

解説

半導体レーザーのシミュレーション

上野 眞 資

NEC 光エレクトロニクス研究所光デバイス研究部 〒305 つくば市御幸が丘 34

Two-Dimensional Device Simulation of Semiconductor Lasers

Masayasu UENO

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation, 34, Miyukigaoka, Tsukuba 305

1. ま え が き

半導体レーザーシミュレーションは、半導体レーザーの諸特性に関して大規模数値計算を行い、高密度かつ高精度な特性解析をすることをその目的としている。こうした大規模数値計算は、半導体レーザーを中心とした光デバイスに関する実験支援ツールとして用いることができ、研究開発の効率化ならびに迅速化を促進することができる。

従来は半導体レーザー解析として1次元またはこれを改良した擬2次元的¹⁾な解析が行われてきたが²⁾、これでは実験結果を精度良く解析するには限界があり、より高精度なシミュレータの必要が高まっていた。その結果、最近になって半導体レーザーの諸特性を一度に直接2次元解析するシミュレータが次々に開発され³⁻¹⁴⁾、レーザー作製のための設計指針確立に利用されはじめてきた。

ところでこれらの半導体レーザーシミュレータにその目的である研究開発の支援ツールとして十分な機能を持たせるには、計算の信頼性が高く、解析結果が実験結果を正確に予測できるものでなければならない。

そこでここではまず半導体レーザーシミュレータを紹介する。次に素子構造パラメータを様々に変化させた半導体レーザーを実際に作製してそのレーザー発振諸特性を測定した実験結果と、上記2次元解析シミュレータを用いて計算した解析結果とを、広範囲にわたって比較検討したので、その結果について述べる。これにより両者はきわめて良く一致することを明らかにし、半導体レーザーシミュレータがレーザー設計指針を得る上できわめて有効であることを示す。

以下、本稿ではまず半導体レーザーシミュレータとし

て開発されている2次元電流-光出力特性解析シミュレータの概要を述べ、次にこのシミュレータを用いて計算した半導体レーザーの解析結果を実験結果と比較しながら述べる。

2. 計 算

本稿では半導体レーザーとして発振波長 $0.78 \mu\text{m}$ Al-GaAs/GaAs self-aligned structure (SAS)¹⁵⁻¹⁸⁾ レーザーについて検討する。

2.1 計算のモデル

SAS レーザーの断面図を図1に示す。中心線に対し左右対称とし、その右半分のみを示した。図1において斜線で示した領域は光吸収特性を伴う電流ブロック層であるが、電流ブロック層に形成される溝形状は図に示すように、通常メサ構造の場合(M-SAS)、矩形構造の場合(R-SAS)、逆メサ構造の場合(I-SAS)と三つのタイプに分類することができる。

2.2 解析シミュレータ

半導体レーザーシミュレータとして2次元電流-光出力特性解析シミュレータが開発されている。これは活性層に対して水平横方向(x 軸方向)と垂直方向(y 軸方向)との2次元平面において、半導体レーザーの電気特性と光特性との数値計算を2次元的に行うものである。特に半導体レーザーでは、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。以下に上記観点に基づいて開発した半導体レーザーシミュレータについて簡単に説明する。

