

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21日(木) 13:15 ~ 16:30 | 会 A308 (熊本城ホール)

[21p-A308-1~12] 3.10 フォトニック構造・現象 (旧3.11)

岩本 敏(東大)、角倉 久史(NTT)

◆ 奨励賞エントリー

13:15 ~ 13:30

[21p-A308-1] 光電気化学エッチングによりアンダーカットされた窒化ガリウム二次元フォトニック結晶共振器のモード分析

○(M1)吉田 理人¹、惣角 翔¹、内田 和男¹、田尻 武義¹ (1.電通大)

◆ 英語発表

13:30 ~ 13:45

[21p-A308-2] Experimental demonstration of a waveguide and a cavity in a two-layered SiC photonic crystal with a complete bandgap

○Heungjoon Kim¹, Bong-Shik Song^{1,2}, Takashi Asano¹, Susumu Noda¹ (1.Kyoto Univ., 2.Sungkyunkwan Univ.)

13:45 ~ 14:00

[21p-A308-3] ガラス薄膜装荷ガラス上2次元フォトニック結晶ナノ共振器の設計(II)

○(M1)川田 琉生¹、藤田 晃成¹、Pholsen N.²、岩本 敏²、太田 泰友¹ (1.慶應理工、2.東大先端研)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[21p-A308-4] 転写プリント法を用いた高品質ダイヤモンドリング共振器の作製・集積に向けた検討

○河合 健太¹、勝見 亮太¹、飛沢 健¹、鳴瀬 駿¹、高田 晃佑¹、佐藤 大地¹、八井 崇¹ (1.豊橋技科大)

14:15 ~ 14:30

[21p-A308-5] エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器構造の作製 (2)

○石田 悟己¹、松清 秀次²、池 尚玟¹、大槻 秀夫¹、西岡 政雄²、牧野 敏晴³、加藤 宙光³、岩本 敏^{1,2} (1.東大先端研、2.東大生産研、3.産総研)

14:30 ~ 14:45

[21p-A308-6] フォトニック結晶導波路中の導波モードに対するTFD解析

○岩本 敏^{1,2}、鍛冶 静雄³、坂上 貴之⁴、竹田 航太^{4,5}、宇田 智紀⁶、山口 拓人¹ (1.東大先端研、2.東大生研、3.九大IMI、4.京大院・理学、5.理研、6.東北大AIMR)

15:00 ~ 15:15

[21p-A308-7] 非エルミート表皮効果を示す異方性フォトニック結晶スラブの励振

○高田 健太^{1,2}、養田 大騎³、森竹 勇斗³、納富 雅也^{1,2,3} (1.NTT NPC、2.NTT物性基礎研、3.東工大)

15:15 ~ 15:30

[21p-A308-8] MT対称性をもつ媒質における光非エルミートスキン効果の解析

○森竹 勇斗¹、養田 大騎¹、高田 健太^{2,3}、納富 雅也^{1,2,3} (1.東工大理、2.NTT NPC、3.NTT BRL)

15:30 ~ 15:45

[21p-A308-9] 非エルミート・エルミート結合制御に基づく無反射・垂直放射導波路の放射電界強度分布制御

○野口 直哉¹、井上 卓也¹、吉田 昌宏¹、野田 進¹ (1.京大院工)

15:45 ~ 16:00

[21p-A308-10] 非エルミート・エルミート結合制御に基づく無反射・一様垂直放射2次元アンテナの設計

○井上 卓也¹、野口 直哉¹、吉田 昌宏¹、野田 進¹ (1.京大院工)

16:00 ~ 16:15

[21p-A308-11] フォトニック結晶におけるM点ディラックコーンを用いたゼロ屈折率状態

○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ナノフォトニクスセンタ)

16:15 ~ 16:30

[21p-A308-12] 非エルミートフォトニック結晶の対称性を利用した例外点の波数空間制御

○(M2)鈴木 聡^{1,2}、大塚 秀太郎^{1,2}、上村 高広^{1,2}、養田 大騎¹、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ナノフォトニクスセンタ)

光電気化学エッチングによりアンダーカットされた窒化ガリウム二次元フォトリソニック結晶共振器のモード分析

Mode analysis of GaN two-dimensional photonic crystal cavities undercut by photo-electrochemical etching

電気通信大学, [○](M1) 吉田 理人, (M1) 惣角 翔, 内田 和男, 田尻 武義

The Univ. of Electro-Commun., [○]M. Yoshida, S. Sosumi, K. Uchida, and T. Tajiri

E-mail: ttajiri@uec.ac.jp

高 Q 値の GaN 二次元フォトリソニック結晶(2D-PhC)共振器は、光回路における高効率可視レーザ光源などへの応用が期待されている[1]。特に、中空スラブの GaN 2D-PhC 共振器の作製法の一つとして、光電気化学(PEC)エッチングをアンダーカットプロセスに用いる方法が知られている[2, 3]。しかしながら、同手法で作製された InGaN 量子井戸を含む GaN 2D-PhC 共振器では、高次モードで $Q \sim 800$ が報告されるにとどまっている[3]。本研究では、より高い Q 値が期待される基底モードを特定するために、レーザを用いた PEC エッチング法[2]を用いた L7 型 GaN 2D-PhC 共振器の作製と、顕微 PL 分光による評価を行った。その結果、これまでより高い $Q \sim 3400$ の基底モードを観測した[4]ので報告する。

先行研究[3]との比較のために、三角格子状に円孔が配列するフォトリソニック結晶 (周期 a , 半径 r) から、横並びの 7 つの穴を取り除いた L7 型共振器を対象に作製を行った。試料の作製には、InGaN 量子井戸層を含む GaN スラブ層 (厚み 120 nm)、InGaN/GaN 超格子犠牲層 (総厚 220 nm) を MOCVD 法により製膜した基板を用いた。電子線リソグラフィおよび反応性イオンエッチングにより円孔を形成後、波長 375 nm のレーザを用いた PEC エッチング法により犠牲層を除去した。図(a)は作製した L7 型共振器の SEM 像である。図(b)は He-Cd レーザを用いて測定した室温顕微 PL スペクトルである。未加工の基板発光 (同図 黒線) と比較して、複数のピークが観測されている。これらの波長は、3D-FDTD 法による共振波長の数値解析結果 (同図 破線) と一致する。また、最も長波側のピークは、基底モードの共振波長と一致しており、格子定数の依存性 (図(c)) も概ね一致することから、基底モードであることが分かる。格子定数 165nm の時に、これまでより高い $Q \sim 3400$ であることも分かった。詳細は当日報告する。

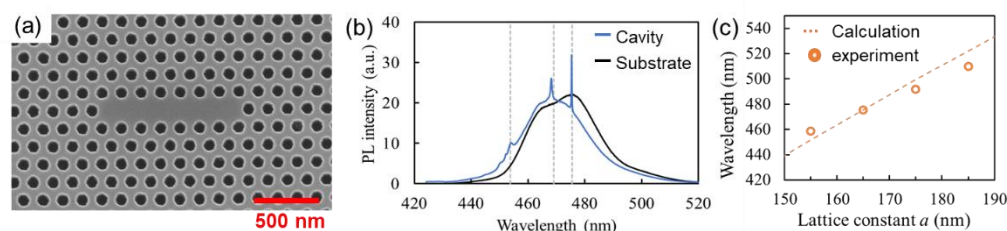


Fig. (a) SEM image of a fabricated PhC cavity. (b) μ -PL spectra measured for the cavity (blue) with $a \sim 165$ nm and $r \sim 44.6$ nm, and for the un-processed substrate (black). Calculated resonant wavelengths are shown by dashed lines. (c) a dependence of resonant wavelengths for the fundamental mode.

