トポロジカルフォトリック結晶ナノ共振器

岩本 敏^{1,2,3}, 太田 泰友³, 荒川 泰彦³

¹東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1)

²東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

Topological Photonic Crystal Nanocavities

Satoshi IWAMOTO,^{1,2,3} Yasutomo OTA,³ and Yasuhiko ARAKAWA³

¹Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904

²Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

³Institute for Nano Quantum Information Electronics, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

(Received April 1, 2019)

Topological photonics, an emerging field in photonics, attracts many researchers not only due to its fundamental interests, but also due to its potential applications. Introducing the concept of band topology into photonic systems enables the realization of various topological states of light. Photonic crystals (PhCs) are an important platform for the study of topological photonics, particular for integrated photonic circuits. Topologically protected edge states, which function as optical waveguides enabling robust light transport, have been intensively studied. Meanwhile, optical cavities are another key component in integrated photonic systems. Here, we will discuss an optical nanocavity realized using the semiconductor PhC platform. We designed two topologically distinct PhC nanobeams and experimentally demonstrated lasing oscillation using a topological localized mode at the interface between them.

Key Words: Topology, Edge state, Photonic crystal, Nanocavity

1. はじめに

“トポロジー”は物質中での電子の振る舞いやその結果として現れる諸現象を理解する上で有用かつ重要な概念となっている。量子ホール効果のバンドトポロジーに基づく理解¹⁾とバルクエッジ対応²⁾の発見を発端に、トポロジーの概念を基礎として新たな物質相・材料が多く見出されており、その特徴を活かした様々なデバイス応用の可能性が議論されている。

このトポロジカル物性科学の概念を、光や音波などの古典的波動の制御に利用しようとする試みが、物理的面白さと様々な応用の可能性から注目され、その研究が盛り上がっている。特にトポロジーの考え方を適用し、電磁波や光の新たな制御やそれを用いたデバイスの可能性を探索する分野はトポロジカルフォトリックスと呼ばれている³⁻⁷⁾。

トポロジーの概念に基づく様々な電磁場状態の実現・探索は、それ自体、基礎科学として興味深い研究対象である。光のトポロジカルな状態は、フォトリック結晶(PhC)などの人工光学構造で実現可能であり、電子材料

では実現が難しい系も光のプラットフォームでは実現できる可能性がある。加えて、フォトリックバンドのトポロジカルな性質が異なる構造で形成された界面に現れる光のトポロジカルエッジ状態を利用することで、従来技術では困難な、構造欠陥や曲げに対してロバストで強い一方向性を示す光伝搬が実現できるため、集積フォトリックス技術に革新をもたらす可能性があるとして注目されている。

本稿では、トポロジカルフォトリックス、特に集積フォトリックス応用を意識した研究について簡単にふれた後、半導体PhC構造を用いたトポロジカルフォトリックスに関する我々の最近の取組のうち、トポロジーの考え方を基礎として実現したPhCナノ共振器に関する成果について紹介する。

2. トポロジカルフォトリックス

トポロジカルフォトリックスのはじまりは、2008年に発表されたHaldaneとRaghuの理論提案である^{8,9)}。彼らは、電子系の整数量子ホール効果に相当する現象が光におい

でも実現できることを示し、ゆらぎに強い一方向光導波路としての応用の可能性を示唆した。翌2009年には、マイクロ波領域でこの特性が実験的に示された¹⁰⁾。これらの研究を契機に、現在、様々な研究が進められている。

磁気光学効果を持つ材料やメタマテリアルなど特殊な人工光学材料を用いることにより、光の様々なトポロジカル状態を実現することができる。しかし、材料の制約や損失などの問題のため、近赤外域での動作が必要とされる集積フォトニクス技術に直接応用することは難しい。一方、NIMSの胡曉らは、PhCの単位セルの構造を工夫することで、等方性で透明な誘電体材料のみでトポロジカルPhCが実現できることを2015年に示した¹¹⁾。この提案を契機に、集積フォトニクスへの応用を念頭としたトポロジカルフォトニクスの研究が盛り上がりつつあり、この提案に基づいた半導体トポロジカルPhCに関する実験的な研究も報告されている^{12,13)}。また、我々のグループでは、同じく誘電体のみで実現できるバレー PhC¹⁴⁻¹⁷⁾と呼ばれる構造に注目し、量子ドット発光を用いたエッジ状態を利用した光の高効率伝搬の実証¹⁸⁾や曲がるスローライト導波路の検討¹⁹⁾などを報告している。

