

1.3 μm 帯フォトニック結晶面発光レーザ

1.3- μm -Wavelength Photonic Crystal Surface-Emitting Lasers

伊藤 友樹*

Yuhki Itoh

青木 健志

Takeshi Aoki

藤井 康祐

Kosuke Fujii

田中 礼

Rei Tanaka

小笠原 誠

Makoto Ogasawara

吉永 弘幸

Hiroyuki Yoshinaga

情報通信量が増大の一途を辿る中、データセンタでは、多チャンネル化により通信量の急増に対応してきた。一方、現状のシステムでは、1チャンネルにつき1つの半導体レーザを使用するため、消費電力の増大や、部品点数の増加による高コスト化が問題となっている。高光出力の単体レーザ素子から多チャンネルに光を分岐する構成が提案されており、その要求を満たす高出力かつ単一モードの通信用レーザが求められている。しかし、既存の通信用レーザで、単一モードかつ高出力を得ることは、原理的な限界を迎えつつある。我々は、単一モードと高出力動作を両立する次世代の半導体レーザとして、1.3 μm 帯のInP系フォトニック結晶レーザを検討している。ドライエッチングと再成長技術を用いて作製したInP材料系PCSELにおいて、室温連続駆動において200 mWを超える単一モード発振を実証した。さらに、短パルス駆動においては、4.6 Wの高出力を達成し、通信だけでなくセンシング用途にも応用可能である結果を見出した。

To address the growing demand for data traffic, data centers have been increasing the number of channels. However, current systems use one semiconductor laser per channel, resulting in higher power consumption and high costs due to the increased number of components. To overcome these challenges, a novel approach has been proposed, where light from a single laser with high output power is branched to create multiple channels. However, existing telecommunication lasers have reached the limit in achieving high output power with single-mode lasing in principle. Therefore, we have conducted research on 1.3- μm -wavelength InP-based photonic crystal surface-emitting lasers (PCSELs) as the next-generation semiconductor laser capable of both single-mode lasing and high output power. We have demonstrated over 200 mW single-mode operation under continuous-wave conditions at room temperature by using dry-etching and regrowth technique. In addition, we have achieved a high output power of 4.6 W in short-pulse operation. These results suggest that PCSELs can be used not only for communications but also for sensing applications.

キーワード：フォトニック結晶、面発光レーザ、フォトニック結晶レーザ、InP、再成長

1. 緒言

スマートフォンの普及やSNS・動画配信サービスの拡大、在宅勤務などの働き方の変化から、ネットワーク通信量は増大の一途を辿っている。これらを支えるデータセンタでは、これまで多チャンネル化によりデータ通信量の増大に対応してきたが、現状のシステムでは1チャンネルにつき1つの半導体レーザを使用するため、消費電力の増大や部品点数の増加による高コスト化が問題となっている。これらの課題を解決するため、単一のレーザ素子から多チャンネルに光を分岐する構成が提案されており、その要求を満たす高出力かつ単一モードの通信用半導体レーザが強く求められている。しかし、既存の通信用レーザの高出力化は、原理的な限界を迎えつつあり、既存技術の制約を打破する次世代半導体レーザの開発が求められている。

このような背景の中、我々は、単一モードと高出力動作を両立する次世代半導体レーザとして、フォトニック結晶面発光レーザ (PCSEL: Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser) の研究・開発を京都大学と共同で進めている。~940 nm帯のGaAs材料系のPCSELでは、すでにワット級から10ワット級の高出力かつ単一モードのレーザ動作が実証されている^{(1),(2)}。我々は、その技術をInP材料系に展

開し、通信波長帯かつEye-safe性の高い波長である1.3 μm ~1.55 μm 帯のPCSELを検討している。本稿では、PCSELの動作原理や特徴を述べたうえで、InP材料系PCSELの作製技術とそれを用いて作製したレーザの特性について述べる。最適化したドライエッチングおよび埋め込み再成長技術を用いて作製したInP材料系PCSELにおいて、室温連続 (CW: Continuous-Wave) 駆動での単一モード発振⁽³⁾ や、二重格子フォトニック結晶の導入による200 mWを超える高出力・単一モード動作^{(4),(5)}、短パルス駆動でのワット級の高出力動作⁽⁶⁾ を実証してきたので、その結果について報告する。

