

強磁性ナノグラニューラ膜を用いたトポロジカルフォトリック 結晶に関する研究

東京大学 生産技術研究所 岩本 敏

Study on Topological Photonic Crystals Using Ferromagnetic Nanogranular Film

Satoshi Iwamoto

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

物性物理学で進展してきたバンドトポロジーの概念を光の制御に活用するトポロジカルフォトリックスが注目を集めている。特に光のカイラルエッジ状態を活用したトポロジカル光導波路は、構造欠陥や曲げがあっても一方向に光を伝送できるため、集積光回路技術への応用が期待されている。我々は、光通信波長帯で機能するトポロジカル光導波路の実現を目指し、強磁性ナノグラニューラ膜を用いたトポロジカルフォトリック結晶を検討した。また、誘電率テンソルの対角成分がゼロに近い値を持つ ENZ (Epsilon-Near-Zero) 材料を用いることで、カイラルエッジ状態の発現に必要な磁気光学効果が実効的に増強されること、その結果として、より堅牢な光伝搬が可能となる大きなトポロジカル光バンドギャップの実現が可能となることを明らかにした。

Topological photonics, which exploits the concept of band topology developed in condensed matter physics for realizing unprecedented functions in optical devices, is now receiving huge attention. In particular, topological optical waveguides harnessing the chiral edge state of light are expected to lead to innovation in integrated photonic circuit technology since the waveguides enable robust unidirectional light transport even under the presence of structural defects and sharp waveguide turns. Aiming for the realization of the topological waveguides at telecommunication wavelengths, we investigated topological photonic crystals using ferromagnetic nanogranular materials. Moreover, we proposed photonic crystals with an ENZ (Epsilon-Near-Zero) material, whose diagonal components in the dielectric tensor are close to zero. The use of ENZ materials effectively enhances the magneto-optical effect necessary for emerging the chiral edge state. Consequently, the topological bandgap is enlarged, enabling more robust light guiding.

1. はじめに

IoT などの進展による処理すべき情報量の爆発的増大に伴い、サーバなどの情報処理機器においても光技術の重要性が益々高まっており、既存の光デバイスや光集積回路の更なる小型化・高機能化、高集積化の実現が求められている。しかし、光導波路を急峻に曲げることが困難であること、その作製時に生じる構造ゆらぎや不完全性に起因する後方散乱などのため、既存の集積フォトリックス技術の単純な延長ではその実現は難しい。

近年、この課題の克服を可能にするかもしれないトポロジカルフォトリックス¹⁻⁴⁾と呼ば

れる分野が注目を集めている。トポロジカルフォトンクスとは、光のトポロジカルな性質を理解し制御・活用しようとするフォトンクスの新しい分野の一つであり、物質科学で発展したバンドトポロジと呼ばれる概念を光科学に展開したものである。物質系では実現困難なモデルの実現が可能であるほか、利得の導入が容易であり非エルミート物理の探究⁵⁾に適している。トポロジカルフォトンクスで最も特徴的な現象は、周期的光学構造の端に現れる光トポロジカルエッジ状態である。このエッジ状態は、構造のゆらぎなどが存在する場合にも光を高効率に伝送することができるため、急峻曲げが可能で構造ゆらぎに強い光導波路や、それらを活用した光遅延線や一方向レーザなど、集積フォトンクスの新たな進展をもたらすデバイスへの応用が期待されている。

特に実現が期待されるのは、一方向にのみ光が進むことが許された光カイラルエッジ状態を用いた光導波路である。光カイラルエッジ状態は、量子ホール絶縁体において電子が試料端の形状や欠陥の有無に関わらず一方向に進むカイラルエッジ状態の光版である。量子ホール絶縁体における電子カイラルエッジ状態と同様、光カイラルエッジ状態を発現させるためには系の時間反転対称性を破る必要がある。光系で時間反転対称性を破る手法の一つが磁気光学効果の活用である。2008年、磁気光学材料を用いて適切に設計されたフォトンニック結晶(トポロジカルフォトンニック結晶, トポロジカル PhC)において、光カイラルエッジ状態が実現可能であることが理論的に示され⁶⁾、直後の2009年にはマイクロ波領域において実現され、後方散乱が禁止された一方向伝搬の実現が報告されている⁷⁾。また、光通信波長帯で高い性能指数を持つ磁気光学材料であるイットリウム・鉄・ガーネット(YIG)上に半導体 PhC 薄膜を接合し、光カイラルエッジ状態を観測したとする報告⁸⁾があるものの、トポロジカルバンドギャップの幅は波長 1550nm において 42pm と極めて小さく、導波路としての動作帯域が確保できないことに加えて、構造ゆらぎに対する堅牢性も明らかになっていない。このように、光通信波長帯における光カイラルエッジ状態の実現は容易ではなく、その理解は十分には進んでいない。これは、現在利用できる材料の磁気光学効果が小さいことによるものである。

