

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

2024年9月18日(水) 13:30 ~ 18:00 皿 A34 (朱鷺メッセ3F)

[18p-A34-1~16] 3.10 フォトニック構造・現象

浅野 卓(京大)、石崎 賢司(京大)、角倉 久史(NTT)

13:30 ~ 13:45

[18p-A34-1]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] フォトニック結晶レーザーへの複数接合活性層の導入: 実験的実証

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

13:45 ~ 14:00

[18p-A34-2]

金属3Dプリンタ応用に向けたフォトニック結晶レーザーアレイモジュールの開発 (II)

○吉田 昌宏¹、深田 豊^{1,2}、De Zoysa Menaka¹、勝野 峻平¹、井上 卓也¹、服部 綾太郎²、廣野 陽子²、野田 進¹ (1.京大院工、2.DMG森精機)

14:00 ~ 14:15

[18p-A34-3]

バレートポロジーに基づく円偏光生成器の検討

○林 文博¹、張 成昆²、吉見 拓展³、甲斐 航¹、雨宮 智宏¹、太田 泰友⁴、岩本 敏²、中川 茂¹ (1.東工大、2.東大先端研、3.無所属、4.慶應大)

14:15 ~ 14:30

[18p-A34-4]

Observation of unidirectional lasing in a ring resonator with a surface grating

○(D)戴 知微¹、林 文博²、池 尚玟¹、作本 宙彌¹、竹中 充¹、岩本 敏¹ (1.東大、2.東工大)

14:30 ~ 14:45

[18p-A34-5]

直径10mmフォトニック結晶レーザーの特性評価

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

15:00 ~ 15:15

[18p-A34-6]

10mmΦPCSELの自己無撞着連続動作解析

○(M2)前田 健太郎¹、井上 卓也¹、吉田 昌宏¹、勝野 峻平¹、奥田 功太郎¹、野田 進¹ (1.京大院工)

15:15 ~ 15:30

[18p-A34-7]

非エルミートスキン効果の実験観測に向けたフォトニック結晶構造の探索

○小川 希海^{1,2}、森竹 勇斗¹、養田 大騎^{1,4}、高田 健太^{2,3}、倉持 栄一^{2,3}、納富 雅也^{1,2,3} (1.東工大理、2.NTT 物性研、3.NTT NPC、4.関西学院大学理工)

15:30 ~ 15:45

[18p-A34-8]

非エルミートフォトニック結晶におけるカイラル発光モードの損失装荷法依存性

○原田 拓実^{1,2}、鈴木 聡^{1,2}、大塚 秀太郎^{1,2}、森竹 勇斗¹、倉持 栄一^{2,3}、小野 真証^{2,3}、藤井 拓郎^{3,4}、松尾 慎治^{3,4}、納富 雅也^{1,2,3} (1.東工大理、2.NTT物性研、3.NTT NPC、4.NTT先デ研)

15:45 ~ 16:00

[18p-A34-9]

非エルミート・エルミート結合制御に基づく自由空間結合型偏光可変フォトニック結晶の設計

○金坂 知樹¹、井上 卓也¹、吉田 昌宏¹、野田 進¹ (1.京大院工)

16:00 ~ 16:15

[18p-A34-10]

フォトニック結晶におけるM点ゼロ屈折率状態の実験的観測

○浜谷 孔明^{1,2}、渡邊 祥^{1,2}、森竹 勇斗¹、小野 真証^{2,3}、倉持 栄一^{2,3}、納富 雅也^{1,2,3} (1.東工大理、2.NTT 物性研、3.NTT NPC)

◆ 英語発表

16:15 ~ 16:30

[18p-A34-11]

Observation of slow-light modes in valley photonic crystal heterostructure waveguides

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

16:45 ~ 17:00

[18p-A34-12]

GaN系二重格子PCSELの格子間距離と発振特性

○十鳥 雅弘¹、北村 篤史¹、小泉 朋朗^{2,1}、江本 溪^{2,1}、De Zoysa Menaka¹、小川 健志¹、井上 卓也¹、石崎 賢司¹、吉田 昌宏¹、勝野 峻平¹、野田 進¹ (1.京大院工、2.スタンレー電気)

17:00 ~ 17:15

[18p-A34-13]

GaN系フォトニック結晶レーザーを用いた水中3次元ToF-LiDARの開発 (IV)

○小川 健志¹、De Zoysa Menaka¹、十鳥 雅弘¹、北村 篤史¹、江本 溪^{2,1}、小泉 朋朗^{2,1}、井上 卓也¹、石崎 賢司¹、野田 進¹ (1.京大院工、2.スタンレー電気)

◆ 奨励賞エントリー

17:15 ~ 17:30

[18p-A34-14]

InGaN/GaN系トポロジカルPhC共振器構造の作製と発光特性評価

○杉浦 雛姫¹、本多 卓人¹、秋元 弥頼¹、片岡 生一¹、倉田 隼也斗¹、菊池 昭彦^{1,2} (1.上智大理工、2.上智大半導体研)

◆ 英語発表

17:30 ~ 17:45

[18p-A34-15]

Y-junction optical combiner composed of unidirectional waveguides utilizing topological photonic crystals

○(D)Guangtai Lu¹, Satoshi Iwamoto¹ (1.Univ. Tokyo)

17:45 ~ 18:00

[18p-A34-16]

電析法による周期構造を有するBiI₃膜の作製

○(M2)鈴木 直道¹、池之上 卓己¹、三宅 正男¹ (1.京大院エネ科)

フォトニック結晶レーザーへの複数接合活性層の導入：実験的実証

Experimental demonstration of photonic-crystal lasers with multijunction active layers

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

Kyoto Univ., [○]S. Katsuno, M. Yoshida, T. Inoue, M. De Zoysa, R. Hatsuda,
K. Okuda, 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利用した面発光型半導体レーザーである ¹⁾。PCSEL は大面積コヒーレント発振による高輝度動作が可能であり ²⁾、さらに、2 次元ビーム走査や任意のビーム形状の生成 ³⁾、短パルス高ピーク出力動作 ⁴⁾ などの高機能性をも有することから、LiDAR センシングやレーザー加工をはじめとした幅広い応用展開が期待されている。これらの様々な応用において、PCSEL のスロープ効率の向上は、光出力の増大や、駆動電流の低減に繋がるため極めて重要である。我々は、そのための手法として、PCSEL への複数接合活性層 (= トンネル層を介して接合した複数の活性層) 導入の検討を進めており、これまでに、その基本設計を見出してきた ⁵⁾。今回、実際に本構造を導入したデバイスの作製を行い、レーザー発振特性を評価し、スロープ効率の向上を実証することに成功したので報告する。

[設計] 図 1(a) に複数接合活性層を導入した PCSEL の模式図を示す。トンネル層 (p++/n++) を介して複数 (同図では 2 つ) の活性層が積層されており、電極から注入される 1 組の電子正孔対に対して、複数の光子が放出される。そのため、注入電流に対して取り出せる光出力が増大、すなわちスロープ効率の増大が期待出来る。この際、PCSEL の層構造を適切に設計 ⁵⁾ (図 1(b) 左) することにより、図 1(b) 右に示すデバイス垂直方向のモードのうち 1 次垂直モードにおいて、トンネル層に節が位置し、活性層とフォトニック結晶層に腹が位置する電界強度分布を形成可能である。従って、本モードを利用することで、高ドープのトンネル層における吸収損失を避けつつ、発振に十分な利得と共振効果を得ることが可能となる。

[実験] 以上の設計に基づいて、2 接合活性層を導入した、共振領域直径 3 mm の PCSEL を作製し、そのパルス駆動における発振特性を評価した。図 2 に、2 接合活性層の PCSEL の電流-光出力特性を、単一活性層の PCSEL の特性と併せて示す。同図より、2 接合活性層の導入によって、期待通り従来の約 2 倍のスロープ効率が得られていることが分かり、複数接合活性層の導入による PCSEL のスロープ効率向上を実験的に実証することに成功した。さらにその結果として、PCSEL としてこれまで最大となるピーク出力 1.5 kW を達成した。詳細は当日報告する。

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

[文献] [1] S. Noda, *et al.*, *Adv. Opt. Photon.* **15**, 977-1032 (2023). [2] M. Yoshida, *et al.*, *Nature* **618**, 727 (2023), [3] R. Sakata, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122** 130503 (2023). [4] R. Morita, *et al.*, *Nat. Photon.* **15**, 311 (2021). [5] 勝野他, 2024 年春季応物, 23a-11E-5.

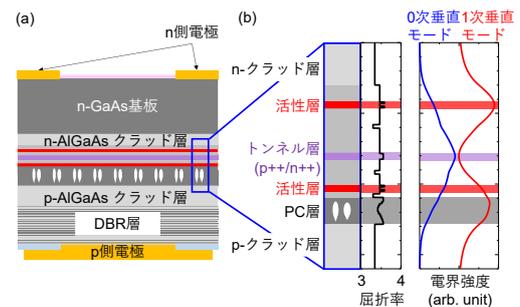


図 1. (a) 複数接合活性層を導入した PCSEL の模式図と、(b) デバイス垂直方向の屈折率分布及び電界強度分布 (2 接合の場合)。

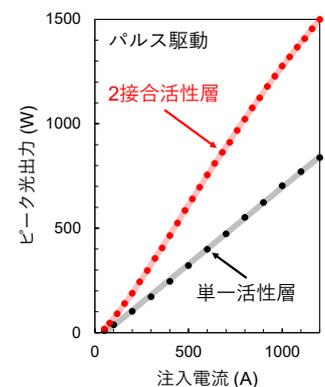


図 2. 電流-光出力特性 (パルス駆動) の測定結果。

金属 3D プリントア应用に向けた フォトニック結晶レーザーアレイモジュールの開発 (II)

Development of PCSEL array modules for metal 3D printing applications (II)

京大院工¹, DMG 森精機², [○]吉田 昌宏¹, 深田 豊^{1,2}, De Zoysa Menaka¹, 勝野 峻平¹,
井上 卓也¹, 服部 綾太郎², 廣野 陽子², 野田 進¹

