

面発光レーザーの物理と課題

馬場俊彦

今年には面発光レーザー初の室温連続発振の報告¹⁾から10年目に当たる。この間、基礎物理から設計、プロセス、実装に至るまで多岐にわたる研究、議論がなされた²⁻⁴⁾。最近でもウェハーフュージョン、選択酸化等のプロセス、GaInNAs等の材料、光インターコネクト、スマートピクセル等の応用といった具合に新しい報告が絶えずなされ、話題性を失っていない。ただし期待される性能、改善の要点などはおおよそ明確になっている。半導体レーザーとしての動作原理はストライプレーザーと同じであり、本質的な特異性は少ない。しかし技術が成熟してくると、わずかな性質の違いが極限性能の大きな差異となって現れるものである。本稿ではそれらをまとめてみたい。以下の節では、まず前半で各性能項目について面発光レーザーの現状と問題点、改善法を述べる。面発光レーザーには大きく分けて誘電体多層膜型と半導体多層膜型があるが、最近は後者が実用化の対象として定着しつつあるので、本稿でもそちらを取り上げたい。さらに後半で面発光レーザーならではの可能性、すなわち極限微小化と自然放出制御^{5,6)}について展望する。

1. 性能と改善法

1.1 閾値電流密度 J_{th}

本稿で考える半導体多層膜型面発光レーザーの断面構造を図1に示す。活性領域には(歪み)量子井戸を、多層膜反射鏡ではさまれたキャビティには発振波長と同じ光学的厚さ(λ キャビティ)を仮定する。一般に J_{th} を低くできれば半導体に余裕が生まれ、温度安定性、長期信頼性が向上するなど総合的に特性が改善される。そのためには閾

値利得 G_{th} [cm^{-1}] を下げる必要がある。レーザーの簡単な理論では

$$G_{th} = \alpha_{act} + \frac{1-\xi}{\xi} \alpha_{clad} + \alpha_{diff} + \frac{1}{\xi L} \log\left(\frac{1}{R}\right) \quad (1)$$

と与えられる。ここで ξ は活性層への光閉じ込め係数、 α_{act} 、 α_{clad} はそれぞれ活性層とクラッド層の吸収損失、 α_{diff} は横方向への光の回折損失、 L は共振器長、 R は反射鏡の平均反射率である。面発光レーザーの L は、図1に示すような多層膜内部へのモード定在波の広がり性を考慮して計算される⁷⁾。 α_{diff} を抑えるためには L は短くするのが好ましく、普通、ストライプレーザーの場合の1/100以下である。この状況で式(1)第4項の増大を抑えるためには $\log(1/R)$ も小さくする必要があり、 R には99.9%近い値が要求される。これだけならば最近のエピタキシャル成長技術によりすでに可能となっている。しかし面発光レーザーではレーザーモード定在波の縦方向の広がりがストライプレーザーの導波モードの広がり性に比べて大きく、したがって ξ が小さい。例えば厚さ5nmの量子井戸1層当たりの ξ は、ストライプレーザーで0.8~1%が標準的なのに対し、GaAs/AlGaAs反射鏡をもつ面発光レーザーでは0.4~0.5%とおおよそ半分である。これを補うようにさらに R を高める結果、外部量子効率が低下する。また式(1)よりわかるように、 ξ が小さいと α_{clad} の影響が大きくなり、結局、 G_{th} はストライプレーザーの場合より高くなる。

この問題を解決するには、次の3つの方法がある。① ξ の増大、すなわち反射鏡材料として屈折率差の大きな組み合わせを選択する。近年、屈折率差の大きなGaAs/AlAs反射鏡を長波長帯面発光レーザーに利用する研究が盛んなのはこのためである⁸⁾。②高利得材料の利用。波長0.98 μm 帯GaInAs歪み量子井戸はこの点できわめてすぐれている。長波長帯材料としてはGaAs基板上的GaInNAs⁹⁾、

横浜国立大学工学部電子情報工学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: baba@dnj.ynu.ac.jp

