

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) 13:15 ~ 18:00 | 会 A308 (熊本城ホール)

[22p-A308-1~17] 3.10 フォトニック構造・現象 (旧3.11)

新家 昭彦(NTT)、高橋 和(大阪公立大)、北村 恭子(京工繊大)

13:15 ~ 13:30

[22p-A308-1] [講演奨励賞受賞記念講演] 光子・光子共鳴に基づくフォトニック結晶レーザーの直接変調帯域の広帯域化(II)

○森田 遼平¹、井上 卓也¹、仲野 秀栄¹、De Zoysa Menaka¹、石崎 賢司¹、野田 進¹ (1.京大院工)

◆ 英語発表

13:30 ~ 13:45

[22p-A308-2] Generation of multiple EPs with modulated loss/ gain parameters in a PT system

○(D)Manish Kala¹, Pawan Singh¹, Akhilesh Kumar Mishra¹ (1.IIT Roorkee India)

13:45 ~ 14:00

[22p-A308-3] 機械学習とCMA-ESを活用した連続駆動分割電極PCSELのリアルタイム発振モード状態制御

○和泉 孝紀¹、De Zoysa Menaka¹、行舎 直起¹、小林 宇翔¹、井上 卓也¹、勝野 峻平¹、吉田 昌宏¹、石崎 賢司¹、初田 蘭子¹、浅野 卓¹、野田 進¹ (1.京大院工)

14:00 ~ 14:15

[22p-A308-4] フォトニック結晶レーザーの発振状態制御のための面内温度分布制御機構の導入

○小林 宇翔¹、和泉 孝紀¹、De Zoysa Menaka¹、行舎 直起¹、井上 卓也¹、勝野 峻平¹、吉田 昌宏¹、石崎 賢司¹、初田 蘭子¹、野田 進¹ (1.京大院工)

14:15 ~ 14:30

[22p-A308-5] 深層学習によるトポロジカル導波路Z-bendの曲げ効率向上構造の設計

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

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[22p-A308-6] Ge₂Sb₂Te₅の選択的装荷による光トポロジカル相転移の実験的実証

○上村 高広^{1,2}、千葉 永^{1,2}、養田 大騎^{1,2}、森竹 勇斗¹、田中 祐輔²、倉持 栄一^{2,3}、小野 真証^{2,3}、納富 雅也^{1,2,3} (1.東工大理、2.NTT物性研、3.NTT NPC)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[22p-A308-7] 変調フォトニック結晶レーザーの放射特性の RCWA 法による詳細解析(II)

○(M1)田中 聡記¹、坂田 諒一¹、井上 卓也¹、石崎 賢司¹、De Zoysa Menaka¹、野田 進¹ (1.京大院工)

15:15 ~ 15:30

[22p-A308-8] エレファントカプラを用いた光スキルミオン結晶ビーム生成素子

○林 文博¹、吉田 知也²、渥美 裕樹²、榊原 陽一²、雨宮 智宏³、太田 泰友⁴、岩本 敏⁵ (1.東大先進機構、2.産総研、3.東工大院工、4.慶應大、5.東大先端研)

15:30 ~ 15:45

[22p-A308-9] 二重格子構造を導入した変調フォトニック結晶レーザーによる狭発散角多点同時ビーム出射

○石崎 賢司¹、坂田 諒一¹、今村 陽¹、井上 卓也¹、田中 聡記¹、デゾイサ メーナカ¹、小松原 望^{1,2}、前田 修²、太田 浩紀^{1,2}、山田 和義²、中村 仁²、山口 圭治²、初田 蘭子¹、野田 進¹ (1.京大院工、2.ソニーセミコンダクタソリューションズ)

15:45 ~ 16:00

[22p-A308-10] 1次元グレーティングにおける伝搬型BICの実験的観測

○浜谷 孔明¹、森竹 勇斗¹、養田 大騎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 NPC、3.NTT BRL)

16:00 ~ 16:15

[22p-A308-11] SLGビームスキャナにおける回折格子のトポロジカル最適化

○廣谷 圭祐¹、安藤 雅隆¹、陶山 実之¹、馬場 俊彦¹ (1.横国大院工)

16:15 ~ 16:30

[22p-A308-12] オンチップイオントラップへ向けた横方向出射型集光グレーティングカプラに関する検討

○林 文博¹、石井 大善²、長田 有登¹ (1.東大先進機構、2.東大教養)

16:45 ~ 17:00

[22p-A308-13] モアレ超格子バレーフォトリック結晶の数値解析

○(M1)石井 佑樹¹、陸 広泰²、岩本 敏²、太田 泰友¹ (1.慶應理工、2.東大先端研)

17:00 ~ 17:15

[22p-A308-14] 変調フォトリック結晶レーザーの高ピーク出力・短パルス動作の検討

○坂田 諒一¹、石崎 賢司¹、井上 卓也¹、森田 遼平¹、田中 聡記¹、De Zoysa Menaka¹、野田 進¹ (1.京大院工)

17:15 ~ 17:30

[22p-A308-15] SLG光ビームスキャナと補間クロックサンプリングを用いたリアルタイムSiフォトリックス非機械式FMCW LiDAR (II) – 干渉計の集積化

○山崎 竣平¹、玉貫 岳正¹、鎌田 幹也¹、馬場 俊彦¹ (1.横浜国立大学)

17:30 ~ 17:45

[22p-A308-16] GaN系フォトリック結晶レーザーを用いた水中3次元ToF-LiDARの開発 (II)

○小川 健志¹、De Zoysa Menaka¹、十鳥 雅弘¹、江本 湊^{2,1}、小泉 朋朗^{2,1}、森本 峻介¹、和泉 孝紀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

17:45 ~ 18:00

[22p-A308-17] レーザ援用光電気化学エッチング法によるGaNマイクロディスクレーザの作製とその評価

○惣角 翔¹、内田 和男¹、田尻 武義¹ (1.電気通信大学)

光子・光子共鳴に基づくフォトニック結晶レーザーの 直接変調帯域の広帯域化(II)

Extension of direct modulation bandwidth of photonic-crystal lasers based on photon-photon resonance (II)

京大院工 °森田遼平, 井上卓也, 仲野秀栄, De Zoysa Menaka, 石崎賢司, 野田進

Kyoto Univ. °R. Morita, T. Inoue, S. Nakano, M. De Zoysa, K. Ishizaki, S. Noda

E-mail: moritar@qoe.kuce.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuce.kyoto-u.ac.jp

[序] 高出力(>W)・高ビーム品質動作可能なフォトニック結晶レーザー (PCSEL) ¹⁾において, 高速(>GHz) な直接変調動作が可能となれば, 衛星間通信を含む様々な自由空間光通信への展開が期待される ²⁾. 前回, PCSEL の直接変調帯域の広帯域化のために, 光子・光子共鳴 (Photon-Photon Resonance : PPR) ³⁾の原理を利用した新たなデバイス構造を提案し, 帯域の増大が可能であることを数値計算で明らかにした ⁴⁾. 今回, フォトニック結晶の結合係数や格子定数分布の形状を変化させた系統的な解析を行い, 周波数変調帯域のさらなる増大が可能であることを明らかとしたので報告する.

[原理] PPR を導入した PCSEL の構造例を Fig. 1(a)に示す ⁴⁾. フォトニック結晶共振器を格子定数の異なる2つの領域に分割する. このとき, 格子定数差 Δa により生じるモードギャップの差 (Fig. 1(b)) に起因して, Fig. 1(c)に示すように基本と高次モードの電界分布にずれが生じる. この状態で, 両方の領域にバイアス電流を注入し, 低周波側の領域のみを変調させると, 基本と高次モード間での結合がわずかに誘起され, その結果, 両モードの共振周波数差付近で PPR が生じ, 直接変調帯域が増大する.

[解析] はじめに, フォトニック結晶の面内の回折強度を表すエルミート結合係数の実部 ⁵⁾を, 発振領域 300 μm 角において単一モード発振可能な $R = 170 \text{ cm}^{-1}$ に固定し, 2つの領域の格子定数差 Δa を変えた際の周波数応答特性の解析結果を Fig. 2(a)に示す. ここで, 各領域のバイアス電流は $I_A = I_B = 1.5 \text{ A}$ とし, 変調電流の振幅は $I_{\text{mod}} = 0.15 \text{ A}$ とした. 同図より, Δa が大きくなるほど, PPR の共振ピークが急峻になり-3dB 変調帯域が増大することがわかる. ただし, Δa がさらに大きい場合 ($\Delta a > 1.5 \times 10^{-4} a$) は多モード発振が生じ, 直接変調動作が困難となる. 次に, $R = 110 \text{ cm}^{-1}$ (発振領域 500 μm 角でも単一モード発振を維持可能) に低減した場合について, 同様の条件で周波数応答特性を解析した結果を Fig. 2(b)に示す. 結合係数の低減により高次モード発振が抑制された結果, より大きな Δa を導入した場合にも PPR が生じることが確認された. このとき, 結合係数の低減および Δa の増加により, 基本と高次モードの共振周波数差が増大するため, PPR の共振ピークは高周波側に移動し, 結果として-3dB 変調帯域のさらなる増大が実現した. 詳細は当日報告する. **[謝辞]** 議論頂いた KDDI 総合研究所の石村, 西村, 高橋, 釣谷, 鈴木 (敬称略) の各位に感謝する. 本研究の一部は科研費 (20H02655, 22H04915) の支援を受けた. **[文献]** 1) M. Yoshida et al., *Nat. Mater.* **18**, 121 (2019). 2) S. Ishimura et al., *J. Light. Technol.* DOI: 10.1109/JLT.2023.3273563 (2023). 3) A. A. Tager et al., *IEEE J. Quantum Electron.* **29**, 2886 (1993). 4) 森田 他, 2023 年春応物, 17p-A303-1 (2023). 5) T. Inoue et al., *Nat. Commun.* **13**, 3262 (2022).

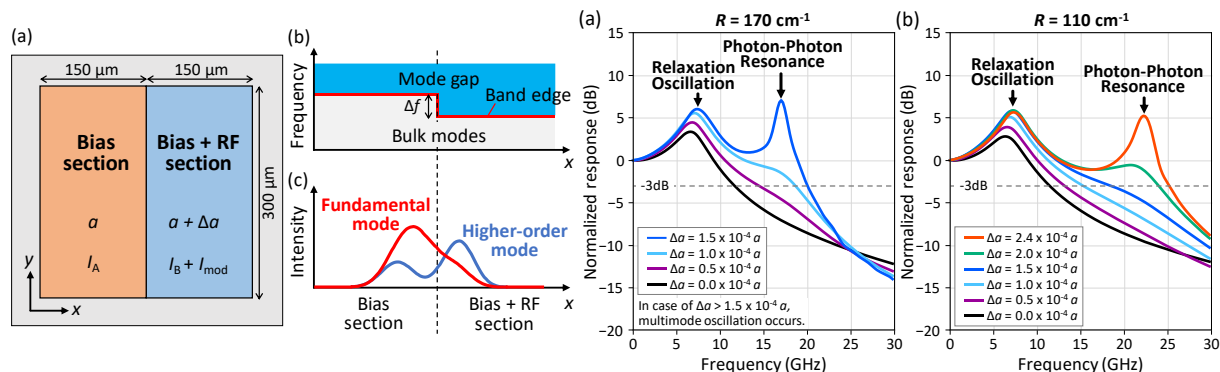


Fig. 1. (a) Schematic of a photonic-crystal laser with photon-photon resonance. (b)(c) Schematic of band-edge frequency distribution and photon-density distribution of each mode.