Kyoto Univ.¹, DMG MORI², [○]Masahiro Yoshida¹, Yutaka Fukada^{1,2}, Menaka De Zoysa¹,
Shumpei Katsuno¹, Takuya Inoue¹, Ryotaro Hattori², Yoko Hirono², and Susumu Noda¹

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、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}。これまで、直径 3mm PCSEL により、連続 (CW) 駆動において、50W 級動作に成功している³。このような高出力 PCSEL のスマート製造分野における応用の1 つとして、金属 3D プリントへの展開が考えられる。小型でありながら高出力・高ビーム品質な PCSEL を用いることで、加工ヘッドへの光源の直接搭載とシンプルな光学系での集光が可能となり、既存の大型光源の置き換えと伝送用ファイバを含む複雑な光学系の省略により、システムの小型化やファイバ損傷による故障リスクの回避等が期待出来る。さらに、PCSEL の高制御性・高機能性を活かした高機能化も期待出来る。我々は、産業用金属 3D プリントにおける光出力レベル (数 100W~数 kW 級) の実現に向けた PCSEL の光出力増大のアプローチの 1 つとして、アレイモジュール開発を進めており⁴、今回、3mm Φ PCSEL を 9 素子アレイ化したモジュールにより、CW 光出力 400W の実現に成功したので報告する。

[実験] 図 1(a)に今回開発した PCSEL アレイモジュールの外観を示す。3mm Φ PCSEL 9 素子を、3 \times 3 の配置で同一ヒートシンク上にアレイ実装することで、500 円硬貨と同程度のサイズの小型アレイモジュール開発に成功したと言える。ここで、アレイ実装された各素子は、図 1(b)の上

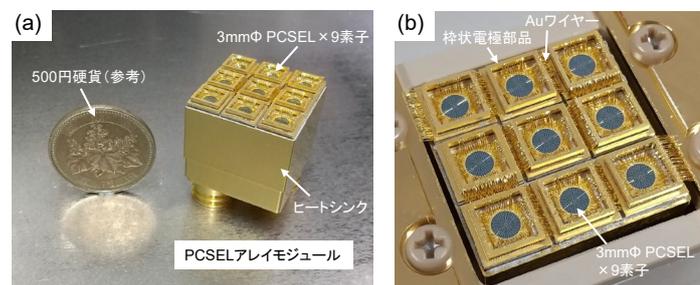


図 1. 開発した 3mm Φ PCSEL の 9 アレイモジュール (直列接続) の (a) 外観と (b) 上面の写真。

面写真に示すように、枠状電極部品とワイヤを介して電氣的に直列接続⁴されている。続いて、本アレイモジュールの CW 駆動における電流-光出力特性を図 2 に示す。同図より、小型アレイモジュールにおいて、CW 400W という高出力動作を実現することに成功した。この結果は、金属 3D プリントへの適用が視野に入るとともに、今後、1 素子当たりの光出力向上やアレイ数の増大によって、kW 級以上の動作も期待出来ることを示すものである。詳細は当日報告する。[謝辞] 本研究の一部は、科研費特別推進研究 (22H04915), BRIDGE の支援を受けた。[文献] 1) M. Imada, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 316-318 (1999). 2) S. Noda, *et al.*, Adv. Opt. Photon. **15**, 977-1032 (2023). 3) M. Yoshida, *et al.*, Nature **618**, 727-732 (2023). 4) 吉田 他, 2024 年春季応物, 23a-11E-4 (2024).

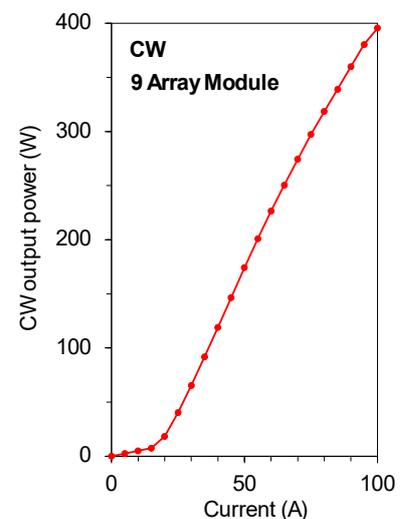


図 2. 9 アレイモジュールの CW 駆動における電流-光出力特性。

バレートポロジーに基づく円偏光生成器の検討

Study on a circular polarization generator based on the valley topology

東工大¹, 東大先端研², 無所属³, 慶應大⁴○ 林 文博¹, 張 成昆², 吉見 拓展³, 甲斐 航¹, 雨宮 智宏¹, 太田 泰友⁴, 岩本 敏², 中川 茂¹Tokyo Tech.¹, RCAST, Univ. Tokyo², Independent³, Keio Univ.⁴○ W. Lin¹, C. Zhang², H. Yoshimi³, W. Kai¹, T. Amemiya¹, Y. Ota⁴, S. Iwamoto², S. Nakagawa¹

Email: lin.w.ab@m.titech.ac.jp

周期構造の対称性に起因する幾何学位相により内部の波動関数/バンド構造が支配されるトポロジカルフォトリック結晶は、散乱に対し堅牢なエッジ光導波路等の画期的な新機能素子をもたらしている。同系における特異な現象として、特定の波数 (例えば Γ 点や K/K' 点) における円偏光状態の発現が知られており [1, 2], エッジモードの指向性励振 [3] 等への応用が報告されている。入射とは逆に円偏光の生成も原子物理分野をはじめ多くの応用先が期待できる。このような応用には素子面外へ放射可能なライトラインより上側のバンドを利用する必要があるが、同系の大きな利点である低損失な光導波を損なう。ライトラインの下側にあるモードは二重周期構造によりバンドを折り返すことで上側へと移すことが可能であり、同機構は近年ライトラインの帳に包まれた新奇光現象の観測に活用されている [4]。今回我々は、二重周期を利用してエッジ導波路と連続接続可能であり、かつバレーフォトリック結晶の K/K' 点バンド端で生じる円偏光状態を素子面外へ取り出し可能な構造を検討したので報告する。

考案素子は蜂の巣格子状に三角孔を設けた Si スラブ (220 nm 厚) を基本構造とする (図 1(a)). 単位胞に含まれる 2 つの三角孔が同一寸法 (同図②) の場合, K/K' 点でバンドが縮退しディラック点が見られる (フォトリックグラフェン構造). 一方, ①や③のように寸法が異なると縮退が解けてバンドギャップが生じ (バレーフォトリック結晶), バンド端で円偏光となる [2, 5]. このような構造に対し 1 周期おきに三角孔の寸法を変調 (同図④) することでライトライン下のバンドは折り返されてライトラインを超え, バンド端周波数で円偏光回折が期待される. 同構造とエッジ導波路の接続に単一モードを保ちつつ導波路幅を広げられるグラフェン領域 [6, 7] を導入し, この領域内に二重周期構造を埋め込んだ. FDTD 法で光伝搬を計算し (図 1(b)), 二重周期領域からの回折を求めたところ, K 点方向に強く局在し高い円偏光度を示すことが確認された (図 1(c)). 二重周期部の三角孔の大小関係を反転すると逆回りの円偏光回折が得られ, バレーフォトリック結晶の K 点バンド端に起因する円偏光であることが示唆される. バンド計算等を含めた詳細な解析は当日報告する。

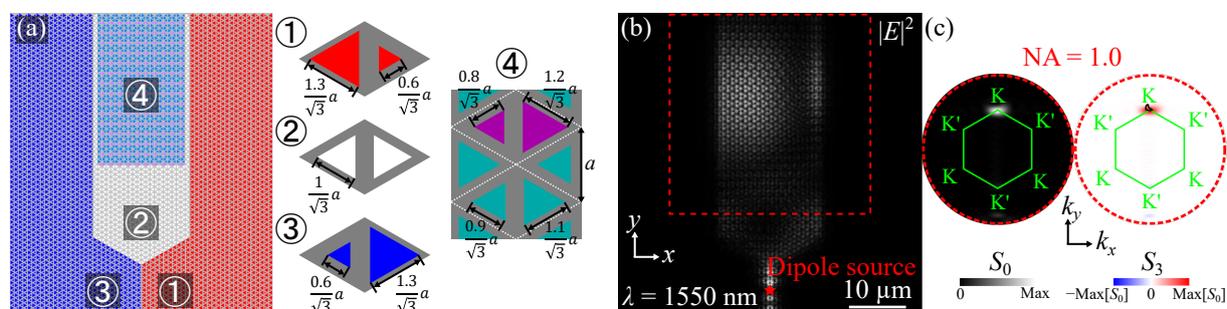


Fig. 1. (a) Proposed device structure. Lattice constant $a = 500$ nm. (b) Simulated electric field distribution in the device plane. (c) Computed far-field profiles of the intensity S_0 (left) and its circularly polarized component S_3 (right) radiated from the region indicated by the red-dashed square in (b). The black contour in the right panel indicates a region where $S_3/S_0 \geq 0.99$.

参考文献: [1] T. Yoda and M. Notomi, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 053902 (2020). [2] C. Guo *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 106103 (2020). [3] S. Okada *et al.*, *Opt. Express* **31**, 35218 (2023). [4] M. Barsukova *et al.*, *Nat. Photonics* **18**, 580 (2024). [5] H. Yoshimi *et al.*, *PECS-XIII P-12* (2023). [6] Q. Chen *et al.*, *ACS Photonics* **8**, 1400 (2021). [7] C. Zhang *et al.*, *Opt. Mater. Express* **14**, 1756 (2024).