計算のアルゴリズムを図2に示す。光出力(フォトン密度 δ)を固定し、印加電圧 V をパラメータとして

(1) 2次元電気特性解析によるキャリア密度分布

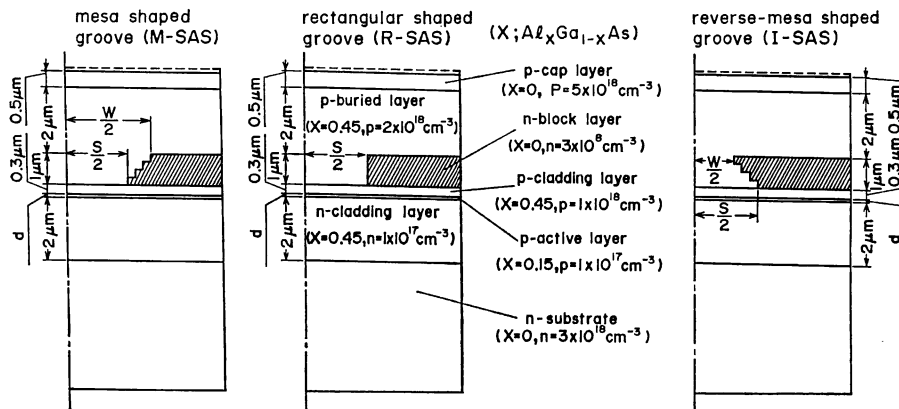


図 1 計算のモデル

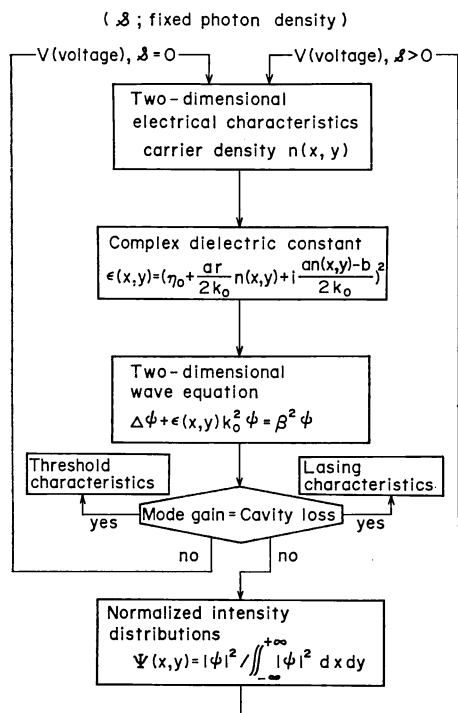


図 2 計算のアルゴリズム

$n(x, y)$ の計算

(2) キャリア密度分布を組み入れた複素誘電率

$\epsilon(x, y)$ の計算

(3) 2次元複素波動方程式の有限要素法による解析

(4) レーザー発振条件の判定

(5) 光強度分布を組み入れた2次元電気特性解析

以上の計算をセルフコンシステントな解を得るまで繰り返し行った。

上記の各項ごとの計算は以下のように行った。

(1) 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¹⁹⁾を用いた。これはポアソン方程式および電子と正孔と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。ここで電流分布に寄与する移動度のモデルとして、電子と正孔との移動度には共に速度飽和形を用いた。このとき移動度 μ は次式になる。

$$\mu = \mu_0 / (1.0 + \mu_0 E / V_s)$$

上式で μ_0 は低電界移動度、 E は電界、 V_s は飽和速度である。また再結合過程としては誘導放出再結合、自然発光再結合およびShockley-Read-Hall非発光再結合の三過程を考慮した。

(2) 電気特性解析から得たキャリア密度分布 $n(x, y)$ を補間し、任意の (x, y) 点のキャリア密度を求め、これら組み入れた複素誘電率 $\epsilon(x, y)$ を計算した。このとき活性層は

$\epsilon(x, y) = [\eta_0 + arn(x, y) / 2k_0 + i\{an(x, y) - b\} / 2k_0]^2$ となる。ここで η_0 は活性層の屈折率、 a は微分利得係数、 b は損失パラメータ、 r は屈折率のキャリア密度に対する負の依存性の比率²⁰⁾、 $k_0 = 2\pi / \lambda$ (λ は発振波長)、 i は虚数単位である。なお計算では $\eta_0 = 3.64$ 、 $r = -1.0$ 、 $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ²¹⁾、 $b = 190 \text{ cm}^{-1}$ を用いた。

(3) 2次元波動方程式の解析には有限要素法を用いた。各領域を三角メッシュ状に分割し、その三角メッシュ内の分布は線形関数で近似し、境界条件のもとに各三角辺をつなげて数値計算を行った。

(4) レーザー発振条件ではモード利得 $G_m = 2\mathcal{G}_m(\beta)$ ($\mathcal{G}_m(\beta)$ は波動方程式の固有値 β の虚数部)と共振器損失 $L = L_m + L_i$ (L_m は共振器端面におけるミラー損失、 L_i は光吸収損失等を含む内部損失)との

表 1 計算に用いた主なパラメータ値

Material composition	Al _{0.15} Ga _{0.85} As
Emission wavelength λ (μm)	0.78
Energy gap E_g (eV)	1.613
Relative dielectric constant (ϵ/ϵ_0)	12.65
Mobility (cm^2/Vs)	
μ_n ; Electron μ_0 (cm^2/Vs)	$\frac{6900}{1+(N/1.42)^{0.54}}+1000$
V_s (cm/s)	8.3×10^6
μ_p ; Hole μ_0 (cm^2/Vs)	$\frac{308}{1+(N/5.0)^{0.5}}+44$
V_s (cm/s)	9.5×10^6
Electron affinity χ (eV)	3.891
Recombination constant B (cm^3/s)	$2.57 \times 10^{-10} \frac{n_r}{n_r+n_L+n_X}$

N ; impurity concentration ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), n_r ; electron concentration at r valley, n_L ; electron concentration at L valley, n_X ; electron concentration at X valley.

大きさの比較を行い, $G_m > L$ では印加電圧を減らし, $G_m < L$ では印可電圧を増加し, $G_m = L$ が得られるまで繰り返し計算した.

(5) 光強度分布はフォトン放出によるキャリア密度の減少量を電気特性解析プログラムのキャリア再結合方程式に導入することにより組み入れた.