GaInAs 基板上的 GaInAs¹⁰⁾, InP 基板上的 AlGaInAs¹¹⁾, InNAsP¹²⁾ などが研究されている。これらの材料は伝導体側のバンドオフセットを GaInAsP よりも大きくでき、高注入時のキャリアー漏れ、利得飽和を防ぐことができる。

③ α_{clid} の低減。多層膜反射鏡、特に p 型層へのドーピングを適度に減らす、もしくはレーザーモード定在波の節の位置に集中的にドーピングを行うことで実現できる。これは荷電子帯間吸収が深刻な長波長帯で特に有効となる⁸⁾。

1.2 閾値電流 I_{th}

面発光レーザーの具体的な構造を図 2 にまとめる。面発

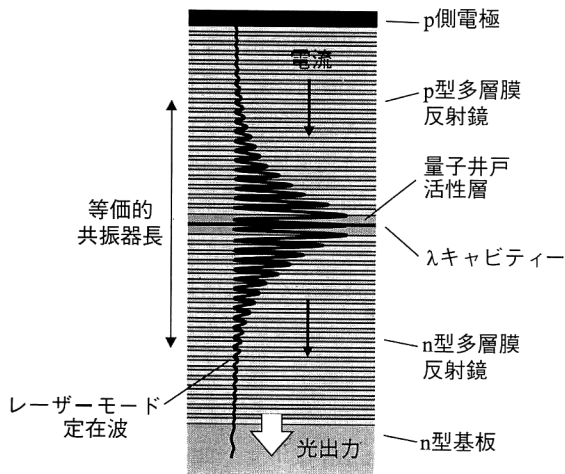


図 1 面発光レーザーの構造とレーザーモードの定在波分布。

光レーザーは電流が流れる実効面積を小さくすることで、 I_{th} を容易に低減できる。ただし全く自由に小さくできるわけではない。直径 $2r$ が発振波長に近づくと α_{diff} が大きくなって J_{th} が増大し、 I_{th} も大きくなる。また何事も、考える領域が小さくなると体積効果より表面効果が顕著になる。半導体レーザーでは表面再結合による電流損失が心配となる。さらに電極接触面積と電流断面積が狭くなるため、電気抵抗の増大、発熱による I_{th} の上昇が懸念される。これらの問題を一挙に解決したのが選択酸化技術である。活性層近くに導入された選択酸化層が集光作用をもつレンズの役割を果たし、 α_{diff} の上昇を抑えたため、従来の直径微小化の限界を 1/2 以下に引き下げた。またあらかじめ大きな半導体メサを形成し、これに選択酸化を施して素子の実効面積を小さくするため、活性層側面が露出しない、電極面積を大きく保てる、といった効果がある。波長 $0.98 \mu\text{m}$ 帯 InGaAs/AlGaAs の素子で $2r \sim 2 \mu\text{m}$, $I_{\text{th}} \sim 10 \mu\text{A}$ が得られるなど¹³⁾、このプロセスを採用することで従来のプロトン打ち込み型やメサ型に比べ I_{th} がおよそ 1 桁低減された。今後の課題はプロセスの面内均一性の確保であり、酸化の自己停止機構が検討されている¹⁴⁾。