以上の背景を踏まえ、本研究では、光通信波長帯で機能する光カイラルエッジ状態の実現を目指したトポロジカル PhC 構造を検討した。具体的には(1)通信波長帯で YIG の 40 倍の磁気光学効果を示す強磁性ナノグラニューラ膜⁹⁾を用いたトポロジカル PhC、(2)誘電率テンソルの対角成分がゼロに近い値を持つ ENZ (Epsilon-Near-Zero) 特性を示す磁気光学材料を用いたトポロジカル PhC について検討した。以下では、(2)の成果について詳細を報告する。

2. 磁気光学効果におけるENZ特性の影響

検討した構造とその特性を議論する前に、ENZ 効果とそれが磁気光学効果に及ぼし得る効果について議論する。誘電率テンソルの対角成分がゼロに近い ENZ 領域では、様々な特異な光学現象が発現することが知られており¹⁰⁻¹³⁾、その探究と活用が近年注目されている。z 方向に磁場を印加した場合の磁気光学材料の誘電率テンソル $\hat{\epsilon}_{MO}$ は式(1)で与えられる。

$$\hat{\epsilon}_{MO} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & -i\Lambda & 0 \\ i\Lambda & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、有限の非対角成分 Λ が磁気光学効果を発現させる。磁気光学効果の代表的現象であるファラデー効果を考える。単位長さあたりのファラデー回転角 θ_F は誘電率テンソルの非対角成分が対角成分に比べて十分小さい場合には式(2)で与えられることが知られている。

$$\theta_F = -\frac{\omega}{2c} \frac{i\Lambda}{\sqrt{\epsilon_{xx}}} \quad (2)$$

ここで ω は光の周波数、 c は光速であり、簡単のため $\epsilon_{yy} = \epsilon_{xx}$ とした。式(2)から分かる通り、誘電率の対角成分が0に近づくと θ_F は発散的に増大する。したがって、ENZ特性を利用することで、磁気光学効果を実効的に増強できる可能性があることがわかる。

Fig. 1は ϵ_{xx} の関数として θ_F を計算した結果である。材料損失の影響を考察するため、いくつかの $\text{Im}(\epsilon_{xx})$ の値に対する計算結果もあわせて示した。 ϵ_{xx} がある程度大きい領域では、(2)に従って θ_F が変化すること、 ϵ_{xx} が更に小さくなると式(2)の前提となる近似が成り立たなくなり θ_F は飽和することがわかる。通常の磁気光学材料では ϵ_{xx} は5程度もしくはそれ以上であることから、ENZ効果が磁気光学効果を増強する手段として有効であることが理解できる。また大きな損失がある場合にも ϵ_{xx} 低減による磁気光学効果の増強が期待できることがわかる。

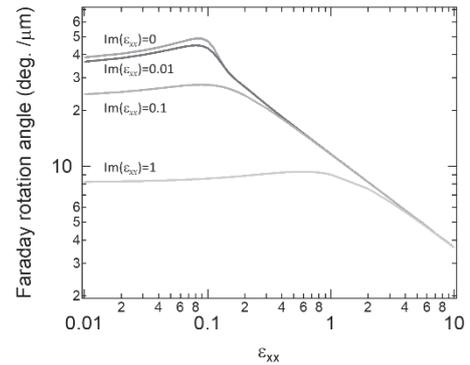


Fig. 1: Faraday rotation angle as a function of $\text{Re}(\epsilon_{xx})$. Each curve corresponds to the result with different $\text{Im}(\epsilon_{xx})$.

