

シンポジウム

## ポスト次世代の高輝度半導体レーザー：フォトニック結晶レーザー

Post-next-generation high-brightness semiconductor lasers: Photonic-crystal surface-emitting lasers

○井上 卓也, 森田 遼平, 吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進 (京都大学)

Takuya Inoue, Ryohei Morita, Masahiro Yoshida, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Susumu Noda (Kyoto Univ.)

## 1. はじめに

レーザーは、その高い出力と指向性（＝高輝度性）および単色性により、情報化社会を支える光通信、自動運転を支える光測距(LiDAR)システム、製造分野を支えるレーザー加工等、多岐にわたる用途に広く用いられている。最近では、レーザーの応用範囲はさらに急速に拡大しており、衛星間光通信等の宇宙産業へのレーザー技術の適用を目指す研究も活発化している。これらの応用範囲の拡大に伴い、高輝度性および単色性に加えて、小型・軽量・高効率・高速変調可能なレーザー光源に対する需要が急速に高まっている。しかしながら、現状では、上記の要求を全て満たすレーザー光源は存在しない。例えば、気体レーザー・固体レーザー・ファイバーレーザー等の高出力光源は、大型かつ低効率であり、高速変調動作も困難である。一方、これらの課題を克服する半導体レーザーは、高出力化のために出射面積を拡大すると、多モード化により輝度およびコヒーレンスが劣化するという課題を抱える。

これらの課題を抜本的に解決しうるレーザー光源として、フォトニック結晶レーザー(Photonic Crystal Surface Emitting Laser: PCSEL)<sup>1)</sup>が注目を集めている。PCSELは、光の波長程度の周期構造をもつ2次元フォトニック結晶を内部に埋め込んだ面発光型の半導体レーザーである。PCSELにおいては、フォトニック結晶の内部を伝搬する光波が、面内180°方向および90°方向に回折されるとともに、面垂直方向に伝搬する放射波にも結合し、2次元定在波状態が形成される。この作用により、PCSELは大面積での単一モード発振が実現可能となるため、ポスト次世代の高輝度半導体レーザーとして、上記の各種応用への展開が期待されている。

本講演では、PCSELの最近の研究の進展として、(1)大面積・高輝度動作の実現、(2)短パルス・高ピーク出力動作の実現、の2つを主に紹介し、最後にPCSELの将来展望を議論する。

## 2. PCSELの大面積・高輝度動作

PCSELの大面積(≧3mm)・高輝度動作のための基本指針を図1(a)に示す。PCSELの内部では、単峰状の電界分布を有する基本モード(上図)の他に、複数の電界の腹を有する高次モード(下図)が存在しうる。これらのモードは、面発光動作時の出射角度がわずかに異なり、基本モードは垂直に光を放射するのに対して、高次モード

はやや斜めの角度にビームを出射する。従って、出射角度に依存して放射損失が急峻に増大するようなフォトニック結晶構造を設計することで、大面積でも単一モード発振が実現可能になる。

上記の方針に従い、本研究では、Fig. 1(b)に示すように、単位格子内に2つの空孔を配置した二重格子フォトニック結晶構造<sup>2)</sup>と裏面反射鏡を用いることで、面内180°・90°回折を表す結合係数( $R+iI$ )と、放射波を介した回折を表す結合係数(大きさ $\mu$ )の両者の精密な制御を行った<sup>3)</sup>。これらの結合係数の大きさを変化させた際の、放射損失の出射角度依存性の計算結果をFig. 1(c)に示す。面内回折および放射回折の両者をもとに弱めるに従って、出射角度の僅かな変化に対して放射損失が大きく増大するようになることがわかる。本設計に基づき、面内回折および放射回折を適切に調整した直径3mmのPCSELデバイスを作製し、連続波駆動にて発振特性を評価した結果をFig. 1(d)に示す<sup>4)</sup>。110Aの電流注入時に50W超の出力が得られ、その時のビーム拡がり角は $1/e^2$ 幅で $0.05^\circ$ と極めて狭くなった。これは、輝度(単位面積・単位立体角当たりのパワー)にして $1\text{ GW/cm}^2/\text{sr}$ に相当し、大型の $\text{CO}_2$ レーザーに匹敵する高い輝度を、半導体レーザー単体で実現することに成功した。