上記の計算で $G_m = L$ となるとその時の各値がレーザー発振諸特性となる.

(6) さらに上記波動方程式からセルフコンシステントな解として得られた波動関数を用いて, キルヒホッフの積分公式からそのフレネル回折光を求め²²⁾, この光の進行方向におけるスポットサイズの変化から非点隔差を計算した.

以上の計算に用いた主なパラメータの値を表 1 に示す.

なおレーザー素子の共振器長 L_c は $L_c = 250 \mu\text{m}$ とした.

3. 結 果

発振波長 $0.78 \mu\text{m}$ AlGaAs/GaAs SAS レーザーを MOVPE (有機金属気相成長)¹⁸⁾ 法で製作し, そのレーザー発振諸特性を測定すると共に, 2次元電流-光出力特性解析シミュレータを用いて解析を行い, 両者を比較検討した^{11, 14)}.

ここではまずレーザー発振諸特性として, 電流-光出力 (I - L) 特性, 閾値電流 I_{th} , 外部微分量子効率 η_D , 近視野像 (活性層水平横方向のスポットサイズ (半値全角) w_H), 遠視野像 (活性層水平横方向の広がり角 (半

値全角) θ_H および活性層垂直方向の広がり角 (半値全角) θ_L) について検討した結果¹¹⁾を示す. 次に非点隔差 $4Z$ についても検討したのでその結果¹⁴⁾も示す.

このとき SAS レーザーの主な構造パラメータとして, (1)電流注入領域幅 (溝上端の幅) W , (2)ストライブ幅 (溝下端の幅) S , (3)活性層厚 d を用いた. これらは素子製作において容易に変化させることができるばかりでなく, W は主に溝形状, S は利得-損失分布の幅, d は垂直方向への光の染み出しによる電流ブロック層 (光吸収層) での光吸収損失の大きさ等に密接に結びついたパラメータであるため, 溝部分を中心に形成される利得-損失分布および実効的な屈折率分布を自由に変化させることができる.

そこで上記に基づき W, S および d を各々独立に変化させた様々な素子構造を有するレーザー素子を実際に作製し, 各レーザー素子ごとに W, S および d の各値を正確に測定すると共に, 各素子のレーザー発振諸特性を測定し, 同時にこれらのパラメータを用いてシミュレータによる計算を行い両者を比較した. ここでは, 光出力 5 mW のレーザー発振諸特性を中心に検討した結果を示す.

3.1 電流-光出力諸特性

3.1.1 電流注入領域幅 (W) 依存性

SAS レーザーにおいてストライブ幅 S を一定にして電流注入領域幅 W を変化させることは溝形状を変えることに対応し, W の変化により I-SAS ($W < S$), R-SAS ($W = S$), M-SAS ($W > S$) の各レーザーになる (図 1).

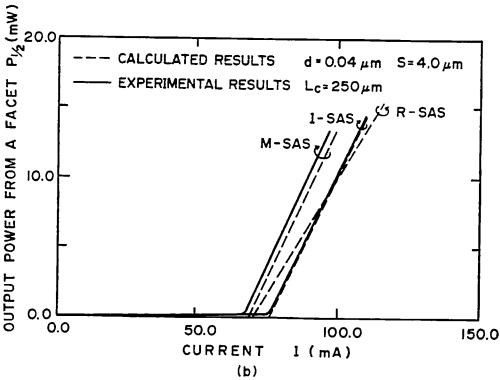
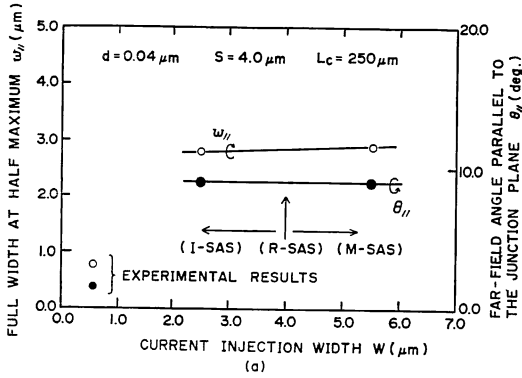


図3 (a)スポットサイズ $w_{||}$ と横方向の広がり角 $\theta_{||}$ の電流注入領域幅 W 依存性を示した図。実線は計算結果。白丸および黒丸は $w_{||}$ および $\theta_{||}$ の実験結果。
(b)電流-光出力特性を示した図。破線は計算結果。実線は M-SAS レーザー ($W=5.5 \mu\text{m}$) と I-SAS レーザー ($W=2.5 \mu\text{m}$) との実験結果。