2. フォトニック結晶レーザの動作原理

InP系PCSELのデバイス構造を図1 (a) に示す。PCSELは活性層近傍に設けた2次元フォトニック結晶^{*1} (PC) により形成されるフォトニックバンドの特異点 (Γ 点, 図1 (b)) での共振を利用した面発光型のレーザである。図1 (c) に示すように、PC面内の180°方向の光の結合に加えて、90°方向の光の結合により、数百 μm 径の面積においても安定したレーザ発振が得られ、出力光は、面垂直方

向に取り出される。PCSELの特徴を代表的な既存レーザである分布帰還型端面射出型レーザ（DFBレーザ）および垂直共振器型面発光レーザ（VCSEL）と比較したものを図2に示す。DFBレーザで高出力を得るには、共振器の長尺化やストライプの幅広化が必要であるが、前者は低光結合係数の回折格子の設計に限界があり、後者は、多モード発振の課題がある。また、VCSELの場合についても、アパーチャ径の拡大により高出力化が可能であるが、この場合も多モード発振の課題がある。このように既存レーザでは、単一モード発振と高出力化にトレードオフの関係があり、これは、光の共振が一方向に限られ共振器サイズに限りがあることと、共振方向と出射方向が一致していることによ

来する。PCSELは、二次元共振作用により、共振器サイズが増大可能で、面垂直方向に出射可能なことから、共振方向と出射方向も異なり、設計の自由度が向上している。高次モードをカットオフするようにPCを最適に設計することで、デバイス面積を拡大することが可能であり、高出力かつ単一モード発振を両立することができる。また、大面積でコヒーレントな共振が得られることで、回折限界に近い、発散角 1° 以下の高収束光が得られることもPCSELの特徴である。狭幅な発散角のビームにより、レンズ等の光学部品の削減が見込めることから、通信システムとしてのコストダウンが期待できる。

3. デバイス作製方法と空孔形成技術

3-1 デバイス作製方法

n-InP基板上にn-InGaAsP層を有機金属気相成長(MOVPE)により成長し、その後、電子ビーム露光とドライエッチングにより格子定数 ~ 400 nmの高アスペクト比の空孔を有するPCを形成する。その後、MOVPEによる再成長を用いて、空孔深さを保持しながら、InPスペーサ層で平坦化を行った。続いて、多層量子井戸(MQW)活性層、p-InPクラッド層、p-GaInAsコンタクト層を順に再成長した。光の取り出しは基板側とし、n電極に円形の窓を形成した。電流注入領域を決定するp電極の直径は $200 \mu\text{m}$ とした。PCには、図3に示す楕円二重格子PCを採用した。2つの正方格子のPCを間隔 d でシフトさせて配置した構造であり、その片方の格子点を楕円形状としている。GaAs系PCSELでは、この楕円二重格子により非対称性を高め、垂直方向への放射を強める効果を実証されており⁽²⁾、我々は、InP系では初めてこの楕円二重格子PCを採用し、高出力・単一モード発振に向け、格子間の間隔 d や楕円形状の最適化を行った。

