

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.10 フォトニック構造・現象 (旧3.11)

■ 2023年9月22日(金) 9:15 ~ 12:00 | 会 A308 (熊本城ホール)

[22a-A308-1~10] 3.10 フォトニック構造・現象 (旧3.11)

浅野 卓(京大)、石崎 賢司(京大)

9:15 ~ 9:30

[22a-A308-1] ヒータ装荷型トポロジカル干渉素子によるエッジ伝搬経路切替の実証

○岡田 祥¹、坂本 樹¹、服部 堅¹、佐々木 龍耶¹、西山 伸彦^{1,2}、胡 暁³、雨宮 智宏¹ (1.東工大院工、2.東工大未来研、3.物材機構)

9:30 ~ 9:45

[22a-A308-2] 高効率なトポロジカル垂直カプラの実証

○岡田 祥¹、各務 響¹、坂本 樹¹、西山 伸彦^{1,2}、胡 暁³、雨宮 智宏¹ (1.東工大院工、2.東工大未来研、3.物材機構)

◆ 英語発表

9:45 ~ 10:00

[22a-A308-3] Slow-light modes with a large mode area in a valley photonic crystal waveguide with photonic graphene as the core region

○(D)Chengkun Zhang^{1,2}, Yasutomo Ota³, Satoshi Iwamoto^{1,2} (1.RCAST, 2.IIS, 3.Keio Univ.)

10:00 ~ 10:15

[22a-A308-4] 大面積フォトニック結晶レーザーの電流分布制御と高ビーム品質動作

○阿部 竜也¹、吉田 昌宏¹、勝野 峻平¹、De Zoysa Menaka¹、井上 卓也¹、野田 進¹ (1.京大院工)

10:15 ~ 10:30

[22a-A308-5] 10mmΦフォトニック結晶レーザーの発振特性の解析

○前田 健太郎¹、井上 卓也¹、吉田 昌宏¹、野田 進¹ (1.京大院工)

◆ 英語発表

10:45 ~ 11:00

[22a-A308-6] Design of post-based triangular-lattice topological photonic crystal with broken time-reversal symmetry

○(D)Guangtai Lu¹, Siyuan Gao¹, Yasutomo Ota², Satoshi Iwamoto¹ (1.Univ. Tokyo, 2.Keio Univ.)

◆ 英語発表

11:00 ~ 11:15

[22a-A308-7] Design of photonic crystals with a topological photonic bandgap below light line using a semiconductor-magneto-optical material layered structure

○(M2)Xinyi Wang^{1,2}, Guangtai Lu^{1,2}, Siyuan Gao^{1,2}, Nobukiyo Kobayashi³, Kenji Ikeda³, Yasutomo Ota⁴, Tianji Liu⁵, Satoshi Iwamoto^{1,2} (1.RCAST, Tokyo Univ., 2.IIS, Tokyo Univ., 3.Denjiken, 4.Keio Univ., 5.CIOMP)

◆ 奨励賞エントリー

11:15 ~ 11:30

[22a-A308-8] Optimizing Waveguides in Photonic Crystals for High-Efficiency Surface Emission in Terahertz Quantum Cascade Lasers Using High-Index Contrast Coupled-Wave Theory

○(DC)陳 明曦^{1,2}、大谷 知行^{1,2}、平山 秀樹¹ (1.理研 RAP、2.東北大理)

◆ 奨励賞エントリー

11:30 ~ 11:45

[22a-A308-9] 直径3mmフォトニック結晶レーザーのCW光出力増大と金属加工への応用

○勝野 峻平¹、吉田 昌宏¹、De Zoysa Menaka¹、井上 卓也¹、石崎 賢司¹、野田 進¹ (1.京大院工)

11:45 ~ 12:00

[22a-A308-10] 大電流パルス駆動による大面積フォトニック結晶レーザーのキロワット級高ピーク出力動作

○吉田 昌宏¹、勝野 峻平¹、De Zoysa Menaka¹、井上 卓也¹、野田 進¹ (1.京大院工)

ヒータ装荷型トポロジカル干渉素子によるエッジ伝搬経路切替の実証

Demonstration of edge transmission path switching by heater-loaded topological interference devices

○岡田 祥¹, 坂本 樹¹, 服部 堅¹, 佐々木 龍耶¹, 西山 伸彦^{1,2}, 胡 曉³, 雨宮 智宏¹

東京工業大学 工学院 電気電子系¹ 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所²

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点³

○S. Okada¹, T. Amemiya^{1,2}, I. Sakamoto¹, R. Sasaki¹, N. Nishiyama^{1,2}, and X. Hu³

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology

²Institute of Innovative Research (IIR), Tokyo Institute of Technology

³International Center for Materials Nanoarchitectonics (WPI-MANA), National Institute for Materials Science

E-mail: okada.s.ah@m.titech.ac.jp

1. はじめに

我々は、既存の光回路にトポロジカル特性を組み込んだトポロジカル光集積回路を研究している[1]。その機能素子として、トポロジカル系内で2入力の位相干渉を原理とした、エッジ伝搬経路の切替が可能な素子を提案してきた[2]。前回の報告[3]では、光ファイバ系内の位相変化により素子の測定を行ったが、ファイバのわずかな揺らぎに起因する位相揺れにより、出力が不安定となり測定を行うことが出来なかった。今回、チップ内で光を二つに分け、片経路にマイクロヒータを利用した位相変化を施すことにより測定を行い、エッジ伝送の切替を行ったので報告する。

2. 素子構造と測定結果

本研究で使用する素子の光学顕微鏡像を Fig. 1 に示す。フォトニック結晶の単位胞は、 Z_2 トポロジーが発現する構造として、 C_{6v} 対称性を持つ三角エアホール (1 辺の長さ: L , 単位胞中心からの距離: R) を有しており、それが周期 800 nm で三角格子状に配置されている。実験に使用した自明(Trivial)、非自明(Topological)および波長 1.55 μm 付近でバンドが閉じる構造 (Photonic graphene) の変数(L , R) [nm] の設計値は、各々 (240, 244), (240, 284), (240, 266) である。また、一つの入射光をチップ内の Y スプリッタで二つに分け、Input 2 の経路に位相を変化させるためのヒータ (Ti/Au) を装荷している。Fig. 2 にトポロジカル干渉計領域の電子顕微鏡像を示す。今回は、Photonic graphene 領域は 8×8 個とし、Input 1-Port 2 間の Topol. PhC 領域を広くし、各エッジ伝送を形成しやすくした。