謝辞: 本研究は JST CREST(JPMJCR19T1), 科研費 (22H00298) の助成を受けたものです。

表面回折格子を有するリング共振器における一方向レーザ発振の観測

Observation of unidirectional lasing in a ring resonator with a surface grating

東大先端研¹, 東工大未来研², 東大工学部³ ○(D) 戴 知微¹, 林 文博², 池 尚政¹, 作本 宙彌³, 竹中 充³, 岩本 敏¹RCAST, Univ. of Tokyo¹, FIRST, Tokyo Tech.², Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo³, ○Zhiwei Dai¹, Wenbo Lin²,Sangmin Ji¹, Hiroya Sakumoto³, Mitsuru Takenaka³ and Satoshi Iwamoto¹

E-mail: dai-zw@iis.u-tokyo.ac.jp

Whispering gallery modes (WGMs) traveling in a ring resonator can generate topological optical structures like optical vortices [1] and skyrmions [2,3] through light diffraction by periodic scatterers equipped with the resonator. To realize ring resonator lasers directly emitting such a topological optical beam, achieving unidirectional lasing is crucial. Introducing an S-shaped waveguide inside a ring breaks the symmetry of counter-propagating two WGM modes in the same order and enables unidirectional lasing [4-7]. For lasers emitting an optical skyrmion beam, our target, it is necessary to achieve unidirectional lasing under the presence of surface gratings allowing the formation of an optical skyrmion beam [2,3]. In this study, as a step for the skyrmion lasers, we fabricated ring resonators with a surface grating and succeeded in observing unidirectional lasing induced by an S-shaped waveguide placed inside the ring resonators [7].

Figure 1(a) shows an SEM image of one of our devices. Devices consisted of a 6- μm diameter ring resonator with a 100-nm gap to the S-shaped waveguide, formed into an InGaAsP MQWs film bonded on SiO₂/Si substrates. Periodic holes of diameter 70 nm introduce extra scattering to the device. Micro-photoluminescent measurements at 4 K using a 785 nm pulsed laser revealed the lasing behavior of the resonator (Fig. 1 (b)). The lasing peak observed in the spectra consists of two peaks originating counter-propagating WGMs: CW and CCW modes. Detailed measurements and analysis demonstrate that strong suppression of the unintended mode, achieving unidirectional lasing with a 6-fold intensity contrast (Fig. 1 (c)). The ratio was greatly suppressed due to the introduction of scattering compared to a unidirectional ring resonator laser without scatterers [7], which is expected from our theory [6]. However, the unidirectional feature is still pronounced.

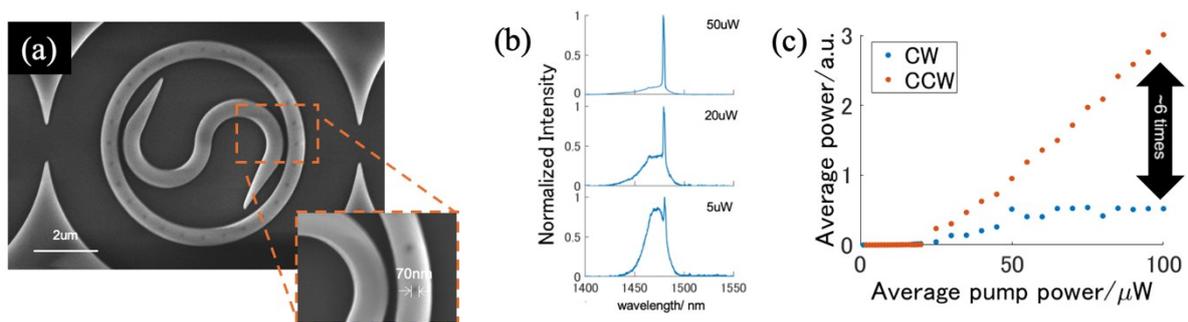


Fig. 1. (a) SEM image of a ring resonator with an S-shaped waveguide fabricated using InGaAsP quantum wells. (b) Emission spectra at different pump powers. (c) L-L plot for the CW and CCW modes.

Acknowledgements: This work was supported by JST CREST(JPMJCR19T1) and JSPS KAKENHI (JP23H00172).

References: [1] X. Cai *et al.*, *Science*, **338**, 363–366 (2012). [2] W. Lin *et al.*, *Phys. Rev. Research*, **3**, 023055 (2021). [3] W. Lin *et al.*, *The 2022 CLEO Conference and Exhibition, SM2N.4* (2022). [4] W. E. Hayenga *et al.*, *ACS Photonics*, **6**, 8, 1895–1901 (2019). [5] A. M. de las Heras and I. Carusotto, *Physical Review A* **104**, 043501 (2021). [6] Z. Dai *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 02SP54 (2024). [7] Z. Dai *et al.*, *The 29th MOC*, submitted (2024).

直径 10mm フォトニック結晶レーザーの特性評価

Characterization of 10-mm-diameter photonic-crystal lasers

京大院工, °吉田 昌宏, 奥田 功太郎, 勝野 峻平, 井上 卓也,
De Zoysa Menaka, 石崎 賢司, 野田 進

Kyoto Univ., °Masahiro Yoshida, Kotaro Okuda, Shumpei Katsuno, Takuya Inoue,
Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, 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、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、直径 3mm の PCSEL により、連続 (CW) 駆動において、50W 級の光出力を得ることに成功し、大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を実現している²⁾。我々は、今後、PCSEL を更に大面積化し、直径 10mm という超大面積デバイスを実現することによって、光出力、そして、輝度を更に一桁増大することを目指して検討を進めている^{3,4)}。このようなデバイスの実現のためには、まず、直径 10mm の大面積において如何に均一な (もしくは所望の) 電流分布を得るかが重要となり、前回、そのための電極構造の設計を行うとともに、設計構造に基づく 10mm Φ PCSEL の一次試作に成功したことを報告した⁵⁾。今回、試作した 10mm Φ PCSEL について、パルス駆動における特性評価を行ったので報告する。

[実験] 図 1 に作製した 10mm Φ PCSEL をパルス駆動用ドライバ基板に実装した写真を示す。デバイス表面側には、上述の通り 10mm Φ PCSEL 用に設計された電極構造⁵⁾が形成されている。なお、本デバイスについては、電極構造の効果を検証することに主眼をおいているため、導入されたフォトニック結晶構造は 10mm Φ PCSEL に最適化されたものではない。まず、本デバイスの発振閾値以下の電流注入時における近視野像 (自然放出光の発光強度分布) の観測により、デバイス全面での発光が得られ、設計した電極構造によって、直径 10mm の大面積への電流注入が実現出来ていることを確認した。続いて、本デバイスの電流-光出力特性を図 2 に示す。同図より、10mm Φ PCSEL のレーザー発振に成功するとともに、まだ十分に最適化されたデバイスではないものの、発振閾値の 7.5 倍程度 (3mm Φ PCSEL の場合の 1/6 程度⁶⁾) の電流注入において 500W 級の光出力が得られ、デバイス面積拡大の効果を確認出来た。今後、これまでに確立してきた理論解析結果^{3,4)}に基づき、エルミート・非エルミート結合係数を適切に低減した二重格子構造⁴⁾を導入することによって、さらなる特性向上と CW 動作への展開が期待出来る。詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究の一部は、科研費特別推進研究 (22H04915), BRIDGE の支援を受けた。**[文献]** 1) S. Noda, *et al.*, *Adv. Opt. Photon.* **15**, 977-1032 (2023). 2) M. Yoshida, *et al.*, *Nature* **618**, 727-732 (2023). 3) T. Inoue, *et al.*, *Nat. Commn.* **13**, 3262 (2022). 4) 前田 他, 2023 年秋季応物 22a-A308-4. 5) 吉田 他, 2024 年春季応物, 23a-11E-9. 6) M. Yoshida, *et al.*, *CLEO 2024*, STu4C.3 (2024).

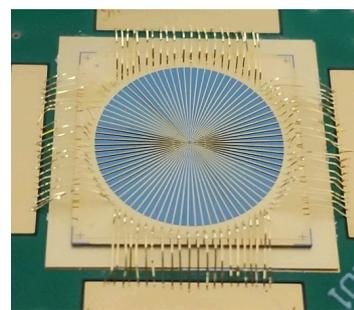


図 1. パルス駆動用ドライバ基板へと実装した 10mm Φ PCSEL.

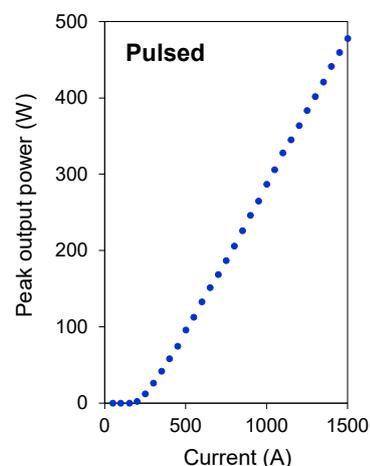


図 2. 10mm Φ PCSEL のパルス駆動における電流-光出力特性 (パルス幅 100ns, 繰り返し周波数 250Hz).

10mmΦPCSEL の自己無撞着連続動作解析

Self-consistent analysis of lasing characteristics of 10-mm-diameter PCSELs under CW operation

京大院工,[○]前田健太郎,井上卓也,吉田昌宏,勝野峻平,奥田功太郎,野田進Kyoto Univ., [○]K. Maeda, T. Inoue, M. Yoshida, S. Katsuno, K. Okuda, 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の設計の深化・最適化を進めている^{1,2)}。これまで、フォトニック結晶におけるエルミート・非エルミート結合係数の精密な制御により、作製した 3mmΦPCSEL の連続(CW)駆動において、50W 級の高輝度 (1GW/cm²)動作実現に成功するとともに³⁾、10mmΦPCSEL に対しても、光源の温度変化が無視できる条件において、kW 級の単一モード発振が実現可能であることを理論的に示してきた^{2,4)}。今回、光源の温度変化が生じる条件、すなわち CW 条件においても、その温度変化と発振状態変化を自己無撞着に考慮した解析手法⁵⁾により、10mmΦPCSEL の発振特性解析を行い、適切な温度補償構造の導入により、高出力・高ビーム品質連続動作が実現可能であることを見出したので報告する。

[解析結果] 解析モデルを Fig. 1 に示す。これまでの理論解析結果⁴⁾に基づき、フォトニック結晶構造には、エルミート・非エルミート結合係数を適切に低減した二重格子構造を仮定した⁴⁾。裏面電極には直径 10mm の円形電極を採用し、出射面側電極には、デバイス中央部の注入電流密度が端部の 9 割程度となるように設計した電極構造⁶⁾を仮定した。自己無撞着 CW 解析においては、Fig.1 に示す通り、各種発熱の要因に応じて、出射面側電極での発熱(P_{nele})、基板での発熱 (P_{sub})、活性層 (およびクラッド層) での発熱(P_{act})の 3 種類に分類し、各発熱源によるフォトニック結晶層の温度変化、およびそれによる屈折率・ゲインの変化を考慮して解析を行った。その際、基板での光吸収損失や出射面側電極による光の遮蔽損失等も考慮した。はじめに、一様なバンド端周波数分布を有するフォトニック結晶構造において、注入電流 880 A における遠視野像、発振スペクトル、および、動作時のバンド端周波数の面内分布の解析結果を Fig.2(a)に示す。同図に示す通り、フォトニック結晶部の温度上昇に起因して、面内にバンド端周波数の分布が生じ、発振モードの多モード化が生じるが、この場合でも、拡がり角 0.03° 程度の比較的良好なビーム品質が得られた。さらに、上記のバンド端周波数分布を補償するための温度補償構造⁵⁾を導入したデバイスについても解析を行った。その結果の一例を Fig. 2(b)に示す。発振モード数の大幅な低減と、ビーム品質の改善がみられたが、詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究の一部は科研費 (22H04915,24H00430) および BRIDGE 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) Yoshida *et al.*, Nature **618**, 7966 (2023). 4) 前田他, 2023 秋季応物 22a-A308-4. 5) Katsuno *et al.*, Opt. Express. **29**, 16(2021). 6) 吉田他, 2024 春季応物 23a-11E-9.