1.3 光出力と電力変換効率

光出力を決めるのは内部量子効率、外部量子効率、および温度上昇である。材料と電流閉じ込め構造が同じで、表面効果が問題にならなければ、内部量子効率はストライプ

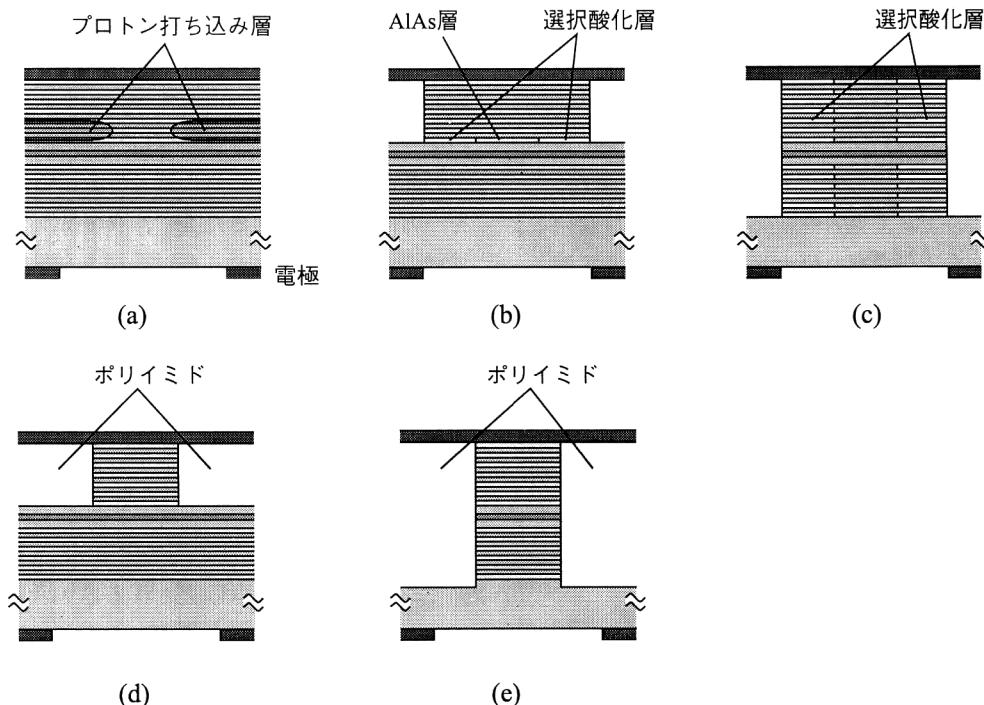


図 2 面発光レーザーの具体的な構造。(a) プロトン打ち込み型、(b) 選択酸化型(単一酸化層)、(c) 選択酸化型(多層酸化層)、(d) 低メサ型、(e) ポスト型。

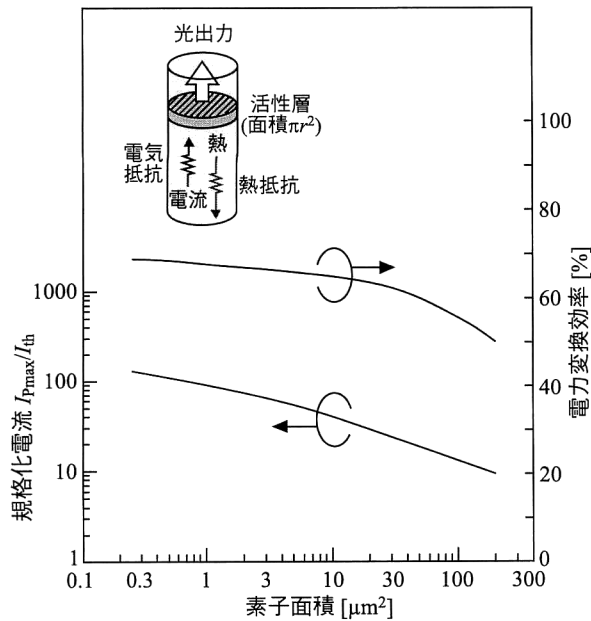


図3 円形ポスト構造面発光レーザーの素子面積と最大光出力を与える電流値、および電力変換効率の関係。波長1.55 μm 、活性層総厚20 nm、クラッド厚3 μm 、内部量子効率90%、外部量子効率80%、特性温度50 K、電極コンタクト抵抗 $1 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ 、多層膜の電気抵抗0.05 Ωcm 、熱抵抗1 K/mWを仮定している。