Fig. 3 にヒータに電流を注入した際のデバイスの赤外カメラ画像を示す。集積化したことにより前回報告したような時間的な各出力の揺らぎは確認されなかった。ヒータ電力 10 mW 時には、Fig.3(a) に示す通り、Port 1 の経路が支配的である。また、38 mW 時には Fig.3(b) に示す通り、Port 2 の経路が支配的であった。測定画像から推測する強度には最大で 2.1 dB 以上の差があることが確認された。

謝辞 JSPS 科研費 (22H01520), JST CREST (JPMJCR18T4), JST ASTEP (JPMJTR22RG), ARIM (JPMXP1222IT011) の援助で行われた。

参考文献

- [1] H. Kagami et al., *Opt. Express* **28** (22), 33619, (2020).
- [2] 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 26p-E303-8(2022).
- [3] 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-D215-9(2023)

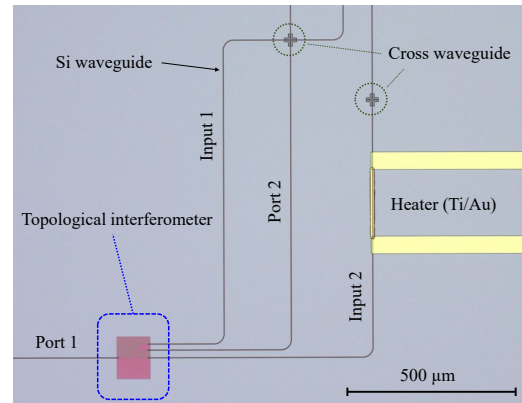


Fig. 1 Optical microscope image of a topological interferometer loaded with a metal heater.

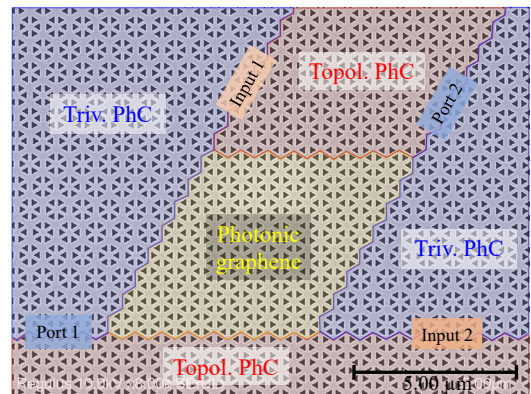


Fig. 2 Scanning electron microscope image of the topological interferometer region.

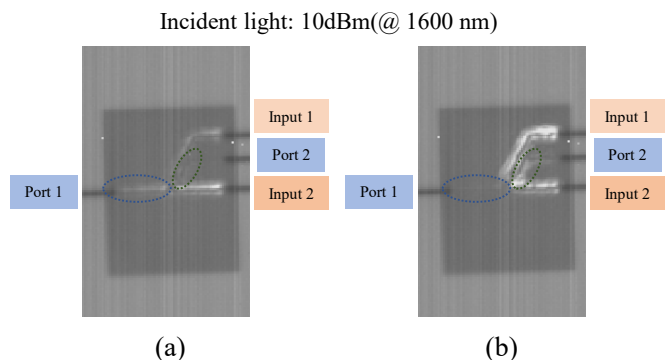


Fig. 3 Infrared camera image of the device when current is injected into the heater. (a) 10mW (b) 38mW.

高効率なトポロジカル垂直カップラの実証

Demonstration of highly-efficient topological vertical coupler

○岡田 祥¹, 各務 響¹, 坂本 樹¹, 西山 伸彦¹, 胡 曉, 雨宮 智宏¹

○S. Okada¹, H. Kagami¹, I. Sakamoto¹, N. Nishiyama¹, T. Amemiya¹

¹ 東京工業大学 工学院電気電子系 ² 物質材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター

¹ Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology ² WPI-MANA, National Institute for Materials Science

E-mail: okada.s.ah@m.titech.ac.jp

1. はじめに

電子系のトポロジをフォトンの系にトレースしたトポロジカルフォトンクスを軸とした研究が、近年盛んに行われている[1]。現在までに、自由空間からトポロジカルフォトンクス伝送路への垂直入射については、高効率な結合を実現する画一的な構造は提案されていない。そのような中、我々はトポロジカル伝送路周辺に欠陥構造を導入することで高い垂直結合率が得られることを理論提案してきた[2]。本研究では、これらの提案を受けて、実際にデバイスを作製し垂直結合率の評価を行った。以下、その詳細を述べる。

2. 素子構造と評価

本研究で用いた素子構造を Fig. 1 に示す。本研究では、SOI (Silicon on insulator) ウェハ上に C_6 対称性を有するナノホールを蜂の巣格子状に配置した構造を採用し、トポロジの異なる二つのフォトンク構造を zig-zag 型の界面で隣接させることでトポロジカル伝送路を構成した。それと併せて、垂直結合率を向上させる目的から、トポロジカル伝送路近傍における特定の蜂の巣格子から三角ナノホールを取り除いた（以降、欠陥構造と呼ぶ）[2]。

上記トポロジカル伝送路をベースとして、欠陥構造の有無による垂直結合効率の変化を測定した。Fig. 2(a) に、左円偏光入射時における port 2 の出力強度の波長依存性を示す。トポロジカルエッジ状態が生じるバンド帯域において、欠陥構造がないトポロジカル伝送路と比較して、欠陥構造を有する伝送路には垂直入射光

が強く結合した。本結果をもとに、欠陥構造有無に伴う垂直結合率の向上比 (= 欠陥構造がある場合の結合効率 / 欠陥構造がない場合の結合効率) の波長依存性をプロットした結果を Fig. 2(b) に示す。これにより、最大で 10 dB 程度の性能向上が観測された。

次に、Fig. 1 の素子において、各々、右円偏光・左円偏光を入射した際の両ポートからの出力強度の波長依存性を、Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) は左右円偏光に対する同一ポートからの出力強度を観測したものであり、特定の円偏光を一意に伝搬させるトポロジカル伝送路特有の現象が観測された（入射光が右円偏光の場合は port 1、入射光が左円偏光の場合は port 2 への出力が支配的）。このとき、光帯域 (1550 nm 帯域) において、port 1 と port 2 の出力強度比は最大で 20 dB 程度となった。また、Fig. 3(b) は左右円偏光に対して各々が支配的となるポートからの出力強度を観測したものである。これにより、両円偏光ともにほぼ同様の伝搬特性が得られていることは明らかであり、導入した欠陥構造は両円偏光に対して適切に機能していることが見て取れた。

謝辞： JSPS 科研費(22H01520), JST CREST (JPMJCR18T4), JST ASTEP (JPMJTR22RG), ARIM (JPMXP1222IT011) の援助で行われた。

参考文献

[1] T. Ozawa et al., Reviews of Modern Physics **91**, 015006 (2019).

