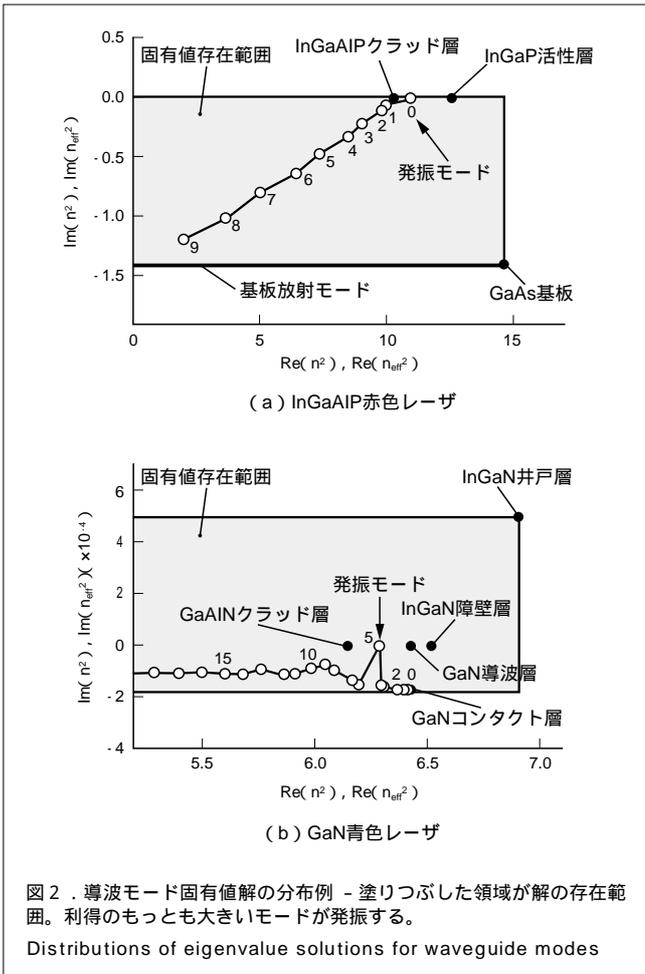
し,光半導体デバイスの様々な特性解析が高速かつ容易に実行できる。シミュレータの概要を図1に示す。このうち導波モード解析と熱伝導解析は,デバイス設計で重要となる個別の解析項目に特化して作成したもので,光半導体デバイスに限らず汎用のデバイスシミュレータとしても利用できる。いずれも構造入力,結果のグラフィック表示,データや図の保存などがPC上で容易に実行でき,複雑な構造でも,計算時間は数分以内と高速である。以下に各シミュレータの特長と,それらを用いたデバイス設計,特性解析例について述べる。

## 2 導波モード解析シミュレータ

LDの発振モードの解析では,利得,吸収を含む複素屈折率導波路における導波モード固有値を,高速にかつ確実に求める必要がある。このためには,複素平面における解の存在範囲<sup>(2)(3)</sup>を把握することが極めて重要である。

図2にInGaAlP(インジウムガリウムアルミニウムリン)赤色レーザ(図2(a))及びInGaN(インジウムガリウム窒素)青色レーザ(図2(b))における実効屈折率( $n_{\text{eff}}$ :導波路を伝搬する光に対する実効的な屈折率,導波モード固有値)の分布の例を示す。ここでは簡単のために,接合面に垂直方向の一次元構造での場合を示してある。図で $\text{Re}(n^2)$ と $\text{Im}(n^2)$ は,それぞれ $n^2$ の実数部及び虚数部である。 $n_{\text{eff}}$ の分布を表す。図中の塗りつぶした領域は理論的に導かれる解の存在範囲で,高次モードを含むすべての導波モード固有値はこの領域に入っている。利得,吸収のある導波路で特

