

ENZ材料で拓くトポロジカルフォトニクスの可能性

岩本 敏

東京大学 先端科学技術研究センター
東京大学 生産技術研究所

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

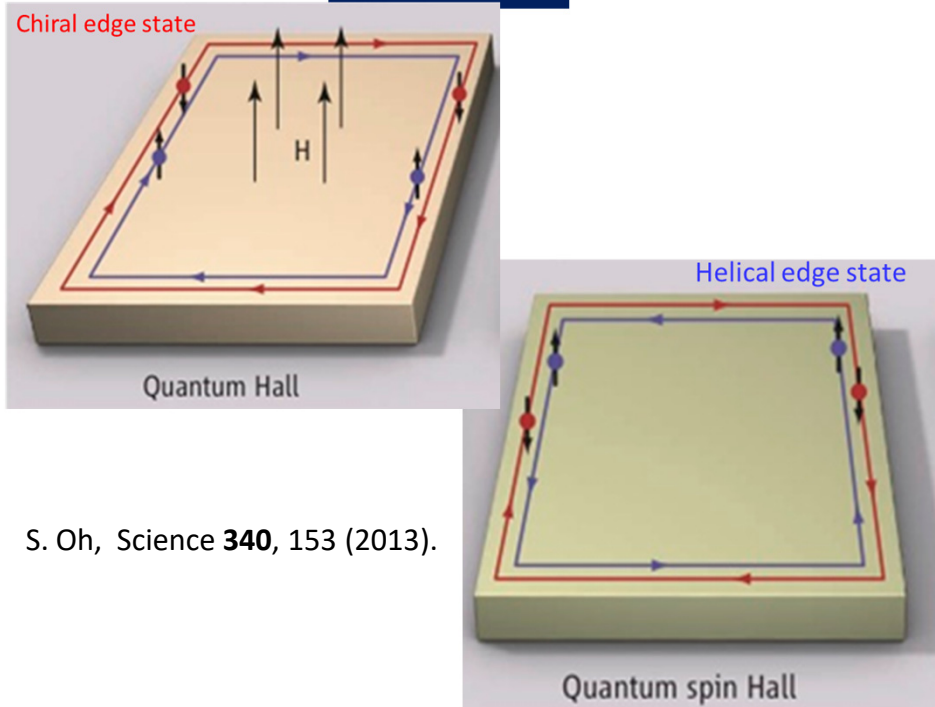
Web: <http://www.iwamoto.iis.u-tokyo.ac.jp/>

本日の内容

- ✓ トポロジカルフォトニクス
- ✓ ENZ効果を活用したトポロジカルフォトニック結晶の可能性
- ✓ ENZ材料における磁気光学効果の実証
- ✓ 通信波長帯一方向性トポロジカル導波路の実現に向けて
- ✓ まとめ

トポロジー：物性科学から光へ

電子系



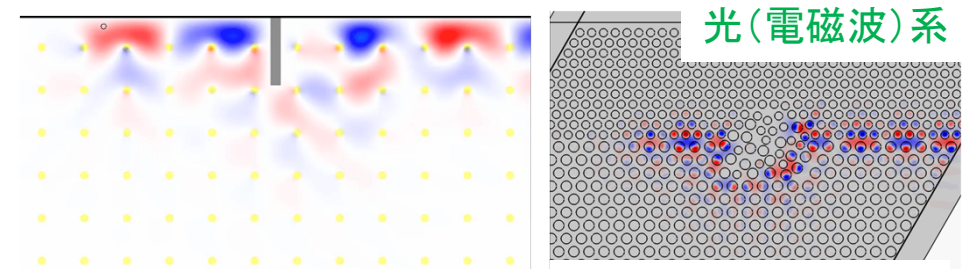
S. Oh, Science **340**, 153 (2013).