[2] H. Kagami, T. Amemiya, S. Okada, N. Nishiyama, X. Hu, Opt. Express **29**, 32755 (2021).

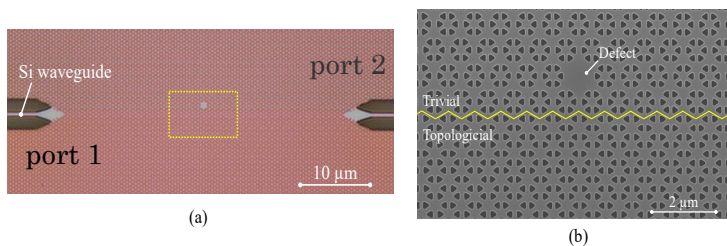


Fig. 1. (a) Optical microscope image of topological vertical coupler with defect structure. (b) Scanning electron microscope image of the area circled by the yellow dotted line in Fig. 1(a).

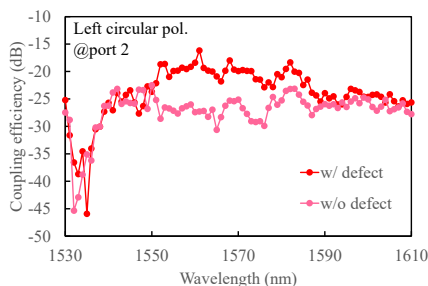


Fig. 2. Wavelength dependence of coupling efficiency with/without defect.

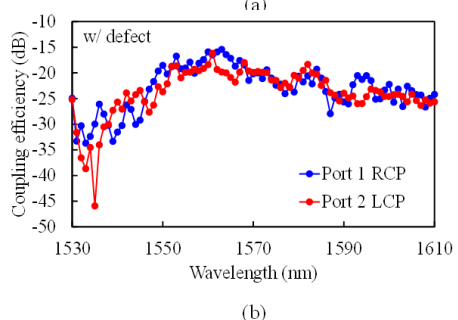
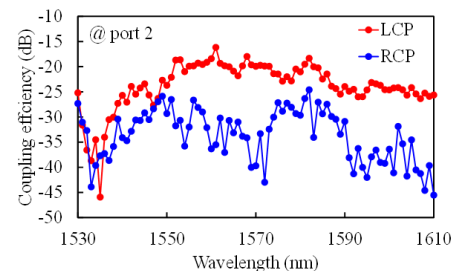


Fig. 3. Propagation characteristics of topological waveguide with defect structure when different circularly polarized light (LCP or RCP) is incident.

フォトニックグラフェンをコア層としたバレーフォトニック結晶導波路 における大面積スローライトモード

Slow-light modes with a large mode area in a valley photonic crystal waveguide with photonic graphene as the core region

東大先端研¹, 東大生研², 慶大³ ○(D)張成昆^{1,2}, 太田泰友³, 岩本敏^{1,2}

RCAST¹, IIS², Univ. of Tokyo, Keio Univ³, Chengkun Zhang^{1,2}, Yasutomo Ota³, Satoshi Iwamoto^{1,2}

E-mail: zck20@iis.u-tokyo.ac.jp

Photonic crystal (PhC)-based slow-light waveguides have been realized in various design configurations, including W1 waveguide [1] and valley photonic crystal (VPhC) waveguide [2]. The slow light modes in these waveguides are highly localized along the interface, which would restrict energy transport capacity. In a recently proposed photonic valley-locked waveguide (PVLW), topological guided modes can distribute broadly over a photonic graphene layer inserted between two VPhCs as the core region [3,4]. In this report, we demonstrate that such a PVLW can support topological slow-light modes when a slight structural modulation is introduced.

Fig. 1(a) presents the schematic of the PVLW investigated here. A graphene-like PhC layer, PhC C, is sandwiched by two topologically distinct VPhC A and B. The projected band structures of TE modes in PVLW with layer distances $d = 1.4a$ (without modification) and $d = 1.15a$ are respectively plotted in Fig. 1(b) and (c). The dispersion curve of the topologically guided mode (colored in red) at around $k = 0.33$ (corresponding to bulk K point) becomes flatter for $d = 1.15a$. Fig. 1 (d) shows the out-of-plane magnetic field intensity distribution of the slow light mode at $f = 0.252$. The field distributes almost across the entirety of the graphene-like PhC layer, verifying that a single-mode slow-light mode with a large mode width is supported in the modulated PVLW. No such single-mode slow-light state is found when the PhC C is replaced with a uniform material, indicating the importance of the graphene-like structure.

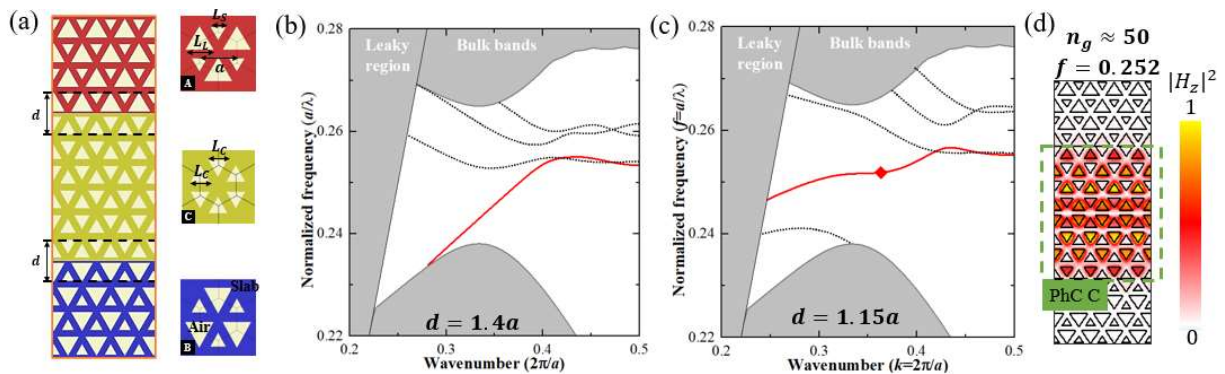


Fig. 1 (a) Schematic of photonic valley-locked waveguide. Right panel: Unit cells of VPhC A, B and PhC C. The unit cells consist of triangle air holes ($\epsilon = 1$) and silicon slab ($\epsilon = 11.56$). The side lengths of air holes are $L_A = 1.3a$, $L_B = 0.7a$ in VPhC A and B, and are $L_C = 0.95a$ in PhC C. The layer distance d is the distance between two different unit cells near the interface. (b) (c) Projected band structures for TE modes in PVLW with $d = 1.4a$ and $d = 1.15a$. The calculation is in two-dimensional plane-wave expansion method. (d) The out-of-plane magnetic field distribution of the mode marked in Fig. 1(c) with group index $n_g = 50$ and normalized frequency $f = 0.252$.