レーザーでも面発光レーザーでも変わらない。図2のポスト型以外の構造では活性層の横方向へのキャリア拡散があるので、内部量子効率が低下する可能性がある¹⁵⁾。1.1で述べたように、面発光レーザーの外部量子効率はストライプレーザーよりやや劣る。また面発光レーザーは熱抵抗が大きいため、連続駆動時の内部温度上昇によって最高光出力が抑えられる。素子の厚みを一定と考えると熱抵抗はおよそ直径 $2r$ に反比例する。したがって素子の微小化は大きな温度上昇を生み、出力飽和を顕著にさせる。マイナス要素ばかりのようだが、見方を変えるとそうではないことがわかる。図3に素子面積と最大光出力を与える電流、および電力変換効率の関係の一例を示す。素子が微小化されると、素子面積 πr^2 で規格化された熱抵抗と電気抵抗は低減される。その結果、同じ電流密度での温度上昇はむしろ小さくなり、最大光出力の面密度は高くなる。つまり面発光レーザーは小さい割によく光る素子といえる。選択酸化を用いた波長0.98 μm 帯の素子では、ストライプレーザーの記録を上回る最大電力変換効率57%が達成されている¹⁶⁾。

1.4 モード制御

モードを構成する要素には縦モード（発振波長）、横モード（空間パターン）、および偏波がある。図1のような λ キャビティを使った面発光レーザーは、発振波長がほぼ完

全に単一化され、サイドモード抑圧比は30 dB程度である。波長の絶対値はキャビティの光学的厚さにほぼ比例するため、エピタキシャル成長の膜厚制御性がきわめて重要になる。逆にウェハー面内で意図的に厚さを傾斜分布させ、多波長レーザーアレイを構成した例もある^{3,4)}。

円形横モードは、面発光レーザーを応用する上で重要な利点である。しかし直径を小さくしないと横モードが安定化できない点が加工プロセスを難しくする。一般に横モード制御構造には利得型と屈折率型があるが、ストライプレーザーのように半導体埋め込み成長によって上下方向に完全な導波路を構成した例は少ない。図2のポスト型は唯一完全な導波路をもつが、周囲は空気かポリイミドのような低屈折率媒質であり、理想的な単一モード化を実現するには直径を1 μm 以下と極微細にしなければならない。したがって加工が難しい、表面再結合が大きい、といった問題がある。他の構造は利得型と屈折率型の混在であり、図2ではプロトン打ち込み型→低メサ型の順に屈折率型の要素が濃くなる。プロトン打ち込み型は、打ち込みの精度の制約から直径5 μm 以下の素子を作るのが難しい。光子密度が低いときは基本モードと高次モードの回折損失の違いによって単一モード動作するが、光子密度が高くなるとホールバーニングによって高次モード発振が起こりやすくなる。選択酸化構造で3 μm 以下まで開口を微小化すると、回折損失と開口部での散乱損失によって高次モード発振が完全に抑えられる¹⁵⁾。

対称形状の共振器をもつ面発光レーザーでは、偏波制御も重要な課題である¹⁷⁾。制御機構を設けない素子では、劈開面に沿った2方向の偏波で発振しやすいことが実験的にわかっている。また複数偏波の同時発振や偏波スイッチングが発生しやすく、これは雑音の増加を引き起こす。偏波を一方向に安定させるために、次のような方法が考案されている。①素子全体に1軸性の歪みを与え、偏波方向によって利得の違いを与える。②方向によって利得差がある(311)基板や量子構造を用いる。③メサを長方形にし、偏波方向によって光の回折損失、光閉じ込め係数の違いを与える。④複屈折性をもった金属/誘電体偏向子を多層膜反射鏡の上に装荷し、偏波によって反射率に差を与える。これらのうち、注入レベルによらず最も安定して偏波制御を実現できているのは②の方法である。(311)基板上的のエピタキシャル成長はほぼ確立されており、偏波間のモード抑圧比30 dBが得られている¹⁸⁾。

1.5 変調速度

光子密度 S 、光子寿命 τ_p 、微分利得 $\partial g/\partial N$ に対して共振周波数は $\sqrt{(\partial g/\partial N)S/\tau_p}/2\pi$ で与えられる。微分利得