これらの研究は、いずれも2次元系で実現される1次元的なトポロジカルエッジ状態を利用したものであり、光導波路としての応用を見据えたものである。一方、集積フォトニクス技術においては、導波路以外にも様々な要素素子が必要である。その一つが光共振器である。特に微小領域に強く光を閉じ込めることができるナノ共振器は、光と物質の相互作用を増強できるため、レーザーや非線形光学デバイスなどへの応用が期待される。以下では、我々が報告しているトポロジーの概念を利用して光の閉じ込めを実現したトポロジカルPhCナノ共振器について紹介する。

3. トポロジカルPhCナノビーム共振器

バンドトポロジーを利用した光局在状態は、電子系におけるSSHモデル²⁰⁾の光版に対応するマイクロピラー共振器やマイクロリング共振器を一次元状に配列した系において、0次元エッジ状態として実現されており、その局在状態を利用したレーザー発振も報告されている²¹⁻²³⁾。しかし、これらの研究はマイクロピラー共振器などのサイズが大きい構造を単位構造としたものであり、ナノ共振器のような回折限界に近い光閉じ込めは実現されていなかった。我々はフォトニック結晶ナノビーム構造のバンドトポロジーを制御することで、小さいモード体積を有するトポロジカル局在状態を実現するとともに、量子ドット利得を用いてレーザー発振を実現することに成功した²⁴⁾。以下ではその概要を紹介する。詳細は文献24を参照していただきたい。

3.1 構造とバンドトポロジーの制御

Fig. 1(a)に作製したトポロジカルPhCナノビーム共振器のSEM像を示す。試料は厚み180 nmのGaAsで形成されており、2種類の異なる単位セルを有するPhCナノビー

Fig. 1 (a) SEM image of a GaAs topological PhC nanobeam cavity. (b) Schematic of the structure. Two different unit cells are indicated by blue and red rectangles.

Fig. 2 Calculated photonic band structures for the designed structure. (a) The case when the holes in the unit cell are the same size. (b) The case when the holes have different sizes (b). The shaded area denotes the leaky region above the light line. W_1 and W_2 are $1.2a$ and $0.7a$, respectively.

ムが接合された構造である。Fig. 1(b)はこの構造を模式的に示したものである。2つの単位セルはいずれも2つの長方形空気円孔を有しており、一つは単位セルの中央に、一方は端に配置されている。以下では、Fig. 1(b)に示したように、界面左側では中央および端の円孔幅が d_1 、 d_2 、界面右側では中央および端の円孔幅が d_2 、 d_1 であり、 $d_1 + d_2 = 0.5a$ (a は周期)の場合について議論する。2次元平面波展開法で計算したフォトニックバンド構造をFig. 2に示す。 $d_1 = d_2 = 0.25a$ の場合には、バンド端で2つのバンドが縮退している(Fig. 2(a))のに対して、 $d_1 \neq d_2$ の場合にはその縮退が解かれバンドギャップが生じる(Fig. 2(b))。上記の条件のもとでは、 d_1 と d_2 の大小関係によらず界面の左右のPhCナノビームは全く同じバンド構造を有しており、バンド構造だけからは2つの構造の違いはわからない。

バンドのトポロジカルな性質は一次元系のトポロジカル不変量として知られているZak位相²⁵⁾を、固有モードから直接計算して得ることができる。特に今回のように単位セルが反転対称性をもつ場合には、その値は π または0に量子化され、ブリルアンゾーンの中心と端で電磁場分布のパリティが反転するか否かで判別できることが知られている²⁶⁾。Fig. 3に、 $d_1 = 0.2a$ の場合について、左

Fig. 3 Field distributions of the magnetic field (H_z) of the lowest photonic band at various wave numbers for the right and left PhC nanobeams in Fig. 1 (bottom). $d_1 = 0.2a$ and $d_2 = 0.3a$.