Acknowledgement This work is supported by JST CREST(JPMJCR19T1), KAKENHI (22H00298, 22H01994), and Asahi Glass Foundation. **References** [1] T. Baba, Nat. Photon., **2**, 465-473 (2008). [2] H. Yoshimi *et al.*, Opt. Express, **29**, 13441-13450 (2021). [3] Q. Chen *et al.*, ACS Photonics, **8**, 1400-1406 (2021). [4] Y. Sai *et al.*, Photon. Res., **11**, 1021-1028 (2023).

大面積フォトニック結晶レーザーの電流分布制御と高ビーム品質動作

Control of current injection distribution in large-area photonic-crystal surface-emitting lasers and realization of high-beam quality operation

京大院工, °阿部竜也, 吉田昌宏, 勝野峻平, De Zoysa Menaka, 井上卓也, 野田進

Kyoto Univ., °T. Abe, M. Yoshida, S. Katsuno, M. De Zoysa, T. Inoue, S. Noda

E-mail: abe@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー (PCSEL) は、2 次元フォトニック結晶の特異点 (Γ 点等) における共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである[1]。最近では、二重格子フォトニック結晶[2]におけるエルミート及び非エルミート光波結合の制御[3]と格子定数分布(温度補償構造)の導入により、大面積(直径 3mm)デバイスにおいて、CW 単一モード 50W 動作(輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)の実現に成功している[4]。さらに、出射面側の電極の設計自由度を活用した分割電極を導入し、注入電流値に応じて電流分布、及びそれに伴う温度分布を制御することで、温度補償構造で狙いとした注入電流レベル以外も含めた、幅広い電流値において、高ビーム品質動作が期待出来ることも数値解析により示した[5]。今回、出射面側分割電極を導入した直径 3mm の大面積 PCSEL において、電流分布制御を行うことで、幅広い電流値におけるビーム品質の向上を実現したので報告する。

[実験] 図 1 に出射面側分割電極を導入した直径 3mm の大面積 PCSEL の模式図を示す。上記の検討[5]に基づき、本デバイスの出射面側電極は、中央部までの電流注入に寄与する中央電極と、端部付近の電流注入にのみ寄与する端部電極の 2 種類に分割されており、これら 2 種類の電極から注入する電流値のバランスを調整することによって、デバイス面内の電流注入分布、及びそれに伴う温度分布を制御出来る。このような出射面側分割電極を用いて、電流値 $\sim 110\text{A}$ (光出力 $\sim 50\text{W}$) に合わせて設計された補償構造を導入した直径 3mm の PCSEL に対して、電流分布制御を行いながら CW 発振特性の評価を行った。補償設計時に想定した周波数分布との差異が生じうる、設計電流値 ($\sim 110\text{A}$) よりも低い注入電流レベル (50, 70, 90A) において、各電流値で最もビーム拡がり角が狭くなるように電流分布を調整した場合の遠視野像の測定結果を図 2(a) に示す。比較のために、電流分布を調整しない時の同測定結果を図 2(b) に示す。電流分布を調整することにより、遠視野像がより一層狭くなることが確認され、幅広い電流値において、 $\sim 0.05^\circ$ ($1/e^2$ 幅) の回折限界に近いビーム拡がり角を得ることに成功した。これは、補償の設計電流値以外における周波数分布と補償構造との差異が、電流分布制御によって補正出来たためであると考えられる。詳細は当日報告する。**[謝辞]** 本研究の一部は、特別推進研究の支援を受けた。**[文献]** [1]S. Noda, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.* **23**, 4900107 (2017). [2]M. Yoshida, *et al.*, *Nat. Mater.* **18**, 121 (2019). [3]T. Inoue, *et al.*, *Nat. Commun.* **13**, 3262 (2022). [4]M. Yoshida, *et al.*, *Nature* DOI:10.1038/s41586-023-06059-8 (2023). [5]阿部他, 2022 年秋応物 20p-A101-12.

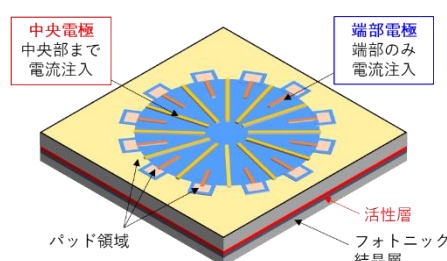


図 1. 出射面側分割電極を導入した直径 3mm の PCSEL の模式図。

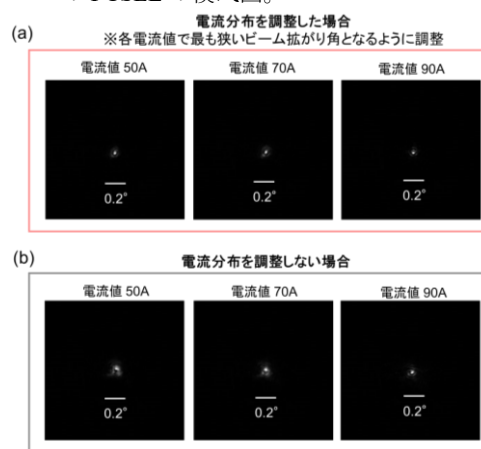


図 2. 直径 3mm の PCSEL の温度補償の設計電流値 ($\sim 110\text{A}$) 以下における CW 動作時の遠視野像の測定結果。(a) 電流分布を調整した場合。(b) 電流分布を調整しない場合。

10mm Φ フォトニック結晶レーザーの発振特性の解析

Analysis of lasing characteristics of 10-mm-diameter photonic-crystal surface-emitting lasers

京大院工,[○]前田健太郎,井上卓也,吉田昌宏,野田進

Kyoto Univ., [○]K. Maeda, T. Inoue, M. Yoshida, S. Noda

E-mail: maeda.kentaro@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序]我々は、フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の大面积・高輝度動作の実現に向けてフォトニック結晶構造¹⁾の設計の深化・最適化を進めている。これまで、基本モードと高次モードの放射損失差および周波数差を、エルミート・非エルミート結合係数を用いて定式化することで、超大面积($\geq 3\text{mm}$)においても単一モード動作を実現するための設計指針を確立するとともに^{2,3)}、作製した直径 3mm PCSEL の連続波駆動において、50W 級の高輝度 ($1\text{GW}/\text{cm}^2$)動作実現にも成功している⁴⁾。今回、さらなる大面积・高輝度動作の実現に向け、発振直径を 10mm に拡大した PCSEL の単一モード発振条件について、面内のバンド端周波数分布の影響を考慮した数値解析を行ったので報告する。