トポジカル絶縁体

トポジカルエッジ状態：

欠陥やゆらぎに強い電子の一方方向伝搬
→次世代エレクトロニクス、スピントロニクスへの応用

波動系



Z. Wang et al., Nature **461**, 772 (2009)

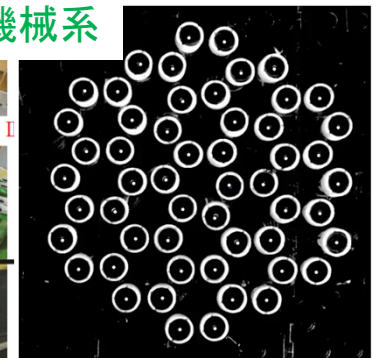
A. B. Khanikaev et al.,
Nat. Mater. **12**, 233 (2013).

音響系



Z. Zhang et al., Research **2019**,
5385763 (2019).

機械系



L. M. Nash et al.,
PNAS **112**, 14495 (2015).

光や音波、機械振動でも
トポジカルエッジ状態！

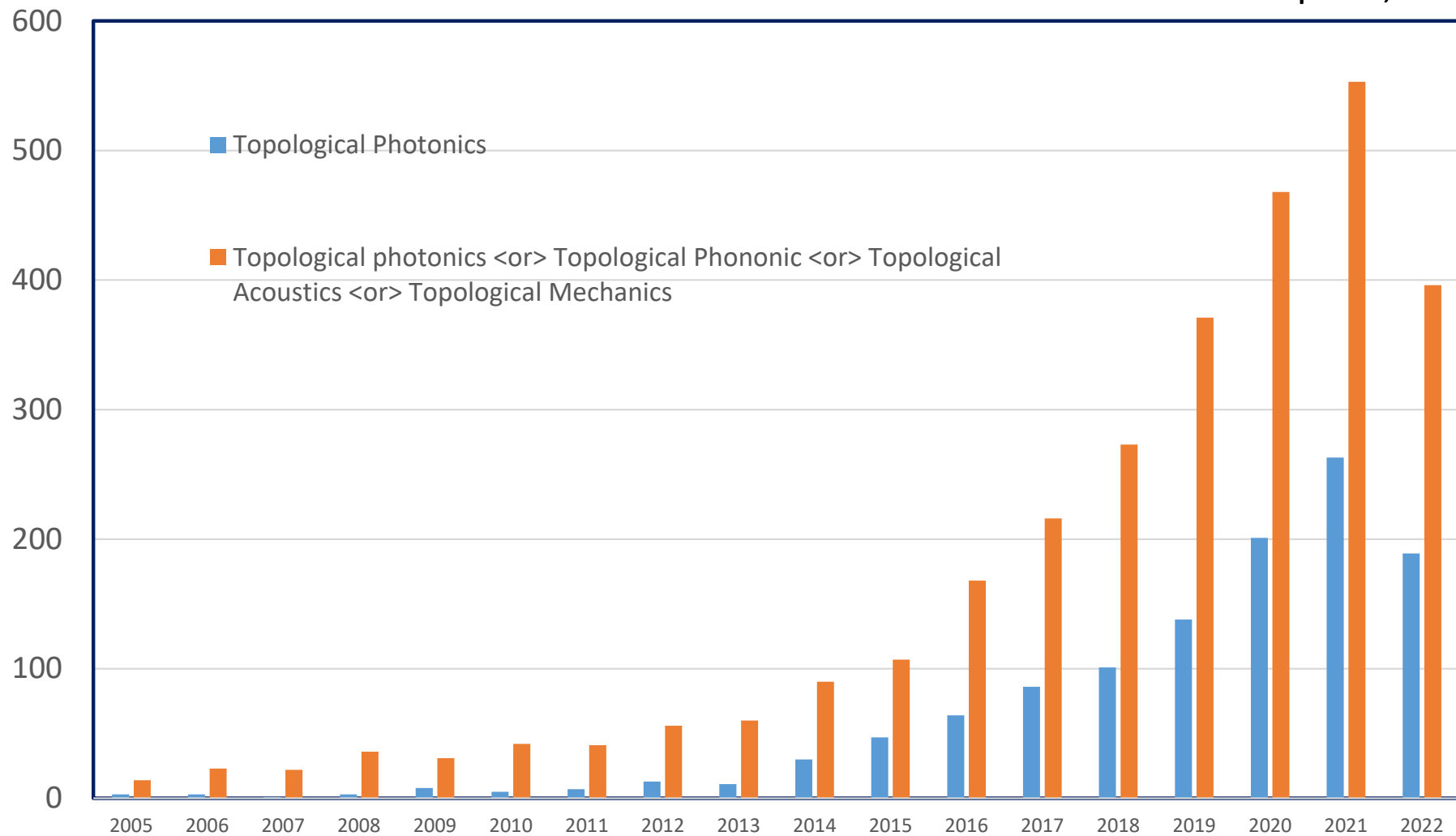
- ✓ バンド構造におけるトポジカルな特徴に起因
- ✓ トポジカル "X" の研究が進展