Fig. 2. (a)(b) Calculated small-signal frequency responses of the designed PCSELs with various Δa for (a) $R = 170 \text{ cm}^{-1}$ and (b) $R = 110 \text{ cm}^{-1}$. Normalized response of -3dB is shown with a dashed gray line.

Generation of multiple EPs with modulated loss/ gain parameters in a PT system

Manish Kala, Pawan Singh, Akhilesh Kumar Mishra

Department of Physics, Indian Institute of Technology Roorkee,
Roorkee-247667, Uttarakhand, India

E-mail : m_kala@ph.iitr.ac.in, pawan.ph@srict.iitr.ac.in, akhilesh.mishra@ph.iitr.ac.in

1. Introduction

In recent years PT obeying non-Hermitian optical systems have gathered considerable research attention due to their various advantageous features [1]. One can realize PT symmetry in an optical structure if its complex refractive index satisfies the condition $n^*(-z) = n(z)$, which means that the real part of refractive index symmetric while the imaginary part is anti-symmetric. Recent studies show that PT symmetric optical systems have potential applications in invisibility, non-reciprocity, coherent perfect absorber, exotic lasing, enhanced sensing, unidirectional transparency, optical isolation, etc [2,3].

In this work, we investigate the generation of multiple laser point (LP) and exceptional points (EP).

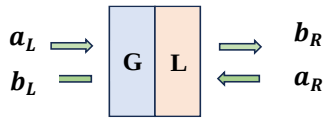


Fig.1. Schematic of layered gain (G) and loss (L) structure.

2. Theory

The system under investigation a layered structure of materials with gain and loss as shown schematically in fig. 1. To study the system, we have used scattering matrix method, which is expressed as

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} t & r_R \\ r_L & t \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where t , r_R and r_L are transmission, reflection to the right and reflection to the left, respectively. The output field $b_{L,R}$ relates with input fields $a_{L,R}$ by scattering matrix as; $(b_R, b_L)^T = \hat{S}(a_L, a_R)^T$ where superscript T denotes transpose. The transmission and reflectance of considered structures are calculated using transfer matrix method (TMM) [4].

3. Results

Transmittance, reflectance and eigen values of PT symmetric structure are plotted in Fig. 2. The refractive indices of the media with gain and loss are $n_G = 3.53 - iq$ and $n_L = 3.53 + iq$ respectively. The thickness of each layer is assumed to be 50 nm . For $q = 2$, we observed one LP and two EPs as shown in Fig 2(a, b). Fig 1(c) shows absolute values of eigenvalues which support the above result. Two EPs appear at wavelengths $0.86\mu\text{m}$, and $1.425\mu\text{m}$. Further, at $1.0\mu\text{m}$ wavelength, transmission and reflection simultaneously become greater than unity

which represent LP point. When we consider sinusoidally varying imaginary part of the refractive index with wavelength, multiple EPs are observed while preserving LPs as shown in Fig. 2 (d, e). These observations may have potential applications in sensing, lasing and optical isolation.

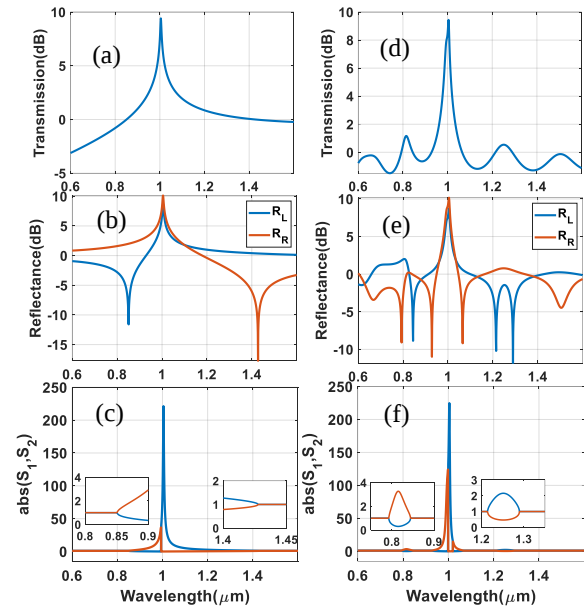


Fig. 2. (a) Transmittance, (b) reflectance from left and right for gain/loss layers. (c) The absolute of eigen values for constant loss and gain parameter, for modulated loss and gain, (d) transmittance, (e) reflectance from left and right for gain/loss layers.

4. Conclusion

We have reported the generation of multiple EPs in PT symmetric structure without disturbing LPs.

References

1. C. E. Ruter et al., *Nature Phys.* 6, 192-195 (2010).
2. C.M. Bender et al., *Phys. Rev. Lett.* 80 (24) (1998) 5243.
3. Z. Lin et al., *Phys. Rev. Lett.* 106.21, 213901 (2011).
4. Y. D. Chong et al., *Phys. Rev. Lett.*, 105, 053901 (2010).

機械学習と CMA-ES を活用した連続駆動分割電極 PCSEL のリアルタイム発振モード状態制御

Real-time control of lasing mode state in multiple-electrode PCSEL under CW condition based on CMA-ES and deep learning

京大院工 °和泉孝紀, De Zoysa Menaka, 行舎直起, 小林宇翔, 井上卓也, 勝野峻平, 吉田昌宏, 石崎賢司, 初田蘭子, 浅野卓, 野田進

Kyoto Univ. °Koki Izumi, Menaka De Zoysa, Naoki Gyoja, Takato Kobayashi, Takuya Inoue, Shumpei Katsuno, Masahiro Yoshida, Kenji Ishizaki, Ranko Hatsuda, Takashi Asano and Susumu Noda
E-mail: koki-izumi@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大面積コヒーレント発振可能な半導体レーザーである。これまで分割電極構造を導入した PCSEL(ME-PCSEL)の発振モード状態制御について検討を進め、パルス動作および CW 動作において、機械学習を活用したビーム形状制御の実証に成功している[1, 2]。また、環境変動等による発振状態への影響を補正可能な、リアルタイム制御について、共分散行列適応進化戦略(CMA-ES)[3]を活用した初期検討を進めてきた[4]。本報告では、このような CMA-ES を活用したリアルタイム発振モード状態制御の高速・高度化を目指し、小規模なニューラルネットワーク(NN)により初期値を与える、機械学習と CMA-ES を融合した新たな手法を提案するとともに、その実証を試みた結果を報告する。

[手法] 本手法は、発振モード状態を反映したビーム形状と ME-PCSEL への電流注入分布の相関関係に関する小規模な NN の構築・予測により、電流注入分布の初期値を得た上で、その初期値をもとに CMA-ES による、目標ビーム形状の実現に必要な電流分布の高速な探索を目指す。具体的には、まず比較的少ないデータ数(例えば数百程度)のビーム形状と電流注入分布のデータセットにより、ビーム形状を入力、電流分布を出力とする学習モデルを構築する。そのうえで、構築した学習モデルへ目標ビーム形状を入力することで、広いパラメータ空間の中から電流注入分布の初期値を予測し、CMA-ES による探索を開始する。この探索では、リアルタイムのビーム形状と目標ビーム形状の一致度を評価しつつ、電流分布を更新し、目標形状に似たビーム形状へと近づけていく。

[結果] 今回検討した CW 駆動 ME-PCSEL のリアルタイム発振モード状態制御に用いた測定系の概要を図 1 に示す。ME-PCSEL の p 側電極として、150 μ m 角の分割電極を 20 μ m 間隔で 6 $\times$ 6 のアレイ状に並べた構造(全電流注入領域 $\sim$ 1mm 角)を導入した。また CW 動作時の放熱のため、デバイスを放熱パッケージと実装した。さらに、ME-PCSEL を図 1 に示す測定系へ組み込み、コンピュータで生成したデジタル入力分布を FPGA、多領域駆動回路へ入力することで、高速に各分割電極への注入電流を制御しつつ、同時にカメラによりビーム形状を取得した。本手法の具体例として、人工的に生成したガウスビームを目標ビーム形状として、機械学習と CMA-ES を活用したリアルタイム発振モード状態制御を行った結果を図 2 に示す。なお、学習モデルは、データ数 300 のデータセットを用いて、構築した。また、参考として、初期分布として一様な分布を用いて、リアルタイム制御を行った場合の結果も合わせて示す。同図から分かるように、機械学習の予測結果を初期分布とすることで、最適化が効率的に進み、目標形状に近いビーム形状が得られることが示唆される。その他のビーム形状への適用等について、詳細は当日報告する。

[謝辞] 本研究は科研費 (22H04915)の支援を受けた。**[文献]** [1] M. De Zoysa et al. Optica **10**(6), 754 (2023). [2] 和泉他, 2023 年春応物, 17a-D215-6. [3] N. Hansen, arXiv:1604.00772v1(2016). [4] 和泉他, 2023 年春応物, 17a-D215-8.

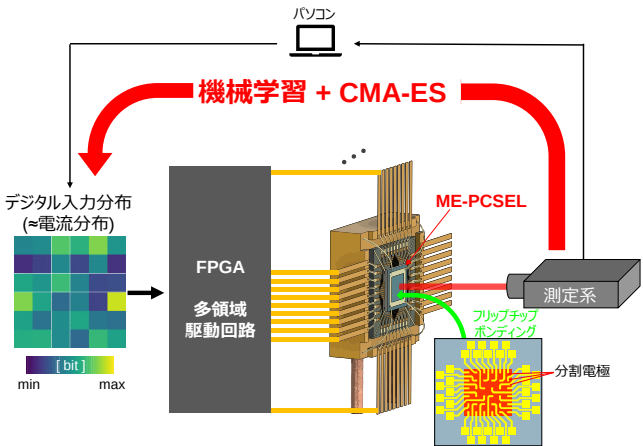


図 1: CW 駆動分割電極 PCSEL のリアルタイム制御。

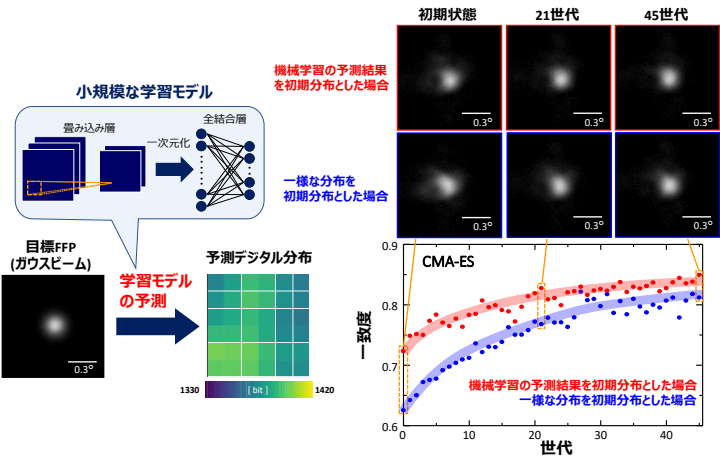


図 2: 機械学習による予測を初期値とした CMA-ES によるリアルタイム制御の様子。

フォトニック結晶レーザーの発振状態制御のための面内温度分布制御機構の導入

Introduction of in-plane temperature control mechanism for photonic-crystal surface-emitting lasers

京大院工[○]小林 宇翔, 和泉 孝紀, De Zoysa Menaka, 行舎 直起, 井上 卓也,
勝野 峻平, 吉田 昌宏, 石崎 賢司, 初田 蘭子, 野田 進