謝辞：本研究は天田財団、矢崎科学技術振興記念財団、科研費「20K14788」の助成を受けたものです。

参考文献： [1] R. Butté & N. Grandjean, *Nanophotonics* **9**, 569 (2020). [2] P. D. Anderson *et al.*, *Opt. Mat. Express*, **8**, 3543 (2018). [3] Y. -S. Choi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 243101 (2005). [4] T. Tajiri *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SG1019 (2023).

Experimental demonstration of a waveguide and a cavity in a two-layered SiC photonic crystal with a complete bandgap

Kyoto Univ.¹, Sungkyunkwan Univ.², [○]H. Kim¹, B. S. Song^{1,2}, T. Asano¹, S. Noda¹

E-mail: songwiz@skku.edu, tasano@qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp

Two-dimensional (2-D) photonic crystal (PC) slabs are very promising candidate for integrated quantum photonics because low-loss waveguides and high- Q nanocavities can be easily realized. However, conventional 2-D PC slabs support photonic bandgaps (PBGs) only for one polarization (mainly TE polarization), and thus have difficulties of controlling quantum emitters with TM polarization. Although rod-type photonic crystals can support TM PBG, defect cavities formed in them suffer from TE-TM coupling loss induced by vertical asymmetry because supporting substrates are necessary. To address this issue, we proposed and demonstrated a two-layered SiC PC slab with a complete PBG, consisting of rod and hole-type 2-D PC layers [1]. In this work we report, for the first time, an experimental demonstration of a waveguide and a cavity formed in the two-layered SiC PC slab structure.

The two-layered PC with a line-defect cavity comprising 49 rods (height ~ 570 nm) and a slab waveguide (thickness ~ 180 nm) was fabricated in a thin SiC film (thickness ~ 750 nm) by using position-alignment E-beam lithography and two-step etching processes. The SEM images of a fabricated sample are shown in Fig. (a). A transmission spectrum of the waveguide was measured by using a tunable CW laser ($\lambda = 1500 - 1600$ nm), as shown in Fig. (b). A high transmission (> -15 dB) was observed at wavelengths from 1526 to 1575 nm only for TE input light. According to FDTD calculation, the waveguide has a single and TE-like propagation mode (see Fig. (c)) at wavelengths from 1522 to 1575 nm, which agrees well with the experimental result. Next, a resonant spectrum of the cavity was measured by using the evanescent optical coupling between the waveguide and the cavity, as shown in Fig. (d). Six Fabry-Pérot (FP) modes with Q factors from 1.5×10^3 to 1.7×10^4 were observed. It is theoretically confirmed that all FP modes originate from TM-like modes of a rod-based line defect forming the cavity (see Fig. (e)). Moreover, by increasing radii of line defect and introducing the heterostructures in it, a nanocavity mode with Q factor higher than 10^5 is expected to be realized on the shorter wavelength side. Details will be presented at the conference. This work was supported by KAKENHI (Grant No. 21F51048 and 22H01988). Refs.: [1] H. Kim, et al., 20a-A101-9, 2022 JSAP autumn conf.

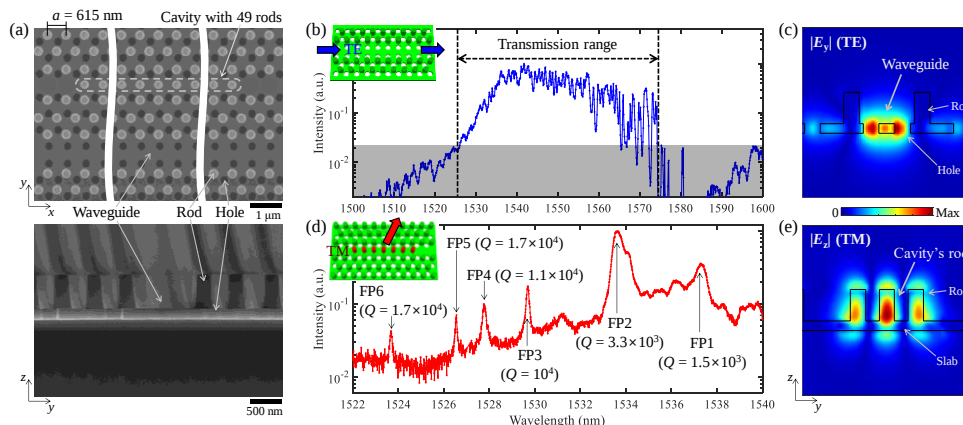


Fig. (a) SEM images of a fabricated two-layered SiC PC waveguide and cavity (upper: top view, bottom: cross-section view). (b) Measured transmission spectrum and (c) calculated electric field distribution of the waveguide. (d) Measured resonant spectrum and (e) calculated electric field distribution of the cavity.

ガラス薄膜装荷ガラス上 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の設計(II)

Design of 2D Photonic Crystal Nanocavities on Glass with a Top Glass Plate (II)

慶應理工¹, 東大先端研² [○](M1)川田 琉生¹, 藤田 晃成¹, N. Pholsen², 岩本 敏², 太田 泰友¹

Keio Univ., Japan¹, RCAST, the Univ. of Tokyo, Japan²,

[○]Ryusei Kawata¹, Akinari Fujita¹, Natthajuks Pholsen², Satoshi Iwamoto², Yasutomo Ota¹

E-mail: r.kawata@keio.jp, ota@appi.keio.ac.jp

はじめに ガラス上で動作する化合物半導体高 Q 値 2 次元フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器は、堅牢かつ高性能なナノレーザーや量子光源を開発する上で重要である。しかし一般に、2 次元 PhC 共振器をガラス上に設置すると、スラブ上下の非対称な屈折率分布に起因した TE-TM 変換により共振器 Q 値が大きく劣化することが知られている。前回、ガラス上に設置したヘテロ構造 PhC ナノ共振器の上部にガラス薄膜を装荷した構造において、特定のガラス厚で Q 値が大きく増大し高 Q 値化が可能となることを報告した^{[1][2]}。今回、いくつかの点欠陥型ガラス上ナノ共振器に対して同様の構造を調べ、ガラス薄膜装荷の影響を数値計算により解析したので報告する。

計算 検討した共振器構造を図 1(a)に示す。共振器周辺の円孔位置や半径を変調した L3 型^[3]の GaAs PhC ナノ共振器(格子定数 $a = 240$ nm, 厚み 130 nm, 円孔半径 $0.22a$)がガラス基板の上に置かれ、それらの上部に厚み t のガラス薄膜が配置されている。 $t=0$ のとき Q 値は 3×10^4 程度であり、上下エアクラッドの場合に比べて 1 桁程度減少した。これは主に TE-TM 変換による光損失が原因である。同構造について t を変化させつつ、 Q 値の変化を調べた結果を図 1(b)に示す。 Q 値は t に対して振動を示し、 $t=475$ nm において最大値 $Q=1.0 \times 10^5$ となった。興味深いことに、 t に対する Q 値の振動は前回報告したヘテロ型共振器に比べて明瞭となった。一方、今回の構造で得られた相対的な Q 値増大効果は減少している。詳細な Q 値増大のメカニズムと、H0 型等その他の共振器構造に対するガラス薄膜の影響など、数値計算結果の詳細は当日報告する。

参考文献 [1] 川田、太田他 応物春 5p-A501-5 (2023).