Growing attention

Source: Web of Science

Number of publications

As of Sep. 12, 2022.



トポロジカルフォトンクス:その始まり

Haldaneらの提案: 構造欠陥等があっても一方向のみに光が伝搬する状態ができるはず!

PRL **100**, 013904 (2008)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
11 JANUARY 2008

Possible Realization of Directional Optical Waveguides in Photonic Crystals with Broken Time-Reversal Symmetry

F. D. M. Haldane and S. Raghu*

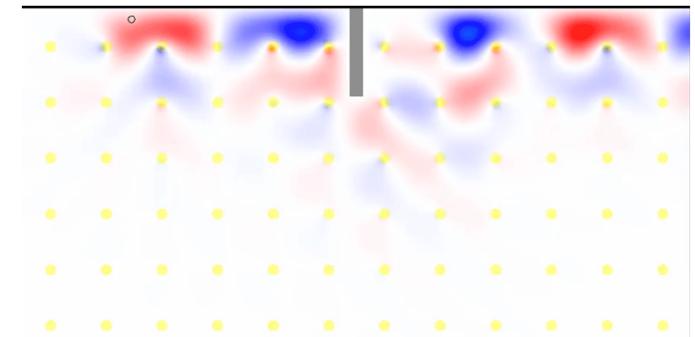
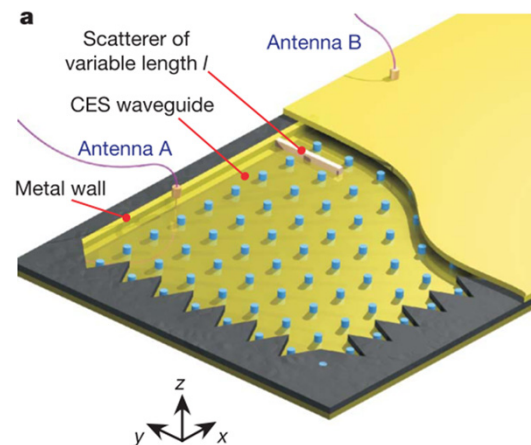
Department of Physics, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544-0708, USA

(Received 23 March 2005; revised manuscript received 30 May 2007; published 10 January 2008)

We show how, in principle, to construct analogues of quantum Hall edge states in “photonic crystals” made with nonreciprocal (Faraday-effect) media. These form “one-way waveguides” that allow electromagnetic energy to flow in one direction only.