[解析結果] 直径 10mm の二重格子 PCSEL の解析モデルを Fig. 1 に示す。これまでの理論解析結果^{2,3)}に基づき、フォトニック結晶の回折効果を(放射損失を伴う回折も含めて)総合的に弱めるため、エルミート結合係数の実部 R と非エルミート結合係数の大きさ μ の値をともに低減した。また、基本モードの放射係数が適切な値となるように、エルミート結合係数の虚部 I の値を調節した。さらに、連続波駆動時の発熱による屈折率変化を補償する目的で、電流注入領域が外側の領域よりも高周波となるようなバンド端周波数分布を導入した場合⁴⁾を想定し、導入した温度補償量と実際の温度上昇量の差分 ΔT を変化させながら発振特性の解析を行った (Fig. 2)。 $\Delta T=0\text{ K}$ および 4 K の際の電流・光出力特性、および注入電流 1400A (出力約 1kW) における遠視野像および発振スペクトルの解析結果を Fig.3 に示す。電流注入領域内外にバンド端周波数の差が生じた場合 ($\Delta T=4\text{ K}$) においても、単一モード発振かつ高ビーム品質動作($1/e^2$ 拡がり角 $\leq 0.013^\circ$)が維持されており、これは $30\text{GW}/\text{cm}^2/\text{sr}$ 級の高輝度動作が理論的に実現可能であることを示唆する。バンド端周波数分布の形状が変化した場合の発振特性の解析結果等、詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究の一部は特別推進研究 (22H04915) のもとで行われた。**[文献]** 1) Yoshida *et al.*, Nat. Mater. **18**, 121 (2019). 2) Inoue *et al.*, Nat. Commun. **13**, 3262 (2022). 3) 井上他, 2022 秋季応物 20p-A101-8. 4) Yoshida *et al.*, Nature (2023) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06059-8>.

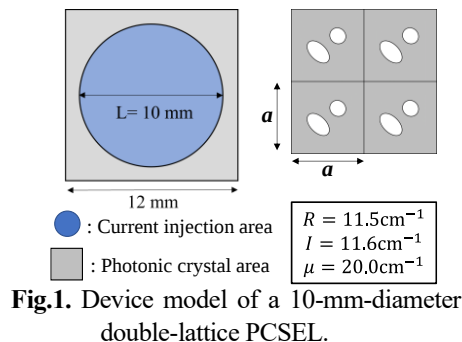


Fig.1. Device model of a 10-mm-diameter double-lattice PCSEL.

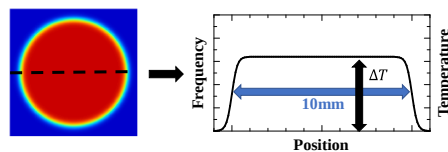


Fig.2. Spatial band-edge frequency distribution used for simulations.

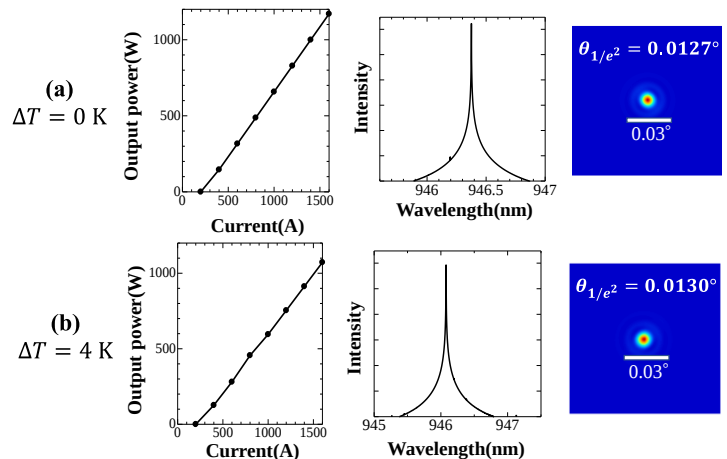


Fig.3. Lasing characteristics of 10-mm-diameter double-lattice PCSELs at an injection current of 1400 A. (a) $\Delta T=0\text{ K}$. (b) $\Delta T=4\text{ K}$. Left: I-L characteristics. Middle: Lasing spectra. Right: FFPs.

時間反転対称性の破れたポスト型三角格子 トポロジカルフォトリック結晶の設計

Design of post-based triangular-lattice topological photonic crystal with broken time-reversal symmetry

東大¹, 慶応大², °(D)陸 広泰¹, 高 思源¹, 太田 泰友², 岩本 敏¹

Univ. Tokyo¹, Keio Univ.², °(D) Guangtai Lu¹, Siyuan Gao¹, Yasutomo Ota², and Satoshi Iwamoto¹

E-mail: lugt@iis.u-tokyo.ac.jp

The realization of topological photonic crystals (PhCs) with broken time-reversal symmetry is one of the most attractive topics in topological photonics due to their ability to support chiral edge states and to resultant topologically protected unidirectional propagation. However, studies on such systems in the optical regime have been limited: they are based on square-lattice PhCs [1,2] or on hole-based triangular-lattice PhCs [3]. Here, we propose a design of triangular-lattice topological PhC with broken time-reversal symmetry using a post-based hybrid structure, which can have a topologically nontrivial band gap in TE-like modes.

Our structure consists of silicon ($n=3.4$) posts with a thickness of 250 nm bonded to a thin film yttrium iron garnet (YIG, permittivity tensor $[4.84, 0.002i, 0; -0.002i, 4.84, 0; 0, 0, 4.84]$), with a thickness of 50nm. We arrayed triangle-shaped posts (side length: 700nm) with a small cylinder (radius: 40nm) at each corner in the triangular lattice (lattice constant: 1125nm) (the inset of Fig. 1 (a)). Applying an external magnetic field perpendicular to the structure lifts the degeneracy between the 3rd and 4th bands at Γ point and opens a ~ 85 -pm-wide gap in the near infrared (Fig. 1 (a)). Without the small cylinders, no bandgap is obtained because the bulk modes at around M point overlap with the gap around Γ point. The distributions of Berry curvature and the Chern numbers for the bands below the gap are shown in Fig. 1 (b). The total Chern number below the bandgap is -1, indicating the gap is a topologically non-trivial complete bandgap. We expect the proposed structure can be fabricated by using the technology of making a thin YIG film [4].