右のPhCナノビーム構造の最低次バンドの磁場分布(H_z)の分布をいくつかの k_x について示した。いずれの構造においても、ブリルアンゾーン中心では磁場は対称的な分布を示している一方、バンド端であるX点では右側の構造(上段)についてはやはり対称的な分布を示している一方で、左側の構造(下段)では、反対称的な分布に変化していることがわかる。このことは、最低次バンドのZak位相が右側では0、左側では π となっており、左右のPhCナノビーム構造が異なるバンドトポロジを有していることを示している。

3.2 トポロジカル局在状態

以上のように、 $d_1 \neq d_2$ の場合、Fig. 1(b)に示した左右のPhCナノビームはそのバンドのトポロジカルな性質(Zak位相)が異なるため、バルク-エッジ対応の原理²⁷⁾によって、接合面にはそのトポロジカルな性質の違いに起因した局在状態が現れる。Fig. 4は、 d_1 を変えながらバンドギャップ内に現れる局在モードの周波数を調べた結果である。ギャップ内にはトポロジカル局在状態しか存在せず、その規格化周波数はほとんど変化していないことがわかる。

スラブ厚 $0.64a$ の場合について、いくつかの d_1 の値に

Fig. 4 In-gap mode frequency as a function of d_1 . The shaded areas corresponds to the leaky regions.

Fig. 5 Electric field (E_y) profiles and normalized frequencies of the topological localized mode for the structures with different d_1 values. In this analysis W_1 and W_2 in Fig. 1 (b) are $1.6a$ and $0.5a$, respectively.

ついて3次元FDTD法で求めた局在モードの規格化周波数とそのスラブ中央における電場成分(E_y)の分布をFig. 5に示す。2次元解析の結果と同様、規格化周波数はほぼ一定であることがわかる。また d_1 が $0.25a$ に近づくにつれてバンドギャップ幅が小さくなることに起因して、モード分布は大きく広がることがわかる。局在モードの Q 値もそれに伴って増大するが、実際にはナノビーム構造の長さが有限であるため、ある d_1 の値で最大値を示す。全長 $70a$ の場合には、 $d_1 = 0.19a$ で最大 Q 値が得られた。そのときの Q 値、モード体積はそれぞれ $59,700$ 、 $0.67(\lambda/n)^3$ であった。これらの値は通常の典型的なPhCナノ共振器と同程度であり、バンドトポロジの制御による高 Q 値ナノ共振器の実現可能性を示すものである。

3.3 光学特性とレーザー発振

これらの検討を基礎に作製した試料の一例がFig. 1(a)に示したものである。スラブの中央にはInAs量子ドット(QD)が埋め込まれており、その発光を利用して局在モードなどの特性を評価するため、PhC構造の周期 a はQDの発光体にあわせて 270 nm に設定している。低温顕微発光測定により、これらの試料の特性を評価した。

Fig. 6はいくつかの異なる d_1 の構造について、その発光スペクトルをまとめたものである。それぞれの d_1 について、トポロジカル界面を有する試料に加えて、一様なナノビームPhC構造についての結果もあわせて示している。励起条件は図中に示した。界面を持たない構造の発光スペクトルから各 d_1 に対するバンド端波長がわかる。それらの位置を図中の灰色矢印で示した。 d_1 が0から大きくなるに従って、バンドギャップ幅が徐々に狭くなっている様子がわかる。一方、界面を有する構造に対する発光スペクトルには、 d_1 の値によらず、ギャップの中央付近に明瞭な発光ピークが観測されている。これは、トポロジカル局在モードに起因するものであり、前節で議論した結果と整合するものである。また、励起位置を変化させた場合の発光強度の変化からモードの拡がりについても見積もっており、数値計算から得られる結果と良好一致が得られている。

さらに、QDの光利得とこのトポロジカル局在モード

Fig. 6 Low-temperature μ -photoluminescence spectra for the fabricated PhC nanobeams with different d_1 values. Colored and black curves are for the structures with and without the topologically distinct interface for each d_1 , respectively. Arrows (colored and gray) indicate the peak positions of the topological localized modes and band edge modes, respectively.