[2] 藤田、太田他 応物春 5p-A501-6 (2023). [3] Minkov *et al.*, Sci. Rep., (2014)

謝辞 本研究は科研費 (22H01994, 22H00298, 22H04962)によって遂行された。

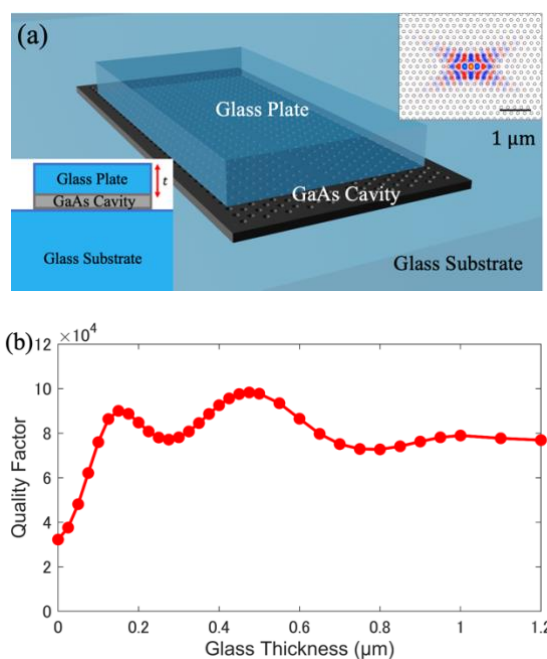


Fig.1 (a) PhC nanocavity on glass with a top glass film. The right top inset shows a mode distribution of the investigated nanocavity and the left bottom shows a cross-view. (b) Simulated Q factors as a function of glass thickness t .

転写プリント法を用いた高品質ダイヤモンドリング共振器の作製・集積に向けた検討

Proposal for fabrication and integration of high-quality diamond ring resonators using transfer printing

¹豊橋技科大, [○]河合健太¹, 勝見亮太¹, 飛沢 健¹, 鳴瀬 駿¹, 高田晃佑¹, 佐藤大地¹, 八井 崇¹

¹TUT, [○]K. Kawai¹, R. Katsumi¹, T. Hizawa¹, S. Naruse¹, K. Takada¹, D. Sato¹, and T. Yatsui¹

E-mail: kawai.kenta.lu@tut.jp

はじめに ダイヤモンド中に存在する窒素-空孔(NV)中心は、量子ネットワークの構築に必要な量子中継器としての応用が期待される¹。量子中継器の構築には微細加工が必須となるが、単結晶ダイヤモンドの微細加工は他の材料に対して未成熟である²。そのため、量子ネットワークの大規模化に向けて、SiN や AlN のような成熟した材料からなる集積光回路上へ NV 中心をハイブリッド集積することが望ましい³。また、NV 中心からの発光において、量子演算に利用されるゼロフォノン線(ZPL)成分は約 20%程度と低いことが問題となっている。ZPL 増強にはリング共振器構造⁴が有効であるが、他材質上への高品質な単結晶ダイヤモンドリング共振器の作製は困難であった。そこで我々は、簡便に微細構造を他材質上へ集積可能な転写プリント法⁵を用いることで、単結晶ダイヤモンドチップ上に作製したリング構造を SiO₂ 上に転写して集積することに成功したので報告する。

実験 ダイヤモンドリング構造の作製には、単結晶ダイヤモンド上に SiO₂ を堆積したサンプルを使用した。まず、電子線リソグラフィにより、レジスト層にリングパターンを作製した。次に、レジスト層をマスクとして CHF₃ ドライエッチングを行うことで、SiO₂ 層に構造パターンを作製した。その後 SiO₂ 層をマスクとした O₂ ドライエッチングを行うことで、ダイヤモンドを垂直に削り出しリング構造を作製した。最後に、微小穴の開いた Faraday ケージを用いた斜めエッチング^{6,7}を行うことで、リング下部を全て削り取りリング構造をダイヤモンド上に落下させた(図 1(a))。その後、転写プリント法を施すことで、落下させたリング構造をピックアップし、SiO₂ を堆積させた Si チップ上に集積させることに成功した(図 1(b))。その他詳細は当日報告する。

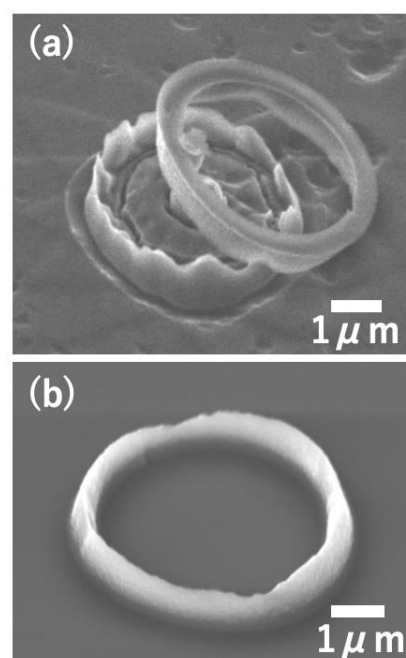


Fig 1. SEM image of diamond ring structure. (a) on diamond and (b) on SiO₂ after transfer printing.

参考文献 ¹M. Ruf, *et al.*, J. Appl. Phys **130**, 070901 (2021). ²J. Zhou, *et al.*, 2022年秋季応物, 21a-A101-8. ³N. H. Wan, *et al.*, Nature, **583**, 226-231 (2020). ⁴A. Farason, *et al.*, Nat. Photonics. **5**, 301-305 (2011). ⁵R. Katsumi, *et al.*, Optica **5**, 691-694 (2018). ⁶P. Latawiec, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B. **34**, 041801 (2016). ⁷S. Takahashi, *et al.*, Nat. Mater. **8**, 721-725 (2009).

謝辞 科研費補助金(21K20428、22H01525、22K14289)、東電記念財団、村田学術振興財団、松尾学術振興財団

エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器構造の作製(2)

Fabrication of Air-Bridge Diamond Photonic Crystal Nanobeam Cavity Structures (2)

東大先端研¹, 東大生産研², 産総研³,

○石田悟己¹, 松清秀次², 池尙致¹, 大槻秀夫¹, 西岡政雄², 牧野俊晴³, 加藤宙光³, 岩本敏^{1,2}

RCAST U-Tokyo¹, IIS U-Tokyo,², AIST³,

○S. Ishida¹, H. Matsukiyo², S. Ji¹, H. Otsuki¹, M. Nishioka², T. Makino³, H. Kato³ and S. Iwamoto^{1,2}

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

広い波長域で透明で高い屈折率と高い熱伝導率を有するダイヤモンドは、ナノフォトニクスや量子ナノフォトニクスのプラットフォームとして注目されている[1-5]。一方、材料的安定性のため、ダイヤモンドを用いたフォトニック結晶などのフォトニックナノ構造の作製は容易ではない。我々のグループでは、フォトニック結晶(PhC)や光共振器などのナノフォトニクス基盤素子の実現を目指し、ダイヤモンドナノ加工技術の開発を進めている。前回、ダイヤモンド基板上へのエアブリッジ型 PhC ナノビーム共振器構造の形成について報告した[6]。今回、ダイヤモンドの ICP 等方性ドライエッチングの条件を制御することにより、厚さの異なる PhC ナノビーム共振器構造の作製に成功したので報告する。

Fig. 1(a)はナノビームの厚みを ICP 等方性エッチング時間の関数としてプロットしたものである。ICP 等方性エッチングは ICP 900 W, BIAS 0 W, 基板温度 200 °Cの条件で行った。パターン周囲の開口サイズ 10 mm において、ダイヤモンド垂直エッチングの深さに依らず、ほぼ同一のレートで薄膜化されている様子がわかる。垂直エッチング 500 nm の試料について、2 時間の等方エッチング後の SEM 画像を Fig. 1(b)に示す。PhC 部分の周期は 206 nm, 空気円孔直径は約 90 nm, ナノビーム幅及び厚みはそれぞれ 294 nm, 240 nm である。更にエッチング時間を 15 分長くすることで厚さ 200 nm の構造も得られた。Fig. 1(c)は、作製した PhC ナノビーム構造の断面を示す SEM 画像である。PhC 部分の空気孔がナノビームを貫通し形成されていることが確認できる。プロセス条件や構造および光学評価については当日報告する。