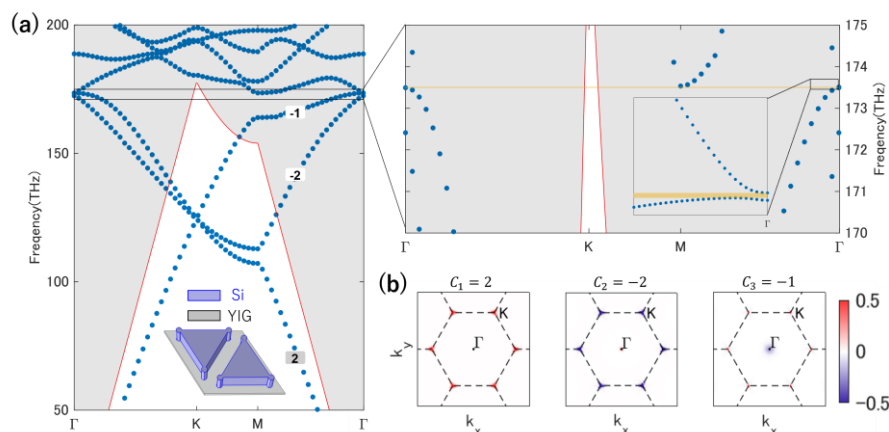


Figure 1. (a) Band structure of topological PhC composed of Si posts on YIG thin film. Chern number are labeled on each band. A bandgap is shown in the enlarge figure. (b) Berry curvature of each band below the bandgap.

Acknowledgments: This work is supported by JST-CREST(JPMJCR1) and KAKENHI (22H00298, 22H0194).

References: [1] Bahari, Babak, et al. Science 358.6363 (2017): 636-640. [2] Bahari, Babak, et al. Nature Physics 17.6 (2021): 700-703. [3] T. Liu, et al., ACS Photon. 9.5 (2022): 1621-1626. [4] S. Gao et al. the 68th JSAP Spring Meeting (2021): 18p-P03-2.

ライトライン下にトポロジカルフォトリックバンドギャップを有する 半導体-磁気光学材料積層型フォトリック結晶の設計

Design of photonic crystals with a topological photonic bandgap below light line using a semiconductor-magneto-optical material layered structure

東大先端研¹, 東大生研², 電磁研³, 慶応大学⁴, 中科院長春光機所⁵

○王 欣怡^{1,2}, 陸 広泰^{1,2}, 高 思源^{1,2}, 小林伸聖³, 池田賢司³, 太田泰友⁴, 刘天際⁵, 岩本 敏^{1,2}

RCAST, Univ. of Tokyo¹, IIS, Univ. of Tokyo², Denjiken³, Keio Univ.⁴, CIOMP⁵

○X. Wang^{1,2}, G. Lu^{1,2}, S. Gao^{1,2}, N. Kobayashi³, K. Ikeda³, Y. Ota⁴, T. Liu⁵, S. Iwamoto^{1,2}

E-mail: wangxy@iis.u-tokyo.ac.jp

Photonic chiral edge states hosted in topological photonic crystals (PhCs) with broken time-reversal symmetry can transport light unidirectionally even with structural disorders [1,2]. So far, in the optical regime, a topological bandgap capable of supporting chiral edge states was realized only above the light line [3]. A topological bandgap and chiral edge states below the light line would be more useful for their waveguide applications. Topological PhCs with a topological bandgap below the light line were theoretically examined [1,4]. However, the proposed structures requiring the in-plane hybrid structure between dielectric and magneto-optical (MO) materials are difficult to fabricate. In this study, we designed air-suspended topological PhCs with a topological bandgap below the light line using a layered structure of dielectric and MO materials [3,5].

The unit cell of the investigated structure is shown in Fig. 1(a). A triangular-lattice silicon PhC with two triangular air holes in a unit cell (Period a , side length of holes $L = 0.9a$) is bonded on a thin uniform MO layer. The thicknesses of Si and MO layers, d_1 and d_2 are $0.67a$ and $0.33a$, respectively. Figure 1(b) shows the band diagram for TE-like modes when bismuth substituted yttrium iron garnet (Bi-YIG) ($\epsilon_{xx} = 5$, $\epsilon_{xy} = 0.002i$) is used as the MO layer. A topological gap below the light line is observed. The gap-mid gap ratio is 0.004%, which corresponds to 62 pm at 1550 nm. The gap-mid gap ratio increases up to 0.035% (540 pm at 1550 nm) when a FeCo-BaF nanogranular film ($\epsilon_{xx} = 4.4$, $\epsilon_{xy} = 0.01i$) [6] is used as the MO layer.

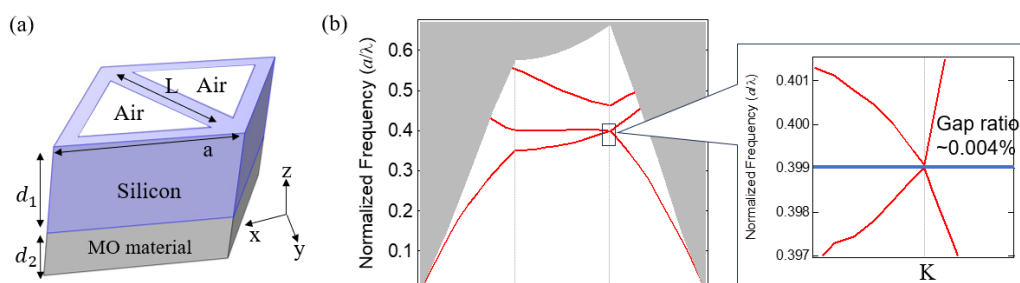


Figure 1: (a) Schematic of air-suspended PhC structure consisting of a Si PhC on a uniform MO layer. (b) Band diagram for TE-like modes in Si PhC-on-YIG structure. The right panel show the magnified view around K point. In the calculations, we use the refractive index of silicon of 3.48.

Acknowledgement This work is supported by JST CREST(JPMJCR19T1) and KAKENHI (22H00298, 22H01994).

Reference [1] F. D. M. Haldane and S. Raghu, Phys. Rev. Lett. 100, 013904 (2008). [2] Z. Wang, *et al.*, Nature **461**, 772 (2009). [3] B. Bahari, *et al.*, Science **358**, 636 (2017). [4] T. Liu, *et al.*, ACS Photon. **9**, 1621 (2022). [5] G. Lu, *et al.*, The 84th JSAP autumn meeting (2023). [6] N. Kobayashi, *et al.*, IEEE Trans. Fundam. Mater. **141**, 123 (2021).