Kyoto Univ., [○]Takato Kobayashi, Koki Izumi, Menaka De Zoysa, Naoki Gyoja, Takuya Inoue,
Shumpei Katsuno, Masahiro Yoshida, Kenji Ishizaki, Ranko Hatsuda and Susumu Noda
E-mail: kobayashi.takato@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 点など)における共振効果を利用した大面積コヒーレント発振可能な新たな半導体レーザーである。これまで、我々は、PCSEL に分割電極構造を導入し、電流注入分布を変化させ、発振状態の制御を行うとともに、機械学習や進化戦略(CMA-ES)を用いて、狙った発振状態を得ることが可能なスマートレーザーの実現に成功している[1, 2]。本報告では、電流分布の制御とは独立に、PCSEL 共振器の屈折率分布を制御可能な、面内温度分布制御機構を導入することを提案し、実際に発振状態制御が可能であることを解析的に示す。また、温度制御機構を導入した初期デバイスを試作し、面内の温度分布が制御可能であることを確認したので報告する。

[結果] 今回は、面内温度分布制御機構として、図 1 に示すような PCSEL の出射面側に透明導電膜の分割ヒーターを導入したデバイスについて検討を行った。まず、分割ヒーターの駆動条件を変化させたときのフォトニック結晶層の温度分布を解析した。ここで、分割ヒーターは、直径 800 μm 、幅 30 μm のリングを 8 分割した構造とし、各ヒーターの発熱量は 0 ~ 0.2 W の範囲で変化させた。デバイスへ 6 A の電流注入を行ったときの、面内温度分布の解析結果の一例を図 2 上段に示す。また、参考のため、ヒーターの発熱がない場合の解析結果も合わせて示す。同図より、デバイス出射面側に導入したヒーターによりフォトニック結晶層の温度分布が制御でき、解析条件 3 のように、共振器内で平坦な温度分布も実現できることが分かる。さらに、分割ヒーターの駆動条件を変化させた場合の、直径 1 mm PCSEL の CW レーザー特性[3]を解析した。解析結果の一例として、ヒーターの発熱なしの場合と平坦な温度分布が生じる解析条件 3 の場合のレーザー特性の解析結果を図 2 下段に示す。なお本解析では、あえて直径 1 mm の共振領域に最適化されていないフォトニック結晶の設計を用いた。同図より、ヒーターの発熱がない場合には、フォトニック結晶層での温度は中央部が高くなり、上述のように最適化されていない設計構造に由来し、2 モードでの発振が生じている様子が分かる。その一方で、同図の解析条件 3 のようにヒーターの発熱によって面内均一な温度分布が均一とすることで、単一モード発振となる様子が確認できる。これは、導入した分割ヒーターを用いた温度分布制御により、環境による温度変化や作製時のひずみにより生じた場合にも発振モード状態の乱れを制御可能であることを示唆している。

続いて、分割ヒーターを導入した PCSEL の初期試作を行った。試作したデバイスの顕微鏡写真を図 3(a)に示す。同図のように、分割ヒーターの設計構造は上記の解析と同様であり、デバイス出射面上に、絶縁膜を挟んで形成した。本デバイスをパッケージへと実装し、パッケージ温度 20 $^{\circ}\text{C}$ の条件のもと、デバイスへ 6 A の電流を注入しつつ、ヒーターの駆動条件を変化させ、表面温度分布を観察した。測定結果を図 3(b)に示す。同図より、ヒーターの駆動条件に応じ、ヒーターの近傍の表面温度が変化している様子が分かる。これにより、本デバイスにおいて、分割ヒーターによる発振モード状態制御の実現が期待される。

[謝辞] 本研究は科研費 (22H04915)の支援を受けた。**[文献]**[1] M. De Zoysa et al. Optica **10**(6), 754(2023). [2] 和泉他 本応物. [3] S. Katsuno et al. Opt. Express. **29**, 16, 25118(2021).

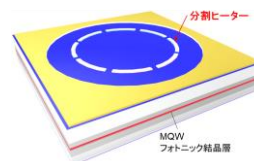


図 1. 分割ヒーターを導入した PCSEL の模式図。

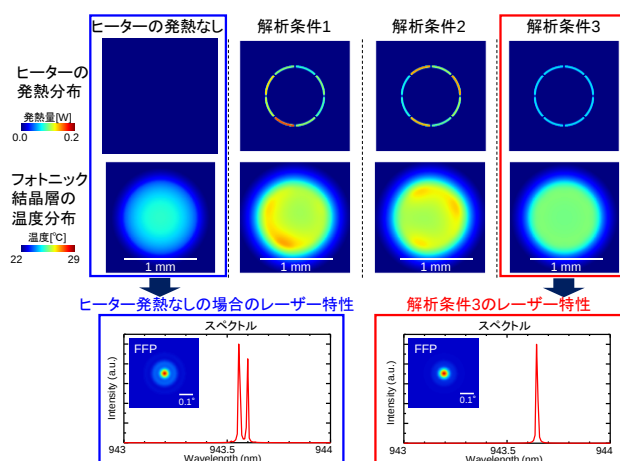


図 2. 分割ヒーターの駆動条件によるフォトニック結晶層の面内温度分布とレーザー特性の解析結果。

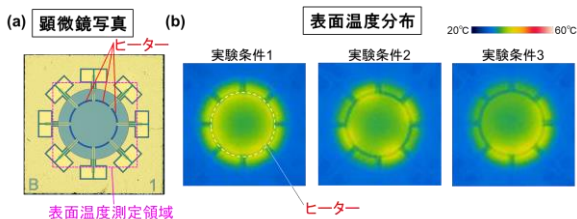


図 3. (a) 初期試作デバイスの顕微鏡写真. (b) ヒーターの駆動条件を変化させた場合の表面温度分布。

深層学習によるトポロジカル導波路 Z-bend の曲げ効率向上構造の設計

○坂本 樹¹, 岡田 祥¹, 服部 堅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,

WPI-MANA, National Institute for Materials Science³

○I. Sakamoto¹, T. Amemiya^{1,2}, S. Okada¹, H. Kagami¹, N. Nishiyama^{1,2}, X. Hu³

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

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

³WPI-MANA, National Institute for Materials Science

E-mail: sakamoto.i.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

トポロジカルフォトリソニック結晶の所望の要求に対する構造最適化手法として、結晶を構成する単位胞のパラメータを個別に設計することは、現実的とは言えない。その解決策として、円孔フォトリソニック結晶において利用されている、機械学習を用いて配置を決定するという手法のトポロジカルフォトリソニック結晶への適応を検討する[1,2]。前回までに細線導波路からの結合器において適応したが[3]、本報告では、トポロジカルフォトリソニック結晶導波路における Z-bend 領域に対して行ったので報告する。

2. 深層学習へ向けた準備

本研究において用いるトポロジカルフォトリソニック結晶の単位胞を Fig. 1(a)に示す。トポロジカルフォトリソニック結晶における単位胞内の設計パラメータは、正三角孔の一边の長さ L , 単位胞の中心から正三角孔の重心までの距離 R , 単位胞の周期の3つで構造が決定される。今回は波長 $1.55 \mu\text{m}$ で動作するように、初期設計パラメータ (L, R) [nm] を Trivial 構造は (281, 231), Topological 構造は (284, 264), 周期を 730 nm とし, R のみを深層学習のパラメータとした。解析には Fig. 1(b) のように、トポロジカル伝送路において Z 状に曲げた構成を用いた。曲げ部分付近の 6×6 単位胞の領域において、各単位胞に対する R は, Trivial, Topological の値を基準値としてガウス分布で変化させた。今回は Topological 構造が鋭角内側となる曲げを考慮したため、2回目の Trivial が鋭角内側となる曲げについては構造を変化させていない。解析には 2D-FDTD (Finite difference time domain) 法を用い、曲げ部分付近における構造に対する出力 $|\text{Power}|$ の測定を合計試行回数 2000 回で行った。

3. 学習結果

2D-FDTD 法によって集めた構造対出力の対応関係を持つデータセットを用いてニューラルネットワークの学習を行った。その学習過程である Loss の収束の様子を Fig. 2(a), 学習結果である、ニューラルネットワークによる予測出力値 $|\text{Power}|_{\text{NN}}$ と FDTD 法による出力値 $|\text{Power}|_{\text{FDTD}}$ との比較結果を Fig. 2(b)に示す。相関係数が 0.956 となり、構造に対する出力の予測が機能していることが示された。また、データセットの中で最も高い $|\text{Power}| (=0.196)$ を超える出力目標値 $|\text{Power}|_{\text{target}} (=0.23)$ を設定した。この目標値に対して学習したニューラルネットワークを

用いて、基本の構造から R を変化させ構造パラメータ空間を探索することにより、 $|\text{Power}|_{\text{target}}$ を満たす構造を導出した。この設計構造について 2D-FDTD 法による解析を行い出力値の確認を行ったところ、 $|\text{Power}|=0.211$ となり、基本構造よりも大きな値を確認した。(Fig. 3)

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 (22H01520), JST CREST (JPMJCR18T4), JST ASTEP (JPMJTR22RG), ARIM (JPMXP1223IT0011) の援助により行われた。

参考文献

- [1] R. Li, et al. *Optical Materials Express* 11 (7) 2122-2133. (2021).
- [2] T. Asano & S. Noda, *Nanophotonics*, 8(12) 2243-2256. (2019).
- [3] 坂本他, 第 70 回応用物春季学術講演会, 17a-D215-7 (2023)

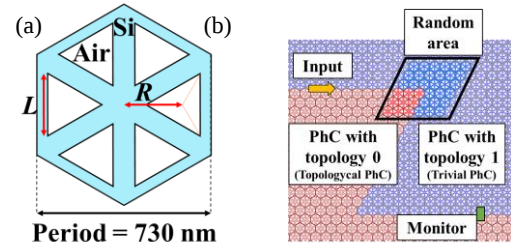


Fig. 1 (a) Unit cell (b) Z-bend structure used for simulation

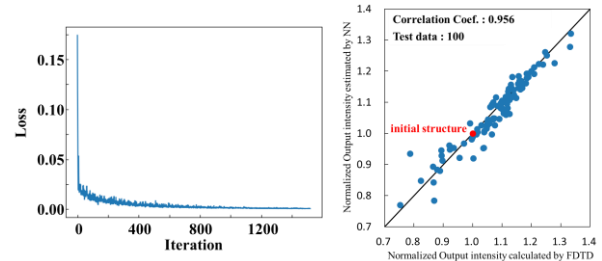


Fig. 2 Learning result

(a) MSE loss

(b) Correlation between $|\text{Power}|_{\text{FDTD}}$ and $|\text{Power}|_{\text{NN}}$

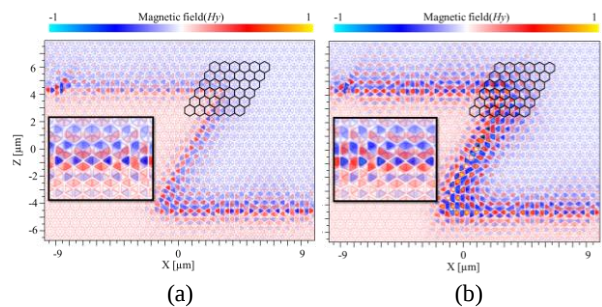


Fig. 3 Mode distribution by FDTD method.

(a) initial structure

(b) structure determined by deep learning.