は活性層の特性で決まるので、ストライプレーザーと変わらない。ただし面発光レーザーには強い縦モード選択性があるため、共振モードと利得スペクトルが離調する利得オフセット¹⁹⁾がある場合は、微分利得がさらに小さくなる。光子密度については、1.4節で述べたようにストライプレーザーよりも大幅に増大できる潜在能力がある。また光子寿命は（意図せずとも）ストライプレーザーの場合より短い。以上を総合すると、最高変調速度はストライプレーザーより高くなる可能性がある。現在までのところ報告されている最高変調速度は16 GHz程度である。主な制限要因である寄生容量を低減できれば、45 GHzまでの変調が可能と予測されている²⁰⁾。

2. 極限微小化と自然放出制御

2.1 微小共振器の自然放出光係数

一般に共振器体積が小さくなると、共振器が許容する光学モード数が減少する。レート方程式でしばしば登場する自然放出光係数 C (β とも呼ばれる)は、レーザーモードに結合する自然放出エネルギーの割合で定義され、

$$C = m \xi_r \lambda^4 / 4\pi^2 n_{eq}^3 V \Delta\lambda \quad (2)$$

と与えられる²¹⁾。ここで m は活性層の発光の異方性を表す係数であり、面発光レーザーの場合、バルクでは1であるが、量子薄膜では1.5となる。 ξ_r はレーザーモードの定在波と活性層の位置関係から計算される0~8の値であり、相対閉じ込め係数と呼ばれる。 n_{eq} はレーザーモードの等価屈折率、 V は定在波の広がり方を考慮した実効的な共振器体積、 λ は発光中心波長、 $\Delta\lambda$ は共振器がないときの発光スペクトル半値全幅である。面発光レーザーはストライプレーザーと比べて V が1/10~1/1000となるため、 C が大幅に増大する。これに付随した発光の高速化、無閾値レーザー発振、特異な変調特性などが、自然放出制御としてしばしば議論される。

2.2 微小共振器の自然放出レート

共振器が均一な反射率をもつ反射鏡で覆われた状況を考えよう。各モードに対する自然放出レートは、フェルミの黄金則から計算される。すなわち、電子（双極子モーメントの大きさと空間分布）と光（真空場の平方強度と空間分布）の相互作用の大きさ（積の全空間積分）でレートが与えられる。全モードへの自然放出レートはその総和（周波数積分）で与えられる。大きな共振器では真空場強度が自由空間と大差ないが、モードは多い。この場合の全自然放出レート R_{sp} は次式で与えられる。

$$R_{sp} \cong e^2 \mu^2 \omega^3 n_{eff} / 3\pi \hbar c^3 \epsilon_0 \quad (3)$$