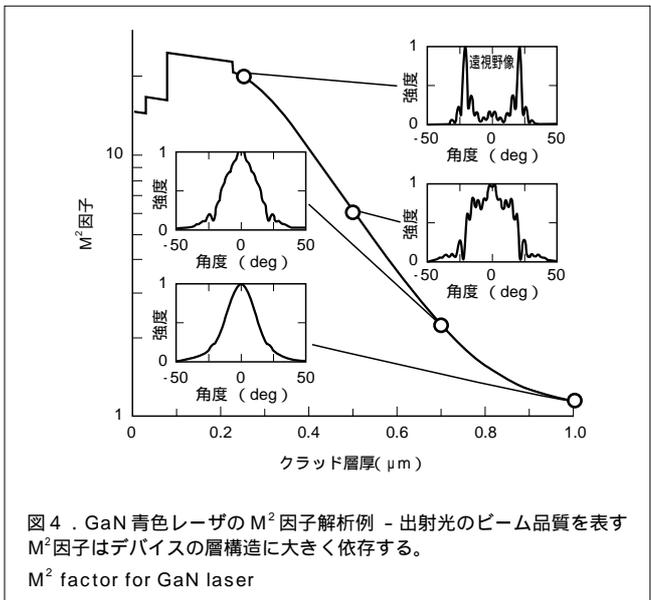
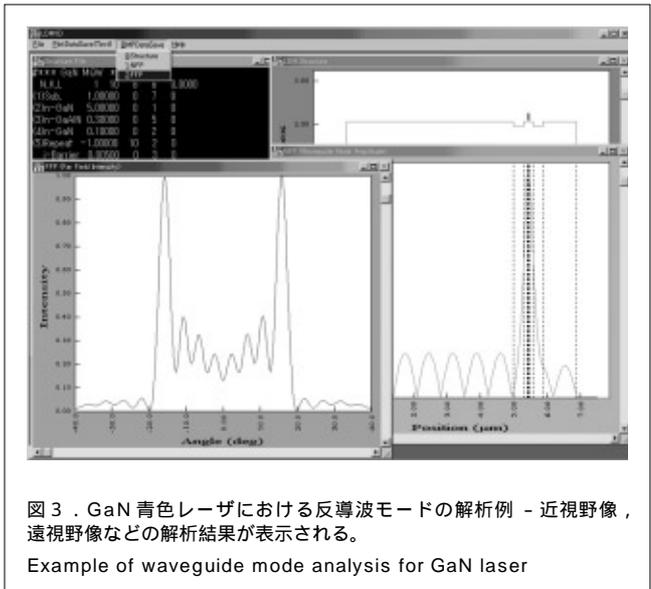




微的なことは、導波路を構成する各層の屈折率(n)に対して、図に示すように  $n_{eff}^2$  の実数部上限は決まるが、実屈折率導波路のように下限が必ずしも  $n^2$  の最小値とならないことである。

図2(a)の場合は、基本モード(0次モード)がもっとも利得の大きい発振モードで、これは基板やコンタクト層を無視した実屈折率構造で求めた解とほぼ一致する。一方図2(b)では、高次モード(この場合は5次モード)が発振モードで、これは基板、コンタクト層を含むすべての構造を考慮しないと導出できない。このモードの実効屈折率実数部はGaNコンタクト層の屈折率より小さいため、図3に示したように、その遠視野像分布は反導波構造に特有の双峰特性を示す。

図3のような反導波特性は、導波モードがコンタクト層に大きな振幅を持っていることに起因しているので、この層の影響を低減する構造設計が必要である。クラッド層厚を所定の厚さとすることにより、高次モードであっても単峰の遠視野像が得られることが、シミュレーションと実験の両面から確認されている<sup>(3)(4)</sup>。このような反導波特性は、出射光のビーム品質を表す  $M^2$  因子(M square factor: この値が1に近いほどビーム品質が良い)<sup>(5)</sup>とも大きな相関があることがシミュレーションで示されている<sup>(6)</sup>(図4)。



### 3 LD/LED 汎用シミュレータ

光半導体デバイスでは、電子と正孔の分布、バンド構造、発光分布などの解析が必要で、場合によっては後述する熱伝導特性も考慮する必要がある。特に半導体レーザでは、上述の導波モードと、この分布及び光出力に依存した誘導放出再結合項が、電子と正孔の分布を決める電流連続方程式の中に入り、また電子と正孔の分布に依存した利得分布が導波モードを決める屈折率虚数部にかかわるため、電子系方程式、光学系方程式を自己無撞着(どうちゃく)セルフコンシステント)に解く必要がある<sup>(7)(8)</sup>。シミュレータでは、これらを差分近似と行列解法による数値計算で解いている。