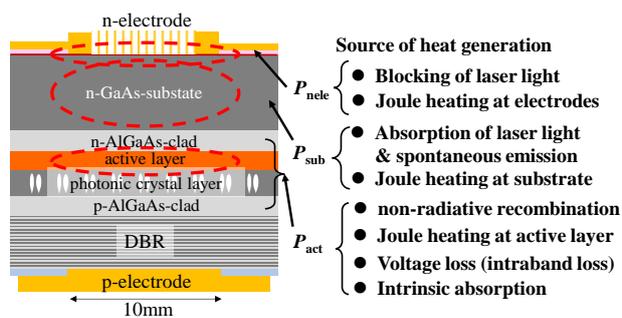


Fig.1. Simulation model of 10-mm-diameter double-lattice PCSELs under CW operation.

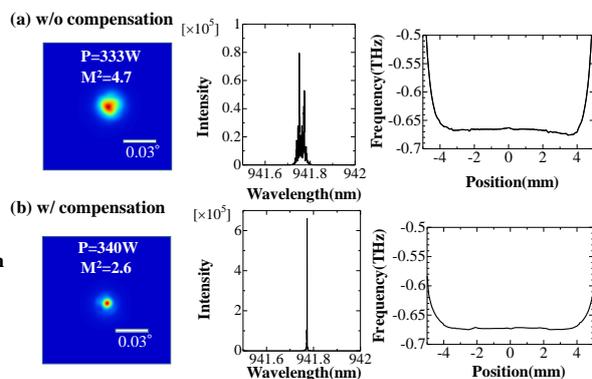


Fig.2. FFPs, Lasing spectra, and band-edge frequency distributions of 10-mm-diameter PCSELs at 880 A (a) w/o and (b) w/ frequency compensation.

非エルミートスキン効果の実験観測に向けたフォトニック結晶構造の探索

Exploration of photonic crystal structures for experimental observation of Non-Hermitian Skin Effects

¹東工大理, ²NTT 物性研, ³NTT ナノフォトニクスセンタ, ⁴関西学院大学理工

○小川希海^{1,2}, 森竹 勇斗¹, 養田 大騎^{1,4}, 高田 健太^{2,3}, 倉持 栄一^{2,3}, 納富 雅也^{1,2,3}

¹Tokyo Tech, ²NTT Basic Research Labs, ³NTT Nanophotonics Center, ⁴Kwansei Gakuin University.

○N Ogawa^{1,2}, Y Moritake¹, T Yoda^{1,4}, K Takata^{2,3}, E Kuramochi^{2,3}, and M Notomi^{1,2,3}

E-mail: ogawa.n.ah@phys.titech.ac.jp

近年「非エルミートスキン効果(Non-Hermitian Skin Effect : NHSE)」の研究が盛んになっている。NHSE とは、バルク内の固有モードが系の境界に局在する、非エルミート系特有の現象である。NHSE は理論では多く確認されているが、実験にて観測した事例は少ない。またそれらの実験はタイトバインディング系であり、マクスウェル方程式のような微分方程式で記述される連続系の NHSE は観測できていない。我々は連続系における NHSE の実験観測を目標に、今後行う実験観測の手段を説明し、現実で作製できるフォトニック結晶の構造や素材を探索した。先行研究の 2D シミュレーション[1][2]では、現実的ではない素材を使用しているため、本研究では作製プロセスで使用可能な素材を使って 3D シミュレーションを行った。

今回提案するフォトニック結晶は Fig.1(a) 正方格子、直角三角形穴のスラブ型であり、SOI 基板を想定している。格子定数は 600 nm であり、シリコンの厚みを 150nm とした。また異方的な吸収を設定するために、フォトニック結晶の上にクロムを装荷した。NHSE を実験で観測するためにはいくつかの条件があり、「Q 値が十分にあること」、「NHSE の局在長が短いこと」が必要である。またライトラインより下のモードは空気中で存在できず実験に使えない。そのため「光がライトラインの上にあること」も必要である。それらの条件を解決するために、クロム装荷の仕方、厚みを変更し、Si の厚みを変えた。Fig.1 (b)ではバンド図、Fig.1 (c)では複素固有周波数がプロットされており、PBC 下での固有周波数はループを形成している。NHSE は OBC 下で起きる現象であり、電場強度が $1/e$ となる距離を局在長とした。この局在長が短くなるためには、PBC 下における固有周波数の実部を固定したときに、このループの虚部の差が大きくなる必要はない。本研究ではこの虚部の差が大きくなるようなフォトニック結晶構造を探索した。今回提案する構造では、注目している第二バンドがライトラインより上にあり、Q 値が 20 程度ある。そして 184.06+3.9678i THz の時、局在長は $3.21 \mu\text{m}$ (系の全長は $12 \mu\text{m}$) となっている。結果として NHSE 実験観測の 3つの条件を満たすようなフォトニック結晶構造が見つかった。今後この結果をもとにフォトニック結晶を作製し、バンド測定にて NHSE の観測を行う。本研究は科学研究費補助金(20H05641, JP24H02232 および 24K01377)の援助の下に行われた。[1] J Zhong et al. PRB 104, 125416 (2021). [2] K Yokomizo et al. PRR 4, 023089(2022).

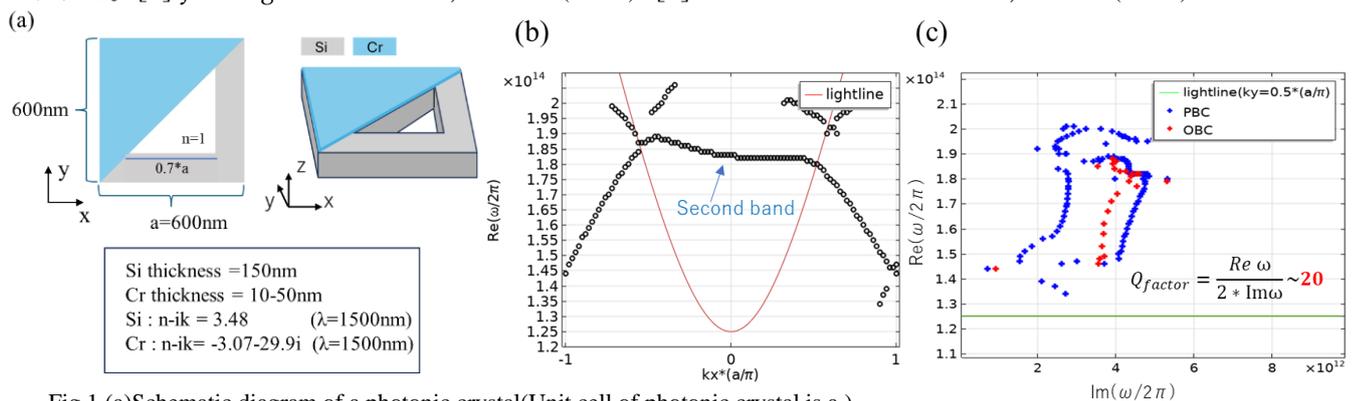


Fig.1 (a)Schematic diagram of a photonic crystal(Unit cell of photonic crystal is a.)

(b) $kx-\omega$ Band diagram (red line is lightline. Cr thickness=10nm)

(c)Complex eigenvalues plot ($ky*(a/\pi)=0.5$, blue circle = Periodic boundary condition, Red circle = Open boundary condition, The structure is periodic in the y direction and has 20 Unit cells arranged in the x direction under OBC.)