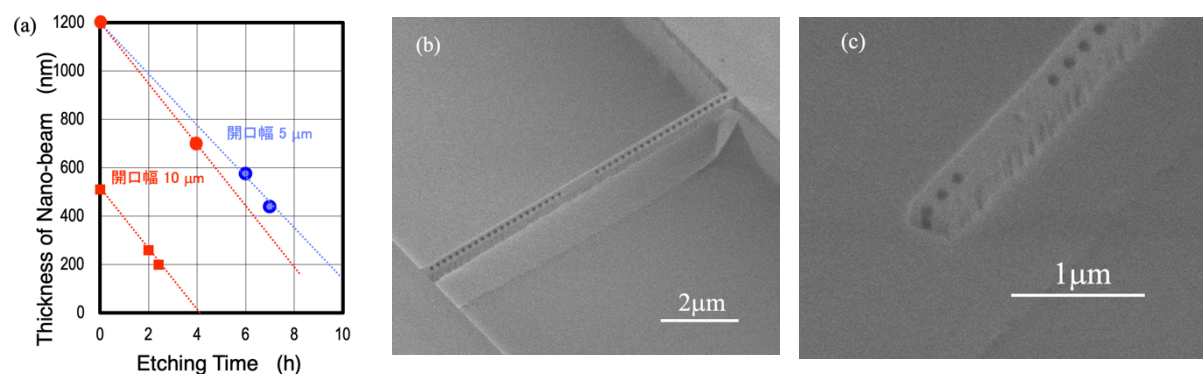


Fig. 1: (a) Thickness of PhC nanobeam as a function of isotropic-RIE etching time. Red (blue) symbols represent the thicknesses of PhC nanobeams sandwiched between two 10 (5)-μm-width apertures. Squares (circles) correspond to the thicknesses for the structures with an initial height of 500 nm (1200 nm). (b) SEM image of a defect-type air-bridge diamond PhC nanobeam cavity structure fabricated with 120-min isotropic etching. (c) Magnified SEM image showing the cross-section of a fabricated PhC nanobeam cavity structure.

Acknowledgement: 本研究は、JST Moonshot R&D Grant Number JPMJMS2062、総務省グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発 (JPMI00316) の支援を受けて行われました。実験においては、飯嶋航大氏、原田 直氏の協力をいただいた。

Reference: [1] K. Beha *et al.*, Beilstein J. Nanotechnol. **3** 895 (2012). [2] I. Aharonovich and E. Neu, Adv. Opt. Mater. **2**, 911 (2014). [3] T. Schröder *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **33**, B65 (2016). [4] C. Bradac *et al.*, Nat. Commun., **10**, 5625 (2019). [5] K. Kuruma *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 230601 (2021). [6] S. Ishida *et al.*, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 15p-A501-2 (2023).

フォトニック結晶導波路中の導波モードに対する TFD 解析

TFD analysis on guided modes in photonic crystal waveguides

東大先端研¹、東大生研²、九大 IMI³、京大院・理学⁴、理研⁵、東北大 AIMR⁶

○岩本敏^{1,2}、鍛冶静雄³、坂上貴之⁴、竹田航太^{4,5}、宇田智紀⁶、山口拓人¹

RCAST, Univ. of Tokyo¹, IIS, Univ. of Tokyo², IMI, Kyusyu Univ.³, Kyoto Univ.⁴,
RIKEN⁵, and AMIR, Tohoku Univ.⁶

°S. Iwamoto^{1,2}, S. Kaji³, T. Sakajo⁴, K. Takeda^{4,5}, T. Uda⁶, and T. Yamaguchi¹,

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

フォトニック結晶導波路(PhC-WG)の曲げ損失を低減できる構造として、バレーフォトニック結晶(VPhC)や光トポロジカル絶縁体(PTI)を用いたトポロジカル PhC-WG が広く研究されている[1]。一方、バンドトポロジを特徴づけるベリー曲率がゼロとなる構造を用いても曲げに強い PhC 導波路が可能となることが報告されている[2,3]。これらの構造では、導波モードが持つ光の渦状構造と曲げ耐性の関係がしばしば議論されている。今回、W1 型 PhC-WG やトポロジカル PhC-WG などの導波モードが持つ渦状の分布について、ベクトル場に対するヘルムホルツ-ホッジ分解[4]と流線トポロジーデータ(Topological Flow Data, TFD)解析[5, 6]を用いて調べたので報告する。

2次元 FDTD 法により求めた導波モードのポインティングベクトル場 $\mathbf{S}$ からヘルムホルツ-ホッジ分解し回転成分に対応するハミルトン成分 $\mathbf{S}_H$ を抽出する。次にその流れを生成するポテンシャル関数(ハミルトン関数)を求め、この関数に対して TFD 解析を行った。Fig. 1 は、zigzag 界面を持つ VPhC-WG(a)、PTI 構造を用いた PhC-WG(b)および W1 型 PhC-WG(c)について、導波路曲げ部分に対して行った解析結果の一例である。それぞれ左から構造、ハミルトン関数、TFD 解析で得られたパーティショニンググラフを示す。VPhC-WG と PTI を用いた PhC-WG では導波路曲げ構造を反映したような境界が検出された一方、W1-PhC WG では構造とは相関のないパーティションが検出される結果となった。また、PTI を用いた PhC-WG(Fig.1 (b))では導波路曲げの内側に複数のパーティションが現れる特徴的なパターンを示すこともわかった。波長による違いやベリー曲率がゼロとなる構造に対する結果は当日報告する。

謝辞: 本研究は JST-CREST JPMJCR19T1、JST 未来社会創造事業本格研究「未来医療を創出する 4 次元トポロジカルデータ解析数理共通基盤」により遂行された。**参考文献:** [1] 例えば、レビュー論文として S. Iwamoto *et al.*, Opt. Mater. Express, **11**, 319 (2021) [2] J. -K. Yang *et al.*, Phys. Rev. Research **3**, L022025(2021). [3] W. Dai 他 第 70 回応物春季講演会, 16p-A501-9 (2023). [4] H. Bhatia *et al.*, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. **19**, 1386 (2013). [5] T. Yokoyama and T. Sakajo, Proc. Roy. Soc. A, **469**, 20120558 (2013). [6] T. Uda *et al.*, 日本応用数理学会論文誌, **29**, 187 (2019).

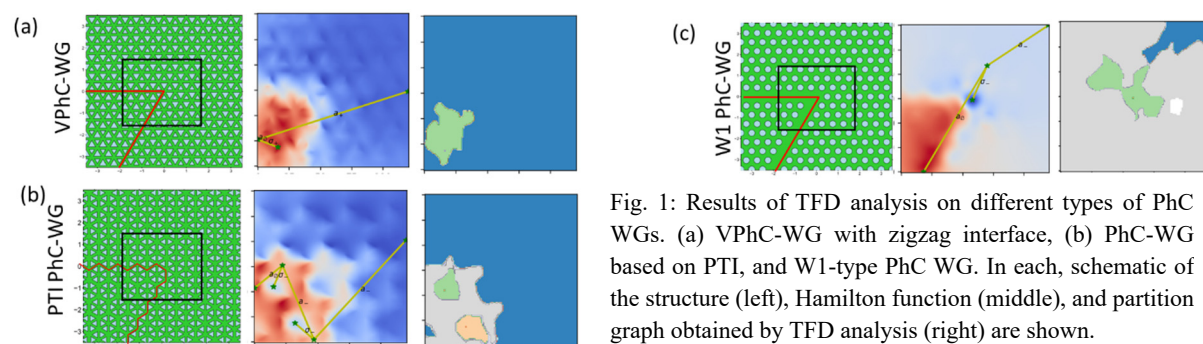


Fig. 1: Results of TFD analysis on different types of PhC WGs. (a) VPhC-WG with zigzag interface, (b) PhC-WG based on PTI, and W1-type PhC WG. In each, schematic of the structure (left), Hamilton function (middle), and partition graph obtained by TFD analysis (right) are shown.