図3 (a)にスポットサイズ $w_{||}$ と横方向の広がり角 $\theta_{||}$ との W 依存性を示す。実線は計算結果であり、白丸および黒丸は各々 I-SAS レーザー ($W=2.5 \mu\text{m}$) と M-SAS レーザー ($W=5.5 \mu\text{m}$) との $w_{||}$ および $\theta_{||}$ の実験結果である。

- 1) $w_{||}$ および $\theta_{||}$ 共に W 依存性は極めて小さい。垂直方向の広がり角 θ_{\perp} も W に依存せず $\theta_{\perp}=23.8$ 度と一定であった。

図3 (b)に I-SAS レーザー ($W=2.5 \mu\text{m}$), R-SAS レーザー ($W=4.0 \mu\text{m}$), M-SAS レーザー ($W=5.5 \mu\text{m}$) の各 $I-L$ 特性を光出力 15 mW まで示す。破線は計算結果であり、実線は I-SAS レーザーと M-SAS レーザーの実験結果である。

- 1) 閾値電流 I_{th} は M-SAS レーザーと R-SAS レーザーではほぼ等しく、I-SAS レーザーのとき最も高くなる。

- 2) 外部微分量子効率 η_D は M-SAS レーザーと I-SAS レーザーとはほぼ等しく、R-SAS レーザーのとき最も低い。
- 3) 上記の相違は溝形状による電流の流れの違いと光吸収層での光吸収損失の違いに起因する。

図3 (a), (b)から明らかなように計算結果と実験結果とは良く一致している。

3.1.2 ストライプ幅 (S) および活性層厚 (d) 依存性

SAS レーザーのレーザー発振諸特性はストライプ幅 S に依存して大きく変化すると共に、活性層厚 d も大きく依存する。

図4は活性層厚 d を変化させた時の I-SAS レーザーの近視野像の計算結果であり、(a)は $d=0.04 \mu\text{m}$ の場合、(b)は $d=0.07 \mu\text{m}$ の場合である。各図は光強度分布を等高線の形で示し、また中心線に対して左右対称としてその右半分を示した。

- 1) 活性層が薄い場合 ($d=0.04 \mu\text{m}$) には光は垂直方向に広く染み出しているのに対し、厚い場合 ($d=0.07 \mu\text{m}$) には光は活性層内に閉じ込められ染み出しは少ない。
- 2) 光が垂直方向に広く染み出すほど光吸収層での光吸収損失は大きくなり、その結果利得-損失分布は大きくなり、水平横方向の溝部に形成される実効的な屈折率分布の高さも高くなる。

I-SAS ($S=4.0 \mu\text{m}, W=2.5 \mu\text{m}$)
OUTPUT POWER 5mW

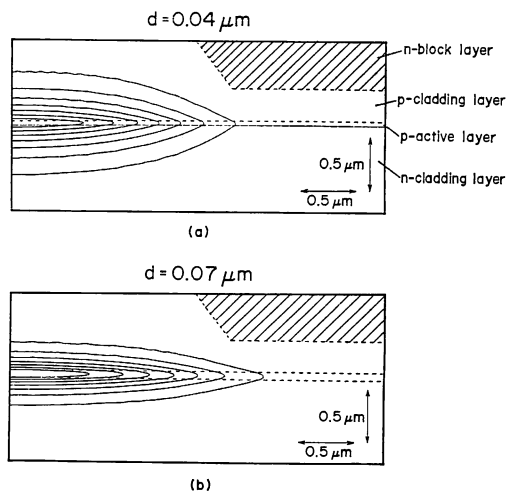


図4 近視野像の強度分布を等高線で示した図。中心線に対して左右対称としてその右半分のみを示した。(a)は活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ の場合、(b)は $d=0.07 \mu\text{m}$ の場合。