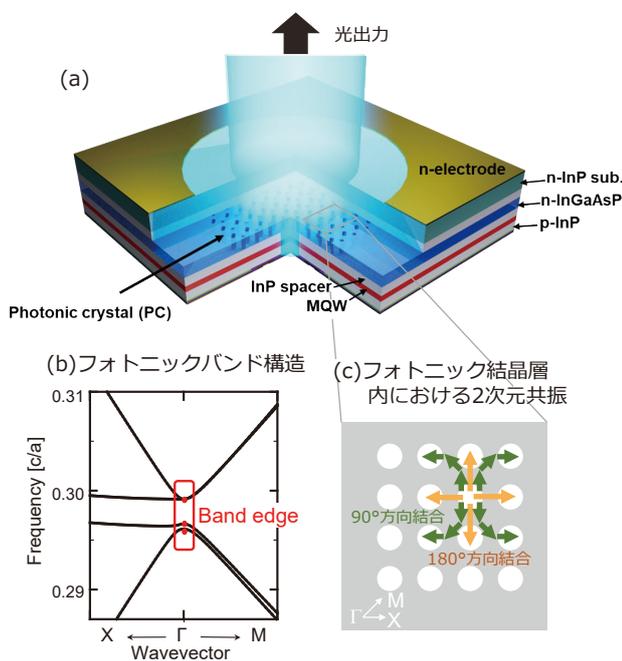


図1 (a) InP系PCSELの構造図と (b) フォトニックバンド構造、
(c) PC面内での光の結合

	端面射出レーザ (DFB-LD)	垂直共振器面発光レーザ (VCSEL)	フォトニック結晶レーザ (PCSEL)
光出射方向・共振方向			
高出力化の方策	共振器長の長大化 ⇒回折格子設計に限界 ストライプメサの幅広化 ⇒多モード	アパーチャー径の拡大 ⇒多モード	アパーチャー径の拡大 ⇒単一モード
高出力時のスペクトル形状	多モード	多モード	単一モード
高出力時のビーム広がり	広がり大 (20~30°)	広がり大 (5~20°)	高収束ビーム (<math><1^\circ</math>)

図2 PCSELの特徴

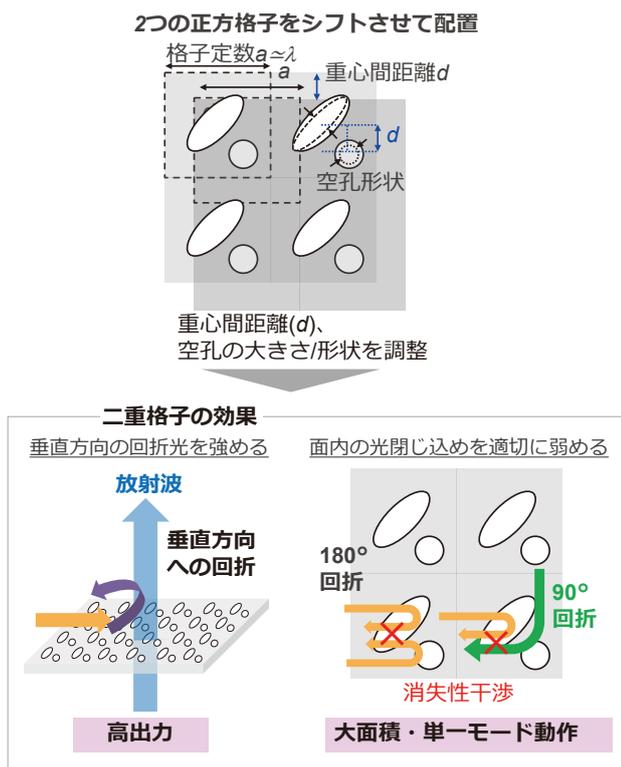


図3 二重格子フォトニック結晶とその効果

いては、異方性の強い条件を適応することで、楕円二重格子PCに必要な、直径100 nm以下の小さな空孔を、400 nm以上の深さで形成することを可能とした⁽⁷⁾。また、再成長においては、横方向成長を促進した成長条件を見出した結果、100 nm以下のInPスペーサの厚みで平坦な表面を得ることに成功した。InPスペーサ成長後のAFM観察像からは、ステップ・テラス構造を観察し、原子層レベルで平坦なInPスペーサ表面を空孔上に形成可能であることを明らかにした⁽³⁾。以上のプロセスを用いることで、楕円空孔の深さ600 nm、円形空孔の深さは450 nm、アスペクト比 > 5の均一な空孔を形成することができた。これらの検討の結果、十分な厚みのPC層を活性層の近傍に形成することができ、PC層と活性層の光閉じ込め係数を共に高めることが可能な、高い結合定数を得られる構造とした。

4. デバイス特性

作製した二重格子PCSELの室温パルス駆動における電流-光出力 (I-L) 特性を図5に示す。比較のため、同じデバイス構造で作製した円形単一格子PCSELの結果も示した。パルス幅1 μs、デューティ比0.1%で評価した。二重格子PCSELにおいて光出力の大幅な向上が確認でき、単一格子PCSELに対して25倍のスロープ効率が得られた。この結果は、非対称性を高めた二重格子PCの導入により、垂直方向の光の放射が設計通り増加できたことを示す。