Ge₂Sb₂Te₅の選択的装荷による光トポロジカル相転移の実験的実証

Experimental demonstration of photonic topological phase transition with selectively loaded Ge₂Sb₂Te₅

東工大理¹, NTT 物性研², NTT NPC³

○上村 高広^{1,2}, 千葉 永^{1,2}, 養田 大騎^{1,2}, 森竹 勇斗¹, 田中 祐輔², 倉持 栄一^{2,3}, 小野 真証^{2,3},
納富 雅也^{1,2,3}

1. Tokyo Institute of Technology, 2. NTT BRL, 3. NTT NPC

○Takahiro Uemura^{1,2}, Hisashi Chiba^{1,2}, Taiki Yoda^{1,2}, Yuto Moritake¹, Yusuke Tanaka², Masaaki Ono^{2,3},
Eiichi kuramochi^{2,3}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: uemura.t.ac@m.titech.ac.jp

トポロジカルフォトンクスは、電子物性におけるトポロジーの概念を光波へ応用した分野である。光トポロジーの界面に出現するエッジモードは、曲げへの耐性や偏光と進行方向の固定といった興味深い性質を持つ [1-2]。一方、従来の光トポロジーの発現方法は、固定された空間構造に依存していた。以前の発表において、アモルファス(a-)相と結晶(c-)相の間で大きな屈折率コントラストを持つ相変化材料であるGe₂Sb₂Te₅(GST)を用いた、双方向へ相転移可能な光トポロジカル絶縁体を提案した[3]。今回、提案した構造を実際に作製することで、材料相転移によるバンド反転を実験的に確認した。これは材料相転移による光トポロジカル相転移としては初の実証となる。

図1(a)に、ベースの構造として採用した光トポロジカル絶縁体(PTI)の構造を示す。この系の光トポロジーは、 Γ 点における固有モードである p モードと d モード (図1(b)) の周波数の大小関係によって決定される[1-2]。今回、GSTの屈折率コントラスト ($\Delta n = 2.86$) [4]によって p モードのみに摂動を与えられるよう、図1(a)に示す p モードと d モードの電場コントラストに基づき、GSTを選択的に装荷した (図1(b))。SEM測定より、約120nm×200nmの矩形および直径180nm程度の円形パターンが正確に作製されていることと、位置合わせ精度が良好であることを確認した。図1(c)は、フーリエ分光測定による、リフトオフ直後 (a-GST) およびアニール (c-GST) 後のフォトリックバンドを示す。 d モードにおいて対称性から面外放射損失が抑制され、 Γ 点近傍で暗くなるという性質を利用することで、 Γ 点における固有モードの周波数の大小関係、すなわちトポロジカル相を同定可能である。図から、a-GSTではtopological相、c-GSTではtrivial相と同定し、GSTの相転移によるバンド反転が達成されたと結論付けた。GSTをナノスケールで精緻に装荷する手法は、トポロジカルフォトンクスのみならず、非エルミート光学系や光集積回路等の様々な分野に応用可能である。講演では、 Γ 点における Cross section や穴シフトに対する周波数の依存性から、光トポロジカル相転移の達成を定量的に立証する。

【参考文献】[1] Wu, Long-Hua, and Xiao Hu, " Physical review letters 114.22 (2015) [2] Barik et al, Science 359, 666–668 (2018) [3] 上村, 他 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 11a-W631-1 (2019) [4] D. Tanaka et al, Optics express 20(9), 10283-10294 (2012) 【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 (20H05641) の援助の下に行われた。

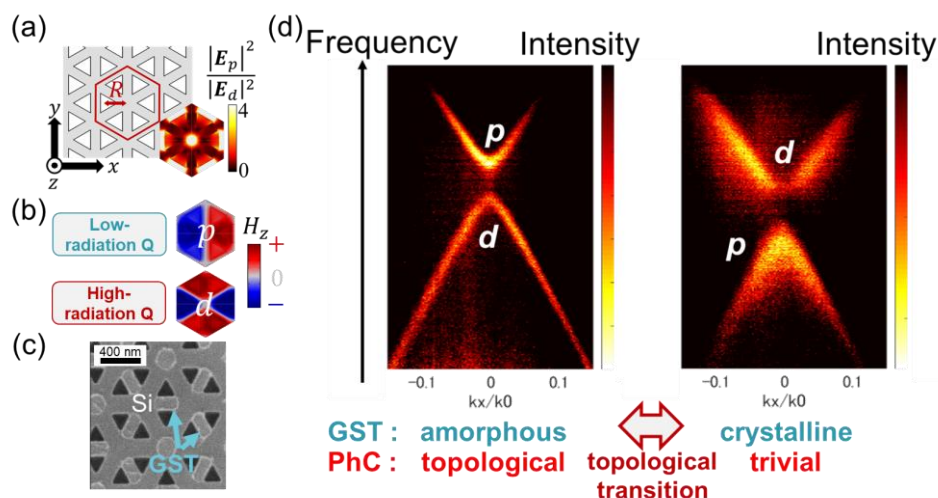


Fig.1 (a) A base Si PTI structure and $|E_p|^2/|E_d|^2$ contrast in a unit cell. (b) H_z distribution of the eigenmodes in the PTI. (c) SEM image of the fabricated PTI. (d) Measured reflection spectra showing photonic band diagram. The left is the result for as-deposited (amorphous GST) and the right shows the result after annealing (crystalline GST).

変調フォトニック結晶レーザーの放射特性の RCWA 法による詳細解析 (II)

Detailed analysis of emission properties of modulated PCSELs by RCWA method (II)

○田中聡記, 坂田諒一, 井上卓也, 石崎賢司, De Zoysa Menaka, 野田進 (京大院工)

○S. Tanaka, R. Sakata, T. Inoue, K. Ishizaki, M. De Zoysa, S. Noda (Kyoto Univ.)

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

変調フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶の特異点(M点)における大面積共振効果を用いるとともに、フォトニック結晶の格子点の位置や大きさの変調により、任意の2次元方向への自在なビーム出射を可能とする新たな半導体レーザーである[1-3]。最近では、変調フォトニック結晶に対し、二重格子構造を導入することを提案し、これにより、大面積・高ビーム品質動作が可能となること、格子点の大きさ変調のみで任意のバンド端での発振が可能となること、さらに不要な高次回折を低減可能であることを見出している[4]。このような変調フォトニック結晶レーザーの解析において、前回、高次のブロッホ波の結合等を厳密に取り込むことが可能なRCWA法を導入し、非対称な格子点形状の影響等を含めて放射特性を詳細に解析した[5]。今回、高出力動作において重要な裏面反射構造(DBR)を導入した場合の放射特性について、従来の一重格子および新たな二重格子を導入した場合の詳細な解析・比較を行ったので報告する。

図1には、解析したレーザー構造の断面図を示す。変調フォトニック結晶層から下方に出射された光は、DBRで反射された後、上方に出射された光と干渉する。出力増大においては、適切な干渉位相を得ることが重要となるため、フォトニック結晶層とDBRの間のpクラッド層の厚さを変化させて、干渉位相を変化させた。まず、従来の一重格子変調フォトニック結晶(バンド端A/Bの放射を位置の変調、C/Dの放射を大きさの変調により制御)に対して、放射係数を計算した結果を、図2(a)に示す。ここで、代表例として、バンド端AおよびCの放射係数を示している。同図より、バンド端AとCで、放射係数が最大となるpクラッド層の厚さに、20nm程度のずれが生じていることがわかる。これは、バンド端AとCの共振波長差が、もともと9nm程度あることに加えて、バンド端AとCの放射原理が異なり、特に、大きさ変調により放射されるバンド端Cにおいて、作製時の孔の深さの変動により、実効的な波源の位置が変動することに起因する。一方、図2(b)に示す二重格子構造(両格子の大きさのみを変調)においては、放射係数が最大となるpクラッド層の厚さにほとんど差がない様子が見て取れる。これは、面内回折の低減により、バンド端A, Cの共振波長差が小さくなることに加えて、いずれのバンド端の放射も大きさ変調に基づくために、波源の位置にほとんど差がないためであると考えられる。このような特徴により、広い角度範囲への多点同時出射時等においても、容易に発振バンド端を選択し、単一モードでの動作が可能になると期待できる。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費(22H04915、23K13679)の支援を受けた。

【文献】[1] S. Noda, *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **23**, 4900107 (2017). [2] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Nat. Communications* **11**, 3487 (2020). [3] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Applied Physics Letters -Perspective-* **122**, 130503 (2023). [4] 今村, 野田, 他, 2022年春季応物 25p-E303-7. [5] 田中, 野田, 他, 2023年春季応物 16p-A501-13.

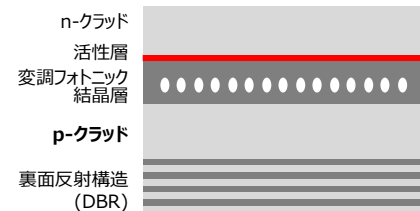


図1. 変調フォトニック結晶レーザーの断面模式図。

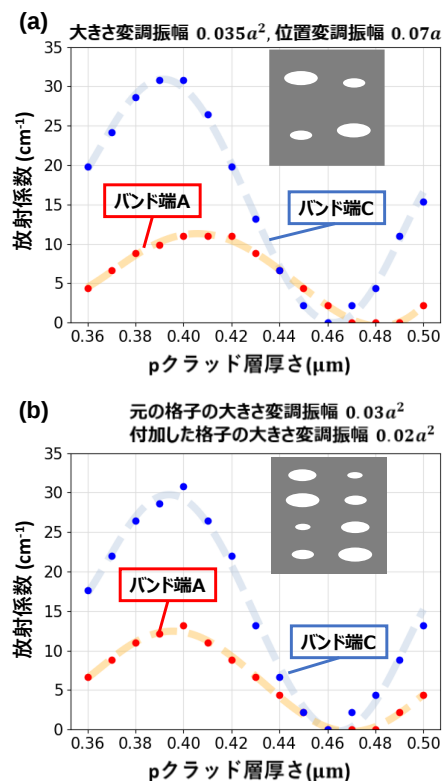


図2. RCWA法による、DBR導入時の放射特性の解析結果。(a) 一重格子、(b) 二重格子。

エレファントカプラを用いた光スキルミオン結晶ビーム生成素子

An optical skyrmion crystal beam generator based on elephant couplers

東大先進機構¹, 産総研², 東工大理工³, 慶應大⁴, 東大先端研⁵

○ 林 文博¹, 吉田 知也², 渥美 裕樹², 榊原 陽一², 雨宮 智宏³, 太田 泰友⁴, 岩本 敏⁵

KIS, Univ. Tokyo¹, AIST², Tokyo Tech.³, Keio Univ.⁴, RCAST, Univ. Tokyo⁵

○ W. Lin¹, T. Yoshida², Y. Atsumi², Y. Sakakibara², T. Amemiya³, Y. Ota⁴, S. Iwamoto⁵

Email: lin-w@iis.u-tokyo.ac.jp

トポロジーは光の性質に関する我々の理解を一層深める重要な概念とみなされており、近年では同概念に基づき様々な新奇光状態が発見されている。中でも2次のホモトピー群で特徴付けられるトポロジカルに非自明な空間構造を持つ光スキルミオンは注目の的となっている。同構造は主に偏光(もしくは電場ベクトル自身の3次元的な向き)の空間構造中に見出されており、これまで単一の光スキルミオン[1, 2]に加え、金属表面上では光スキルミオンが2次元格子状に並んだ光スキルミオン結晶[3]も観測されている。その中で我々は、偏光と位相を制御した放射源を適切に配置することにより、光スキルミオン結晶を伝搬モードとしても実現できることを提案している[4]。今回、細線導波路を立体的に湾曲させたエレファントカプラ[5]を偏光が制御可能な放射源として利用した光スキルミオン結晶ビーム生成素子を作製・評価したので報告する。