3. ENZ-磁気光学材料を用いたトポロジカルフォトニック結晶

3.1 構造とフォトニックバンド構造

検討したトポロジカル PhC は Fig. 2 (a) に示す単位セルが三角格子状(周期 a) に配列された構造である。単位セルはシリコン中に形成された2つの正三角形孔(一辺の長さ L) に ENZ- 磁気光学材料が埋め込まれた構造である。以下では材料の損失は無視し ϵ_{xx} は実数と

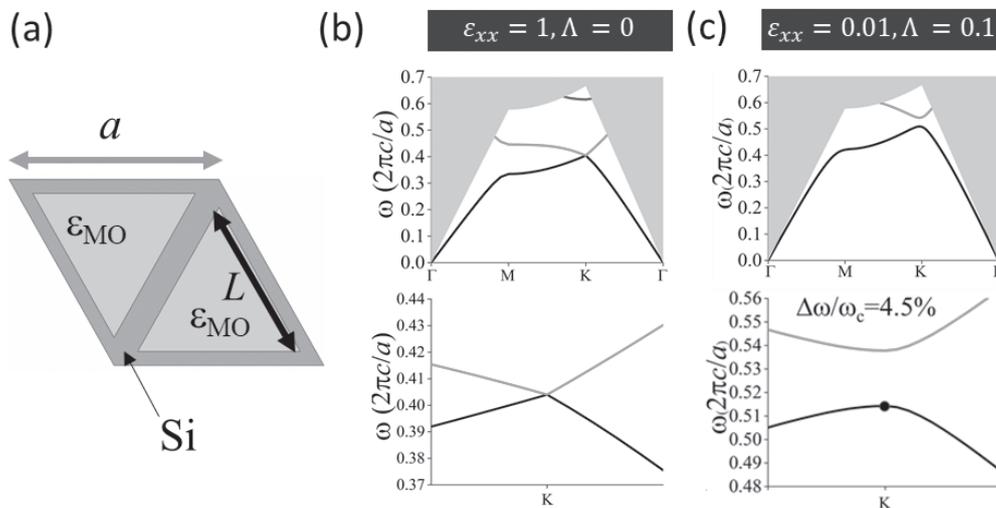


Fig. 2: (a) Unit cell structure of topological PhC with ENZ material. (b) and (c) photonic band diagrams for topological PhCs with different parameters.

して議論するが、損失がある場合にも同様な結果が得られることを確認している¹⁴⁾。この構造におけるTE偏光に対するフォトリックバンド構造を、異なる ϵ_{xx} 、 Λ に対して計算した。計算にはCOMSOL Multiphysicsを用いた。 $L=0.9a$ の場合についての計算結果の一例をFig.2(b)および(c)に示す。磁気光学効果がない場合($\Lambda=0$ 、Fig.2(b))にはK点近傍に2つのバンドが縮退したDirac点が現れる。このDirac点は、系の時間反転および空間反転に対する対称性に起因して現れるもので、 $\Lambda=0$ である限り ϵ_{xx} の値によらず存在する。磁気光学効果により時間反転対称性が破られる($\Lambda \neq 0$ 、Fig.2(c))と、Dirac点の縮退が解かれバンドギャップが形成される。このバンドギャップは、通常のフォトリックバンドギャップとは異なり、トポロジカルな性質を備えたものであり、3.3節で述べるように、そのギャップ中に光カイラルエッジ状態が形成される。したがって、このバンドギャップのサイズが、カイラルエッジ状態を用いた導波路の帯域や堅牢性を検討する上で重要である。その指標となるギャップ幅 $\Delta\omega$ とギャップ中心周波数 ω_c の比 $\Delta\omega/\omega_c$ は、開発中の材料で期待される Λ の値を用いたFig.1(c)の例では4.5%に達する。これは過去の報告に対して1000倍以上大きい値である。

3.2 低誘電率効果によるトポロジカルバンドギャップの増大

ENZ材料の誘電率によるギャップサイズ比 $\Delta\omega/\omega_c$ の変化をFig.3に示す。構造の違いについても検討するため、ENZ材料中のシリコン円柱からならトポロジカルPhCに対する結果もあわせて示す。 $\epsilon_{xx} \sim 0.8$ 程度までは、何れの構造においても誘電率を小さくすることで $\Delta\omega/\omega_c$ が単調に増大していることがわかり、構造によらず期待される効果が得られることがわかる。 ϵ_{xx} が更に小さい領域では、シリコン円柱からなる構造では $\Delta\omega/\omega_c$ が減少してしまうのに対し、Fig.2(a)に示した構造では、 $\Delta\omega/\omega_c$ のさらなる増大が確認できる。この違いの要因の一つは、Fig.2(a)の構造では、トポロジカルギャップが第一バンドと第二バンドの間に生じるのに対して、円柱構造では、第二バンドと第三バンドの間で高次のバンド間に生じるためと考えられる。この結果は、従来の空気孔の周期構造を用いたPhCにおいて、空気孔をENZ磁気光学材料で埋めることで大きなトポロジカルフォトリックギャップが得られる可能性を示すものである。