3-2 高アスペクト比の深い空孔の形成技術

図4には空孔形成プロセスとInPスペーサ成長後の原子間力顕微鏡 (AFM) 像、MQW成長後の空孔断面の走査型顕微鏡 (SEM) 像を示す。我々のデバイスの特徴として、ドライエッチングと再成長を用いて、高アスペクト比の深い空孔を形成した点が挙げられる。図4に示すように、PC上部に活性層を設けることで、PC形成時の活性層へのドライエッチングダメージを回避しつつ、高アスペクト比の深い空孔を、活性層近傍に形成できる。ドライエッチングにお

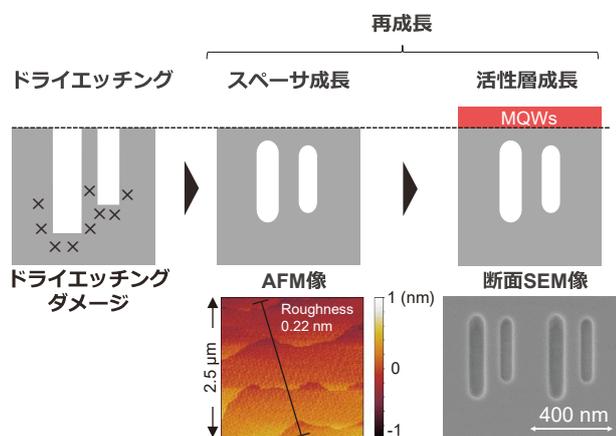


図4 空孔形成のプロセスとInPスペーサ成長後のAFM像と活性層成長後の空孔断面のSEM像

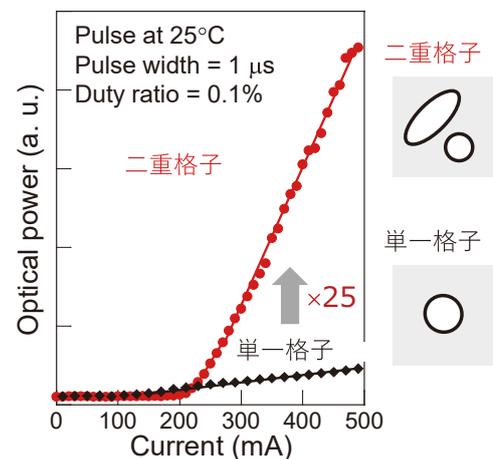


図5 室温パルス駆動における電流-光出力 (I-L) 特性。パルス幅1 μs、デューティ比0.1%。

二重格子PCSELのCW駆動でのI-L評価結果を図6 (a)に示す。25°Cから80°Cまでの広い温度範囲で発振を確認できた。25°Cにおけるしきい値電流 (I_{th}) は230 mA (しきい値電流密度 (J_{th}) 730 A/cm²)、ピーク出力は240 mWであった。25°Cでの最大スロープ効率は0.21 W/Aで、電

力変換効率は約800 mAで最大値をとり11%であった。PCSELは原理的に光が出射側と裏面側の上下に回折される。反射ミラー構造を導入し、裏面からの反射光を活用することで、さらなる光出力とスロープ効率の増大が期待できる。しきい値電流密度の温度依存性を図6 (b) に示す。30-80°Cの温度範囲における、しきい値電流密度の温度依存性から、特性温度^{*2} (T_0) を見積もった結果、53.7 Kであった。この値は、InP系DFBレーザとほぼ同等の値であり、PCSELの温度特性がDFBレーザと同等であることを示す。