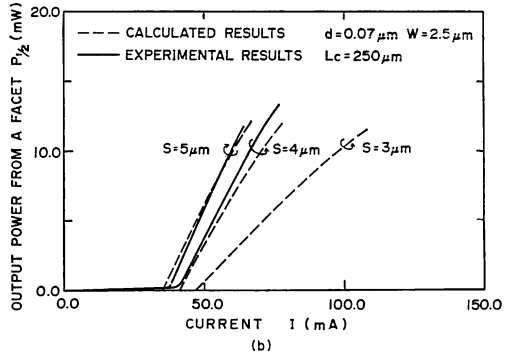
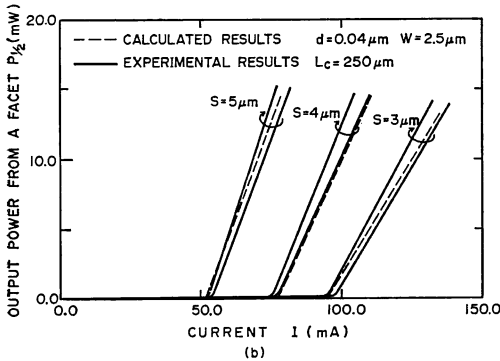
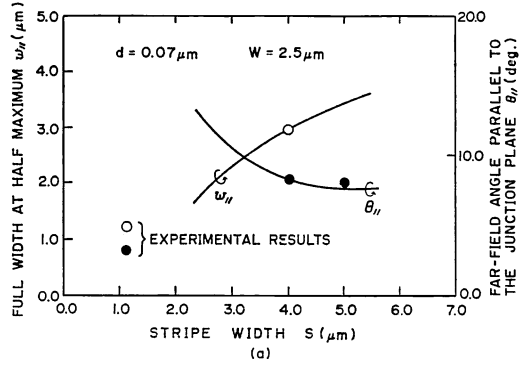
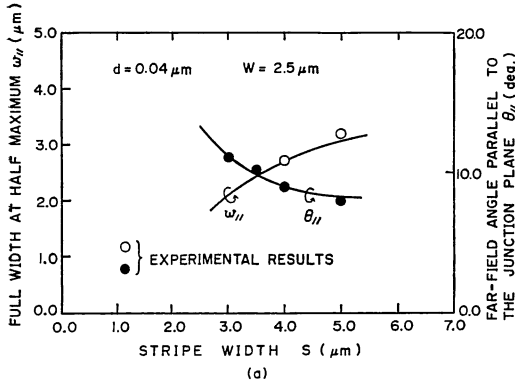


図5 (a)活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーにおいて、スポットサイズ w_H と横方向の広がり角 θ_H のストライプ幅 S 依存性を示した図。実線は計算結果。白丸および黒丸は各々 w_H および θ_H の実験結果。
(b)活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーにおいて、ストライプ幅 $S=3.0 \mu\text{m}$, $4.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$ の各場合の電流-光出力特性を示した図。破線は計算結果。実線は実験結果であり、典型的な例を2本ずつ示した。

図6 (a)活性層厚 $d=0.07 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーにおいて、スポットサイズ w_H と横方向の広がり角 θ_H のストライプ幅 S 依存性を示した図。実線は計算結果。白丸および黒丸は各々 w_H および θ_H の実験結果。
(b)活性層厚 $d=0.07 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーにおいて、ストライプ幅 $S=3.0 \mu\text{m}$, $4.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$ の各場合の電流-光出力特性を示した図。破線は計算結果。実線は $S=4.0 \mu\text{m}$ と $5.0 \mu\text{m}$ との場合の実験結果。

そこでここでは活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ と $d=0.07 \mu\text{m}$ との2種類の SAS レーザーにおけるレーザー発振諸特性のストライプ幅 S 依存性を、両者を比較しつつ検討する。

図5に $d=0.04 \mu\text{m}$, 図6に $d=0.07 \mu\text{m}$ の各場合を示す。図5(a)および図6(a)に I-SAS レーザーのスポットサイズ w_H と横方向の広がり角 θ_H とのストライプ幅 S 依存性を示す。実線は計算結果であり、白丸および黒丸は各々 w_H および θ_H の実験結果である。

- 1) ストライプ幅 S が狭くなるに伴い、ストライプ外部において垂直方向に染み出た光は吸収層で吸収されるので、 w_H は狭くなり、これに反比例して θ_H は広がる。
- 2) 上記現象は活性層が薄いほど光の垂直方向への染み出しが多いため顕著になる。 $d=0.07 \mu\text{m}$ のレー

ザーは $d=0.04 \mu\text{m}$ のレーザーに比べて、 w_H は約 $0.3 \mu\text{m}$ 広く θ_H は約 1.0 度狭い。

- 3) 垂直方向の広がり角 θ_1 も光の垂直方向の染み出しを反映して $d=0.04 \mu\text{m}$ では $\theta_1=23.8$ 度、 $d=0.07 \mu\text{m}$ では $\theta_1=33.1$ 度であり、このときも計算結果と実験結果は一致した。なお θ_1 は S に依存せずほぼ一定であった。

図5(b)および図6(b)に $S=3.0 \mu\text{m}$, $4.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーの $I-L$ 特性を示す。破線は計算結果であり、実線は実験結果である。 $d=0.04 \mu\text{m}$ の場合には典型的な実験結果を2本ずつ示し(図5(b)), $d=0.07 \mu\text{m}$ では $S=4.0 \mu\text{m}$ と $5.0 \mu\text{m}$ との場合のみ示した(図6(b))。