ここで μ は双極子モーメントの大きさ、 ω は λ に対応す

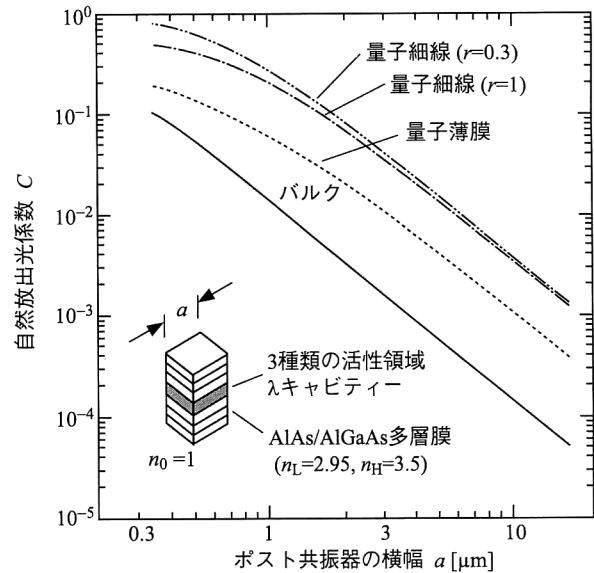


図4 矩形ポスト型面発光レーザーの自然放出光係数の計算結果²²⁾。波長は0.98 μm としている。

る発光角周波数、 n_{eff} は分散を考慮した共振器の実効屈折率である。 n_{eff} を変化させると R_{sp} が変化する、という事実は薄膜を用いた実験で確認されている²²⁾。微小共振器では真空場の平方強度が共振器体積に反比例して高められ、一方、モードは減る。増減が打ち消し合って、共振器を多少小さくした程度では式(3)の結果と変わらない。しかしモードが1個となるような究極的な微小共振器、すなわち共振器体積が

$$(\lambda/2n_{eq})^3 \leq V \leq m \xi_r \lambda^4 / 4\pi^2 n_{eq}^3 \Delta\lambda \quad (4)$$

を満たすとき、偏波の縮退を考えなければ $C=1$ となり、次式 γ で表される割合だけレートが増大する⁶⁾。

$$\gamma = m \xi_r \lambda^4 / 4\pi^2 n_{eq}^3 V \Delta\lambda \quad (\Delta\lambda/\lambda > Q^{-1}) \quad (5)$$

または

$$m \xi_r \lambda^3 Q / 4\pi^2 n_{eq}^3 V \quad (\Delta\lambda/\lambda < Q^{-1}) \quad (6)$$

ここで Q はレーザーモードの共振 Q 値である。式(5)は発光スペクトルが広い場合であり、式(2)の C と全く同じ表式となる。すなわち式(4)を満たす範囲で V を小さくすると、自然放出レートは増大する。発光スペクトルが著しく狭い場合の式(6)は Purcel 係数²³⁾ と呼ばれ、 Q 値に比例してレートは大きく増大することがわかる。

部分的に反射鏡で覆われた共振器では、反射鏡から漏れ出し外場と結合するモード（漏れモード）が自然放出制御の効果を減退させる。活性層の上下に多層膜反射鏡を配置する1次元平板共振器では、横方向、斜め方向に進む光は漏れモードとなる。その放射立体角は GaAs/AlAs 反射鏡を用いた場合で全立体角の90%以上と大きく、上記の効果は望めない。2次元、3次元的に周期性をもつフォトニック

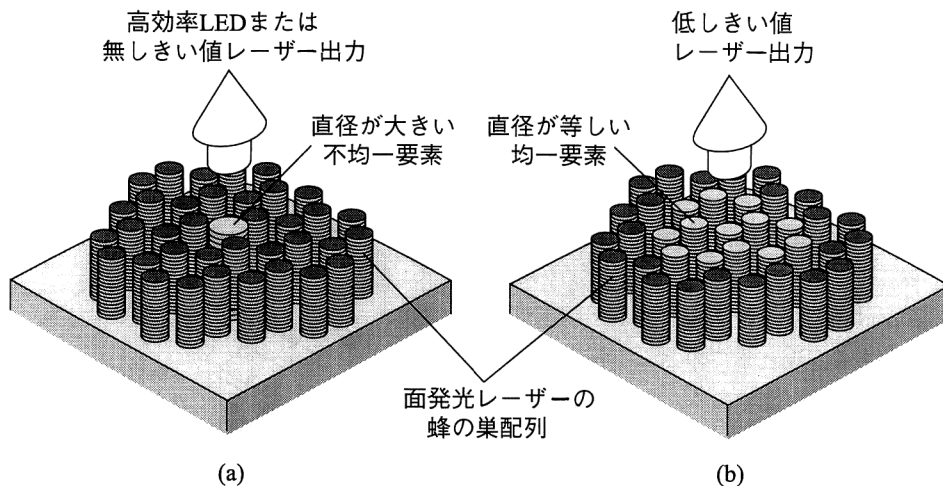


図5 自然放出制御を狙った面発光レーザーの2次元フォトニック結晶配列。(a)は不均一要素をもうけて3次元的な共振モードを実現し、高効率LEDまたは無閾値レーザーを実現する例、(b)は均一要素の配列で横方向の発光を禁止し、低閾値レーザー発振を実現する例。