作製した素子は単一の入射口から分岐した4本のSiO₂埋め込み立体湾曲Si細線導波路により構成される。これら4本の導波路はそれぞれ隣接導波路とは素子面直方向から見て45°(もしくは225°)ずつ向きが回転している(図1(a))。同配置により、各導波路は両隣の導波路とは45°だけ向きの異なる直線偏光を放射し、これらの放射が重ね合わさることでその空間偏光分布には渦状の偏光分布を持つメロン(ハーフスキルミオン)・アンチメロンの格子が形成される。また、隣接放射源間の位相差が $\pi/4$ となる条件下では、メロン・アンチメロンのうち片方が消滅し残った方が結合することでスキルミオン結晶が形成される。位相未調整の状態で作製素子に波長1550nmのレーザー光を入射したところ、遠視野にて格子状の強度分布(図1(b))と、格子状かつ渦を巻く偏光分布が観測された(図1(c))。同素子の4放射源のうち2放射源ずつ空間フィルタリングし、その遠視野で作られる干渉縞を観測することで相対位相を見積もることができ、見積もられた位相差は図1(a)右下の放射源を基準にすると時計回りに数えてそれぞれ約 -0.5π , 1.0π , 0.63π であった。これらの位相差を仮定した数値計算の結果は観測された偏光分布(図1(c))をよく再現し、提案原理に基づいて素子が動作することを示す結果が得られた。

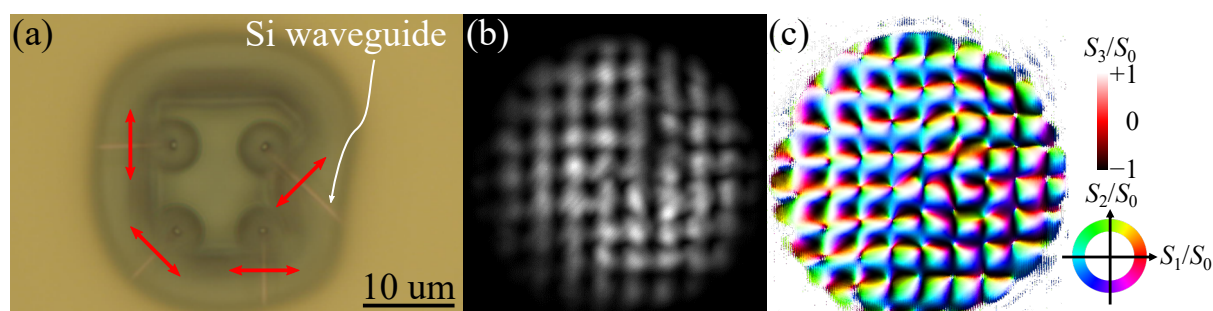


Fig. 1. (a) Optical microscope image of the fabricated device. Red arrows indicate the orientations of polarization upon TE-mode incidence. (b) Observed lattice-like far-field intensity profile. (c) Measured spatial polarization (Stokes parameters) texture at the far field.

参考文献: [1] A. M. Beckley *et al.*, *Opt. Express* **18**, 10777 (2010). [2] W. Lin *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **3**, 023055 (2021). [3] S. Tsesses *et al.*, *Science* **361**, 993 (2018). [4] 林 文博 他, in 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 (2020), 10p-Z18-6. [5] T. Yoshida *et al.*, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32**, 1319 (2020).

謝辞: 本研究は JST CREST(JPMJCR19T1), 村田学術振興財団の助成を受けたものです。

二重格子構造を導入した変調フォトニック結晶レーザーによる 狭発散角多点同時ビーム出射

Narrow-divergence and multi-dot emission based on modulated PCSELs with double lattice structure

◎石崎賢司¹, 坂田諒一¹, 今村陽¹, 井上卓也¹, 田中聡記¹, De Zoysa Menaka¹, 小松原望^{1,2}, 前田修², 太田浩紀^{1,2}, 山田和義², 中村仁², 山口圭治², 初田蘭子¹, 野田進¹ (1. 京大院工, 2. ソニーセミコンダクタソリューションズ)
 ◎K. Ishizaki¹, R. Sakata¹, A. Imamura¹, T. Inoue¹, S. Tanaka¹, M. De Zoysa¹, N. Komatsubara^{1,2}, O. Maeda², H. Ota^{1,2}, K. Yamada², M. Nakamura², K. Yamaguchi², R. Hatsuda¹, S. Noda¹ (1. Kyoto Univ., 2. Sony SS)
 E-mail: ishizaki@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp, snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

変調フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶のバンド構造における特異点(M点)での大面積共振作用を利用しつつ、格子点に大きさや位置の変調を与えることで、ビーム出射方向の制御や、様々なビームパターンの出射を可能とする、新たな半導体レーザーである [1-3]。我々は、本レーザーの、さらなる高出力、狭ビーム広がり動作を実現するために、変調フォトニック結晶への二重格子構造の導入をも検討している [4-6]。今回、多点同時出射可能な変調フォトニック結晶レーザーへ、二重格子構造を導入した、直径 250 μm のデバイスを実際に作製し、 $\sim 0.4^\circ$ という狭い広がり角の単一モード動作を実現したので、報告する。

図 1 に、多点同時出射変調フォトニック結晶レーザーの概念図を示す。フォトニック結晶構造として、二重格子構造（図 1 挿入図）を導入し、発振に寄与する 4 つのバンド端の放射係数を適切な大きさにするため、元の格子と付加した格子のそれぞれに対して、大きさ変調を行っている。出射ビームの FOV は、 $\sim 60^\circ$ とし、28 点を同時に射出させるように、変調を施した。また、デバイスの電流注入領域は直径 $250\mu\text{m}$ とし、裏面反射鏡として DBR 構造も導入して反射位相の調整を行った [7]。図 2(a)に、作製したデバイスから、実験的に得られた出射ビーム（遠視野像）を示す。同図中の拡大図に示すように、各点の拡がり角として、回折限界に近い $\sim 0.4^\circ$ ($1/e^2$ 全幅) が得られた。また、図 1 中に示すビームプロファイル (Log プロット) より、ガウス関数状のビーム形状であり、メインピークに対してバックグラウンドレベルはおおよそ 3 桁低いことも判明した。この時の発振スペクトル (図 3) より、単一のモードでの動作が得られていることが明らかとなった。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費（22H04915、23K13679）の支援を受けた。【文献】[1] S. Noda, *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electronics* **23**, 4900107 (2017). [2] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Nature Communications* **11**, 3487 (2020). [3] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Applied Physics Letters -Perspective-* **122**, 130503 (2023). [4] 今村, 野田, 他, 2022 年春季応物 25p-E303-7. [5] 今村, 野田, 他, 2022 年秋季応物 21p-A101-2. [6] 今村, 野田, 他, 2023 年春季応物 16p-A501-11. [7] 田中, 野田, 他, 本応物.

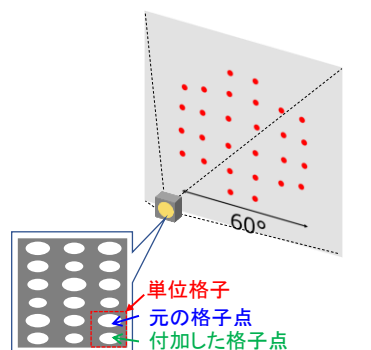


図1. 多点同時出射変調PCSELの概念図。挿入図は、二重格子フォトニック結晶の模式図。

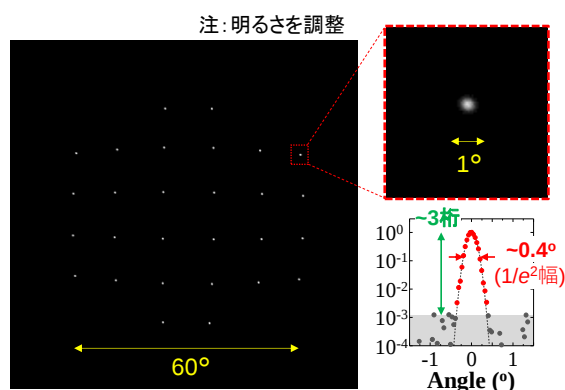


図2. 多点ビームパターンの遠視野像の評価結果。挿入図は、ラインプロファイル。

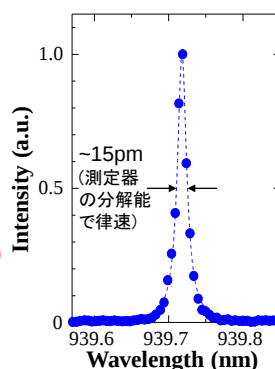


図3. 発振時のスペクトル。

1次元グレーティングにおける伝搬型 BIC の実験的観測

Experimental observation of propagation of off- Γ BIC in 1D grating structures

¹東工大理, ²NTT ナノフォトニクスセンタ, ³NTT 物性研

○浜谷 孔明¹, 森竹 勇斗¹, 養田 大騎¹, 小野 真証^{2,3}, 倉持 栄一^{2,3}, 納富 雅也^{1,2,3}

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

○Komei Hamaya¹, Yuto Moritake¹, Taiki Yoda¹, Masaaki Ono^{2,3}, Eiichi Kuramochi^{2,3},
and Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: moritake@phys.titech.ac.jp

ナノフォトニクスにおいて、ライトラインの上にあるにも関わらず構造内に閉じ込められるモードは Bound states In the Continuum (BIC) と呼ばれ、その特異な特性から近年精力的に研究が行われている[1,2]。BIC は、波数空間の Γ 点に生じる at- Γ BIC と、対称点でない波数において生じる off- Γ BIC の 2 種類に大別でき、いずれにおいても自由空間への放射チャンネルが完全に閉じるため、原理的に無限大の Q 値をもつ。at- Γ BIC は、BIC 研究以前からすでに多くの報告例がある一方、off- Γ BIC は波数空間における偏光渦の偏光特異点で生じ、トポロジカルな性質によって守られている(Topologically protected)ことが示され、大きな注目を集めている[3]。off- Γ BIC のもう一つの特徴は、対称点でない波数において発現するために、スラブ内を伝搬するという点である。我々は、この特性を用いることで、特定の周波数の光のみを透過するフィルタ導波路を提案した[4]。BIC 周波数では、放射損失がなく光の漏れがないため、他の周波数よりもより長距離伝播することが可能になる (Fig. 1(a))。本発表では、BIC をもつ 1 次元グレーティング作製し、そのバンド測定および伝播観測実験から、伝搬型 BIC の実験的観測を行った結果について報告する。

本研究では、シリコンからなる 1 次元グレーティング構造を SiO₂ 上に形成し、PMMA を用いてキャップした。バンド測定結果から、波長 1460 nm 付近に BIC の存在を示す、バンド信号の消失を観測した。さらに、基板側面から光を入射することで、グレーティングの周期方向への光伝播の観測を行った。その結果、伝播光と考えられる光の軌跡がグレーティングからの散乱として観測された(Fig. 1(b))。また、グレーティングの末端（シリコン基板との界面）における光の散乱強度の波長依存性を測定したところ、BIC 周波数において、高い強度が観測された(Fig. 1(c))。これは、BIC が高い Q 値（低い放射損失）であるために、より長距離を減衰なく伝播したことを示している。本研究は、これまであまり注目されてこなかった伝搬型 BIC の面内伝播の観測に成功

したものであり、伝搬型 BIC の新たな応用につながることを期待される。本研究は、科学研究費補助金 (20H05641, 21K14551) の援助の下に行われた

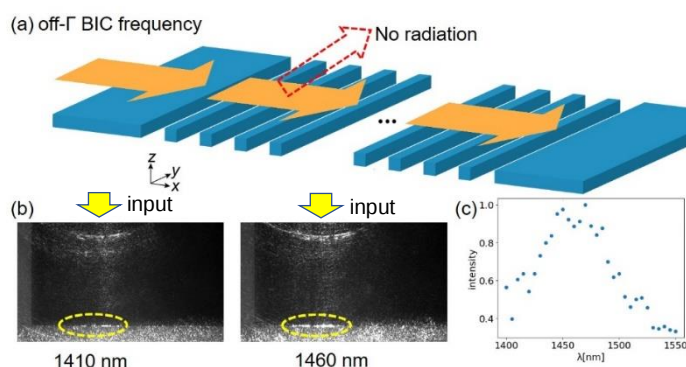


Fig. 1(a) A waveguide using propagation of off- Γ BIC.
(b) Scattered light images at the end of grating. (c) Scattered light intensity as a function of wavelength.