非エルミート表皮効果を示す異方性フォトニック結晶スラブの励振

Excitation of anisotropic photonic crystal slabs for observing non-Hermitian skin effect

NTT NPC¹, NTT 物性基礎研², 東工大³ ○高田 健太^{1,2}, 養田 大騎³, 森竹 勇斗³, 納富 雅也^{1,2,3}

NTT NPC¹, NTT BRL², Tokyo Tech.³, ○Kenta Takata^{1,2}, Taiki Yoda³, Yuto Moritake³,

Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: kenta.takata@ntt.com

近年、非エルミート光学系特有の現象に注目が集まっている。その代表例の一つとして、非エルミート表皮効果がある[1]。これは、非相反性あるいは利得、損失の異方性により、有限な周期系の固有状態の内の多くが系の端に局在する現象である。前回我々は、相反な非エルミート表皮効果の観測に有望な光学系として、現実的な吸収損失及び構造異方性を有する InGaAs 二次元フォトニック結晶スラブを提案した[2]。一方で、同効果の観測には系の励振が必要となるが、外部励振下における定常状態と、前回報告したような表皮モード固有状態とが必ずしも一致しないことを、一様媒質モデルを用いて報告している[3]。従って、何らかの励振により、同効果を明瞭に示す定常状態を得ることが提案系においても可能かどうかを調べる必要があった。

そこで、十分大きくかつ有限な異方性フォトニック結晶スラブを仮定し、その種々の励振に対する応答のシミュレーションを行ったので報告する。図(a)に検討したフォトニック結晶の模式図を示す。同構造は x (紙面水平) 方向及び y (上下) 方向にそれぞれ 41 周期分の単位胞を持つ。差し込み図に示した単位胞は前回報告と同じものであり、淡色部分は InP に格子整合する厚さ 200 nm の InGaAs 薄膜、濃色部分は紙面-45 度方向に長辺を持つ二種類の大きさの長方形穴である。単位胞は正形状であり、 x, y 方向ともに格子定数は $a = 460 \times \sqrt{2}$ nm である。

まず、フォトニック結晶の各側面に完全導体境界条件を課し、またその上下に高さ 3 μm の空気層を追加した系における固有モードを有限要素法で計算した。この計算には大きなリソースを要するため、得られる結果は指定した周波数近傍の限られた数の解となる。続いて、フォトニック結晶の前後の側面 (紙面手前及び奥) に厚さ及び幅の等しい InGaAs スラブ導波路を接続し、基底スラブ導波モードを前面より定常的に入射したときの、構造内の光波の伝搬、及び後面における出力を計算した。図(b)に、スラブ中心面における周波数約 $f \sim 195.9$ THz のフォトニック結晶固有状態の一例 (左、電場強度対数スケール) 及びスラブモード励振に対する定常応答 (右、電場振幅対数スケール) のカラープロットを示す。前回報告では、所謂リボン系のシミュレーションにおいて周波数約 196 THz の明瞭な表皮モードが得られたのに対し、有限系では局在を示すと思しき固有状態においても場が角に集まり、また構造内部にも広がっている。対応する励振応答では、入力場が系の異方性により右側へ回折するのが見て取れる。フォトニック結晶内部 (網掛け部) では光が左右の端に結合する傾向が見られるが、出力光はスラブ全体に広がっているため、表皮効果の検出が困難であることが懸念される。これに対し、図(c)は周波数約 $f \sim 150$ THz に対する同様の結果である。見出された固有状態は非常に明瞭な端への局在を示している。同様の結果が周波数約 160 THz 及び 170 THz でも得られることから、これらの解が非エルミート表皮モードであることが示唆される。さらに、定常応答では出力光の左右両端への局在が顕著にみられ、特に右側には表皮モードの励振を示唆する干渉縞が見られる。励振周波数によるこのような応答の差が現れる理由としては、表皮モード複素周波数がバルクフォトニック結晶のバンド端に近づくことで、バルクと容易に結合するようになることが考えられる。その他の結果は当日議論する。

本研究は科研費 (JP20H05641) による助成を受けた。参考文献:[1] S. Yao and Z. Wang, *PRL* **121**, 086803 (2018) 等。[2] 高田ら, 2023 年春季応物, 16p-A501-3. [3] T. Yoda *et al.*, arXiv:2303.05185 (2023).

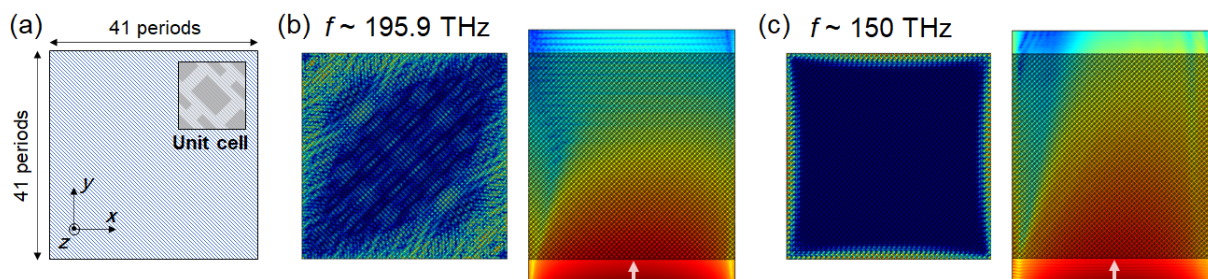


Fig. (a) Schematic of the considered photonic crystal (PhC) slab. The inset is its unit cell. (b) Left: Eigenmode with $f \sim 195.9$ THz of the PhC with perfect electric conductors on its sides and air layers on its top and bottom. Right: Steady response of the system of the PhC and InGaAs slabs to the ground slab mode excitation at the front. $z = 0$. (c) Same for $f \sim 150$ THz.

MT 対称性をもつ媒質における光非エルミートスキン効果の解析

Analysis on optical non-Hermitian skin effect in MT-symmetric media

¹東工大理工, ²NTT NPC, ³NTT 物性基礎研 [○]森竹 勇斗¹, 養田 大騎¹, 高田 健太^{2,3}, 納富 雅也^{1,2,3}

¹Tokyo Tech, ²NTT NPC, ³NTT BRL, [○]Yuto Moritake¹, Taiki Yoda¹, Kenta Takata^{2,3},

and Masaya Notomi^{1,2,3}

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

近年注目されている、非エルミートなハミルトニアンによって記述される物理系で起こる特異な現象に、非エルミートスキン効果 (NHSE: Non-Hermitian Skin Effect) がある。NHSE は、エルミート系では系全体に広がるバルクモードがすべて端に局在する状態になる、という非エルミート系特有の現象であり、新たな局在状態の形成方法として興味をもたれている[1,2]。我々はこれまで、従来の周期系と異なる一様媒質系で光 NHSE が発現することを報告してきた[3,4]。この系では、解析的な式が得られることから、その局在長や励起を理論的に解析することが可能である。しかし、これまで検討してきたスキンモードは、複素数の固有周波数をもつため、伝播中に有限の増幅・減衰があり、固有モードの直接励起が難しいことがわかってきている。そこで本研究では、MT 対称性をもつ媒質における光 NHSE について調査を行った。MT 対称とは図 1(a)のように、鏡映面で反転した後に複素共役（時間反転）をほどこした系が一致する対称性を指す。このような系では、複素固有値が完全に実になり、減衰も増幅もしないスキンモードが得られることが分かった。