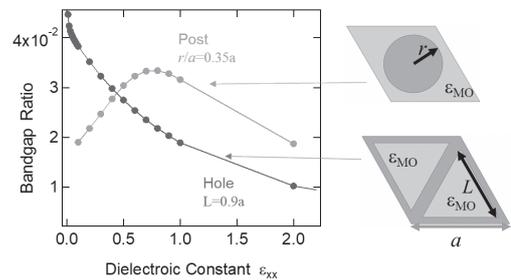


Fig. 3: Bandgap ratio as a function of ϵ_{xx} for two different PhC structures

3.3 カイラルエッジ状態の分散関係と光伝搬特性

磁化の向きを反転させることで Λ の符号を反転させることが可能である。符号の異なる Λ を持つトポロジカルPhCを接合した界面(Fig.4(a))では一方向のみの伝搬が許されるカイラルエッジ状態が現れる。この界面に沿ったフォトリックバンド構造をFig.4(b)に示す。トポロジカルギャップ中に2つのカイラルエッジ状態があることがわかる。このバンド構造が破線で示した中心に対して対称となっていないことにより、各エッジ状態は一方向のみに伝搬することが可能となる。2つのカイラルエッジ状態が存在するのは、界面の両側でのチャーン数と呼ばれるトポロジカル指数の差が界面に現れるエッジ状態の数に対応するというバルク-エッジ対応の帰結である。実際、Fig.4(a)の構成では界面上側の

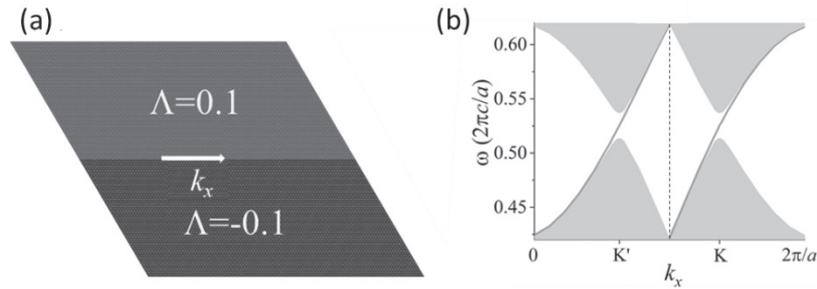


Fig. 4:(a)Schematic of the interface formed with two topological PhCs with different Chern numbers. (b) Photonic band diagram along the interface.

構造では1、下側の構造では-1となり、差が2であることを確認している。

大きなトポロジカルバンドギャップ中に現れるカイラルエッジ状態は、欠陥などに対しよりロバストな光伝搬特性を示すことが期待される。ギャップ幅の違いが光伝搬特性に与える影響を考察するため、界面上に完全電気導体でできた欠陥が存在する場合について解析した。Fig.5は ϵ_{xx} の異なる構造に対する伝搬の様子を示したものである。ここでは面に垂直な磁場成分の強度 $|H_z|^2$ を示している。 $\Delta\omega/\omega_c$ が約1%である $\epsilon_{xx}=2$ の場合、欠陥での顕著な後方散乱が見られないものの、欠陥部分を通過した後の強度分布が大きく乱れている様子がわかる。一方、4%を超える $\Delta\omega/\omega_c$ を持つ $\epsilon_{xx}=0.01$ の場合には、欠陥部分を通過した後も大きな乱れなく伝搬していることがわかる。この結果は、トポロジカルバンドギャップの拡大により、よりロバストな一方向性光導波が可能となることを示すものである。

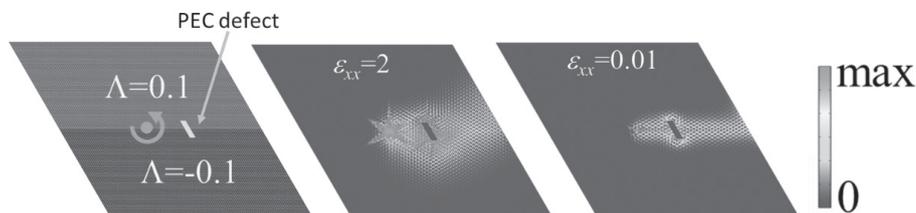


Fig. 5: Light propagation along the interface with a defect made of perfect electric conductor (PEC). (left): Schematic of the configuration. (center) and (right): Field distributions for $\epsilon_{xx}=2$ and 0.01 , respectively.