[1] C. W. Hsu *et al.* Nat. Rev. Matter. **1**, 16048 (2016). [2] C. W. Hsu *et al.* Nature **499**, 188 (2013). [3] B. Zhen *et al.* PRL **113**, 257401 (2014). [4] 森竹 他、第 79 回日本応用物理学会秋季学術講演会(2018).

SLG ビームスキャナにおける回折格子のトポロジカル最適化 Topological optimization of diffraction grating in SLG beam scanner

横国大院工

○廣谷 圭祐, 安藤 雅隆, 陶山 実之, 馬場 俊彦

Yokohama Nat'l Univ.

○Keisuke Hirotani¹, Masataka Ando¹, Saneyuki Suyama¹, Toshihiko Baba¹

E-mail: hirotani-keisuke-fn@ynu.jp

Si フォトニック結晶導波路 (PCW) を利用したスローライト回折格子 (SLG) は光ビームを高効率かつ広い視野角でスキャンできる^{1,2)}。我々はこれまで、上下非対称回折格子の構造最適化により、上方放射率を高めてきた³⁾。しかし、最適化された SLG のスローライトは群屈折率 n_g が 15 以下であり、より高効率なビームスキャンのためには n_g を高める必要があった。また、放射ビームの横 (ϕ) 方向広がり角は FWHM で $28 \sim 34^\circ$ とやや大きく、これがレンズによるコリメートでの損失を生んでいた。本研究はこれらの改善を目指し、特にこれまで位置や角度のみを調整していた深さ 10 nm の浅堀回折格子のトポロジカル最適化⁴⁾を試みた。

まずこれまでと同様にベースとなる PCW の円孔配列を微調整し⁵⁾、直線的なバンドで $25 \sim 30$ という高 n_g を与える構造を得た。次に単一セル内の 4 個の円孔の半径と、7 個に分割した回折格子の形状をパラメータとして自動最適化を行った。ここでは Ansys/Lumerical の 3 次元バンド計算と共分散行列適応進化戦略を利用し、図 1(a) の構造を得た。上下非対称放射は貫通孔と浅堀回折格子での散乱光どうしが下方で打ち消しあうことにより生じるので、回折格子の複雑な形状や位置の微調整により高い効果を生む。対応するスローライト特性と上方放射率を図 1(b)~(d) に示す。上方放射率は 90% 近くになり、低 n_g のときの 95% には及ばないものの、十分に高い値である。また高 n_g で比較すると、回折格子を分割しないときの 85% と比較しても向上し、また波長依存性もはるかに小さくなった。

同様の手法を用いて、放射ビーム広がり角 $\delta\phi$ の抑制を行った。ここでは進行方向に対して対称な構造としたため、上方放射率はおおよそ 50% である。最適化後の構造を図 2(a) に、対応する $\delta\phi$ を図 2(b)~(d) に示す。ここでも浅堀回折格子の形状は複雑になったが、製作が困難なほどの微細な形状は含まれていない。低分散スローライト帯域内のバンドが回折格子で折り返されたときの各規格化波数 $k/(2\pi/a) = 0.05, 0.08, 0.11$ に対して、 $\delta\phi$ はそれぞれ FWHM で $28.2^\circ, 24.0^\circ, 20.2^\circ$ となった。さらにサイドローブの発生をピークの 20% まで許容すれば、全ての範囲で 20° 以下とすることもできる。これらはビームコリメート条件を大幅に緩和すると期待される。

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JNPN14004), ならびに日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (22H00299) として行われたものである。

参考文献 1) H. Ito et al., *Optica* **7**, 47 (2020). 2) T. Baba et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28**, 8300208 (2022). 3) S. Suyama et al., *Opt. Express* **31**, 22170 (2023). 4) D. Vercruysse et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26**, 8301706 (2019). 5) K. Hirotani et al., *Opt. Lett.* **46**, 4422 (2021).

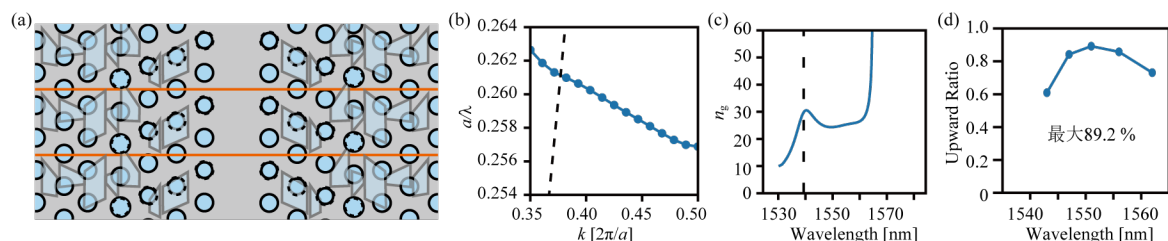


図 1 高 n_g での上方放射率を高めるトポロジカル最適化. (a) 最適化された構造. (b) フォトニックバンド. (c) n_g スペクトル. (d) 上方放射率.

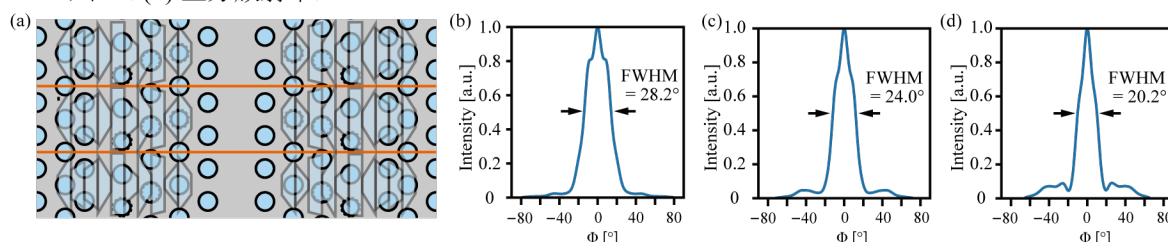


図 2 ビーム広がり角 $\delta\phi$ を小さくするトポロジカル最適化. (a) 最適化された構造. (b)~(d) ビームの角度分布. 回折格子で折り返されたバンドの規格化波数 $k/(2\pi/a) =$ (b) 0.05. (c) 0.08. (d) 0.11.

オンチップイオントラップへ向けた横方向出射型 集光グレーティングカプラに関する検討

Study on a lateral-projection focusing grating coupler for on-chip ion trapping

東大先進機構¹, 東大教養²

○ 林 文博¹, 石井 大善², 長田 有登¹

KIS, Univ. Tokyo¹, College Arts Sci., Univ. Tokyo²

○ W. Lin¹, D. Ishii², A. Osada¹

Email: lin-w@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

外界から隔離された環境に捕捉されたイオンは理想的な量子系の1つに数えられ、同系は量子コンピュータ/シミュレータを実装するための有力な候補と目される。イオンの制御には高度に制御された複数波長のレーザー光を利用する必要がある、空間光学系を利用する従来の手法では大規模化や安定性に課題が生じる。同課題を克服するべく集積光素子を軸に据えたイオントラップが検討されており、初歩的な量子操作が実証されている [1, 2]。これらの研究では集積光回路からイオンに光を照射する機構としてグレーティングカプラ [3] を利用しているが、複数の波長が使われる都合上、波長帯域ごとに分けた複数の素子から単一のイオンに光を照射することが要求される。しかし、素子に沿う方向に光を回折する通常のグレーティング素子では操作対象のイオンへ素子を向けるため、迷光の発生を抑えつつイオン近傍に多数の素子を配置することは容易ではない。今回我々は設計の自由度を高めるべく、操作対象のイオンへ素子の長手方向を向ける必要のない、横向きに光を回折・集光するグレーティングカプラ構造を検討したので報告する。

検討構造は上下2 μm 厚のガラスクラッドに埋め込まれた厚み100nm、幅20 μm の窒化シリコン(SiN)導波路を基にしている。導波路上には深さ100nm、幅50nmの溝が複数本刻まれており、各溝はそれぞれ基底TEモードの入射に対して特定の空間位置で位相整合するように形状や溝同士の間隔が調整されている(図1(a))。具体的な設計として $^{88}\text{Sr}^+$ イオンのS-D遷移波長(674nm)において、グレーティングの開始位置から縦・横ともにおよそ50 μm の位置に集光する構造を設計した(図1(b))。同設計では溝の本数が150本、素子の長さはおよそ50 μm 程度である。設計構造に対して時間領域差分法による電磁場解析を行ったところ、グレーティング面近傍では素子の空間配置と概ね対応する電場分布を示す(図1(c)左)一方、高さ50 μm 地点では横50 μm の位置で電場が強く局在し(図1(c)右)、狙い通りにグレーティング素子の横方向へ出射・集光することができた。当日は素子の試作・評価結果も含めて報告したい。

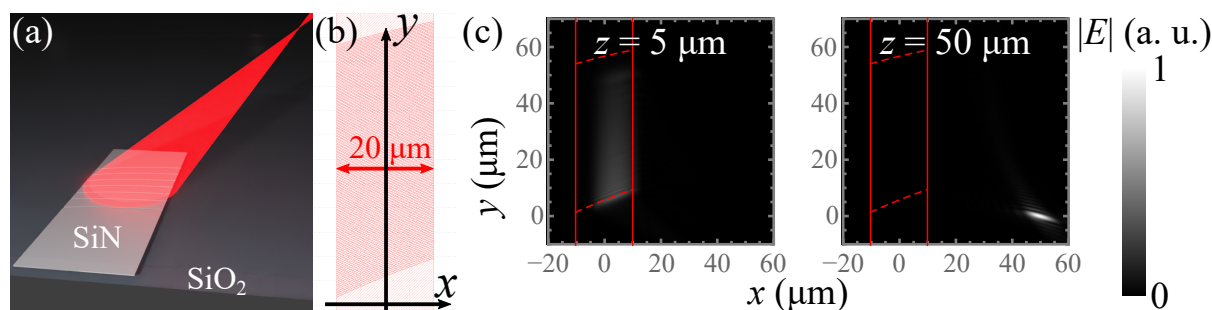


Fig. 1. (a) Schematic of the studied device structure. (b) Grating structure designed to diffract and focus light at $(x, y, z) = (50, 0, 50) \mu\text{m}$. (c) Computed electric field profiles at (left) 5 μm and (right) 50 μm above the grating surface. The red solid and dashed lines respectively depict the waveguide and grating regions.

参考文献: [1] K. K. Mehta *et al.*, *Nature* **586**, 533 (2020). [2] R. J. Niffenegger *et al.*, *Nature* **586**, 538 (2020). [3] K. K. Mehta and R. J. Ram, *Sci. Reports* **7**, 2019 (2017).