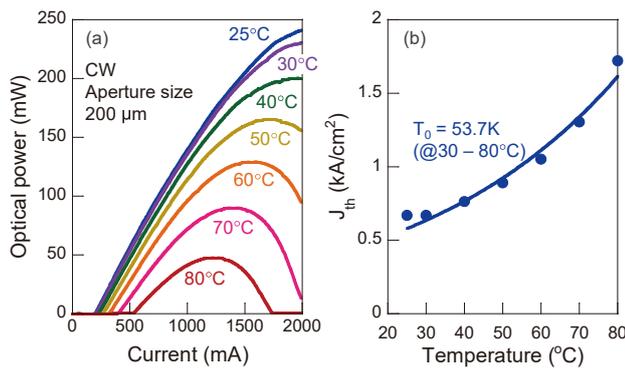


図6 (a) 二重格子PCSELのCW駆動でのI-L特性と (b) しきい値電流密度の温度依存性

図7 (a) に同デバイスのCW駆動における発振スペクトルを示す。25°C、50°C、80°Cでの各ピーク出力付近の注入電流時のスペクトルを示した。すべての温度で単一モード発振が得られており、高温の80°Cでも副モード抑圧比 (SMSR) は、48 dBを超えた。また、発振直後の低電流領域においても、各温度で単一モード発振を観測しており、モードホップフリー動作を確認した。図7 (b) には発振波長の温度依存性を示した。温度に対する波長シフト量は0.103 nm/Kであり、既存のInP系DFBレーザと同等の値であった。

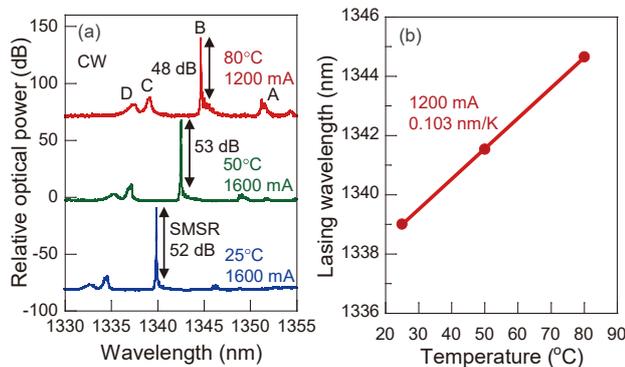


図7 (a) 二重格子PCSELのCW駆動でのスペクトル評価結果と (b) 発振波長の温度依存性

図8に25°Cと80°CにおけるCW駆動時の電流1000 mAの時の遠視野像を示す。25°C~80°Cの温度範囲で単峰かつ狭幅なビームを観測し、その発散角は1.5°以下であった。この結果は、PCSELの特徴である単一モードかつ高収束なビームを80°Cの高温においても維持できることを示す。既存のDFBレーザの発散角は約20~30°であるのに対して、PCSELは~1°程度の狭発散角の単峰ビームが得られる。狭発散角のビームは、センシング用途において、空間分解能や測距距離の向上に寄与し、特にLiDAR (Light Detection And Ranging) のようなセンシング用途の光源において応用が期待される。ToF (Time of Flight) 方式のLiDAR用光源の場合、ナノ秒オーダーの短パルスでのレーザ駆動が想定されている。そこで、InP系PCSELのセンシング用途を見据えた基礎評価として、短パルス駆動でのI-L特性を評価した。

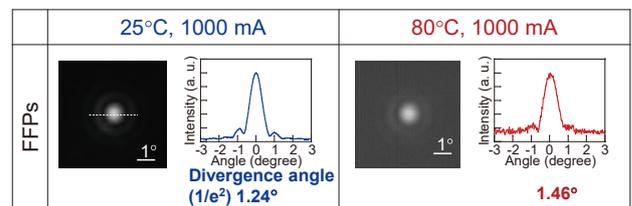


図8 25°Cと80°CにおけるCW駆動時の電流1000 mAの時の遠視野像

図9に短パルス駆動におけるI-L特性の評価結果を示す。室温でパルス周期1 msにおいて、パルス幅2 μsと20 nsの条件で測定した。パルス幅2 μsでは、駆動電流5 A付近で、光出力の飽和傾向を観測し、その時の光出力は~700 mW程度だった。一方、20 nsの短パルスで駆動した場合、測定系の上限である35 Aにおいて4.6 Wのピーク出