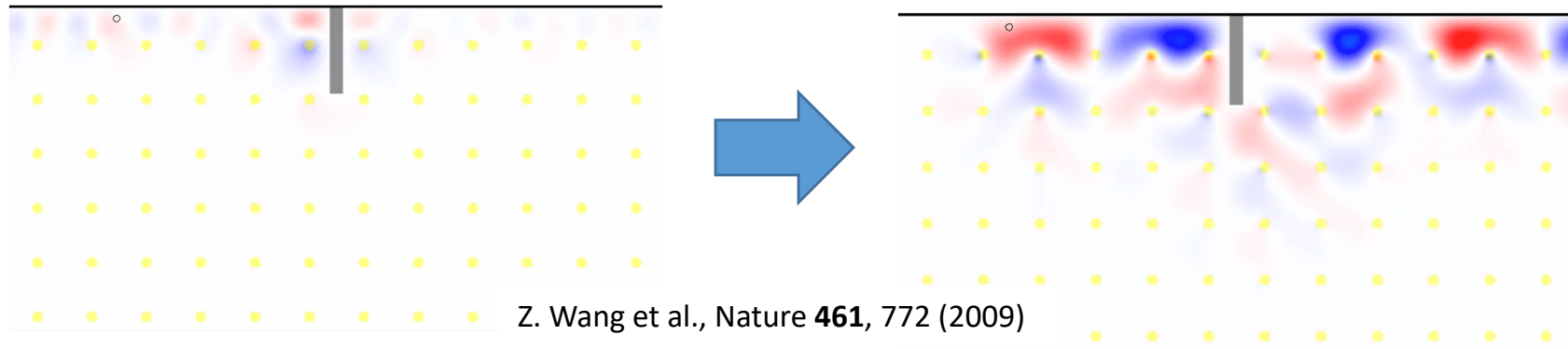
マイクロ波帯で最初に実現

Z. Wang et al., Nature **461**, 772 (2009)

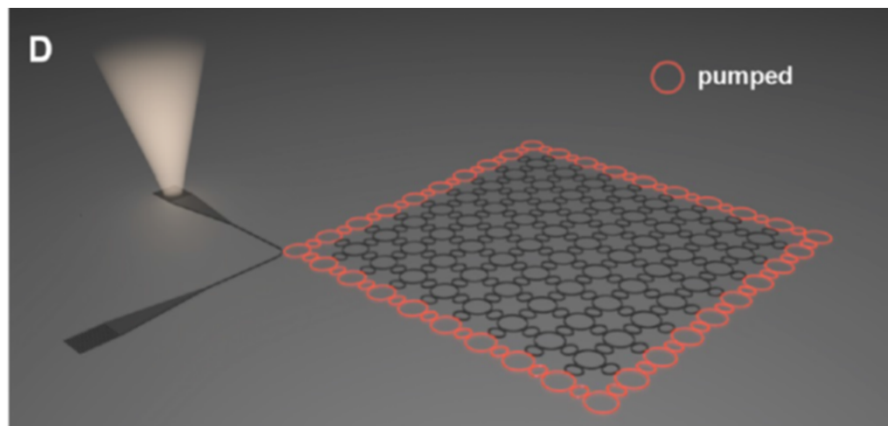


トポロジカルフォトンクス:フォトンクス技術としての期待

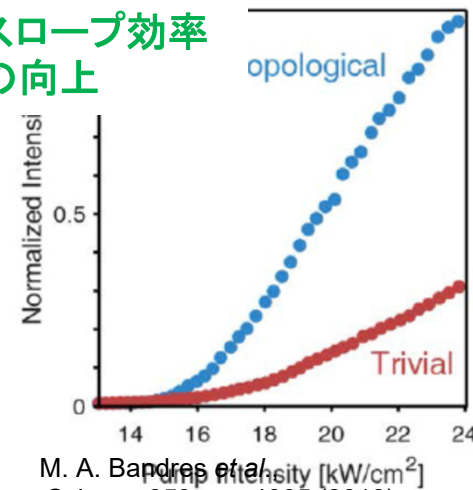
構造揺らぎや欠陥、曲げに強い光導波路、一方向性