謝辞: 本研究は JST ムーンショット型研究開発事業ムーンショット目標 6 (JPMJMS2063-5-2) の支援のもと遂行された。

モアレ超格子バレーフォトニック結晶の数値解析

Numerical analysis of moiré superlattice valley photonic crystals

慶應理工¹, 東大先端研² [○](M1) 石井佑樹¹, G. Lu², 岩本敏², 太田泰友¹

¹Keio Univ., ²RCAST, the Univ. of Tokyo, [○]Y. Ishii¹, G. Lu², S. Iwamoto², and Y. Ota¹

E-mail: rinkobu@keio.jp

はじめに グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)などの層状物質は、ツイスト積層によりモアレ超格子を形成することで、電子バンド構造が変調され、新奇な物性が発現する。同系の光学アナログとして六方格子2次元フォトニック結晶(PhC)を利用した系では、特定のツイスト角で強い光局在が生じる[1]ことを利用した微小共振器レーザー [2]が実証されている。一方、TMDCを模したバレーPhCによるツイスト系では、単層PhCがK(K')点においてバンドギャップを示すことに起因して、グラフェンを模した系よりも広いパラメータ範囲で光局在が期待できる。本研究では、バレーPhCを用いたモアレ超格子バレーPhCに対して数値計算を行った。その結果、フラットバンドの形成とそれに伴う光局在が起きることを確認したので報告する。

結果 検討するモアレ超格子バレーPhC (MVPhC)を Fig. 1(a)に示す。同構造では、単層スラブ内に格子定数 600 nm の六方格子からなる2つの三角孔バレーPhCを角度 θ で回転させて重畳している。本研究では、この構造に対して有限要素法による2次元電磁界シミュレーションを行い、フォトニックバンドを計算した (Fig. 1(b))。モアレ超格子の形成に対応して、各層のバレー分散が混成したバンド構造が生じることが確認できる。特に 208THz 前後には Brillouin ゾーン全域に渡って非常に平坦性の高いバンド(赤)が形成され、モード分布(Fig. 1(c))において AA サイトへの強い光局在を呈することが確認された。詳細は当日報告する。

参考文献 [1]H. Tang, *et al.* Light Sci. Appl. **10**, 157 (2021). [2]X.R. Mao, *et al.* Nat. Nanotechnol. **16**,1099 (2021).

謝辞 本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR213F および科研費 22H01994、22H00298 により遂行された。

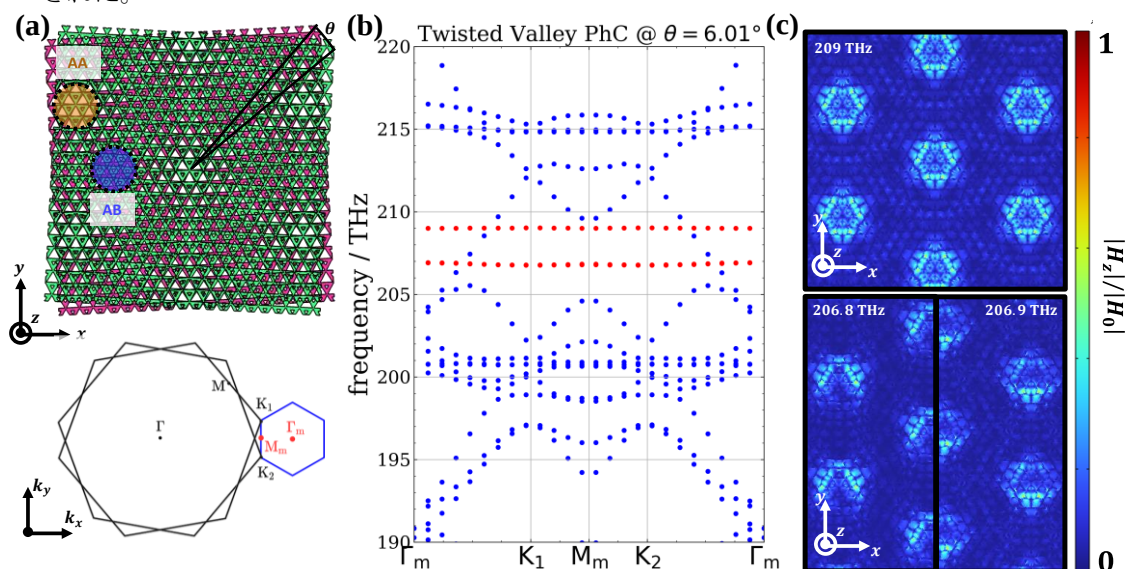


Figure.1 (a) Schematic of a MVPhC and its first Brillouin zone. (b) Photonic bandstructure of the MVPhC at $\theta = 6.01^\circ$. (c) TE mode profile of a flatband mode near M_m , showing the localization near AA regions.

変調フォトニック結晶レーザーの高ピーク出力・短パルス動作の検討

Investigation on high-peak power short-pulse operation of modulated PCSELs

坂田諒一, 石崎賢司, 井上卓也, 森田遼平, 田中聡記, De Zoysa Menaka, 野田進 (京大院工)

R. Sakata, K. Ishizaki, T. Inoue, R. Morita, S. Tanaka, M. De Zoysa, S. Noda (Kyoto Univ.)

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

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶の特異点 (Γ 点、 M 点等) における大面積共振効果を用いた面発光型の半導体レーザーである[1]。これまで、 M 点で動作するフォトニック結晶レーザーにおいて、格子点の位置や大きさを変調した変調フォトニック結晶の導入により、任意の2次元方向へのワット級の高出力かつ高品質ビームの出射や多点ビームの同時出射、任意のビームパターンの出射等の、様々なビーム制御を実現することに成功してきた[1-3]。また、このような特徴的な変調フォトニック結晶レーザーにおいて、単一モード動作を維持しつつ発振面積を拡大していくために、高次モードを抑制可能な二重格子構造の導入についての理論検討を行うとともに[4]、直径 $250\mu\text{m}$ のデバイスにおける高ビーム品質・単一モード動作を実証することにも成功している[5]。今回、このような二重格子変調フォトニック結晶レーザーを用いた低注入電流 (省電力) での測距距離の増大に向けて、直径 $250\mu\text{m}$ のデバイスにおける高ピーク出力、短パルス ($<100\text{ps}$) 動作について理論的に検討したので報告する。

図1に、検討した二重格子変調フォトニック結晶レーザーの模式図を示す。ここでは、空間的に可飽和吸収体を導入することによる Q スイッチング動作[6]に着目し、構造の設計を行った。まず、可飽和吸収領域にも光が分布するように、元の格子の中間に格子を付加したフォトニック結晶[4,5]を導入し、面内回折効果を弱めた。また、可飽和吸収領域は、意図しない1次元発振などを抑制しつつ、面全体で均一に発振させるために、 Γ - X 方向(図中 x 方向)に直線状に配置した。一例として、出射角度 $\pm 54^\circ$ の場合について、幅 $6.6\mu\text{m}$ 、周期 $44\mu\text{m}$ の可飽和吸収領域を導入し、3次元結合波理論で解析した過渡応答特性を、図2に示す。同図より、注入電流 2A において、ピーク出力 $\sim 6\text{W}$ 、パルス幅 $\sim 25\text{ps}$ の自励パルス発振が得られた。また、この時の遠視野像の計算結果 (図2) より、 $1/e^2$ 幅で 0.4° 以下の回折限界に近いビームが得られた。本手法においては、ナノ秒程度のパルス電流を注入して、自励パルス列の最初の1パルスのみを取り出すことで、任意のタイミングで超短パルスを生じさせることが可能であるため、注入電流を抑えつつ、より遠距離の計測への応用にも繋がると期待される。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 (22H04915、23K13679) の支援を受けた。【文献】[1] S. Noda, *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **23**, 4900107 (2017). [2] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 3487 (2020). [3] R. Sakata, S. Noda, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 130503 (2023) [4] 今村, 野田, 他, 2022年春季応物 25p-E303-7. [5] 石崎, 野田, 他, 本応物. [6] R. Morita, S. Noda, *et al.*, *Nat. Photon.* **15**, 311 (2021).

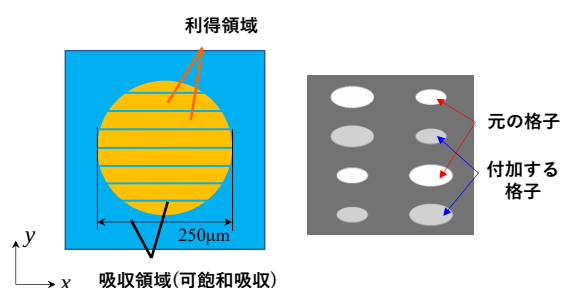


図1. 設計した二重格子変調フォトニック結晶レーザーの模式図。電極構造(左)において、青色の領域は可飽和吸収領域を、橙色は利得領域を表す。また、フォトニック結晶(右)においては、元の格子から $\Delta y = 0.5a$ の位置に格子を付加している。

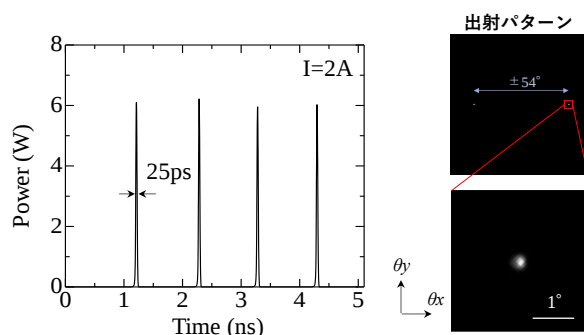


図2. 3次元結合波理論の過渡応答解析によって得られた時間光出力波形(左)と遠視野像(右)。2Aにおいてパルス幅 $\sim 25\text{ps}$ 、ピーク出力 $\sim 6\text{W}$ の自励パルス発振が得られた。また、遠視野像と拡大図より、 0.4° 以下のビーム拡がり角が得られた。

SLG 光ビームスキャナと補間 k クロックサンプリングを用いたリアルタイム Si フォトニクス非機械式 FMCW LiDAR (II) – 干渉計の集積化

Realtime Si photonics nonmechanical FMCW LiDAR with SLG beam scanner and interpolation k-clock sampling (II) --- Integration of interferometer

横国大院工, °山崎竣平, 玉貫岳正, 鎌田幹也, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., °S. Yamazaki, T. Tamanuki, M. Kamata, T. Baba

E-mail: yamazaki-shumpei-xw@ynu.ac.jp

小型軽量で高い安定性が期待される Si フォトニクス非機械式ビームスキャナを搭載したオンチップ LiDAR が開発されている[1]. 我々はフォトニック結晶から成るスローライト回折格子 (SLG) スキャナ[2]と FMCW LiDAR チップ[3]を開発した. ここでは周波数変調光が必要となる. これまでは SSB 変調器を用いてこれを生成してきたが, 大がかりな設備が必要になる. 一方, レーザ直接変調と光ファイバ干渉計の k クロックによる非線形補正サンプリングを組み合わせる方法もある[4]. これに対し, 我々は測距信号を一時的にメモリして k クロックの補間信号を生成することでファイバ干渉計を短尺化し, LiDAR チップによるリアルタイム動作を報告した[5]. 今回は Fig. 1 に示すように, この干渉計をオンチップ集積化したチップを製作し, 動作を確認した.

集積化したのは非対称マッハツェンダー干渉計 (MZI) であり, 細線導波路と幅広導波路を組合わせて長尺アームを 240 mm としたときにも十分に干渉信号が得られた. そのほかの LiDAR チップの構成は [3]と同じである. LiDAR システムの全体構成を Fig. 2 に示す. ファイバ干渉計の時と同様に, 測距信号を一時メモリし, 一方, 干渉信号に補間処理を施して, FPGA によりサンプリングと FFT を行った. 1.7~2.7 m の距離にある対象物を測距し, リアルタイムに取得した 1 次元点群イメージを Fig. 3 に示す. 現在, 2 次元イメージ取得の実験にも取り組んでいる. イメージ取得速度は掃引速度により制限される. 高速な波長掃引レーザを使うことで, 高フレームレートが期待される.