MT 対称な異方的誘電率をもつ系に対して、解析式を用いた計算から、スキンモードの複素固有値が完全に実になることを解析的に示すことができた。また、それを現実の材料系で実現するために、2 層の単位胞からなる多層膜系に有効媒質近似を適用し、どのような誘電率をもった材料系を用いれば MT 対称が満たせるかを解析した。その結果、利得と損失をそれぞれもつ材料を組み合わせることで、MT 対称性が満たせることを見出した。この知見を基に、有効誘電率が $\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{\perp}^* \sim 1.67 + 0.97i$ となるような多層膜を設定し、シミュレーションから複素固有値を求めたところ、図 1(b)のように実固有値をもつスキンモードを得た。これらのスキンモードは、全て波数 $0.25 \times 2\pi/1.5(\mu\text{m})$ で上側に進行する右側局在モードである (図 1(c))。この系の場合、右斜め上に進む光は増幅、左斜め上に進む光は減衰し、それらが釣り合うことによって、実スキンモードが得られたと考えられる。実スキンモードはスキンモードの励起・活用において重要であり、本研究の結果は HNSE を用いた光デバイス応用へ寄与するものと考えられる。本研究は、科学研究費補助金 (20H05641, 21K14551) の援助の下に行われた。

[1] S. Yao and Z. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 121, 086803 (2018). [2] S. Yao and Z. Wang, *Phys. Rev. Lett.* 121, 136802 (2018). [3] K. Yokomizo, T. Yoda, and S. Murakami, *Phys. Rev. Research* 4, 023089 (2022). [4] T. Yoda, Y. Moritake, K. Takata, K. Yokomizo, S. Murakami, and M. Notomi, arXiv:2303.05185

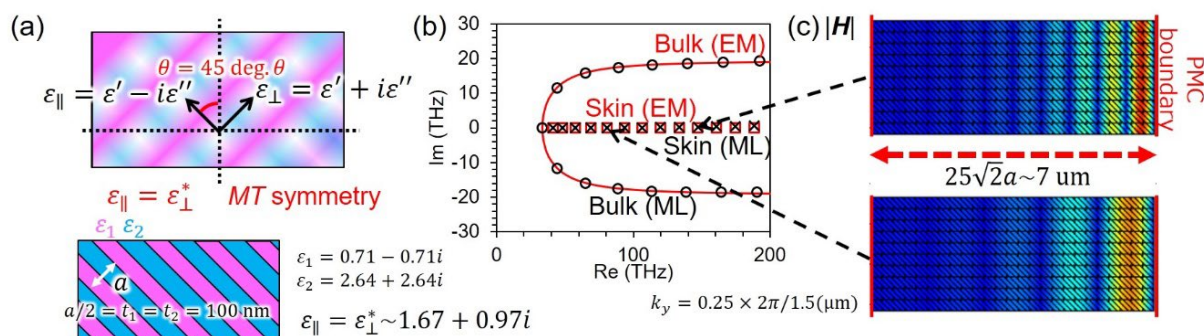


Fig. 1 (a) anisotropic permittivity with MT symmetry. (b) Complex eigenfrequencies for the bulk and skin modes (c) Magnetic field distributions of the skin modes.

非エルミート・エルミート結合制御に基づく無反射・垂直放射導波路の放射電界強度分布制御

Reflectionless waveguide with controlled radiative electric-field distribution by non-Hermitian/Hermitian control

京大院工, °野口直哉, 井上卓也, 吉田昌宏, 野田進

Kyoto Univ., °N. Noguchi, T. Inoue, M. Yoshida, S. Noda

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

【序】 フォトニック結晶は、利得・吸収媒質を導入しなくても放射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するための有用な舞台となりうる。これまで、我々は、フォトニック結晶における放射損失を伴う光結合（非エルミート結合）および伴わない結合（エルミート結合）の制御により、光の伝搬方向により完全垂直放射（無反射）と完全反射が切り替わる一方向性光放射・反射現象が実現可能であることを提案・実証した^{1,2)}。今回、非エルミート・エルミート結合制御に基づく垂直放射導波路において、終端部に反射境界を導入することで、無反射・垂直放射条件を満たしながら、導波路直上の放射電界強度分布自在に制御可能であることを見出したので報告する。

【理論】 Fig.1 に示すように、場所により結合係数が異なる長さ L のフォトニック結晶導波路において、その終端部に完全反射境界（反射位相 0° ）を導入した場合を考える。進行波 $R_x(x)$ と後退波 $S_x(x)$ の間のエルミート結合係数を $R(x)+iI(x)$ 、非エルミート結合係数を $\mu(x)$ とし、導波路直上の垂直放射電界強度分布を $E_{\text{rad}}(x)$ としたとき、 Γ 点周波数の光を入射した際の光の伝搬は以下の方程式で記述される²⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} R_x \\ -S_x \end{pmatrix} = i \left[\begin{pmatrix} 0 & R(x)+iI(x) \\ R(x)-iI(x) & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i\mu(x) & i\mu(x) \\ i\mu(x) & i\mu(x) \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \end{pmatrix} \cdots (1), \quad E_{\text{rad}}(x) = \sqrt{2\mu(x)}(R_x(x) + S_x(x)) \cdots (2)$$

ここで、目的の垂直放射電界強度分布を $F(x)$ としたとき、 $E_{\text{rad}}(x) = F(x)$ かつ無反射条件 ($S_x(0) = 0$) を満たすための結合係数分布の一例は、(1)(2)式を用いて以下のように導出される。

$$R(x) = 0 \cdots (3), \quad I(x) = -\frac{1}{F(x)} \frac{\partial F(x)}{\partial x} \cdots (4), \quad \mu(x) = \frac{F^2(0)}{2 \int_0^L F^2(x) dx} (\text{定数}) \cdots (5)$$

例えば、無反射一様放射($F(x)=\text{定数}$)を実現するための条件は、 $R(x)=I(x)=0$ かつ $\mu(x)=0.5/L$ と導かれる。

【設計】 上述の結合係数の条件を満たすため、Fig.1 示すように、2つの長方形空孔からなる二重格子フォトニック結晶と、反射鏡として働く単格子フォトニック結晶を接続した導波路を3次元FDTD法にて設計した。ここでは目的の垂直放射電界強度分布の例として、① $F(x)=\text{定数}$ （一様放射）、および、② $F(x) = C\{2+\cos(2\pi x/L)\}$ の2つを考え、(3)式と(5)式を満たすように二重格子構造の重心間距離 d と導波路長 L を固定した後、(4)式で決まる I の値に比例して、各場所の二重格子構造の空孔バランス $2x$ を調整した。計した2つの垂直放射導波路について、導波路直上の放射電界強度分布の計算結果をFig.2に示す。いずれの場合も、入射端における反射率を0.01未満に抑制しつつ、設計とほぼ同じ形状の電界強度分布が実現出来ていることがわかる。**【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) 井上他, 2021年秋応物 12p-N321-8. 2) 野口他, 2023年春応物 16p-A501-5.