高効率・高安定レーザ

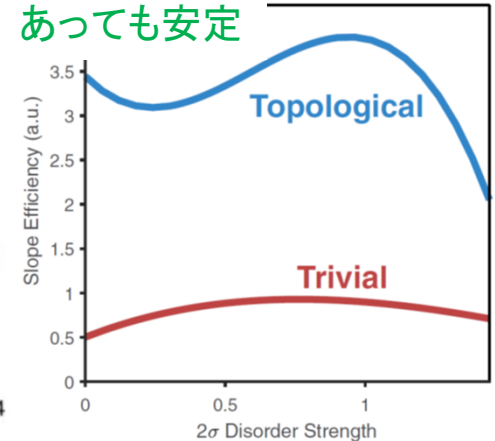


スロープ効率
の向上



M. A. Bandres et al.,
Science **359**, eaar4005 (2018).

揺らぎが
あっても安定



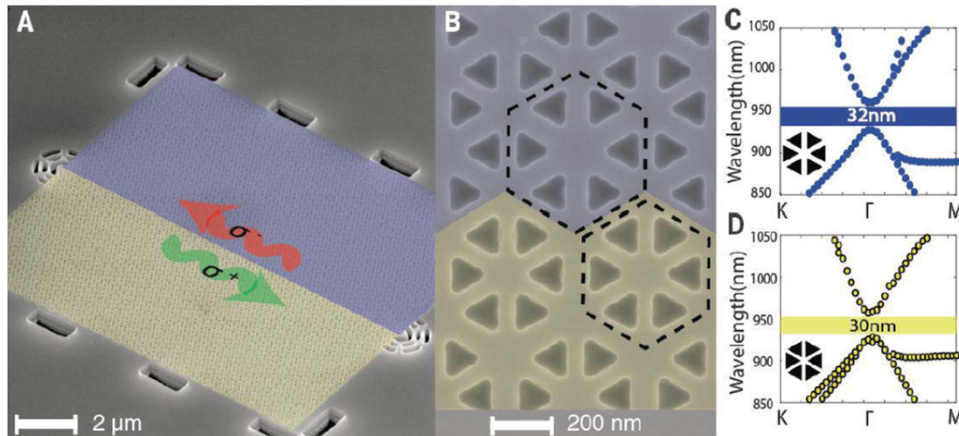
G. Harari et al.,
Science **359**, eaar4003 (2018).