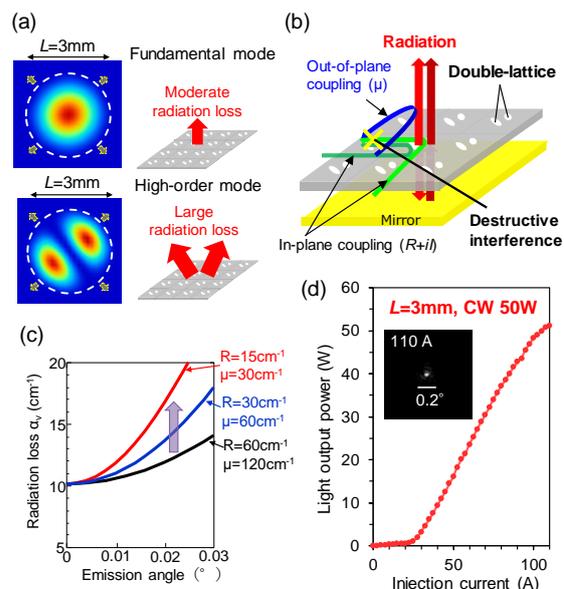


図 1. (a) PCSEL の大面積・単一モード動作の指針. (b) PCSEL における面内・面外結合の模式図. (c) 放射損失の角度依存性の解析結果. (d) 3mm  $\Phi$  PCSEL による 50 W 級高輝度動作の実証結果.

## シンポジウム

## 3. PCSEL の短パルス・高ピーク出力動作

PCSEL において、前項で述べた高輝度連続波動作の他に、サブナノ秒のパルス幅で数 100 W を超える高ピーク出力動作が実現すれば、アイセーフ長距離 LiDAR や非線形効果を利用した生体イメージング等、さらに幅広い応用への展開が可能となる。本項では、これらの短パルス応用に向けて、PCSEL の  $Q$  スwitching 動作により、数 10 ps 未満のパルス幅で数 100 W 級の高ピーク出力動作を実現した結果を紹介する<sup>5-7)</sup>。

一般に、半導体レーザーの  $Q$  スwitching 動作の高出力化のためには、①発振前に共振器損失の大きな状態を実現し、出来るだけ多くのキャリアを活性層に蓄積させること、②発振時に共振器損失を瞬時に減少させて急激な誘導放出を生じさせること、の 2 点が重要である。PCSEL において、上記のような急峻な共振器損失の変化を引き起こす手法として、我々は、デバイス面内に 2 次元的可飽和吸収領域を導入する手法[図 2(a)]と、フォトニック結晶の周期を面内で連続的に変化させる手法[図 2(b)]を提案してきた。前者においては、可飽和吸収領域が、レーザー発振に伴い吸収状態から透明状態に遷移することで短パルス・高ピーク出力発振が得られる<sup>5)</sup>。一方、後者の構造では、発振初期[図 3(b)左]は、光の侵入を妨げる禁制帯の存在により、光が狭い領域に局在し、共振器外への光漏れや面垂直方向への放射損失が大きいため高損失状態となるが、レーザー発振が始まると[図 2(b)右]、誘導放出に伴う屈折率変化に伴って、デバイス全体の共振周波数分布がより均一な分布へと自己変化し、共振器損失は一気に減少する。従って、可飽和吸収効果を利用せずとも等価的な  $Q$  スwitching 動作が生じ、高いピーク出力の短パルス発振を得ることが可能となる<sup>6)</sup>。さらに、可飽和吸収効果と周波数勾配の自己変化作用を組み合わせることで、さらなる高ピーク出力の短パルス発振が実現することも期待される<sup>7)</sup>。