- 1) ストライプ幅 S が狭くなるにつれて、光吸収層での光吸収損失が増大するため、閾値電流 I_{th} は増

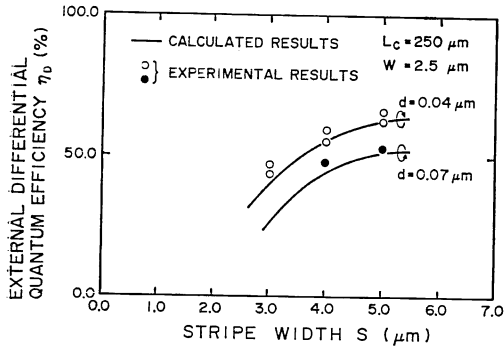


図7 活性層厚 $d=0.04\ \mu\text{m}$ と $0.07\ \mu\text{m}$ との2種類の I-SAS レーザーにおいて光出力 $5\ \text{mW}$ 近傍での外部微量子効率 η_D のストライプ幅 S 依存性を示した図. 実線は計算結果. 白丸および黒丸は各々 $d=0.04\ \mu\text{m}$ のレーザーおよび $d=0.07\ \mu\text{m}$ のレーザーの実験結果.

加し外部微量子効率 η_D は減少する.

- 2) 上記現象は活性層厚が $d=0.04\ \mu\text{m}$ と薄く光吸収損失が大きいほど顕著である.
- 3) さらに $d=0.04\ \mu\text{m}$ では光出力 $15\ \text{mW}$ 以上にわたって直線的な I - L 特性が得られるが, $d=0.07\ \mu\text{m}$ では I - L 特性は光出力が $\sim 8.0\ \text{mW}$ 以上になると直線からはずれ飽和の傾向を示す. これは活性層が厚いときには光吸収損失が小さくなるため水平横方向の溝部に形成される実効的な屈折率分布の高さが低くなり, 屈折率導波機構の寄与が小さくなる. この結果キャリア分布に空間的なホールバーニングが生じ²⁰⁾, スポットサイズが収縮していき, レーザー発振に有効に寄与する注入キャリアの割合が減少するためと考えられる. したがって, この I - L 特性が飽和する傾向は $d=0.07\ \mu\text{m}$ においてストライプ幅 S が広いほど顕著になる.

次に図5(b)および図6(b)に示した I - L 特性において, 光出力 $5\ \text{mW}$ 近傍の外部微量子効率 η_D に関して検討した. 図7はその結果であり, 図に η_D のストライプ幅 S 依存性を示した. 実線は計算結果であり, 白丸および黒丸は各々 $d=0.04\ \mu\text{m}$ および $d=0.07\ \mu\text{m}$ の場合の実験結果である.

- 1) 同一ストライプ幅において, $d=0.04\ \mu\text{m}$ の場合の η_D は $d=0.07\ \mu\text{m}$ の場合に比べて約10%高くなっている.
- 2) 活性層が薄い $d=0.04\ \mu\text{m}$ では水平横方向の溝部に形成される実効的な屈折率分布の高さが高いため, 光はストライプ内部(溝部)に閉じ込められる. このため電流ブロック層に形成された溝部から活性

層内に注入される電流は有効にレーザー発振に寄与することができ, その結果 η_D は高くなり, 同時に高出力まで直線的な I - L 特性が得られると考えられる.

以上図5~7から明らかなように I - L 特性の安定性も含め実験結果と計算結果とは極めて良く一致している. これより本半導体レーザーシミュレータは高精度に実際のレーザー発振諸特性を解析できることが明らかになった.

なお, 従来の1次元的な解析では $\omega_{11}, \theta_{11}, \theta_1$ までの解析, また擬2次元的な解析でもこれらのほか I_{th} までの解析がある程度の信頼性をもって計算できたにすぎなかった⁹⁾. これに対して, 半導体レーザーシミュレータを用いることにより, より高精度でかつレーザー発振特性全体にわたる精密な解析がはじめて可能になったと考えられる.

3.2 非点隔差 (ΔZ)

非点隔差 ΔZ はフレネル回折光の進行方向 (z 軸方向) における強度分布からその活性層水平横方向と垂直方向とのスポットサイズを計算し, 各スポットサイズがその最小となる位置の差から求めた.

このとき回折光は垂直方向では, レーザー共振器内においては活性層とこれを挟むクラッド層との間の屈折率差に基づく強い屈折率導波機構で導波されているため平面波になっており, 共振器端面で垂直方向のスポットサイズは最小となる. これに対し水平横方向のスポットサイズは素子構造に基づく導波状態の相違に伴って様々に変化するのでこれを精密に計算し ΔZ を求めた.

一方, 実験としては, 通常のナイフエッジ法を用いて ΔZ を測定した.