非エルミートフォトリック結晶におけるカイラル発光モードの 損失装荷法依存性

Loss loading dependence of chiral emission modes in non-Hermitian photonic crystals

東工大理¹, NTT物性研², NTTナノフォトニクスセンタ³, NTT先デ研⁴

○原田 拓実^{1,2}, 鈴木 聡^{1,2}, 大塚 秀太郎^{1,2}, 森竹 勇斗¹, 倉持 栄一^{2,3},

小野 真証^{2,3}, 藤井 拓郎^{3,4}, 松尾 慎治^{3,4}, 納富 雅也^{1,2,3}

Tokyo Tech¹, NTT BRL², NTT NPC³, NTT DTL⁴

○Takumi Harada^{1,2}, Satoshi Suzuki^{1,2}, Shutaro Otuka^{1,2}, Yuto Moritake¹, Eiichi Kuramochi^{2,3},

Masaaki Ono^{2,3}, Takuo Fujii^{3,4}, Shinji Matsuo^{3,4}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: harada.t.ao@m.titech.ac.jp

非エルミート系とは利得や損失によりエネルギーが保存しない系で、屈折率虚部が光制御の
主役として働き興味深い現象が次々と見つかっている。例えば、2次元構造のみで円偏光反射に
カイラリティを示す現象等が報告されている[1]。

前回までの発表で、我々はグラフェン装荷 Si フォトリック結晶(PhC)において円偏光反射測定
により Γ 点におけるカイラリティを観測した(Q 値が 60 程度)[2]。今回、同じ原理を用いて Γ 点
での円偏光発光を狙う。母材を InGaAsP に変えると共に、高 Q 値化を狙うために工夫を加えた
数値解析結果について報告する。

構造は前回と同じ縦横 2 つの空気穴を持つ PhC スラブ型で、吸収体装荷により損失差をつけ、
穴間隔 d の変化で対称性を制御しカイラリティを持たせる(図 1(a))。前回発表では吸収体にグラ
フェンを使用した、今回はプロセスに柔軟性のある金属/誘電体複合膜及び半導体膜を用いた。
また本研究では Γ 点で BIC(Bound States in the Continuum)になるバンドを選択して高 Q 値化を狙
った。さらに今回は電場分布(図 1(b))を考慮して吸収体装荷位置の最適化を図った。図 1(c)の配
置は比較的高い円偏光度(DCP)と高い Q 値が得られたものである。図 1(d,e)に示す Cr/Ge 膜を装
荷した場合、(DCP,Q) の値として(0.979, 858),(-0.987, 2358)が得られており、後者の方が配置と
して効果的であった。また、後者の配置で吸収材料を InGaAs 膜に変えた場合(-0.981,3872)とな
り、さらに Q 値を高くできることがわかった(図 1(f))。さらに、吸収体装荷の代わりに片方の空
気穴の形状変化による放射損失差によっても Γ 点に円偏光性を持たせることができた。各手法
の詳細な比較については当日紹介する。

[1] V. A. Fedotov et al. Phys. Rev. Lett. 97, 167401 (2006). [2] S. Suzuki et al., JSAP 21p-A308-12(2023).

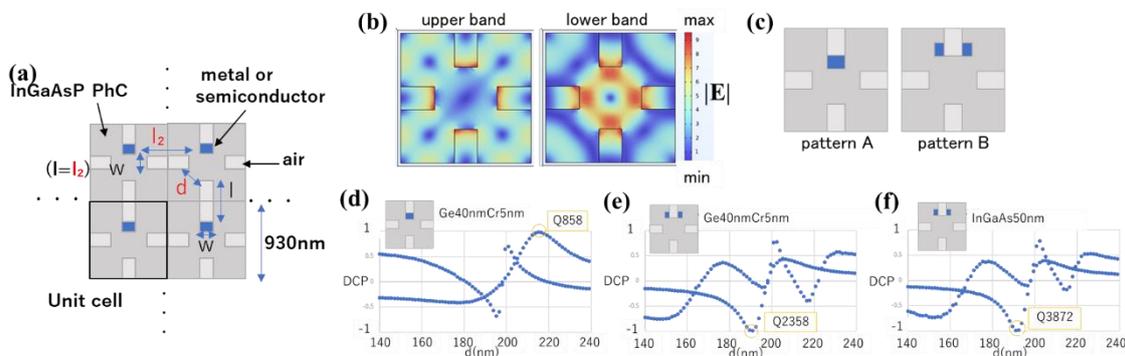


Fig.1 (a) Structure and unit cell of PhC. (b) Electric field distribution $|E|$. (c) Loading Pattern.

(d)(e)(f) Degree of circular polarization and Q-factor at the Γ point with Ge/Cr or InGaAs.

【謝辞】 本研究は、科学研究費補助金(20H05641, JP24H02232 および 24K01377)の援助の下に行われた。

非エルミート・エルミート結合制御に基づく 自由空間結合型偏光可変フォトニック結晶の設計

Design of free-space-coupled photonic crystals with variable beam polarization via non-Hermitian/Hermitian control.

京大院工,[○]金坂知樹, 井上卓也, 吉田昌宏, 野田進

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

E-mail: kanesaka@nano.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

[序] フォトニック結晶は放射損失に起因する非エルミート性を発現するため、非エルミート系特有の物理現象を観測・活用するための有用な舞台となりうる。これまで、我々は、 180° 回折を表すエルミート結合係数 κ_{1D} を抑制しつつ、 90° 回折を表すエルミート結合係数 κ_{2D} と非エルミート結合係数 μ の空間制御 (変調) を導入したフォトニック結晶において、自由空間から垂直入射したガウスビームを、任意の強度分布をもつ放射ビームへと高効率に変換可能であることを提案した^{1,2)}。今回、上記のフォトニック結晶をさらに発展させることにより、出射ビームの偏光状態の可変制御をも可能とする2次元フォトニック結晶の設計を行ったので報告する。

[設計結果] 提案する偏光可変フォトニック結晶全体の模式図を Fig. 1(a)に示す。本構造は、 45° 直線偏光の垂直入射光を偏光分離して面内へ回折させ (領域①)、面内 90° 回折 (領域②) および位相調整 (領域③) を行った後、再度偏光合波して面外へ出射する (領域④) 素子である。本素子は、偏光分離した片側の経路の位相変化量を領域③において、ヒーター等で制御することで、出射偏光状態 (直線偏光および円偏光) を制御可能である。まず、各領域のフォトニック結晶に求められる結合係数の条件の導出を行った結果、 90° 回折領域 (領域②) では、 κ_{1D}, μ と比較して κ_{2D} が大きな4回対称構造が必要であり、偏光分離領域 (領域①④) では、 κ_{1D}, κ_{2D} と比較して μ が大きな4回対称構造が必要であることが明らかとなった²⁾。そこで、上記の条件を満たす具体的なフォトニック結晶として、多重格子変調フォトニック結晶の設計を検討した。設計構造の模式図を Fig. 1(b)(c)の左図に示す。本構造の単位格子は、計16個の空孔から構成される構造であり、各空孔の面積変調比率を C_r 、平均面積を S として、Fig. 1(b)では $(1+C_r)S$ (青) および $(1-C_r)S$ (黄) の2段階に、Fig. 1(c)では、 $(1+C_r)S$ 、 $(1-C_r)S$ 、 S (緑)の3段階で変化させている。Fig. 1(b)の構造では、 x 方向および y 方向に $a/4$ 離れた空孔同士で κ_{1D} の相殺が生じ、 x 方向および y 方向に $a/2$ だけ離れた空孔同士で μ の相殺が生じるため、変調比率 C_r を変化させると、同右図に示すように、 κ_{2D} のみを連続的に制御可能である。同様に、Fig. 1(c)に示した構造でも、 κ_{1D} の相殺が生じ、主に μ を連続的に制御可能である。なお、Fig. 1(a)に提案した構造において、結合係数の適切な空間変調²⁾を組み合わせれば、出射偏光状態とビーム形状を同時に変換可能になることも期待され、その詳細な解析結果は当日報告する。**[謝辞]** 本研究の一部は科研費 (22H04915, 24H00430) の支援を受けた。**[文献]** 1) 井上他, 2023年秋応物 21p-A308-10. 2) 金坂他, 2024年春応物 22p-11E-3.

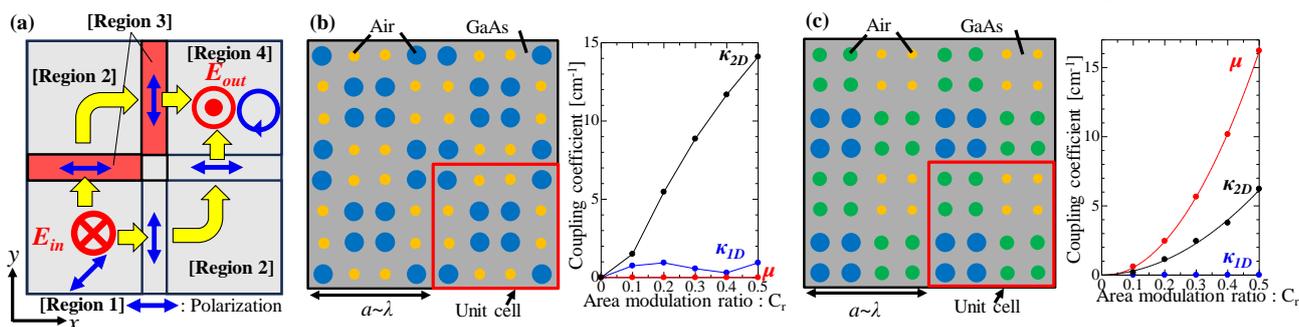


Fig 1. (a) Schematic of the proposed photonic crystal for beam-polarization conversion. (b) Design of multi-lattice photonic crystals with controllable 2D coupling coefficients. (c) Design of multi-lattice photonic crystals with controllable non-Hermitian coupling coefficients.