4. まとめと今後の展望

本研究では、ENZ-磁気光学材料を用いることで磁気光学効果を実効的に増強できること、トポロジカルフォトリック結晶のバンドギャップを大きく拡大できることが可能であることを数値的に明らかにした。更にトポロジカルギャップの拡大により、欠陥や構造ゆらぎにより堅牢な光導波路が実現できる可能性を示した。詳細は我々の論文¹⁴⁾を参照いただきたい。現在、共同研究者とともに、この構造を実現するための材料開発を進めており、初期的な結果も得られている¹⁵⁾。また、詳細は割愛したが、ナノグラニュー膜を用いたトポロジカルフォトリック結晶についても、損失を含めた材料のパラメータを用いた解析を行いその有効性を確認している。光集積回路技術においては、集積化が可能で小型な光アイソレータ、一方向性デバイスの実現が切望されている。本研究を基礎に一方向性導波路の実現を目指した研究を継続する予定である。実現できれば、科学的にも工学的にもインパクトの高い成果となると確信する。

5. 謝辞

本研究は2019年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成および科学研究費補助金・萌芽研究(19K21959)、JST-CREST(JPMJCR19T1)により行われたものである。本稿で紹介した成果に関する共同研究者である Tianji Liu 氏(東京大学)、太田泰友氏(慶應義塾大学)、小林伸聖氏および池田賢司氏(電磁材料研究所)に感謝する。

6. 参考文献

- 1) T. Ozawa, H. M. Price, A. Amo, N. Goldman, M. Hafezi, L. Lu, M. C. Rechtsman, D. Schuster, J. Simon, O. Zilberberg, and I. Carusotto, "Topological photonics," *Rev. Mod. Phys.* **91**, 015006 (2019).
- 2) A. B. Khanikaev and G. Shvets, "Two-dimensional topological photonics," *Nat. Photonics* **11**, 763 (2017).
- 3) Y. Ota, K. Takaka, T. Ozawa, A. Amo, Z. Jia, B. Kante, M. Notomi, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, "Active topological photonics", *Nanophotonics* **9**, 547 (2020).
- 4) S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Recent progress in topological waveguides and nanocavities in a semiconductor photonic crystal platform", *Opt. Mater. Express* **11**, 319 (2021).
- 5) M. Parto, Y. G. N. Liu, B. Bahari, M. Khajavikhan, and D. N. Christodoulides, "Non-Hermitian and topological photonics: optics at an exceptional point", *Nanophotonics* **10**, 403 (2021).
- 6) F. D. M. Haldane and S. Raghu, "Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 013905 (2008).
- 7) Z. Wang, Y. Chong, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, "Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states," *Nature* **461**, 772 (2009).
- 8) B. Bahari, A. Ndao, F. Vallini, A. El Amili, Y. Fainman, and B. Kanté, "Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries," *Science* **358**, 636 (2017).
- 9) N. Kobayashi, K. Ikeda, B. Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa, "Giant Faraday Rotation in Metal-Fluoride Nanogranular Films," *Sci. Rep.* **8**, 4978 (2018).
- 10) I. Liberal and N. Engheta, "Near-Zero Refractive Index Photonics," *Nat. Photonics* **11**, 149 (2017).
- 11) O. Reshef, I. De Leon, M. Z. Alam, and R. W. Boyd, "Nonlinear Optical Effects in Epsilon-near-Zero Media," *Nat. Rev. Mater.* **4**, 535 (2019).
- 12) C. Rizza, A. Di Falco, M. Scalora, and A. Ciattoni, "One-Dimensional Chirality: Strong Optical Activity in Epsilon-Near-Zero Metamaterials," *Phys. Rev. Lett.* **115**, 057401 (2015).
- 13) A. Ciattoni, A. Marini, and C. Rizza, "Efficient Vortex Generation in Subwavelength Epsilon-Near-Zero Slabs," *Phys. Rev. Lett.* **118**, 104301 (2017).
- 14) T. Liu, N. Kobayashi, K. Ikeda, Y. Ota and S. Iwamoto, "Topological bandgaps enlarged in epsilon-near-zero magneto-optical photonics crystals", *ACS Photonics* (2022) *in print*
- 15) 池田 賢司、刘 天際、太田 泰友、岩本 敏、小林 伸聖, "イプシロンニアゼロ特性を有するITO薄膜の磁気光学効果", 第82回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-N321-15 (2021).