3.2.1 電流注入領域幅 (W) 依存性

図8に ΔZ の W 依存性を示す. 実線は $d=0.04\ \mu\text{m}$ と $d=0.07\ \mu\text{m}$ との各場合の計算結果であり, 黒丸は $d=0.07\ \mu\text{m}$ の SAS レーザーにおいて $W=5.5\ \mu\text{m}$ (M-SAS) と $W=2.5\ \mu\text{m}$ (I-SAS) との ΔZ の実験結果である.

- 1) 非点隔差 ΔZ の電流注入領域幅 W (溝形状) 依存性は極めて小さい. また活性層厚 d 依存性も小さい.

3.2.2 ストライプ幅 (S) 依存性

図9に I-SAS レーザーにおける ΔZ の S 依存性を示す. 実線は $d=0.04\ \mu\text{m}$ と $d=0.07\ \mu\text{m}$ との各場合の計算結果であり, 黒丸は $d=0.07\ \mu\text{m}$ とした I-SAS レーザーの ΔZ の実験結果である.

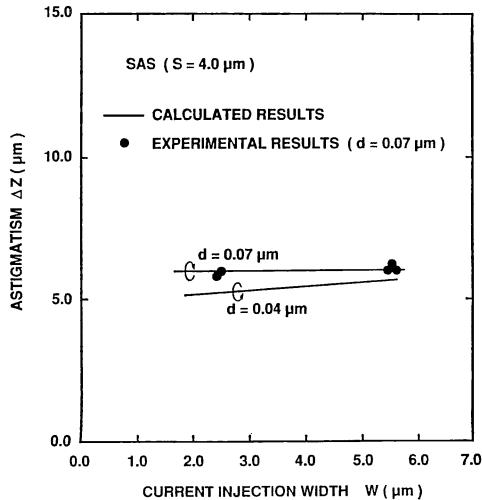


図8 非点隔差 ΔZ の電流注入領域幅 W 依存性を示した図. 実線は活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ と $0.07 \mu\text{m}$ との SAS レーザーの計算結果. 黒丸は $d=0.07 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザー ($W=2.5 \mu\text{m}$) と M-SAS レーザー ($W=5.5 \mu\text{m}$) との場合の実験結果.

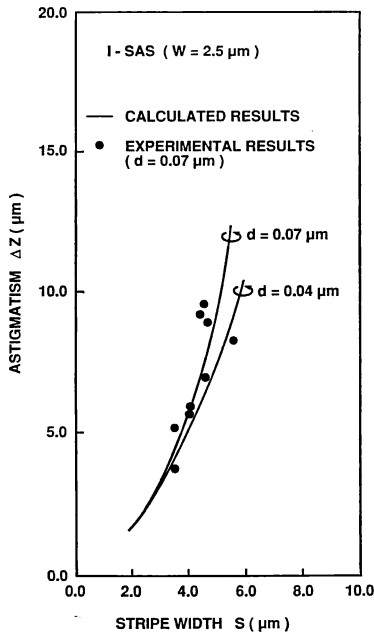


図9 非点隔差 ΔZ のストライプ幅 S 依存性を示した図. 実線は活性層厚 $d=0.04 \mu\text{m}$ と $0.07 \mu\text{m}$ との SAS レーザーの計算結果. 黒丸は $d=0.07 \mu\text{m}$ の I-SAS レーザーの実験結果.

- 1) ストライプ幅 S が狭くなるに伴い ΔZ は急激に減少する.
- 2) 非点隔差 ΔZ の活性層厚 d による変化は比較的

小さい.

- 3) 特に $S \leq 3.5 \mu\text{m}$ になると ΔZ は d に依存せずほぼ一定の値になり, このとき $\Delta Z \leq 4.0 \mu\text{m}$ が得られる.

以上図8および図9から明らかなように, 計算結果と実験結果とは良く一致している. これから半導体レーザーシミュレータは非点隔差も精度良く解析できることが明らかになった.

これに対し, 従来では ΔZ の計算はほとんど行われず, 半導体レーザーシミュレータによって初めて高精度に ΔZ の計算ができるようになった¹²⁻¹⁴⁾.

4. おわりに

半導体レーザーシミュレータとして開発された2次元電流-光出力特性解析シミュレータを用いることにより, 従来に比べて飛躍的に高精度に半導体レーザーのレーザー発振諸特性の計算機解析が可能となったことを明らかにした. さらにこの計算結果は現実の半導体レーザーの実験結果と極めて良く一致することも明らかにした. こうした半導体レーザーシミュレータは半導体レーザー作製のための設計指針確立に利用する等, 研究開発の支援ツールとして十分な機能を持っていると考えられる.

ところで, 本稿ではすべてバルクの活性層を持つ半導体レーザーにおけるシミュレータについて述べてきたが, 現在では量子井戸半導体レーザーに関しても同様なシミュレータの開発が進められている^{23,24)}.