GaNレーザにおける電流分布の計算結果例を図5に示

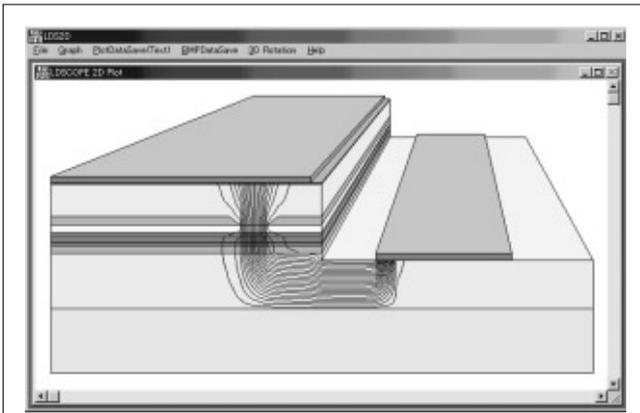


図5 . LDにおける電流分布解析例 - デバイス構造とともに電流線が表示される。

Example of current distribution for laser diode

す。電流線は、電流密度のy成分をx(水平)方向に積分した関数の等高線としてプロットしている<sup>(3)</sup>。この表示手法は後述の熱伝導解析における熱流線の表示にも適用できる。

半導体レーザシミュレータで用いているモデルは、基本的にLED<sup>(9)</sup>にも適用可能である。ただし、LEDでは光取出し効率が素子形状や電極構造に依存するため、これを計算する機能を設けた<sup>(10)</sup>。具体的には、電極や光吸収層などの遮蔽(しゃへい)領域を入力構造ファイル中で定義し、各発光点から放射される光が、これらの領域で遮蔽されずに外に取り出される割合を計算している。

また、面発光型のLEDでは軸対称構造に近い素子構造がしばしば用いられるので、直交座標系以外に極座標系でも計算できるようにし、軸対称構造にも対応できるようにした。この場合の電流線の表示は、前述の等高線関数を軸対称構造に対応した関数とすることにより、やはり電流密度ベクトルに沿った連続線として表示することができる。

図6は軸対称構造の例として、GaAlAs(ガリウムアルミニウムヒ素)バラス型LED(図6上)及びInGaAlP LED(図6中、下)の解析における表示画面を示したものである。図に示したように、電流分布、バンド構造(図6下の左)及び熱発生分布(図6下の右手前)などが可視化されて表示されるので、デバイス設計の際に各パラメータの影響がわかりやすく、また、出力結果のデータから様々な特性を定量的に評価できる。このシミュレータでは、軸対称構造を含む任意の二次元構造の解析が可能である。

#### 4 熱伝導解析シミュレータ

光半導体デバイスでは、熱特性が他の様々な特性に影響を与えるため、温度特性を考慮した解析は極めて重要である<sup>(11)-(13)</sup>。素子の温度特性は、その三次元形状やヒートシン