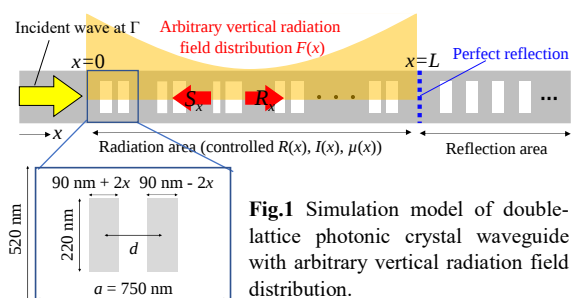


Fig.1 Simulation model of double-lattice photonic crystal waveguide with arbitrary vertical radiation field distribution.

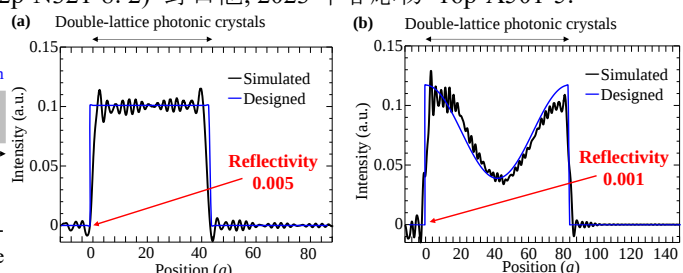


Fig.2 (a)(b) Simulated vertical radiative electric-field distribution above the designed waveguides with two different radiation patterns.

非エルミート・エルミート結合制御に基づく無反射・一様垂直放射 2次元アンテナの設計

Reflectionless 2D antenna with uniform vertical radiation by non-Hermitian/Hermitian control

京大院工, °井上卓也, 野口直哉, 吉田昌宏, 野田進

Kyoto Univ., °T. Inoue, N. Noguchi, M. Yoshida, S. Noda

E-mail: t_inoue@qoe.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するための有用な舞台となりうる。これまで、我々は、フォトニック結晶における放射損失を伴う光結合（非エルミート結合）および伴わない結合（エルミート結合）の制御により、光の伝搬方向により完全垂直放射と完全反射が切り替わる一方向性光放射・反射現象^{1,2)}や1次元構造における放射電界強度分布制御³⁾が実現可能であることを明らかにした。今回、さらに90°回折を表すエルミート結合係数をも適切に制御することで、光を進行方向と直交する方向に一様に広げることが可能であることを見出し、一様な垂直放射を実現する1次元フォトニック結晶³⁾と組み合わせることで、2次元的に無反射・一様垂直放射を実現するアンテナが設計可能であることを報告する。

[90°回折構造設計] 検討する90°回折構造の模式図をFig. 1に示す。4回対称性を有する正方格子フォトニック結晶（寸法 $L_1 \times L_2$ ）を考え、180°方向のエルミート結合を表す結合係数 κ_{1D} および放射損失を伴う非エルミート結合係数 μ は0であり、90°方向のエルミート結合 κ_{2D} のみが存在する場合を仮定する。また、領域の右端と下端は完全反射境界（反射位相 π ）とする。このとき、フォトニック結晶中を x 方向に伝搬する進行波 R_x と後退波 S_x の伝搬方程式は、以下で表される（導出の詳細は当日報告予定）。

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} R_x \\ -S_x \end{pmatrix} = i \begin{pmatrix} i\mu_{2D} & -i\mu_{2D} \\ -i\mu_{2D} & i\mu_{2D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_x \\ S_x \end{pmatrix} \cdots (1), \quad \mu_{2D} = 2\kappa_{2D}^2 L_1 \cdots (2)$$

ここで μ_{2D} は、90°回折光 E_{out} によるフォトニック結晶外部へのエネルギー損失を伴う非エルミート結合係数である。(1)式は、垂直放射を伴う1次元導波路における伝搬方程式³⁾と（位相の違いを除いて）同じであり、 $\mu_{2D}L_2=0.5$ 、すなわち、 $\kappa_{2D}=0.5(L_1L_2)^{-1/2}$ が満たされる場合に、入射光 E_{in} を無反射かつ一様な強度で90°方向に回折可能である。

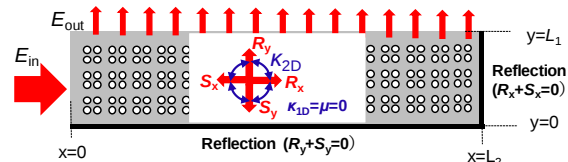


Fig. 1. Schematic of a square-lattice photonic crystal (PC) with uniform 90° diffraction.

[2次元アンテナ設計] 上記の90°回折構造に、一様な光放射を実現する一辺 L_2 の1次元フォトニック結晶³⁾ ($\kappa_{1D}=\kappa_{2D}=0, \mu L_2=0.5$) を接続し、バンドギャップ(PBG)を有するフォトニック結晶で囲んだFig. 2に示す構造を考える。本構造について、結合波理論により、光を入射した際の進行波 (R_x)・後退波 (S_x)・90°回折波 (R_y)・垂直放射波 (E_{rad}) の (a)

電界強度分布、および遠視野像を解析した結果をFig. 2に示す。反射 (S_x) を抑制しつつ、90°回折光 (R_y) を介して一様な垂直放射波 (E_{rad}) へと変換され、狭い拡がり角 ($\sim 0.03^\circ$) の遠視野像が得られることがわかる。実構造の設計等、詳細は当日報告する。 **[謝辞]** 本研究の一部は特別推進研究の支援を受けた。 **[文献]** 1) 井上他, 2021年秋応物 12p-N321-8. 2) 野口他, 2023年春応物 16p-A501-5. 3) 野口他, 本応物。

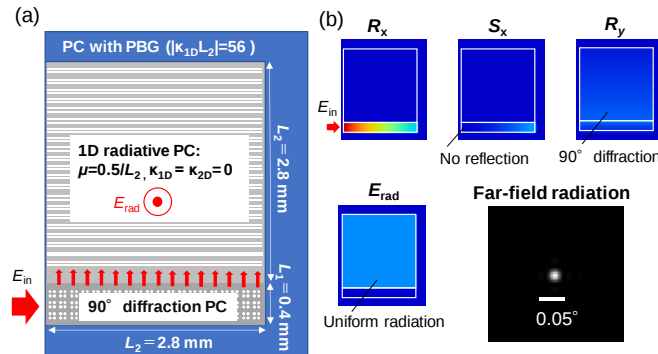


Fig. 2. (a) Schematic of a reflectionless 2D antenna with uniform vertical radiation. (b) Calculated light intensity distribution inside the antenna (R_x , S_x , R_y , E_{rad}) and the far-field radiation profile (FFP).

フォトニック結晶における M 点ディラックコーン を用いたゼロ屈折率状態

Zero-refractive index states using the Dirac cone at the M-point in photonic crystals

東工大¹, NTT 物性研², NTT ナノフォトニクスセンタ³

○(M2)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}

Tokyo Tech¹, NTT BRL², NTT NPC³

○Sho Watanabe^{1,2}, Yuto Moritake¹, Masaaki Ono^{2,3}, Eiichi Kuramochi^{2,3}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: watanabe.s.bn@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。屈折率がゼロの物質では、拡散輸送、位相再構成、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、偶然縮退によって Γ 点に形成されるディラックコーンを用いた ZIM の研究が進められてきた[1]。しかし、 Γ 点上のモードは自由空間のライトラインの上に存在するため、放射損失が大きく光の長距離伝搬が困難である。一方で、ディラックコーンは Γ 点と同じ C_{4v} 対称性を持つ M 点にも形成可能であり、フォノニック結晶分野では M 点ディラックコーンを用いた ZIM が報告されている[2][3]。前回、我々はハニカム格子の K 点ディラックコーン[4]について報告したが、本研究ではライトライン下の M 点ディラックコーンにおけるゼロ屈折率状態について調査を行った。

今回提案するフォトニック結晶構造とそのバンド構造を図 1(a), (b)に示す。基本構造は正方格子ピラー型であるが、中心部に空気穴をあけてコアシェル状にすることでディラック点のシングルモード化を実現している。ディラック点付近では等周波数面が非常に小さい円形となるため、実効屈折率がほぼゼロとなり光が拡散的に伝搬することが期待される。図 1(c)はこのフォトニック結晶の Γ -M 方向にディラック点周波数のガウシアンビームを入射したシミュレーション結果である。入射光は結晶内を広がり、最終的に位相が再構成されて平面波が出力されている。この結果からディラック点でゼロ屈折率状態が実現されていることが示唆される。また、講演では今回提案した M 点 ZIM と前回提案した K 点 ZIM の相違点についても議論する。

【謝辞】本研究は科研費 20H05641 の助成を受けて行われた。

[1] Huang *et al.* Nat. mater. **10**, 582-586 (2011). [2] Gao *et al.* Solid State Commun. **234-235**, 35-39 (2016).