文 献

- 1) M. Ueno, R. Lang, S. Matsumoto, H. Kawano, T. Furuse and I. Sakuma: "Optimum designs for In-GaAsP/InP ($\lambda=1.3 \mu\text{m}$) planoconvex waveguide lasers under lasing conditions," IEE Proc., **129** (1982) 218-228.
- 2) J. Buus: "Principles of semiconductor laser modeling," IEE Proc., **132** (1985) 42-51.
- 3) M. Ueno, S. Ohnishi, S. Kumashiro and S. Asada: "Two-dimensional analysis of the threshold characteristics of self-aligned structure semiconductor lasers," Tech. Dig. 2nd OEC '88 (1988) pp. 102-103.
- 4) D.P. Wilt and A. Yariv: "A self-consistent static model of the double-heterostructure laser," IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1941-1949.
- 5) K. Yamaguchi, T. Ohtoshi, C. Nagaoka, T. Uda, Y. Murayama and N. Chinone: "Two-dimensional device simulator for laser diodes: Hiladies," Electron. Lett., **22** (1986) 740-741.
- 6) T. Ohtoshi, K. Yamaguchi, C. Nagaoka, T. Uda, Y. Murayama and H. Chinone: "A two-dimensional device simulator of semiconductor lasers," Solid-State Electron., **30** (1987) 627-638.
- 7) K.B. Kahan: "Two-dimensional simulation of laser diodes in the steady state," IEEE J. Quantum Elec-

- tron., **QE-24** (1988) 641-651.
- 8) G. Hatakoshi, M. Kurata, E. Iwasawa and N. Motegi: "General two-dimensional device simulator for laser diodes," *Trans. IEICE Jpn.*, **E71** (1988) 923-925.
 - 9) S. Seki, M. Tomizawa, K. Yokoyama and Y. Yoshii: "Two-dimensional, static, and dynamic device simulation of laser diodes," *Proc. IEDM 1988*, **13.6** (1988) pp. 323-326.
 - 10) G.H. Song, K. Hess, T. Kerkhoven and U. Ravaioli: "Two-dimensional simulator for semiconductor lasers," *Proc. IEDM 1989*, **6.4** (1989) pp. 143-146.
 - 11) M. Ueno, S. Asada and S. Kumashiro: "Two-dimensional numerical analysis of lasing characteristics for self-aligned structure semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (1990) 972-981.
 - 12) T. Ohtoshi, K. Yamaguchi and N. Chinone: "Analysis of astigmatism in high-power semiconductor lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) L68-L70.
 - 13) K. Nitta, K. Itaya, M. Ishikawa, Y. Watanabe, G. Hatakoshi and Y. Uematsu: "Astigmatism in ridge-stripe InGaAlP laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L2089-L2091.
 - 14) M. Ueno: "Two-dimensional analysis of astigmatism in self-aligned structure semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 1487-1495.
 - 15) J. J. Coleman and P. D. Dapkus: "Single-longitudinal-mode metalorganic chemical-vapor-deposition self-aligned GaAlAs-GaAs double-heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 262-263.
 - 16) L. J. Mawst, G. Costrini, C. A. Zmudzinski, M. E. Givens, M. A. Emanuel and J. J. Coleman: "Complimentary self-aligned laser by metalorganic chemical vapor deposition," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 903-905.
 - 17) J. J. Yang, C. S. Hong, J. Niesen and L. Figueroa: "High-power single longitudinal mode operation of inverted channel substrate planar lasers," *J. Appl. Phys.*, **58** (1985) 4480-4482.
 - 18) M. Nido, I. Komazaki, K. Kobayashi, K. Endo, M. Ueno, T. Kamejima and T. Suzuki: "AlGaAs/GaAs self-aligned LD's fabricated by the process containing vapor phase etching and subsequent MOVPE regrowth," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 720-724.
 - 19) S. Kumashiro and K. Ueno: "A versatile compound device simulator BIUNAP-C," *Tech. Dig. 34th Meet. Japan Soc. Appl. Phys., Pt. 1*, (1987) p. 911.
 - 20) R. Lang: "Lateral transverse mode instability and its stabilization in stripe geometry injection lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 718-726.
 - 21) F. Stern: "Calculated spectral dependence of gain in excited GaAs," *J. Appl. Phys.*, **47** (1976) 5382-5386.
 - 22) D. Marcuse: *Light Transmission Optics* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1972).
 - 23) Z.-M. Li, K. M. Dzurko, A. Delage and S. P. McAlister: "A self-consistent two-dimensional model of quantum-well semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **128** (1992) 792-803.
 - 24) Z.-M. Li, M. Dion, S. P. McAlister, R. L. Williams and G. C. Aers: "Incorporation of strain into a two-dimensional model of quantum-well semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 346-354.