Fig. 7 (a) Emission spectra at different pump powers for the structure with topological interface ($d_1 = 0.19a$). (b) Light-in-light-out plot for the emission peak of the topological localized mode. The black solid line is the fitting result to the data points.

を利用したナノ共振器レーザーの実現にも成功している。Fig. 7(a)は $d_1 = 0.19a$ の試料について、2つの異なる励起パワーで測定した発光スペクトルである。この実験ではFig. 6の励起条件から繰り返しレートを0.5 MHzに下げている。低励起(5 μ W)時にはトポロジカル局在モードからの発光ピークに加えて、QDからのバックグラウンド発光も顕著にみられている。一方、高励起(150 μ W)時には、局在モードからの発光ピークが強く観測され支配的となっていることがわかる。Fig. 7(b)は対応する光入出力特性である。発光強度は ~ 50 μ W以上で大きく増加しておりレーザー発振を示している。詳細な解析から、しきい値パワーは46 μ W、自然放出結合係数は0.03と見積もられた。大きな自然放出結合係数は、用いたトポロ

ジカル局在モードが小さいモード体積を有することの間接的証拠の一つである。また、レーザー発振状態への遷移に特徴的な、励起パワーの増加に伴うピーク線幅の減少や局在モードピーク以外のバックグラウンド発光のクランプ現象なども観測している。前節で議論したとおり、トポロジカル局在モードの単一性はバルクエッジ対応で規定されており、本実験でもFig. 7(a)に示すとおり、しきい値より十分大きな励起パワーにおいても単一モード発振が得られている。なお、レーザーレート方程式の解析から見積もられた透明化励起パワー11 μ Wにおける線幅から局在モードの Q 値は $\sim 9,600$ であった(設計値59,700)。今回の構造では単位セルに2つの空気孔を設ける必要があることから、通常のPhCナノ共振器に比べて小さい空気孔の加工が必要である。今後、加工精度の向上により実験 Q 値の向上も期待できる。

以上の結果は、PhCのバンドトポロジーの制御により得られるトポロジカル局在モードがナノ共振器モードとして利用できることを示すものである。

4. まとめ

本稿では、バンドトポロジーの制御を利用して実現されるPhCナノビーム共振器に関する我々の研究を紹介した。ここで紹介した成果は、トポロジーの考え方をを用いて、回折限界に近いモード体積をもつナノ共振器とそのナノレーザーへの応用をはじめて実現したものであり、導波路への応用を中心に研究が進んでいるトポロジカルフォトリクスの一つの展開の可能性を示したものである。

一方、本稿で紹介した構造は孤立したPhCナノビーム共振器であり、集積フォトリクスへの応用という観点では2次元PhCでのトポロジカル局在状態が利用できることが望ましい。物性物理の分野でも、二次元系においてバンドのトポロジカルな性質に起因してトポロジカル材料の角に現れるトポロジカルコーナー状態に対する議論が盛り上がっている^{28,29}。我々は、最近2D-PhCスラブを用いてコーナー状態の実現にも成功した³⁰。この状態を利用することで、トポロジカル導波路との結合なども可能になると期待され、トポロジカル光集積回路などが可能となるかもしれない。

トポロジカルフォトリクスの集積フォトリクス応用について、その研究はまだ始まったばかりであり、一体何がどこまでできるのかなど、未解明の部分も多い。現時点では、日本では研究者人口が多くはないのが現状であるが、今後多くの研究者が集い、予想を超えるような新たな展開が我が国から生まれることを期待したい。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果は、科研費特別推進、科研費新学術領域、科研費基盤(S)、科研費基盤(B)などにより得られたものである。また、日頃より有益な議論を頂いている初貝 安弘氏(筑波大学・教授)、若林 克法氏(関西学院大学・教授)、Liu Feng氏(関西学院大学・研究員)、