フォトニック結晶における M 点ゼロ屈折率状態の実験的観測

Experimental observation of zero-refractive index states at M-point in photonic crystals

¹東工大理, ²NTT 物性研, ³NTT ナノフォトニクスセンタ

渡邊 祥^{1,2}, 〇浜谷 孔明^{1,2}, 森竹 勇斗¹, 小野 真証^{2,3}, 倉持 栄一^{2,3}, 納富 雅也^{1,2,3}

¹Tokyo Tech, ²NTT Basic Research Labs, ³NTT Nanophotonics Center

Sho Watanabe^{1,2}, 〇Komei Hamaya^{1,2}, Yuto Moritake¹, Masaaki Ono^{2,3}, Eiichi Kuramochi^{2,3}, and Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: hamaya.k.aa@m.titech.ac.jp

近年、メタマテリアルなどの分野で屈折率がゼロとなる物質(ZIM: Zero-index material)が注目を集めている。ゼロ屈折率状態では、拡散輸送、位相再整合、クローキング効果といった特異な光の伝搬現象が見られ、様々な応用が期待されている。フォトニック結晶においては、ディラックコーンを用いたゼロ屈折率状態の研究が進められてきた[1]。しかし、これらはライトライン上のモードであるため、放射損失が存在する。そのため、長距離伝播に向けた様々な工夫がされてきた。以前に我々は、コアシェル型正方格子フォトニック結晶の M 点ディラックコーンを用いることで、ライトライン下のゼロ屈折率状態が実現できることをシミュレーションにより示した[2]。今回は、試料作製および、光学測定を行い、コアシェル型フォトニック結晶における M 点ゼロ屈折率状態の実験的観測に成功したので報告する。

コアシェル型フォトニック結晶の SEM 画像を Fig 1(a)に示す。八角形の Si ピラーに、八角形の空気穴をあけている。伝搬測定により、1000 μm の長距離伝播や、ディラック点周波数において光の特異な拡散とそれに伴う透過率の減少を確認した(Fig1 (b))。また、斜め入射による屈折角測定から屈折率を求めた結果、ディラック点周波数において 0.05 程度の小さな屈折率が実現していることが実証できた。これらの実験結果はディラック点の存在と、その波長におけるゼロ屈折率状態を示している。さらに、M 点ゼロ屈折率状態の応用に向けて、導波路入射による光拡散を調査した。コアシェル型 M 点ディラックコーンは、等周波数面が非常に小さな円形となるため、光を広く拡散させられる点で非常に優れていると考えられる。シミュレーションにおいて、導波路から光をフォトニック結晶に入射し、その透過強度分布を調査した。その結果、Si スラブ中の伝播に比べ、光が大きく拡散することを確認した(Fig 1(c)(d))。

また、この拡散現象は非常に短い伝搬距離で生じることもわかっており、短距離での光分配器への応用が期待される。

本研究は、科学研究費補助金 (20H05641, 24K01377, JP24H02232) の援助の下に行われた。

[1] Huang et al. Nat. mater. 10, 582-586 (2011).

[2] 渡邊 他、第 84 回日本応用物理学会秋季学術講演会(2023).

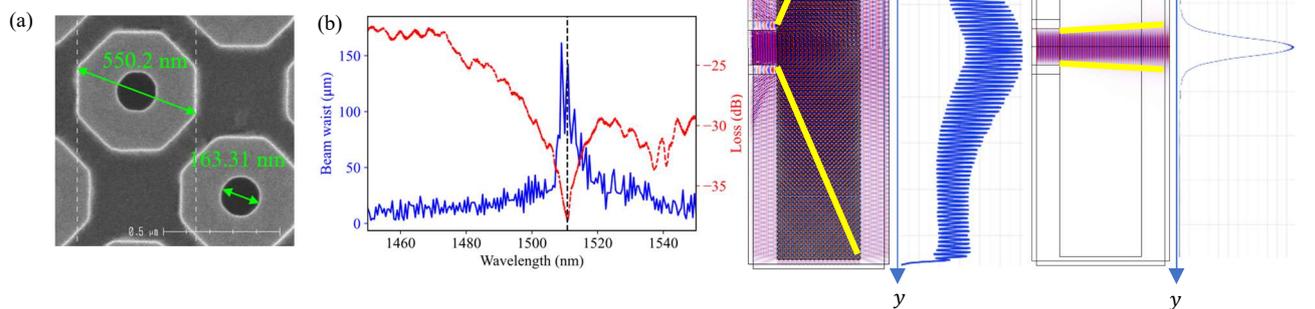


Fig.1 (a) SEM image of fabricated core-shell photonic crystals. (b) Beam waist broadening and transmittance depending on wavelength in PhC ($20 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$).

Simulated magnetic field distributions when beam is incident from waveguide to (c) PhC ($17.5 \mu\text{m} \times 91 \mu\text{m}$) and (d) Si (same size).

バレーフォトリック結晶ヘテロ構造導波路における スローライトモードの観測

Observation of slow-light modes in valley photonic crystal heterostructure waveguides

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

RCAST¹, IIS², Univ. of Tokyo, Keio Univ.³

○Chengkun Zhang^{1,2}, Guangtai Lu^{1,2}, Yasutomo Ota³, Satoshi Iwamoto^{1,2}

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

Highly localized slow-light modes in W1 [1] and valley photonic crystal (VPhC) waveguides [2] are advantageous for enhancing light-matter interactions, enabling efficient optical modulators [3], Purcell-enhanced single photon emission [4], and many other nonlinear devices [1]. Meanwhile, the enhanced nonlinearity will restrict the optical power that can be transmitted without significant signal distortion. Recent studies [5,6] numerically demonstrated that VPhC heterostructure waveguides can host slow-light modes with a wide mode width. Here, we report the experimental realization of the slow-light waveguides based on VPhC heterostructure waveguides.

Figure 1(a) shows an SEM image of a fabricated 220nm-thick Si VPhC heterostructure waveguide with $N = 4$ layers photonic graphene (yellow) sandwiched by topologically distinct VPhC A (red) and C (blue). The group indices (n_g) of topologically guided modes can be tuned by distance d [6]. Figure 1(b) shows the projected band structures for the device in Fig. 1(a) with $N = 4, d = 1.2a$ (lattice constant $a = 500$ nm), where topologically slow-light guided modes are colored in red. We measured the transmission spectrum for the fabricated waveguide and extracted the group indices from the fringe spacing, which are represented by red circles in Fig. 1(c). The measured group indices are above 20, and their wavelength dependence shows a reasonable agreement with that obtained from the dispersion curve (black curve in Fig. 1(c)), indicating the slow-light modes are realized in the VPhC heterostructure waveguide.

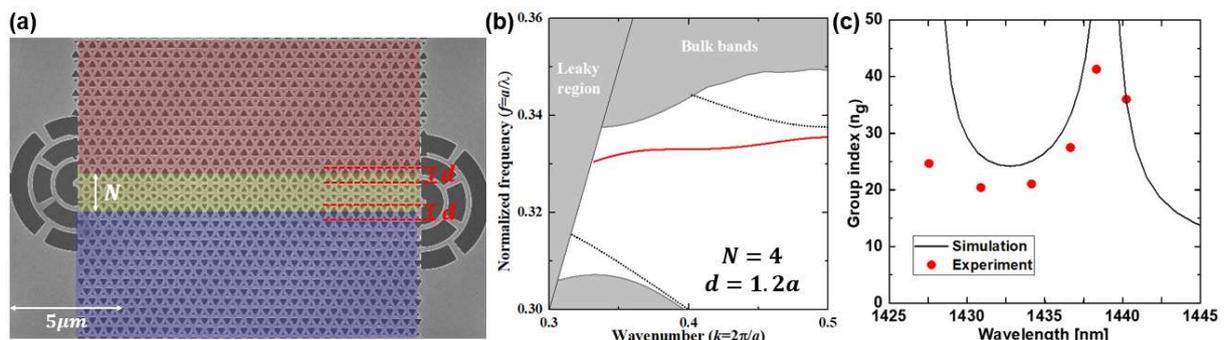


Fig. 1 (a) An SEM image of a VPhC heterostructure waveguide with $N = 4, d = 1.2a$. (b) Projected band structures for the device shown in (a), which are calculated in 3D plane-wave expanding method. (c) Group indices for topologically guided modes extracted from simulation (black lines) and measurement results (red circles). The black lines are shifted in horizontal axis for better comparison.

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] Y. Hinakura *et al.*, Opt. Express **27**, 14321-14327 (2019). [4] K. Kuruma *et al.*, Laser Photonics Rev. **16**, 2200077 (2022). [5] W. Zheng *et al.*, Phys. Scr. **98**, 065508 (2023). [6] C. Zhang *et al.*, Opt. Mater. Express **14**(7), 1756-1766 (2024).

GaN 系二重格子 PCSEL の格子間距離と発振特性

Investigation of lattice-separation in GaN-based double lattice PCSEL

京大院工¹, スタンレー電気² ○十鳥雅弘¹, 北村篤史¹, 小泉朋朗^{2,1}, 江本溪^{2,1},
De Zoysa Menaka¹, 小川健志¹, 井上卓也¹, 石崎賢司¹, 吉田昌宏¹, 勝野峻平¹, 野田進¹
Kyoto Univ.¹, Stanley Electric CO., LTD.², ○Masahiro Jutori¹, Atsushi Kitamura¹,
Tomoaki Koizumi^{2,1}, Kei Emoto^{2,1}, Menaka De Zoysa¹, Kenji Ogawa¹, Takuya Inoue¹,
Kenji Ishizaki¹, Masahiro Yoshida¹, Shumpei Katsuno¹, Susumu Noda¹
E-mail: juttori@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

【序論】 フォトニック結晶レーザー(PCSEL)は、活性層近傍に配置したフォトニック結晶の特異点での大面積共振効果を用いた高出力・高ビーム品質レーザー光源であり、加工用レーザー光源、センシング用光源等としての応用が期待されている。我々は、このような PCSEL の材料系として、GaN 系半導体を採用し、青色領域の PCSEL の開発をも進めて来た。2008 年に、GaN 系 PCSEL のパルス駆動でのレーザー発振を実証して以来¹⁾、デバイスの作製技術と構造設計を深化させ、発振特性の向上を図ってきた^{2,3)}。最近では、面内・外の光波結合の制御が可能な二重格子構造フォトニック結晶を GaN 系に展開し、主に、面内の光結合を強める孔の重心間距離($d \sim \lambda/2$, λ :媒質内波長)の構造について検討を進めてきた^{2,3)}。今回、面内の光結合を弱める重心間距離($d \sim \lambda/4$)の構造⁴⁾について、これまでの構造($d \sim \lambda/2$)と比較しながら検討を進めたので報告する。

【結果】 図1の左側には重心間距離 $d \sim \lambda/2$ の二重格子構造と、右側には重心間距離 $d \sim \lambda/4$ の二重格子構造を模式的に示す。同図に示す 180° 回折を考えると、 $d \sim \lambda/2$ の場合は、二重格子の大きい孔と小さい孔で回折される光の往復の光路差は波長程度となり、強め合い干渉が生じる。一方、 $d \sim \lambda/4$ の場合の回折光の光路差は半波長となり、弱め合い干渉が生じ、 180° 回折効果が弱まる。よって、 $d \sim \lambda/4$ 場合は、より大面積に光が広がり、共振器端部付近に存在する高次モードのみに大きな損失を与え、基本モード発振が得られやすくなる⁴⁾。そこで、 $d \sim \lambda/2$ と $d \sim \lambda/4$ の構造に