Optimizing Waveguides in Photonic Crystals for High-Efficiency Surface Emission in Terahertz Quantum Cascade Lasers Using High-Index Contrast Coupled-Wave Theory

理研 RAP¹, 東北大理² ○(DC)陳 明曦^{1,2}, 大谷 知行^{1,2}, 平山 秀樹¹

RIKEN RAP.¹, Tohoku Univ.², °(DC)Mingxi Chen^{1,2}, Chiko Otani^{1,2}, Hideki Hirayama¹

E-mail: mingxi.chen@riken.jp

Surface-emitting terahertz quantum cascade lasers (SE THz QCLs) that incorporate photonic crystal-based top waveguides present considerable benefits, such as amplified power emissions, single-mode operation, and reduced beam divergence angles. However, designing these devices with analytical or semi-analytical method such as plane wave expansion method (PWEM) and conventional coupled wave theory (CWT) are arduous tasks due to the extreme mode delocalization and permittivity of metallic or heavily doped semiconductor waveguides. In our antecedent work [1], a semi-analytical technique termed the TM mode high-index-contrast three-dimensional CWT (HC 3D CWT) was developed to grapple with these challenges.

In this study, SE THz QCLs equipped with metallic photonic crystal waveguides are put under scrutiny. The unit cell maintains a constant lateral dimension of $a=25\ \mu\text{m}$. Concurrently, the air-node filling factors, which represent the proportion of the air-node area relative to the unit cell area, are experimented ranging from 0 to 0.12. The photonic crystal waveguide characterized by a cylindrical air-node structure has been previously demonstrated the efficacy for SE THz QCLs [2], serving as the foundational design in this research. Antecedent findings in semiconductor-based waveguide SE lasers have indicated that configurations with right-angled triangular air node and double lattice resonator yield significant improvements in the efficiency of surface radiation power extraction [3-4]. Galvanized by these developments, we adopt three quintessential waveguide air node designs for simulation, each exemplifying unique symmetry properties: cylindrical (C), right-angled triangular (RT), and double lattice (DL) structures. Respectively, these choices embody symmetric, antisymmetric, and half-wavelength phase-control characteristics.

Our attention is directed towards the outcomes involving antisymmetric-like modes at the band-edge of the 2nd-order Γ point for they are typically preferred for lasing due to their lower total loss. To bolster the reliability of our computations, we also employ the finite difference time domain (FDTD) method for frequency simulation. The apex deviation in frequency is in the vicinity of 2%. This

variation can be ascribed to computational inaccuracies in the HC CWT's perturbation algorithm and the virtual scattering sources during the spatial segmentation in FDTD. The results from these calculations attest to the exactitude of the simulations, capacitating us to adeptly steer the engineering of the photonic crystal waveguide for integration in ensuing experiments.

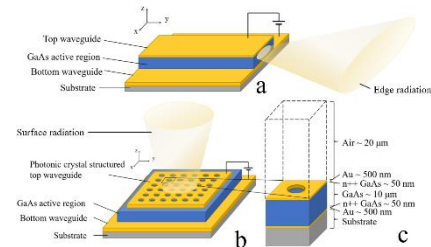


Fig. 1. Typical structure of (a) edge-emitting THz QCLs. and (b) SE THz QCLs. (c) Unit cell and vertical dimension to simulate

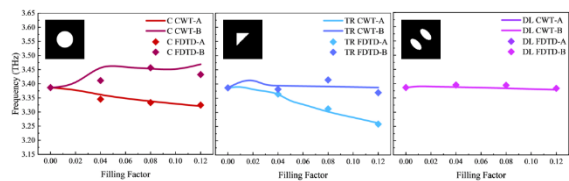


Fig. 2. Working frequency obtained by HC CWT and FDTD. A,B are two supported antisymmetry modes

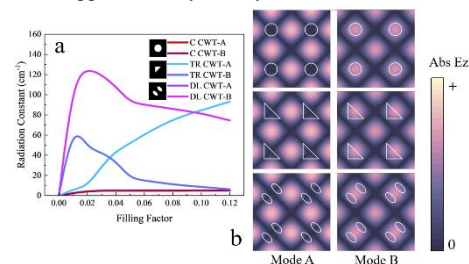


Fig 3. (a)The radiation constants obtained through the HC CWT method are presented. (b) The absolute intensity distribution of the z-component of the electric field for the fundamental waves is shown.

Reference

- [1] M. Chen, et.al., TM-mode High-Index-Contrast Three-Dimensional Coupled Wave Theory as A Semi-Analytical Method: Contributing to Surface Emitting Terahertz Quantum Cascade Laser, under review.
- [2] Y. Yang, et.al., Optics express 21, 20588-20600 (2013).
- [3] Y. Chassagneux, et.al., Nature 457, 174-178 (2009).
- [4] Y. Liang, et.al., Review B 84, 195119 (2011)
- [5] Yoshida M, et.al., Nature materials, 2019, 18(2): 121-128.

直径 3mm フォトニック結晶レーザーの CW 光出力増大と金属加工への応用

Increase of CW output power of 3mm-diameter photonic-crystal lasers and application to metal processing

京大院工,[○]勝野 峻平, 吉田 昌宏, De Zoysa Menaka, 井上 卓也, 石崎 賢司, 野田 進

Kyoto Univ., [○]S. Katsuno, M. Yoshida, M. De Zoysa, T. Inoue, K. Ishizaki, and S. Noda

E-mail: s.katsuno@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー(PCSEL)は活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶の特異点(Γ 点)における共振効果を活用した面発光型半導体レーザーである^{1,2)}。最近では、二重格子フォトニック結晶におけるエルミートおよび非エルミート光波結合の制御により、大面積(直径 3mm 以上)デバイスにおいて単一モード発振を実現するための設計指針の確立に成功している³⁾。さらに、この設計指針に基づく光波結合の制御とともに、連続(CW)動作において生じる面内温度分布(周波数分布)を補償するための格子定数分布(温度補償構造)の導入によって、単一モード 50W 動作(輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)を実現している⁴⁾。今回、直径 3mm PCSEL のさらなる CW 光出力の増大に向けて、発振閾値の低減及び温度補償の効果を維持可能な電流値の増大に関する検討を行ったので報告する。さらに、高出力 PCSEL を用いた金属薄板の切断加工への応用も試みたので報告する。

[実験] CW 光出力の増大に向けて、まず、発振閾値以下でのデバイスの発熱の低減のために、共振器損失と利得の改善による発振閾値電流の低減を検討した。さらに、より高い電流値まで温度補償の効果を維持するために、導入する補償分布の大きさを、従来に比べて増大させた。以上の工夫を適用した直径 3mm の PCSEL を作製し、CW 駆動による電流-光出力特性を評価した結果を図 1 に示す。同図より閾値電流 $\sim 20\text{ A}$ ($\sim 0.28\text{kA/cm}^2$)での発振が得られ、従来に比べて 20%程度閾値を低減することに成功した。また、最大出力値を与える電流値を、従来に比べ 27%増大することが可能となり、最大で 70 W という、従来を上回る高い CW 光出力を達成した。

次に、このような高出力 3mm PCSEL の金属加工への応用を試みた。図 2 に加工時の様子と、加工後の写真を示すが、これより、金属薄板の切断加工に成功している様子が分かる。

[謝辞] 本研究は科研費特別推進(22H04915)の支援を受けた。

[文献]
[1] S. Noda *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 23 (2017) 4900107, [2] M. Yoshida, *et al.*, Nat. Mater. 18, 121 (2019), [3] T. Inoue, *et al.*, Nat. Commun. 13, 3262 (2022), [4] M. Yoshida, *et al.*, Nature. DOI : 10.1038/s41586-023-06059-8 (2023).