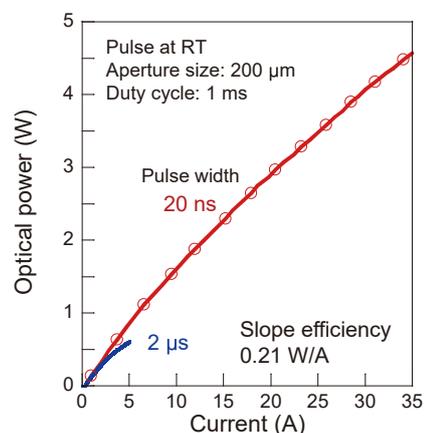


図9 短パルス駆動におけるPCSELのI-L特性

力を達成し、InP系PCSELとして、最大の光出力を実証した。さらなる短パルス化やデバイスサイズの拡大、パルス駆動に適したPCの設計等でさらなる高出力化が見込める。

図10は、フォトリックバンド測定の結果を示す。しきい値以下のパルス駆動（パルス1 μs , Duty比0.1%）における自然放出光の角度成分ごとのスペクトルを評価することでバンド構造を取得した⁽⁸⁾。正方形格子PCに由来する4つのバンド端（低周波から順にA, B, C, D）を明瞭に観察でき、 Γ 点でのバンド端周波数を発振スペクトルと比較することで、発振モードをバンド端Bと同定した。また、各バンド端の周波数から180°方向 (k_{1D}) と90°方向 (k_{2D+} , k_{2D-}) の光結合係数を算出すると、それぞれ、522 cm^{-1} , 193 cm^{-1} , 131 cm^{-1} であった^{(2), (9)}。この値の妥当性を評価するため、厳密結合波解析 (RCWA) を行ったところ⁽¹⁰⁾、光結合係数 (k_{1D} , k_{2D+} , k_{2D-}) はそれぞれ、490 cm^{-1} , 175 cm^{-1} , 141 cm^{-1} であった。実測と概ね一致しており、本デバイスのPCが設計通りの仕上がりであることを確認した。楕円二重格子PCでは、2次元の光結合の強さを表す k_{2D} を高めることで、安定な2次元共振を実現できることが報告されている⁽⁹⁾。今回、100 cm^{-1} 以上と比較的高い k_{2D} を有するPCを用いたことで、広い動作温度範囲で、高いSMSRの単一モード発振を実現できたと考える。

以上より、1.3 μm 帯のPCSELにおいて、高出力かつ単一モードの高収束光を、CW駆動で出力できる性能を示した。レンズレスの高出力CW光源として光通信分野への応用が期待される。また、短パルス駆動においてワット級の出力が得られたことから、LiDARなどのセンシング用途の光源としても有望と考えられる。

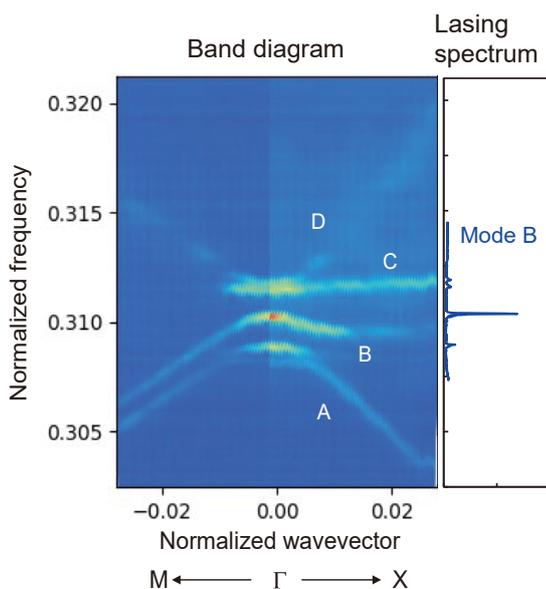


図10 作製したPCSELのフォトリックバンド構造

5. 結 言

1.3 μm 帯InP系二重格子PCSELを作製・評価し、室温CW駆動において240 mWで単一モード発振かつ狭幅な単峰なビームが得られた。また、短パルス駆動においては、4.6 Wを超える高出力を達成した。これらは、InP系PCSELが、光通信およびセンシング用光源として有望であることを示す結果である。