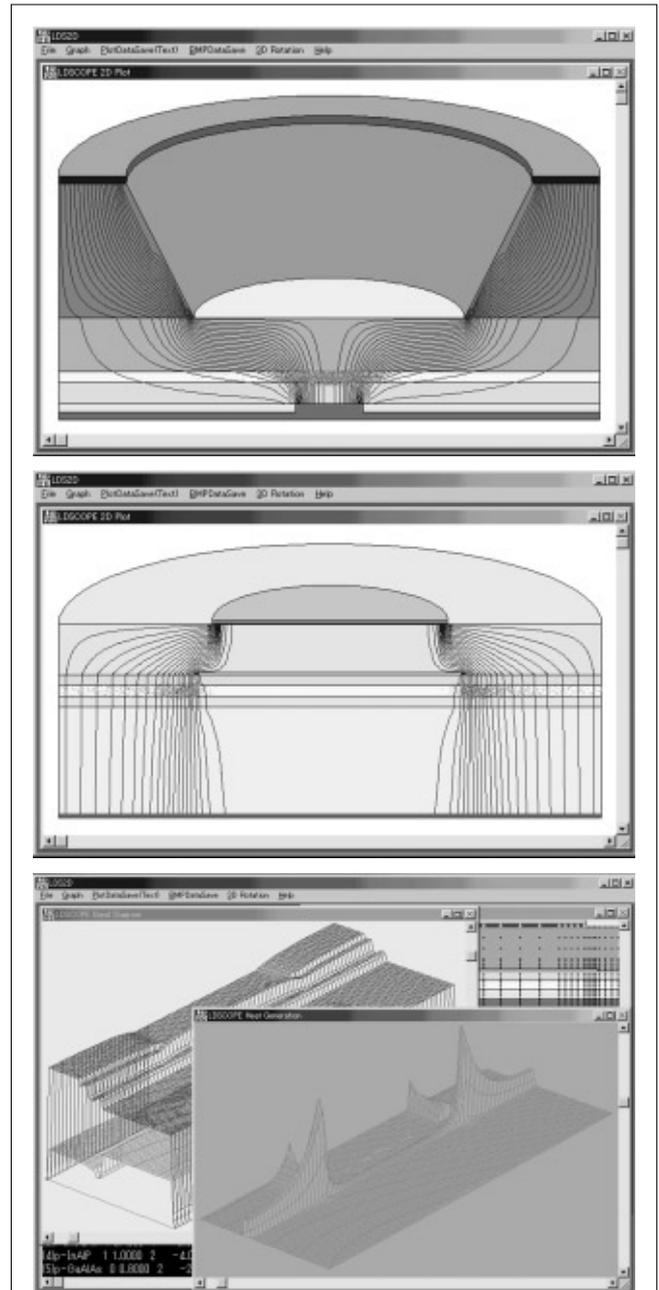


図6 . LD/LEDシミュレータ実行例 - 電流分布、バンド構造、熱発生分布などが解析できる。

Examples of graphical display during operation of LD/LED simulator

ク材料、マウント法などに大きく依存するため、三次元でのシミュレーション解析が必要である。このシミュレータは、もちろん光デバイスに限定されず汎用の熱伝導解析に用いることができるが、特に光半導体デバイス用としては、上述のLD/LED汎用シミュレータと組み合わせて、温度特性を考慮した光学特性、電気的特性の解析に適用することを意図している。

実行例の画面を図7に示す。このシミュレータでは、温度

## 5 あとがき

LDやLEDの光学特性,電気的特性,温度特性の解析用に,PC上で動作する光半導体デバイスシミュレータを開発した。グラフィック環境を利用した構造入力,結果の表示をはじめ,汎用性と使いやすさを考慮したシミュレータであり,様々な光半導体デバイスの設計・解析に有用なツールとして適用可能である。

## 文 献

- (1) 波多腰玄一 “光半導体デバイスシミュレータ”,第26回光学シンポジウム. 東京. 2001-06, p.79 - 82.
- (2) 波多腰玄一 “半導体レーザー”. 微小光学ハンドブック. 応用物理学会日本光学会編集. 朝倉書店, 1995, IV-1章.
- (3) Hatakoshi, G., et al. Optical, electrical and thermal analysis for GaN semiconductor lasers. International J. Numerical Modeling. 14, 2001, p.303 - 323.
- (4) Hatakoshi, G., et al. Analysis of device characteristics for InGaN laser diodes. Jpn. J. Appl. Phys. 38, 3B, 1999, p.1780 - 1785.
- (5) Siegman, A. E. New development in laser resonators. SPIE Proc. 1224, 1990, p.2 - 14.
- (6) 波多腰玄一 “半導体レーザーにおけるM<sup>2</sup>因子の解析”. Optics Japan 2001 講演予稿集. 2001 - 11, 日本光学会. 東京, 2001, p. 225 - 226.
- (7) Wilt, D.P.; Yariv, A. A self-consistent static model of the double-heterostructure laser. IEEE J. Quantum Electron. QE-17, 1981, p.1941 - 1949.
- (8) Hatakoshi, G., et al. General two-dimensional device simulator for laser diodes. Trans. IEICE Jpn. E71, 1988, p.923 - 925.
- (9) 波多腰玄一. 発光ダイオードの動作原理. 応用物理. 68, 1999, p.133 - 138.
- (10) Hatakoshi, G., et al. "Two-dimensional device simulator for generalized LED structures". Tech. Digest, 5th Microoptics Conf. Hiroshima, 1995, p.212 - 215.
- (11) 石塚 勝 編著. 熱対策と熱シミュレーション技術. 総合技術センター, 1991.
- (12) Hatakoshi, G., et al. Thermal analysis for InGaAlP laser diodes. Trans. IEICE Jpn. E71, 1988, p.315 - 317.
- (13) Hatakoshi, G., et al. Thermal analysis for GaN laser diodes. Jpn. J. Appl. Phys. 38, 5A, 1999, p.2764 - 2768.
- (14) Takaoka, K., et al. "InGaAlP-based red VCSELs for high-speed POF optical data links". Proc. Int. POF Conf.'99. Makuhari Messe, 1999, paper PPD4.
- (15) Hatakoshi, G., et al. "InGaAlP red VCSELs". Proc. IEEE/LEOS 2000 Annual Meeting. Rio Grande, 2000, paper ThF1.
- (16) 高岡圭児,ほか. 高速POFデータリンク用InGaAlP赤色面発光レーザー. 東芝レビュー. 56, 10, 2001, p.35 - 38.