トポロジカル絶縁体の考え方を光制御に応用→新奇フォトリックデバイスの可能性

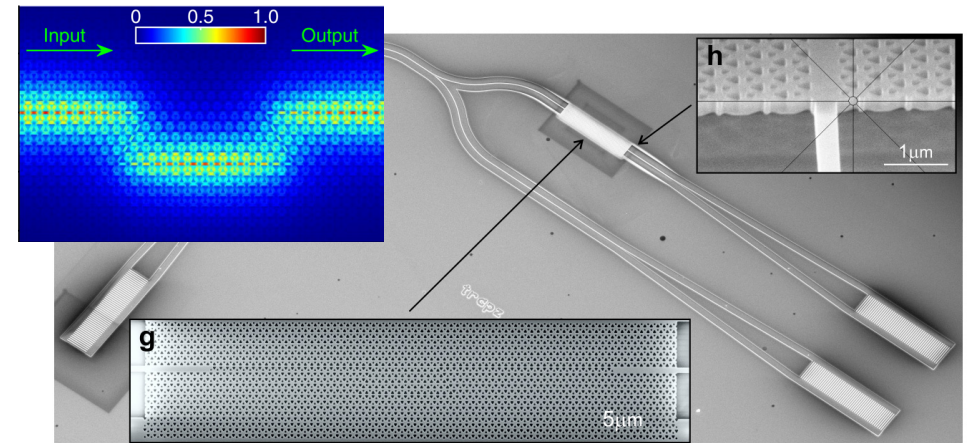
集積フォトンクスのプラットフォームでの研究への注目

半導体トポロジカルナノフォトニクス

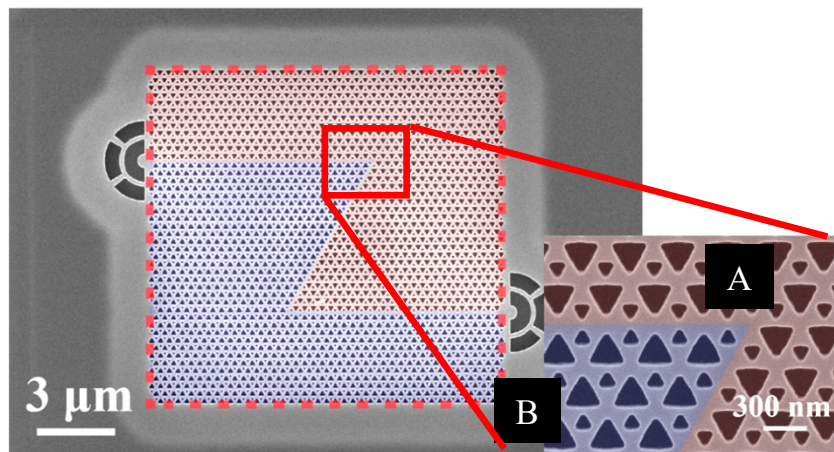
半導体フォトニック結晶で光トポロジカルエッジ状態の特徴を活かした導波路や共振器などの研究が進む



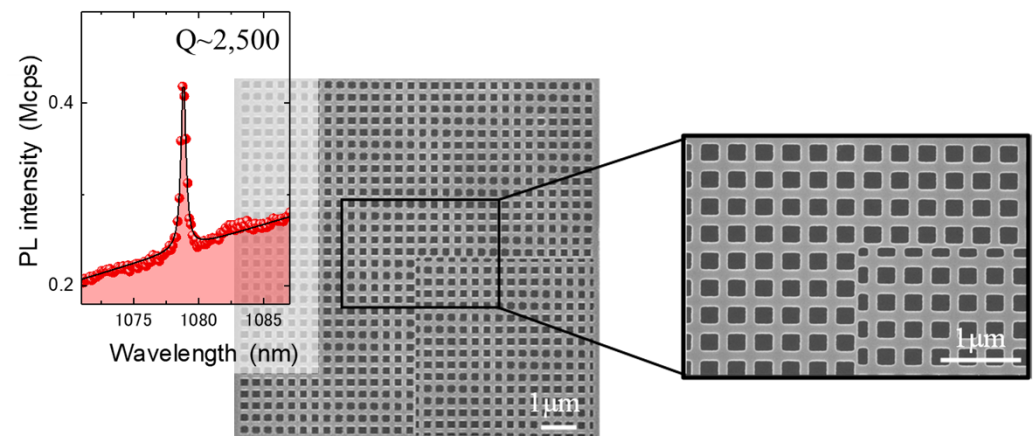
S. Barik *et al.*, Science **359**, 666 (2018)