なお, 本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業総合技術開発機構 (NEDO) の委託業務 (JNPN14004), ならびに日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (22H00299) として行われたものである.

参考文献 [1] X. Zhang, et al. Nature **603**, 253 (2022). [2] T. Tamanuki, et al., J. Lightwave Technol. **39**, 904 (2021). [3] T. Baba, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **28** (2022) 8300208. [4] M. Okano, et al., Opt. Express **28**, 23988 (2020). [5] S. Yamazaki, et al., CLEO. SM4P7 (2023)

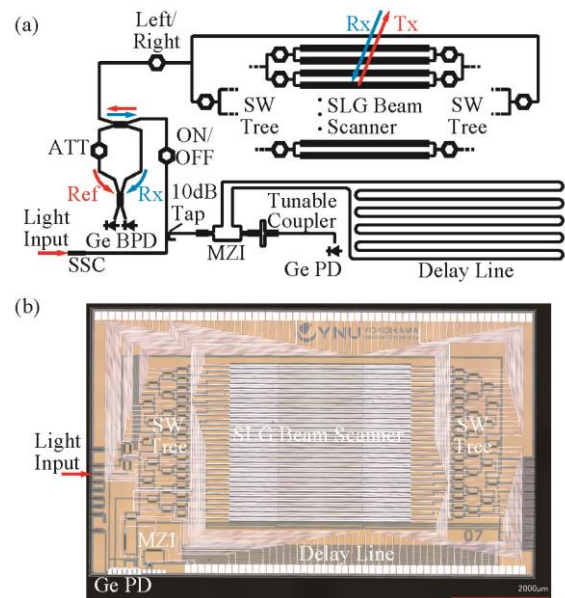


Fig. 1 Full integrated FMCW LiDAR chip with k-clock interferometer. (a) Schematic. (b) Appearance.

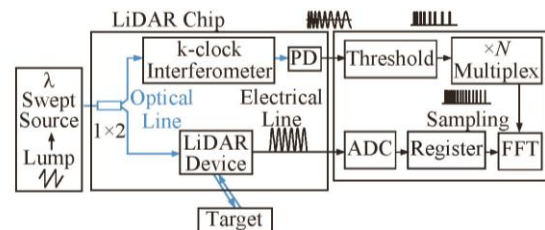


Fig. 2 Schematic diagram of FMCW LiDAR system.

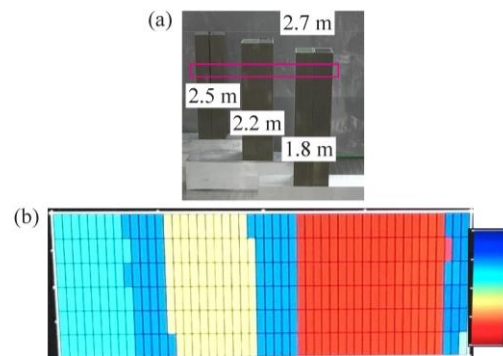


Fig. 3 Real-time-operation of k-clock sampling LiDAR. (a) Target object. (b) 1D point-cloud image.

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

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

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, 江本溪^{2,1},小泉朋朗^{2,1}, 森本峻介¹, 和泉孝紀¹, 井上卓也¹, 石崎賢司¹, 野田進¹Kyoto Univ.¹, Stanley Electric CO., LTD.², ○Kenji Ogawa¹, Menaka De Zoysa¹,Masahiro Jutori¹, Kei Emoto^{2,1}, Tomoaki Koizumi^{2,1}, Shunsuke Morimoto¹, Koki Izumi¹,Takuya Inoue¹, Kenji Ishizaki¹, Susumu Noda¹

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

【序論】フォトリック結晶レーザー (PCSEL) は、活性層近傍に設けた 2 次元フォトリック結晶の特異点 (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⁾。これまで、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、前回、新たな展開として、水中での光吸収の少ない青色帯域の GaN 系 PCSEL を活用し、投光レンズフリーの水中 3 次元 ToF-LiDAR の提案・初期実証を行った⁶⁾。今回は、ToF 計測回路や FPGA を搭載した制御回路等を用い、水中 3 次元 ToF-LiDAR の自動化を行い、リアルタイムで水中 3 次元測距を行うことに成功したので報告する。

【実験】GaN 系 PCSEL を用いた水中 3 次元 LiDAR システムの模式図を図 1(a)に示す。同図のように、本システムは、GaN 系 PCSEL とその駆動回路、走査ミラーとその駆動回路、受光系、ToF 計測回路および、それらを制御する FPGA 制御回路から構成している。FPGA 制御回路を用いて、狙った角度に、2 次元的にミラーを回転させ、それと同時に GaN 系 PCSEL を短パルス (<10ns) で駆動させてビームを (レンズフリーで) 出射する。照射ビームが水中に設置した対象物に当たった場合の散乱光を APD で受光し、ToF 計測回路を用いて光の飛行時間・距離を計測する。この過程を自動的に走査角度毎に繰り返し行い、リアルタイムで狙った FoV における測距イメージを取得し、フレーム毎に FPGA 制御回路からコンピュータへ測距データを通信するようにしている。このような LiDAR システムを用いて、今回は、図 1(b)の写真に示すような水中に設置した 2 つの魚の模型の測距を試みた。2 つ魚の模型の大きさは同じく ~8cm 程度であり、受光面から ~30cm, ~50cm 程度に離れた位置に設置している。以上のもと、水中での測距結果を図 1(c)に示す。同図より、本システムより、水中の 2 つの魚の模型の距離を正しく、また形も鮮明に計測出来ていることが見て取れる。詳細は当日報告する。【謝辞】本研究の一部は、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).

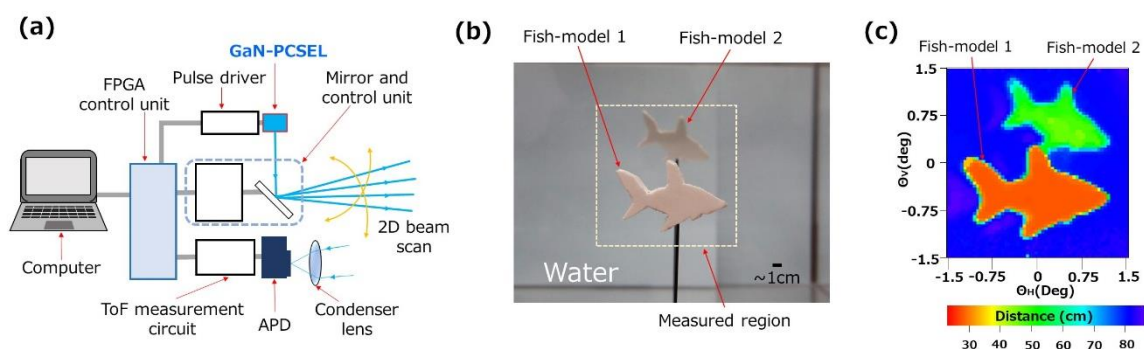


Fig.1 (a): Schematic diagram of GaN-PCSEL based 3D LiDAR system. **(b):** Photograph of measurement targets of 2 fish models in water. **(c):** Measured 3D distance image of objects in water.

レーザ援用光電気化学エッチング法による GaN マイクロディスクレーザの作製とその評価

A GaN micro-disk laser fabricated by

laser-assisted photo-electrochemical etching and its characterization

電気通信大学, [○](M1)惣角 翔, 内田 和男, 田尻 武義

the University of Electro-Communications, [○]S. Sosumi, K. Uchida, and T. Tajiri

E-mail: s2331088@gl.cc.uec.ac.jp

窒化ガリウム (GaN) を材料とするマイクロ共振器は、可視光帯の集積型レーザ等への応用が期待されている^[1-3]。GaN マイクロ共振器の作製には様々な手法があるが、光電気化学 (PEC) エッチング法は、マイクロ共振器の空気クラッドを形成するアンダーカットエッチング法の一つとして知られている^[1-3]。近年、光源にレーザを用いたレーザ援用 PEC (LA-PEC) エッチング法^[3]が新たに提案されており、GaN フォトニック結晶共振器の Q 値改善等が報告されている^[4]。しかしながら、同手法により作製された GaN マイクロ共振器におけるレーザ発振の例はなく、レーザ光源の作製への応用可能性は明らかではない。本研究では、LA-PEC エッチング法を用いて GaN マイクロディスク共振器を作製し、パルス光励起下でレーザ発振を観測したので報告する。

マイクロディスク共振器の作製には、InGaN/GaN 超格子犠牲層 (総厚 350 nm) と、InGaN 量子井戸を含む GaN スラブ層 (厚み 130nm) を MOCVD 法により成膜した基板を用いた。電子線描画と反応性イオンエッチングにより直径 2 μm のディスク構造を形成した後に、塩酸溶液中でレーザ光 (波長 375nm) を試料に 70 分間照射した。PEC エッチング後の構造は、図(a)の SEM 像に示すように、ディスク下部の犠牲層が除去されていることが分かる。図(b)は、波長 355 nm の光パルス励起下で観測された室温顕微 PL スペクトルである。平均入力光パワー 0.02 μW では、ウィスパーリングギャラリーモード (WGM) に起因する^[4]周期的なピークが観測されている。入力光パワーの増加に伴い、450 nm と 453 nm の WGM ピーク強度が顕著に増加しており、レーザ発振が示唆される。入力光パワーに対するピーク積分強度の関係 (図(c)) では、レーザ発振を示す光出力の非線形な増大が、0.04 μW 付近の閾値パワーで観測されることが分かった。詳細は当日報告する。

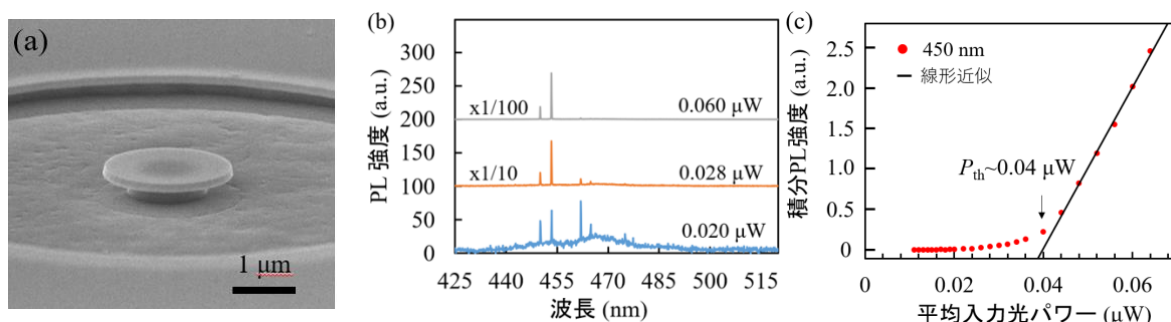


Fig. (a) SEM image of a micro-disk laser cavity fabricated by LA-PEC etching. (b) μ -PL spectra measured under pulsed photo-excitation. The spectra for different input powers are shown in different colors and offset. (c) Integrated PL intensity of the peak at 450 nm wavelength as a function of time-averaged input power. A linear fit above the lasing threshold is shown in black.

謝辞：本研究は JSPS 科研費「20K14788」、天田財団およびマツダ財団の助成を受けたものです。

参考文献：[1] D. Wang *et al.*, Opt. Lett. **43**, 799 (2018). [2] A. C. Tamboli *et al.*, Nat. Photon. **1**, 61 (2007). [3] P. D. Anderson, *et al.*, Opt. Mater. Express **11**, 3543 (2018). [4] T. Tajiri *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG1019 (2023).