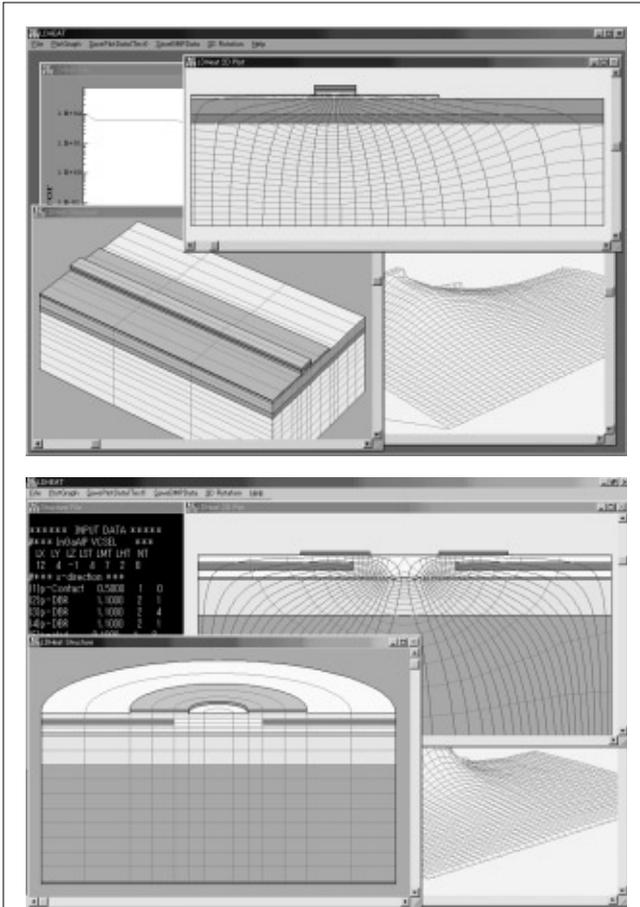


図7. 熱伝導解析シミュレータ実行例 - 温度分布, 熱流分布などが表示される。下図は軸対称構造の解析例である。

Examples of graphical display for thermal analysis

分布の鳥瞰(ちょうかん)図や等高線だけでなく,熱流線を表示することによって,発生した熱がどのような経路をたどってヒートシンクへ流れるかが画面上でわかるようにした。熱流線の表示は,前節で述べた電流線の表示法と同様の手法を用いている<sup>(13)</sup>。

この熱伝導解析シミュレータでも,LEDや面発光レーザーに多い軸対称構造を取り扱えるようにした(図7下)。軸対称構造は計算上では二次元なので,一般の三次元構造より計算時間は少なくてすむ。軸対称構造の解析例としては,InGaAlP赤色面発光レーザー<sup>(14)-(16)</sup>における発光層領域面積と活性層温度上昇との関係が明らかになっている。



波多腰 玄一 HATAKOSHI Gen-ichi, D. Eng. 研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主幹, 工博。光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会, 日本光学会, 電子情報通信学会会員。 Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.