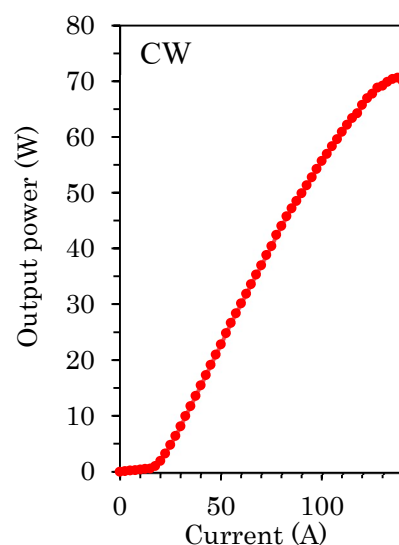


図 1. 直径 3mm の PCSEL の電流-光出力特性 (CW 動作).

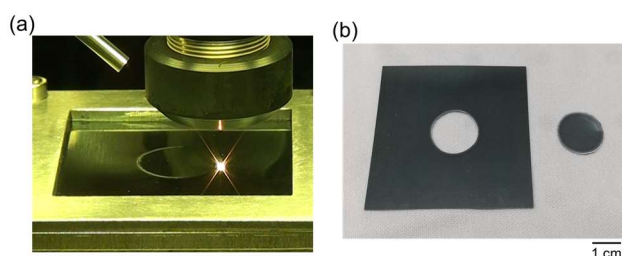


図 2. 金属薄板(ステンレス)の切断加工 (a)加工時の様子, (b)加工後の金属薄板. 中央部分を円形に切断加工出来ている様子が分かる。

大電流パルス駆動による大面積フォトニック結晶レーザーの キロワット級高ピーク出力動作

Kilowatt-class high-peak-power operation of large-area photonic-crystal surface-emitting lasers driven by high-current pulse source

京大院工, °吉田 昌宏, 勝野 峻平, De Zoysa Menaka, 井上 卓也, 野田 進
Kyoto Univ., °Masahiro Yoshida, Shumpei Katsuno, Menaka De Zoysa, Takuya Inoue,
and Susumu Noda

E-mail: yoshida@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶レーザー (PCSEL) は、活性層近傍に設けた 2 次元フォトニック結晶の特異点 (Γ 点等) における共振効果を利用した面発光型半導体レーザーである[1,2]. 最近では、二重格子フォトニック結晶におけるエルミートおよび非エルミート光波結合の制御に基づき、直径 3mm 以上の大面積 PCSEL の高ビーム品質・高出力動作のための設計指針を確立するとともに[3], 3mm PCSEL の連続動作において、50W を超える光出力を得ることに成功している[4,5]. このような大面積 PCSEL では、熱の影響が少ないパルス電流駆動においては、さらに高いピーク出力動作が期待出来る. そこで今回、大電流パルス駆動回路を用い、3mm PCSEL に対してキロアンペア級のパルス電流注入を行うことで、キロワット級のピーク光出力の実現に成功したので報告する.

[実験] 大電流注入可能なパルス駆動回路基板に対して、直径 3mm の PCSEL を表面実装することにより、配線によるインダクタンス付加の影響を抑制しつつ、実装を行った. これにより、パルス幅 10ns~100ns かつピーク電流キロアンペア級のパルス電流注入によるレーザー駆動が可能となった. 実際に 3mm PCSEL に電流注入を行った場合の電流モニタ波形の一例を図 1(a)に示す. 同図より、パルス幅~50ns, ピーク電流値~1kA の高ピークパルス電流が注入出来ていることが分かる. この際の PCSEL の光出力の応答波形を、フォトディテクタを用いて検出した結果を図 1(b)に示す. パルス電流注入にตอบสนองして、電流波形に対応した光出力波形が得られていることが見て取れる. 次に、ピーク電流ーピーク光出力特性の測定結果を図 2 に示す. 同図より、~1.4kA 注入時において、~1kW の高いピーク光出力 (パルスエネルギー: 47 μ J) を得ることに成功した. 詳細は当日報告する.

[謝辞] 本研究は科研費特別推進研究 (22H04915) の支援を受けた.

[文献] [1] S. Noda, *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **23**, 4900107 (2017). [2] M. Yoshida, *et al.*, Nat. Mater. **18**, 121 (2019). [3] T. Inoue, *et al.*, Nat. Commun. **13**, 3262 (2022). [4] M. Yoshida, *et al.*, Nature, DOI: 10.1038/s41586-023-06059-8 (2023). [5] 勝野他, 本応物.

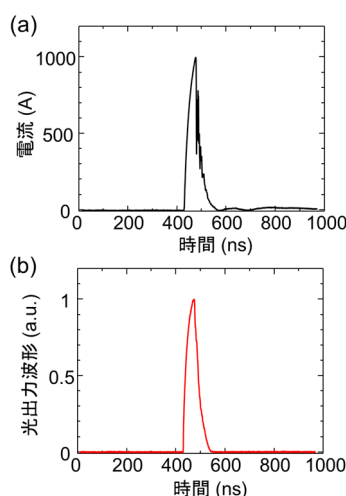


図 1. 直径 3mm PCSEL の大電流パルス駆動時の(a)電流モニタ波形, および, (b)光出力波形の一例.

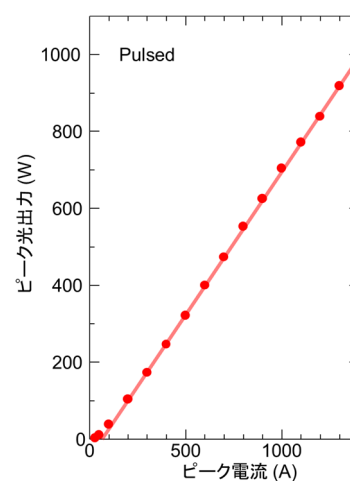


図 2. ピーク電流ーピーク光出力特性 (パルス幅~50ns, 繰り返し周波数 100Hz).