6. 謝 辞

本研究は、京都大学のフォトリック結晶レーザ拠点 (PCSEL COE) の野田教授等との共同研究で進めたものである。

用語集

※1 フォトリック結晶

光の伝播状態を制御するために設計された周期的な構造物。光の波長程度の周期で作製することで、特定の波長の光をフォトリック結晶内に閉じ込めたり、導波させたりすることが可能である。

※2 特性温度

レーザの基本特性を示す指標の一つ。特性温度が高いほど、高温でもレーザ発振可能であることを示す。

参 考 文 献

- (1) S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and Y. Tanaka., "Photonic-crystal surface-emitting lasers: Review and introduction of modulated-photonic crystals," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 23 (6) (2017)
- (2) M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hatsuda, B. Song, J. Gellela, and S. Noda., "Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams," Nat. Mater. 18 (2), 121-128 (2019)
- (3) Y. Itoh, N. Kono, N. Fujiwara, H. Yagi, T. Katsuyama, T. Kitamura, K. Fujii, M. Ekawa, H. Shoji, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda., "Continuous-wave lasing operation of 1.3- μm wavelength InP-based photonic crystal surface-emitting lasers using MOVPE regrowth," Opt. Express 28 (24), 35483 (2020)
- (4) Y. Itoh, N. Kono, K. Fujii, H. Yoshinaga, N. Fujiwara, M. Ogasawara, R. Tanaka, H. Yagi, M. Yanagisawa, M. Yoshida, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda., "High-Power Single-Mode Operation of 1.3 μm Wavelength Double-Lattice Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers using InP-based Regrowth Process," Conf. Dig. - IEEE Int. Semicond. Laser Conf. 2022-Octob, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2022)
- (5) Y. Itoh, N. Kono, D. Inoue, N. Fujiwara, M. Ogasawara, K. Fujii, H. Yoshinaga, H. Yagi, M. Yanagisawa, M. Yoshida, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda., "High-power CW oscillation of 1.3- μm wavelength InP-based photonic-crystal surface-emitting lasers," Opt. Express 30 (16), 29539 (2022)

- (6) Y. Itoh, N. Kouno, K. Fujii, H. Yoshinaga, N. Fujiwara, M. Ogasawara, R. Tanaka, H. Yagi, M. Yanagisawa, M. Yoshida, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda., "High-power with single-lobe beam of 1.3- μm InP-based double-lattice photonic-crystal surface-emitting lasers," Proc. SPIE Photonics West 12440, 124400E (2023)
- (7) Y. Itoh, N. Kono, N. Fujiwara, H. Yagi, T. Katsuyama, D. Inoue, K. Fujii, M. Ekawa, H. Shoji, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda., "Low-Threshold Single-Mode Lasing from InP-based Double-Lattice Photonic Crystal Surface Emitting Lasers with High-Aspect-Ratio Air Holes," Conf. Dig. - IEEE Int. Semicond. Laser Conf. (2021)
- (8) K. Sakai, E. Miyai, T. Sakaguchi, D. Ohnishi, T. Okano, and S. Noda., "Lasing band-edge identification for a surface-emitting photonic crystal laser," IEEE J. Sel. Areas Commun. 23 (7), 1335-1340 (2005)
- (9) T. Inoue, M. Yoshida, J. Gellela, K. Izumi, K. Yoshida, K. Ishizaki, M. De Zoysa, and S. Noda., "General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation," Nat. Commun. 13 (1), 3262 (2022)
- (10) V. Liu and S. Fan., "S4 : A free electromagnetic solver for layered periodic structures," Comput. Phys. Commun. 183 (10), 2233-2244 (2012)

 執 筆 者

伊藤 友樹* : 伝送デバイス研究所
博士 (工学)



青木 健志 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



藤井 康祐 : 伝送デバイス研究所 主査



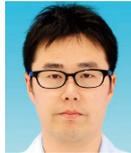
田中 礼 : 伝送デバイス研究所 主査



小笠原 誠 : 伝送デバイス研究所



吉永 弘幸 : 伝送デバイス研究所 グループ長



 *主執筆者