高橋 駿氏(京都工芸繊維大学・助教)に感謝する。また、英文の確認をいただいたホームズ マーク氏(東京大学・准教授)に感謝する。

参考文献

- 1) D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs: *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 405.
- 2) Y. Hatsugai: *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 3697.
- 3) L. Lu, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić: *Nature Photon.* **8** (2014) 821.
- 4) L. Lu, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić: *Nature Phys.* **12** (2016) 626.
- 5) A. B. Khanikaev and G. Shvets: *Nature Photon.* **11** (2017) 763.
- 6) B.-Y. Xie, H.-F. Wang, X.-Y. Zhu, M.-H. Lu, Z. D. Wang, and Y.-F. Chen: *Opt. Express* **26** (2018) 24531.
- 7) 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: *Rev. Mod. Phys.* **91** (2019) 015006.
- 8) F. D. M. Haldane and S. Raghu: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 13904.
- 9) S. Raghu and F. D. M. Haldane: *Phys. Rev. A* **78** (2008) 033834.
- 10) Z. Wang, Y. Chong, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić: *Nature* **461** (2009) 772.
- 11) L.-H. Wu and X. Hu: *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 223901.
- 12) S. Barik, A. Karasahin, C. Flower, T. Cai, H. Miyake, W. DeGottardi, M. Hafezi, and E. Waks: *Science* **359** (2018) 666.
- 13) N. Parappurath, F. Alpeggiani, L. Kuipers, and E. Verhagen, *arXiv:1811.10739* (2018).
- 14) T. Ma and G. Shvets: *New J. Phys.* **18** (2016) 025012.
- 15) Z. Gao, Z. Yang, F. Gao, H. Xue, Y. Yang, J. Dong, and B. Zhang: *Phys. Rev. B* **96** (2017) 201402.
- 16) M. I. Shalaev, W. Walasik, A. Tsukernik, Y. Xu, and N. M. Litchinitser: *Nature Nanotech.* **14** (2019) 31.
- 17) X.-T. He, E.-T. Liang, J.-J. Yuan, H.-Y. Qiu, X.-D. Chen, F.-L. Zhao, and J.-W. Dong: *Nature Commun.* **10** (2019) 872.
- 18) T. Yamaguchi, Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Ishida, A. Osada, Y. Arakawa, and S. Iwamoto: *Appl. Phys. Express* **12** (2019) 062005.
- 19) 吉見 拓展, 山口 拓人, 太田 泰友, 荒川 泰彦, 岩本 敏, 第66回応用物理学会春季学術講演会 (2019) 11a-W631-5.
- 20) W. P. Su, J. R. Schrieffer, and A. J. Heeger: *Phys. Rev. Lett.* **42** (1979) 1698.
- 21) P. St-Jean, V. Goblot, E. Galopin, A. Lemaître, T. Ozawa, L. L. Gratiet, I. Sagnes, J. Bloch, and A. Amo: *Nature Photonics* **11** (2017) 651.
- 22) M. Parto, S. Wittek, H. Hodaei, G. Harari, M. A. Bandres, J. Ren, M. C. Rechtsman, M. Segev, D. N. Christodoulides, and M. Khajavikhan: *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 113901.
- 23) H. Zhao, P. Miao, M. H. Teimourpour, S. Malzard, R. E.-Ganainy, H. Schomerus, and L. Feng: *Nature Commun.* **9** (2018) 981.
- 24) Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa: *Commun. Phys.* **1** (2018) 86.
- 25) J. Zak: *Phys. Rev. Lett.* **62** (1989) 2747.
- 26) M. Xiao, Z. Q. Zhang and C. T. Chan: *Phys. Rev. X* **4** (2014) 021017.
- 27) Y. Hatsugai: *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 3697.
- 28) W. A. Benalcazar, B. A. Bernevig, and T. L. Hughes: *Science* **357** (2017) 61.
- 29) W. A. Benalcazar, B. A. Bernevig, and T. L. Hughes: *Phys. Rev. B* **96** (2017) 245115.
- 30) Y. Ota, F. Liu, R. Katsumi, K. Watanabe, K. Wakabayashi, Y. Arakawa, and S. Iwamoto: *Optica* **6** (2019) 786.