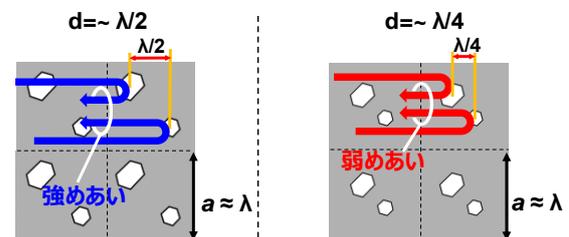


図1: 二重格子フォトニック結晶の格子点構造

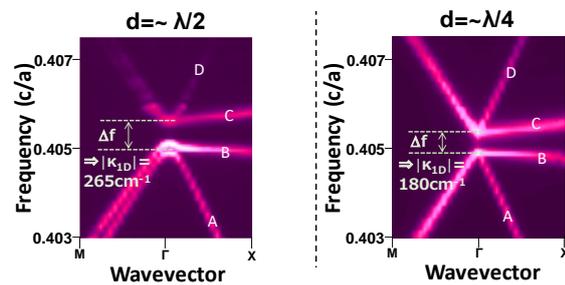
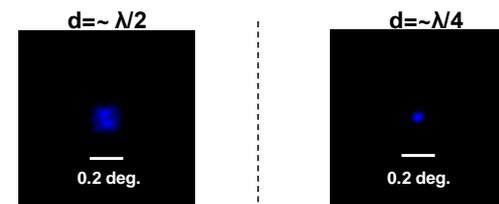


図2: フォトニックバンド構造の測定結果

図3: 500 $\mu\text{m}\Phi$ デバイスの光出力2W時の遠視野像

対して、空孔埋め込み形状を考慮しながら発振サイズ 500 $\mu\text{m}\Phi$ の PCSEL の設計・作製を行い、バンド構造の測定を行った (図2)。まず、バンド構造の Γ 点におけるバンド端周波数 C と D の中心と A と B の中心の差(Δf)から、 180° 回折を示す 1次元結合係数 $|k_{1D}|$ を見積もったところ、 $d \sim \lambda/2$ 構造では、 $|k_{1D}| = 265\text{cm}^{-1}$ となり、 $d \sim \lambda/4$ 構造では $|k_{1D}| = 180\text{cm}^{-1}$ となった。続いて、両デバイスを室温・パルスで駆動させ、光出力 2W 時の遠視野像を図3に示す。同図より、 $d \sim \lambda/4$ 構造において、より狭いビームが得られていることが分かり、その拡がり角($1/e^2$ 幅)は、回折限界に近い $\sim 0.094^\circ$ であることが分かった。これは、 $d \sim \lambda/4$ 構造では、 $d \sim \lambda/2$ 構造に比べ、500 $\mu\text{m}\Phi$ に渡って、光がより広がり、高次モードが抑制された結果と言える。詳細は当日報告する。【謝辞】本研究の一部は、内閣府 BRIDGE プログラムおよび科研費(22H04915)を受けて進めている。【文献】1) H. Matsubara *et al.*, Science **319**, 445 (2008). 2) K. Emoto, *et al*, Communications Materials **3**, 72 (2022). 3) 十鳥 他, 応物春, 23p-11E-2, (2024). 4) M. Yoshida, *et al*, Nat. Mater. **18**, 121 (2019).

GaN系フォトニック結晶レーザーを用いた水中3次元ToF-LiDARの開発(IV)

Development of GaN-PCSEL-based 3D ToF-LiDAR for ranging in water (IV)

京大院工¹, スタンレー電気² ○小川健志¹, De Zoysa Menaka¹, 十鳥雅弘¹, 北村篤史¹,
江本溪^{2,1}, 小泉朋朗^{2,1}, 井上卓也¹, 石崎賢司¹, 野田進¹

Kyoto Univ.¹, Stanley Electric CO., LTD.², ○Kenji Ogawa¹, Menaka De Zoysa¹,
Masahiro Jutori¹, Atsushi Kitamura¹, Kei Emoto^{2,1}, Tomoaki Koizumi^{2,1},
Takuya Inoue¹, Kenji Ishizaki¹, Susumu Noda¹

E-mail: ogawa@nano.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

【序論】 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大面積でコヒーレント発振可能な面発光レーザーであり、加工やセンシング等のための小型レーザー光源として期待されている。我々は、PCSELの材料系の一つとして GaN を採用し、青色帯域の PCSEL の開発に取り組んできた¹⁻⁴⁾。2008年に電流注入によるレーザー発振を実証して以来¹⁾、デバイス作製技術と構造設計の深化を進め、高ビーム品質・高出力パルス動作^{2,3)}、CW動作への展開等^{3,4)}を行ってきた。さらに、青色帯域での水中の吸収が少ないことから、GaN系のPCSELを用いた水中3次元LiDARの構築にも取り組んできた⁵⁾。前回、GaN系PCSELとMEMSを用いた水中3次元LiDARにおいて、高速度・リアルタイムの測距に成功した⁶⁾。そこで、今回は、PCSELの高ビーム品質・高出力駆動および高感度なSPADの採用による、水中での長距離(4m以上)測距を試みた結果を報告する。

【実験】 GaN系PCSEL, MEMSミラー, およびSPADを用いた水中3次元LiDARの実験系を模式的に図1に示す。本LiDARシステムにおいて、レンズフリーのGaN系PCSELによるビームを小型のMEMSミラーを用いて2次元的に走査し、対象物(例えば、図1の海藻と魚の模型)からの散乱光を高感度のSPAD並列アレイで受光する。本システム全体は、FPGAとパソコンを用いて制御している。今回採用したGaN系PCSELは、二重格子フォトニック結晶構造を導入したものであり³⁾、光出力特性および遠視野像をそれぞれ図2(a)と(b)に示す。図2(a)より、5Aにおいて2W級の光出力が得られていることが分かる。また、遠視野像から 0.15° 程度の狭い広がり角のビームが得られていることが分かる。本PCSELの2W級のビームを、MEMSミラーを用いて、2次元的に走査しつつ、4m先に設けた模型に対する水中3次元センシングを行った結果を図3に示すが、2種の模型に対する測距が実現出来ている様子が見取れる。なお、今回は、実験環境上、測定可能な距離が4mに制限されているが、図2(c)より、4m先の対象物から1V程度の強い信号が得られていることから10m級でも測距の可能性が見込まれる。詳細は、当日報告する。**【謝辞】** 本研究の一部は、内閣府BRIDGEプログラム、および科研費(22H04915)のもと行われた。**【文献】** 1) H. Matsubara *et al.*, *Science* **319**, 445 (2008). 2) 江本 他, 応物春, 11p-W631-17 (2019). 3) K. Emoto, *et al.*, *Comms. Materials* **3**, 72 (2022). 4) 十鳥 他, 応物秋, 21p-A101-7 (2022). 5) 小川 他, 応物春, 17a-D215-10(2023). 6) 小川 他, 応物春, 23p-11E-4(2024).

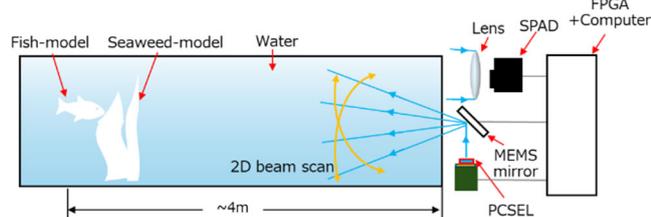


Fig.1: Schematic diagram of GaN-PCSEL based under water 3D LiDAR system.

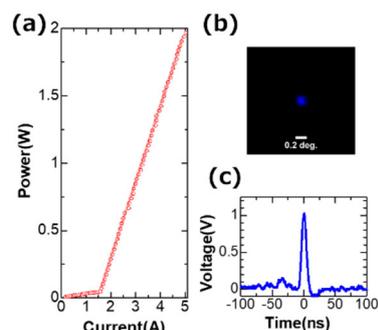


Fig.2 (a): Light output characteristic of GaN-PCSEL at pulse operation (b)FFP at 5A (c): Signal detected by SPAD array

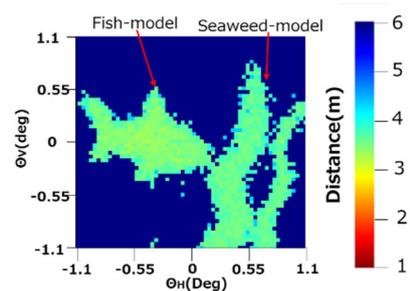


Fig.3: Measured distance image of objects in water

InGaN/GaN 系トポロジカル PhC 共振器構造の作製と発光特性評価

Fabrication and optical excitation characteristics evaluation of InGaN/GaN-based topological PhC resonator structure

上智大理工¹, 上智大半導体研²

○杉浦 雛姫¹, 本多 卓人¹, 秋元 弥頼¹, 片岡 生一¹, 倉田 隼也斗¹, 菊池 昭彦^{1,2}

Sophia Univ.¹, Sophia Semiconductor Research Institute²

○Hinaki Sugiura¹, Takuto Honda¹, Mirai Akimoto¹, Seiichi Kataoka¹, Hayato Kurata¹, Akihiko Kikuchi^{1,2}

E-mail: kikuchi@sophia.ac.jp

はじめに: フォニック結晶 (PhC) にトポロジーの概念を導入したトポロジカル PhC[1]が近年注目されている。バンドトポロジーの異なる2つの PhC を隣接させた界面では欠陥にロバストな一方向性光伝搬などの特異な現象が発現し、PhC の作製技術が確立しているテラヘルツ~近赤外域において実験的検証が盛んに行われているが、可視域での報告は極めて少ない。我々はこれまでに低損傷微細加工技術である水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法[2]と AlInN 犠牲層の硝酸選択エッチングを用いてメンブレン型 GaN 系 PhC[3]を作製し、直線導波路型 GaN トポロジカル PhC における赤色から青色域にわたる可視全域でのトポロジカルエッジ伝搬[4, 5]、および InGaN/GaN 多重量子井戸活性層を内在するリング共振器型トポロジカル PhC における紫外線照射下での青色リング状発光等[6]について報告した。本研究では、サイズの異なる複数の InGaN/GaN MQW 内在型共振器構造を作製して、光励起発光特性の評価を行った。