結晶では、フォトニックバンドギャップ (PBG) が漏れモードを抑制するので、効果が望める⁶⁾。金属で覆われた微小共振器も同様の効果が期待できるように思われる。しかし実際には Au, Ag のような高反射率金属でも反射率がたかだか 95% (実際の素子では 90% 以下が多い) であり、微小共振器が要求する 99.9% 近い反射率の条件は満たせない。

式(4)で表されるような完全単一モードで通常自然放出よりも著しく速い発光が実現できれば、誘導放出によるレーザー発振に頼らなくても高速、高効率な LED (light emitting diode) が実現できる。特に低電力、低出力、高効率率が要求される应用到適すると思われる。

2.3 面発光レーザーの自然放出制御

自然放出制御にはすべてのモードに対して強い光閉じ込めが必要であり、ポスト型以外の面発光レーザーで大きな効果を実現するのは難しいと考えられる。モードの波数空間分布を考慮して矩形ポスト型面発光レーザーの C を計算した結果を図4に示す²¹⁾。横幅 a を $2\lambda/n_{eq}$ 程度にするとバルク活性層でも C は 0.1 近くとなり、量子井戸構造によって m を大きくできれば、 C はさらに 1 に近づく。ただし横幅 a を λ/n_{eq} よりも小さくすると回折によってモードは広がり、実効共振器体積はこれ以上小さくならない。そこで図5(a)のようにポストをアレイ状に配列して、2次元フォトニック結晶を構成する方法が考えられる。図のような蜂の巣配列は偏波によらず PBG を生む²⁴⁾。また実際に発振を起こさせたい面発光レーザーの直径を他のポストより大きくすると、面内方向に共振モードが生じる²⁵⁾。こうすれば、面発光レーザー本来の縦方向の共振とフォトニック結晶配列による横方向の共振で3次元的な共振モードが生じ、 $\gamma > 1$ が実現できると予想される。ただ

しこの場合、共振波長と発光波長が一致するように、発光波長を調整する必要がある。図5(b)は均一なポストからなるフォトニック結晶を表しており、この場合、PBGは横方向へ放射されるモードを禁止する。したがって自然放出率はむしろ減少し、高速なLEDは望めない代わりにレーザー閾値電流を下げるができる。

近い将来と遠い将来とで話を分けて解説した。前者をまとめると、高性能素子が実現されている InGaAs 系では、標準(最高)で閾値電流 $100 \mu A$ (数 μA)、電力変換効率 50% (60%以上)、変調速度 20 GHz (50 GHz) が数年以内に実現されると思われる。これに長波長帯素子の温度特性改善が加われば、応用範囲は格段に広がるだろう。後者は量子ドット、フォトニック結晶など関連する構造と同時に研究が進むと思われる。上記の性能がさらに向上したとき、比較的弱い光出力で動作する大規模面発光レーザーアレイの用途を、幅広い分野の研究者の間で考えておいてもらいたいものである。

文 献

- 1) F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga: "Room-temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser," Trans. IEICE., **E7** (1988) 1089-1090.
- 2) K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita: "Surface emitting semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., **24** (1988) 1845-1855.
- 3) Special issue on semiconductor lasers, IEEE J. Quantum Electron., **27** (1991) 1332-1425; **29** (1993) 1950-2057.
- 4) Special issue on semiconductor lasers, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., **1** (1995) 601-696; **3** (1997) 344-434.
- 5) T. Baba, T. Hamano, F. Koyama and K. Iga: "Spontaneous