前述した 2 つの原理を併用した直径 800  $\mu\text{m}$  の PCSEL を作製し、ストリークカメラを用いて過渡応答特性の評価を行った。電流 20 A を注入した際の過渡応答特性の測定結果を図 2(c)に示す。パルス幅 30 ps 未満で、ピーク出力 200 W 級の短パルス・高ピーク出力発振の実現に成功した<sup>7)</sup>。これは、従来の  $Q$  スwitching 型半導体レーザーで得られる最大のピーク出力の約 10 倍に相当する。さらに、同デバイスに、パルス幅 1.5 ns の短パルス電流を注入した際には、Fig. 2(d)に示すように、単一の短パルス発振を取り出すことも成功した。本結果は、短パルス発振のタイミングや繰り返し周波数を電氣的に制御可能であることを示唆しており、前述した種々の短パルス応用への適用が期待される。

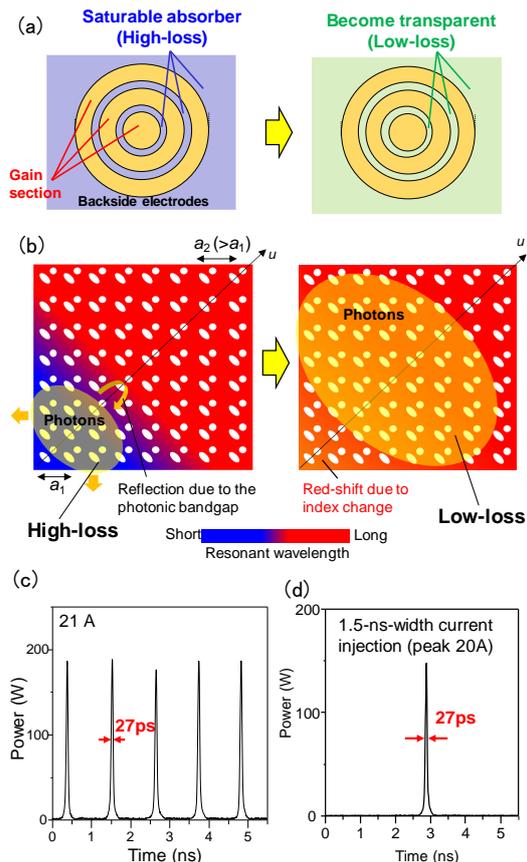


図 2. (a)(b)可飽和吸収領域および大域的周波数勾配を導入した短パルス PCSEL の原理図。(c)(d)作製した短パルス PCSEL の過渡応答特性。

## 4. 将来展望

以上で述べた高輝度 PCSEL や短パルス・高ピーク出力 PCSEL は、従来の大型レーザー装置を光源単体で置き換えることを可能とし、レーザー加工や LiDAR 等の各種応用システム的大幅な小型化・軽量化・低コスト化の実現に寄与することが期待される。さらに、PCSEL は、原理的に極めて狭い発振線幅が実現可能であるため<sup>8)</sup>、衛星間光通信や衛星搭載型コヒーレント LiDAR 等、高いコヒーレンス性が要求される宇宙応用等への展開も期待され、ポスト次世代のレーザー光源として広く普及することが期待される。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費(20H02655, 22H04915)および内閣府 BRIDGE のもとで実施された。

## 参考文献

- 1) M. Imada et al., Appl. Phys. Lett. **75** (1999) 316.
- 2) M. Yoshida et al., Nat. Mater. **18** (2019) 121.
- 3) T. Inoue et al., Nat. Commun. **13** (2022) 3262.
- 4) M. Yoshida et al., Nature **618** (2023) 727.
- 5) R. Morita et al., Nat. Photonics **15** (2021) 311.
- 6) T. Inoue et al., Nat. Commun. **14** (2023) 50.
- 7) R. Morita et al., Opt. Express **31** (2023) 31116.
- 8) T. Inoue et al., Appl. Phys. Lett. **122** (2023) 051101.