実験方法・結果: p-GaN(60nm)/MQW(42nm)/n-GaN(50nm)/AlInN(300nm)/GaN/(0001) Al₂O₃ 構造のエピウェハ表面に三角空孔を六員環状に配置した変調ハニカム構造の SiO₂ マスクを形成した。六員環クラスタの周期を a₀ (~350nm)、クラスタ中心と三角形重心間の距離を R とし、R > a₀/3 である Topological 領域を一辺長 L=3~9 クラスタの六角形に配置し、その周囲を R < a₀/3 の Trivial 領域で囲った。メンブレン型 PhC 構造の作製手順は、以前の報告と同様である。Fig.1(a)は作製した L6 共振器の上面 SEM 像、(b)は水銀ランプ励起の蛍光顕微鏡写真である。全ての構造において、Topo./Tri.境界に沿った青色の六角系リング状発光が観察され、発光は Trivial 領域に強く分布していた。Fig.2 は、リング発光部の蛍光強度の L 依存性であり、L=6 のとき最も強く、L=9 のとき最も弱くなった。

謝辞: 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP24K00950 の援助を受けて行われた。

参考文献: [1] L. Wu et al. Phys. Rev. Lett., 114 (2015) 223901. [2] R. Kita et al. Jpn. J. Appl. Phys., 54 (2015) 046501. [3] K. Yoneta et al., Jpn. J. Appl. Phys., 61, SC1078 (2022). [4] Y. Takano et al. ICNS14, OD7-2, Fukuoka, 2023. [5] 杉浦他, 第71回応物春季講演会, 22a-21C-1, 東京, 2024. [6] 倉邊他, 第71回応物春季講演会, 23a-11E-3, 東京, 2024.

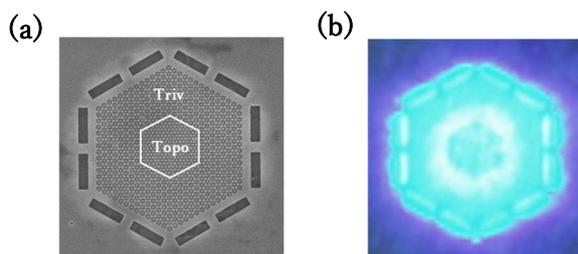


Fig.1. (a) SEM top-view and (b) mercury lamp excited fluorescence microscope images of InGaN/GaN MQW topological PhC resonator structure. (L=6)

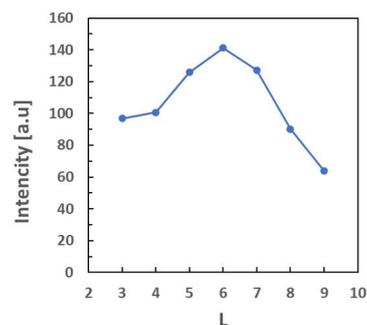


Fig.2. Peak fluorescence intensity of ring-shape emission as a function of resonator size L.

トポロジカルフォトリック結晶一方向導波路を用いた Y 型合波器

Y-junction optical combiner composed of unidirectional waveguides utilizing topological photonic crystals

東大¹ °(D)陸 広泰¹, 岩本 敏¹

Univ. Tokyo¹, °(D) Guangtai Lu¹, and Satoshi Iwamoto¹

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

The phenomenon of destructive interference in light indicates that two out-of-phase light waves can cancel each other out. This principle, however, seems to challenge the concept of energy conservation, due to the inequality of input power and output power, which is also known as interference paradox (see Figure 1(a)). However, it is theoretically impossible to couple two such light waves into a single mode. For instance, when a beam splitter receives two out-of-phase incoming beams, it produces two outgoing beams: one that undergoes destructive interference and another that experiences constructive interference due to a phase shift. Traditional Y-junctions, shown in Figure 1(b), result in no light coupling to the output port due to destructive interference inside the waveguide but the energy leakage through radiation modes.[1] For photonic crystal Y-junctions, destructive interference is associated with energy reflecting back to the source (Figure 1(c)) or out-of-plane radiation.[2]

Recent advances in topological photonic crystals in quantum Hall phase have opened new possibilities for creating unidirectional waveguides that are immune to back scattering.[3] A Y-junction optical combiner based on these unidirectional waveguides can function differently because of no backscattering at the junction.

We consider a 2D structure composed of photonic crystals carrying different Chern numbers. Different from conventional Y-junction combiners, in the topological Y-junction combiner, two out-of-phase inputs are combined and guided to the output port as demonstrated in Fig. 1(d). The result reveals that energy conservation is held through bulk-edge correspondence. This principle necessitates that the output waveguide must be multimode. The destructive interference in one of the output mode is associated with the constructive interference in another output mode, keeping the energy conservation of the system.

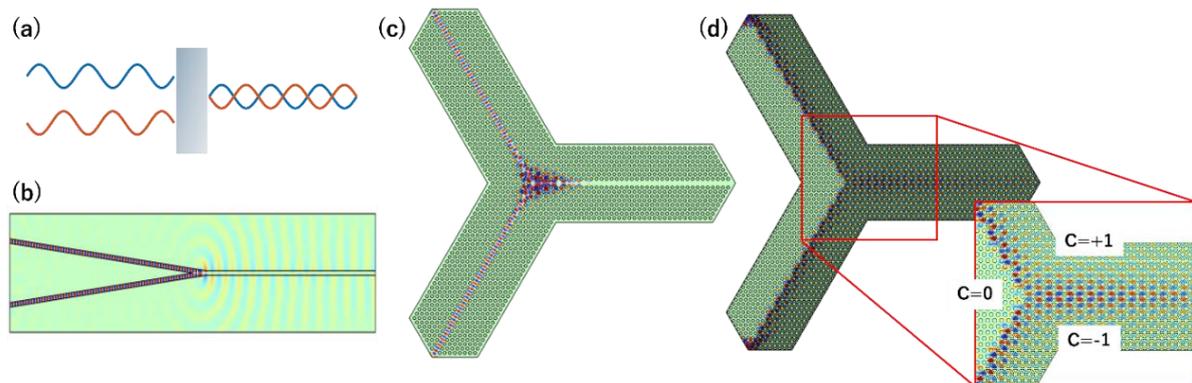


Figure 1. (a) Illustration of destructive interference. (b-d) Destructive interference by input out-of-phase waves in (b) traditional Y-junction. Energy leakage through radiation. (c) photonic crystal Y-junction. Energy leakage through reflection. (d) topological Y-junction. Energy is preserved due to its multimode nature. Chern numbers of photonic crystals are labeled. References: [1] S. K. Burns, et al. IEEE J. Quantum Electron. QE-16 (1980): 446-454 [2] Y. Wu, et al. Physica B: Condensed Matter 405.7 (2010): 1832-1835. [3] Z. Wang, et al. Nature 461.7265 (2009): 772-775.

電析法による周期構造を有する BiI_3 膜の作製

Preparation of BiI_3 film with periodic structure by electrodeposition method

京大院エネ科 ◯鈴木 直道, 池之上 卓己, 三宅 正男

Kyoto Univ. ◯Suzuki Naomichi, Takumi Ikenoue, Masao Miyake

E-mail: ikenoue.takumi.4m@kyoto-u.ac.jp

フォトニック結晶が様々な半導体で作製されている。 $\text{MA}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ (MA; methylammonium) 半導体は、欠陥によって生じるエネルギー準位が浅く、電荷移動特性が欠陥によって損なわれにくい^[1,2]。また、Si や GaAs などの従来の半導体と異なり、安価で容易な溶液プロセスで作製可能という利点がある。そのため、フォトニック結晶の新たな材料として期待できる。我々はテンプレート内への電析を利用して $\text{MA}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ フォトニック結晶の作製を目指している。周期構造のテンプレート内に BiI_3 を電析させた後、得られた BiI_3 の周期構造体を、MAI 溶液と反応させることで $\text{MA}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ フォトニック結晶を得るプロセスを想定している。本研究では、PS コロイド結晶のテンプレートが形成された基板に電析を行うことで周期構造を有する BiI_3 膜の作製を行った。

BiI_3 膜の電析は、5–100 mM の $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、10 mM の I_2 および 100 mM の NaNO_3 を含む溶液 (H_2O , EtOH = 1 : 1) に、硝酸を加えて pH を 1 以下に調整した電解液を用いて行った。250 mV での定電位電析とした。周期構造のテンプレートにはポリスチレン (PS) コロイド結晶を用いた。

$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 濃度 5 mM では、(Fig. 1 a) に示されるようにテンプレートの PS コロイド結晶の上部に BiI_3 が電析された。 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 濃度 50 mM では PS コロイド結晶の空隙を完全に充填するように BiI_3 が電析された(Fig. 1 b)。これは電析時にコロイド結晶の空隙に Bi イオンが十分に拡散したためだと考えられる。 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 濃度が 100 mM 以上となると、 BiI_3 は電析されなかった (Fig 1 c)。以上の結果から $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 濃度 50 mM が、テンプレート内への BiI_3 の電析に適していることが分かった。

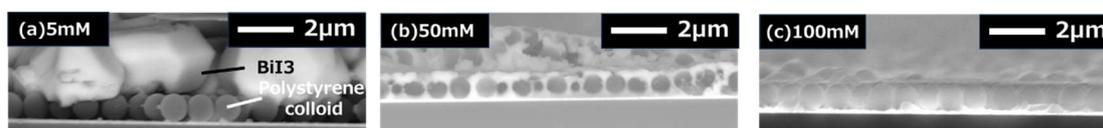


Fig. 1 Cross-sectional SEM images of BiI_3 layers electrodeposited on substrates with PS colloidal crystal from electrolytes with various concentrations of $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$

References

- [1] Jin H et al. Materials Horizons. 2020
- [2] Wanjun Li et al. Journal of Materials Chemistry C 2021