- emission factor of a microcavity DBR surface emitting laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1347-1358.
- 6) T. Baba: "Photonic crystals and microdisk cavities based on GaInAsP-InP system," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **3** (1997) 808-830.
 - 7) D. I. Babic and S. W. Corzine: "Analytic expressions for the reflection delay, penetration depth, and absorptance of quarter-wave dielectric mirrors," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 514-524.
 - 8) N. M. Margalit, J. Piprek, S. Zhang, D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, J. R. Wesselmann, J. E. Bowers and E. L. Hu: "64°C continuous-wave operation of 1.5- μm vertical-cavity laser," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **3** (1997) 359-365.
 - 9) M. C. Larson, M. Kondow, T. Kitatani, K. Nakahara, K. Tamura, H. Inoue and K. Uomi: "GaInNAs-GaAs long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser diodes," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 188-190.
 - 10) H. Shoji, T. Uchida, T. Kusunoki, M. Matsuda, H. Kurakake, S. Yamazaki, K. Nakajima and H. Ishikawa: "Fabrication of $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{InGaAsP}$ strained SQW lasers on $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$ ternary substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6** (1994) 1170-1172.
 - 11) N. Ohnoki, N. Hatori, A. Mizutani, F. Koyama and K. Iga: "GaInAs/AlGaInAs semiconductor lasers with AlAs oxide current confinement structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 1896-1899.
 - 12) W. G. Bi, Y. Ma, J. P. Zhang, L. W. Wang, S. T. Ho and C. W. Tu: "Improved high-temperature performance of 1.3-1.5- μm InNAsP-InGaAsP quantum-well microdisk lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 1072-1074.
 - 13) G. M. Yang, M. H. Macdougall and P. D. Dapkus: "Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 886-888.
 - 14) T. Yoshikawa, H. Saito, H. Kosaka, Y. Sugimoto and K. Kasahara: "Self-stopping selective-oxidation process of AlAs," *Appl. Phys. Lett.*, **72** (1998) 2310-2312.
 - 15) H. K. Bissessur, F. Koyama and K. Iga: "Modeling of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **3** (1997) 344-352.
 - 16) B. Weigl, M. Grabherr, C. Jung, R. Jager, G. Reiner, R. Michalzik, D. Sowada and K. J. Ebeling: "High-performance oxide-confined GaAs VCSEL's," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **3** (1997) 344-352.
 - 17) T. Mukaiyama, N. Ohnoki, Y. Hayashi, N. Hatori, F. Koyama and K. Iga: "Polarization control of vertical-cavity surface emitting lasers using a birefringent metal dielectric polarizer loaded on top distributed Bragg reflector," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **1** (1995) 667-673.
 - 18) M. Takahashi, N. Egami, T. Mukaiyama, F. Koyama and K. Iga: "Lasing characteristics of GaAs(311)A substrate based InGaAs-GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **3** (1997) 372-378.
 - 19) D. B. Young, J. W. Scott, F. H. Peters, M. G. Peters, M. L. Majewski, B. J. Thibeault, S. W. Corzine and L. A. Coldren: "Enhanced performance of offset-gain high-barrier vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2013-2022.
 - 20) B. J. Thibeault, K. Bertilsson, E. T. Hegblom, E. M. Strzelecka, Y. Akulova and L. A. Coldren: "High speed characteristics of low optical loss oxide apertured vertical cavity lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 11-13.
 - 21) T. Baba, T. Hamano, F. Koyama and K. Iga: "Spontaneous emission factor of a microcavity DBR surface emitting laser (II)—Effect of electron quantum confinements—," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 1310-1319.
 - 22) E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and R. Bhat: "Inhibited and enhanced spontaneous emission from optically thin AlGaAs/GaAs double heterostructures," *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 2546-2549.
 - 24) J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn: *Photonic Crystals* (Princeton University Press, Princeton, 1995).
 - 25) M. Ikeda, K. Hirai and T. Baba: "Theoretical analysis of transmission and resonance characteristics in finite 2D photonic crystals using scattering matrix method," *Dig. Int. Topical Meeting of Contemporary Photonics Technology* (1998) 195-196.

(1998年6月5日受理)