[3] Dubois *et al.* Nat. Commun. **8**, 14871 (2017). [4] 渡邊他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 20p-A101-7(2022).

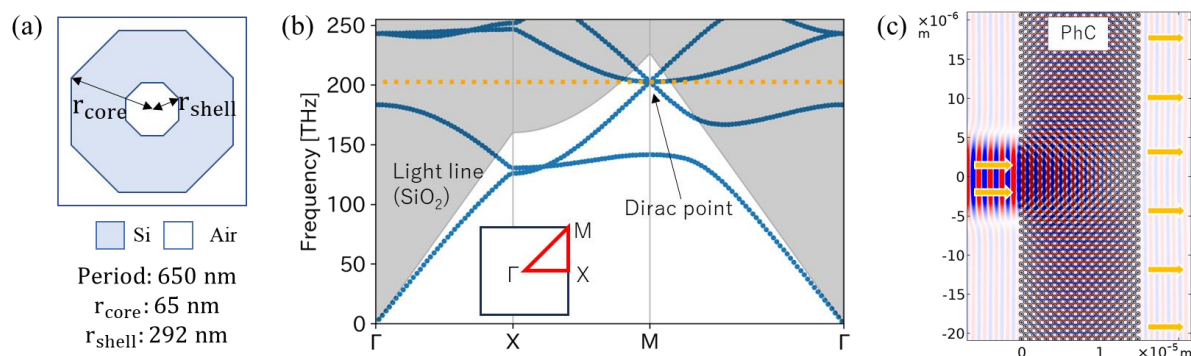


Fig.1 (a) (b) Unit cell and TE band structures of core-shell photonic crystal. (c) Magnetic field distributions when a Gaussian beam is incident on a PhC slab at the Dirac frequency.

非エルミートフォトリック結晶の対称性を利用した例外点の波数空間制御

Manipulation of exceptional points in k space of non-Hermitian

photonic crystals based on symmetry control

¹東工大理,²NTT 物性研,³NTT ナノフォトリックセンタ°鈴木 聡^{1,2}, 大塚 秀太郎^{1,2}, 上村 高広^{1,2}, 養田 大騎¹, 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 BRL, ³NTT NPC°Satoshi Suzuki^{1,2}, Shutaro Otsuka^{1,2}, Takahiro Uemura^{1,2}, Taiki Yoda^{2,3}, Yuto Moritake¹, Masaaki Ono^{2,3},Eiichi Kuramochi^{2,3}, Masaya Notomi^{1,2,3} E-mail:suzuki.s.dc@m.titech.ac.jp

PT 対称性をもつ非エルミート物理系では、例外点(Exceptional point: EP)をまたいだ *PT* 相転移によって、新奇な光学現象を実現できることが提案され、研究が活発化している。特に強い円偏光状態となる EP では円偏光変換成分に非対称性があるため、興味深い現象が確認できるとともに EP を実験的に確認する手段となっている[1]。我々は、これまでグラフェン装荷フォトリック結晶(PhC)を用いて Γ 点に EP ができる条件を数値計算で明らかにし、作製した結晶でその存在を実験的に確認した[2]。本研究では構造の対称性と EP の振る舞いの関係に注目した。その結果、数値計算から 4 回対称性を持つ構造では波数空間上に 4 つの EP ができること、それらが構造の対称性が壊れることで動き、最終的に Γ 点で 1 つの EP になることが明らかになった。また、実験においても非 Γ 点における EP の存在を確認し、構造の対称性と光学特性の関係を計算、実験の両方で示すことができた。

図 1(a)は本研究で用いた正方格子 SiPhC の構造である。グラフェン装荷(青い領域)によって損失の非対称性を、穴間隔 d の変化によって構造の非対称性を生み出すことができる。この系を作製し、左右円偏光(L, R)による反射測定を行った。図 1(b)は波数空間におけるその変換反射($L \rightarrow R$, $R \rightarrow L$)の非対称性 $\{(R_{L \rightarrow R} - R_{R \rightarrow L}) / (R_{L \rightarrow R} + R_{R \rightarrow L})\}$ をプロットしたものである。構造が 4 回対称性を持つとき(C_4)、非対称性の大きい色の濃い領域が 4 つ存在する。また、そこから d を小さくすることで構造の対称性を壊していくとそれらが Γ 点に集まる様子が確認できる。これらの位置、および運動は数値計算における EP の様子と対応しており、非 Γ 点も含めて EP の様子を実験的に確認できたことを示している。講演では偏光反射($L \rightarrow L$, $R \rightarrow R$)の非対称性と構造の対称性の関係についても報告する。

【謝辞】本研究は科研費 20H05641 の助成を受けて行われた。

[1] M. Lawrence *et al.* PRL. **113**, 093901 (2014). [2] 鈴木他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A101-2(2022)

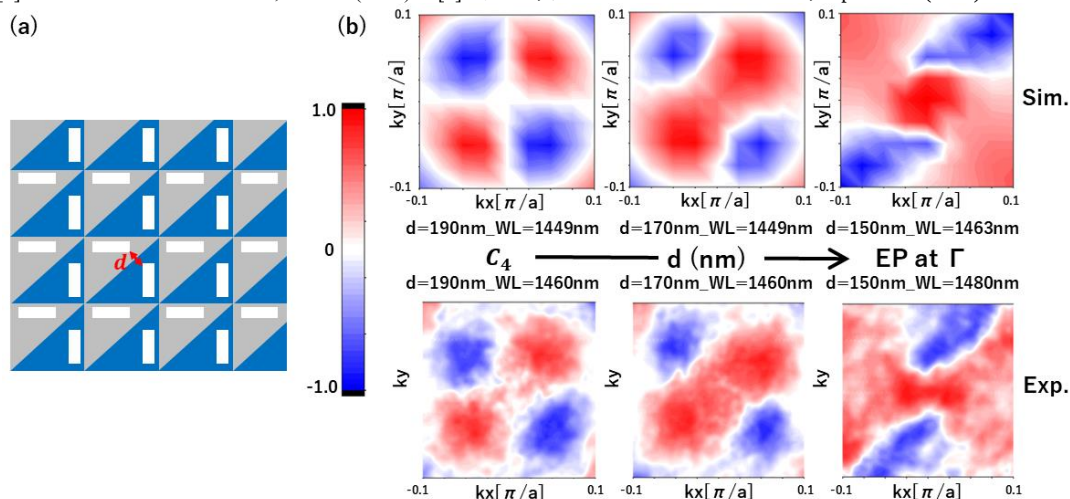


Fig.1 (a) Schematic of graphene-loaded photonic crystal. (b) Calculated results and experimental results of asymmetry-factor $(R_{L \rightarrow R} - R_{R \rightarrow L}) / (R_{L \rightarrow R} + R_{R \rightarrow L})$ in wavenumber space.