M. I. Shalshov, *et al.* Nat, Nanotech. **14**, 31 (2019).



T. Yamaguchi, *et al.*, APEX **12**, 62005 (2019)

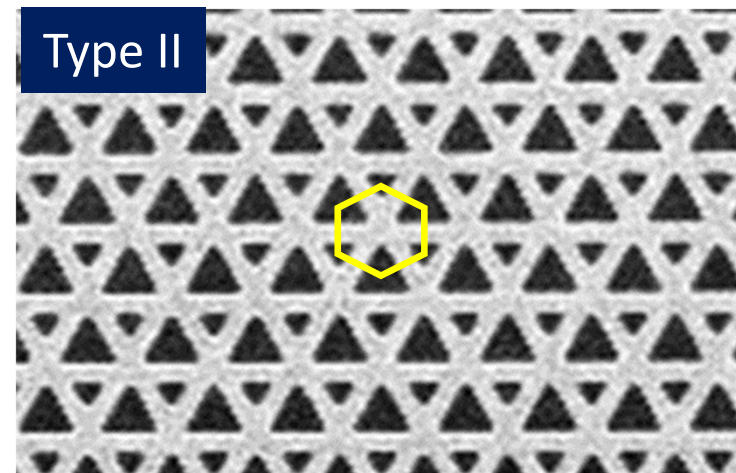
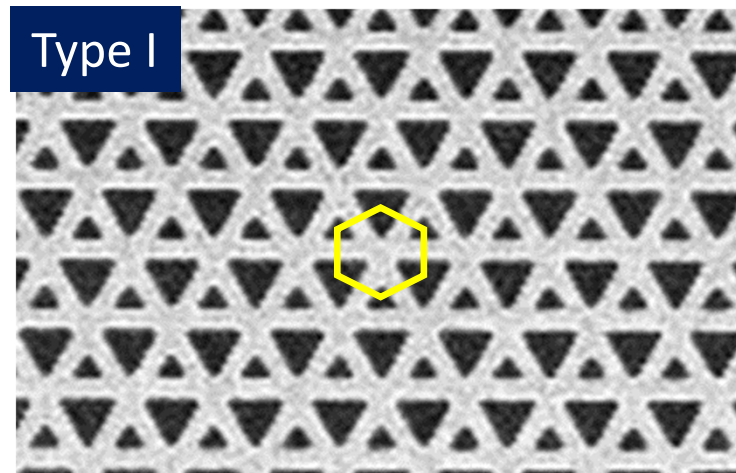


Y. Ota *et al.*, Optica **6** 786 (2019).

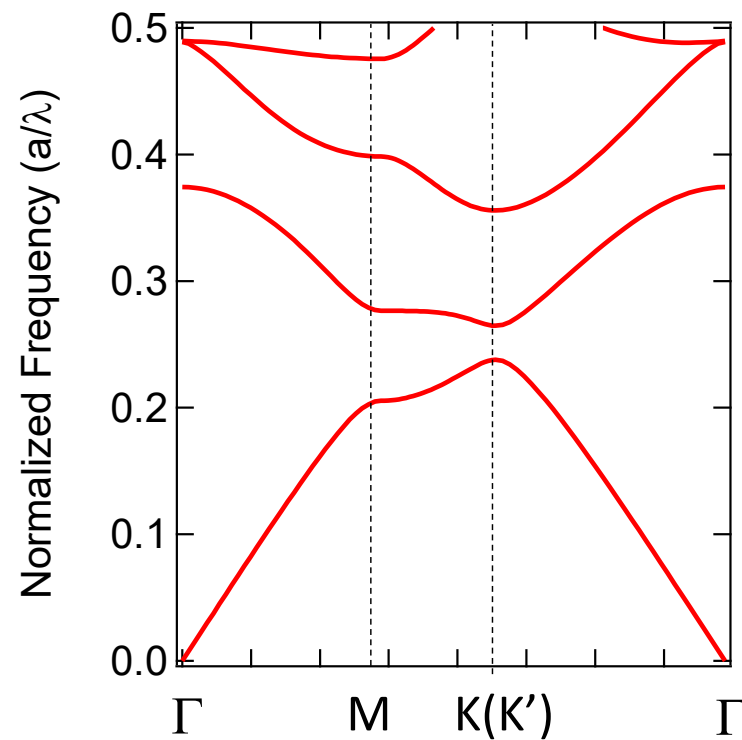
最近の進展: S. Iwamoto *et al.*, Opt. Mater. Express **11**, 319 (2021)
Y. Ota *et al.*, Nanophotonics **9**, 547 (2020).

バレーフォトン結晶

半導体のみで実現可能なトポロジカルフォトン結晶の一つ

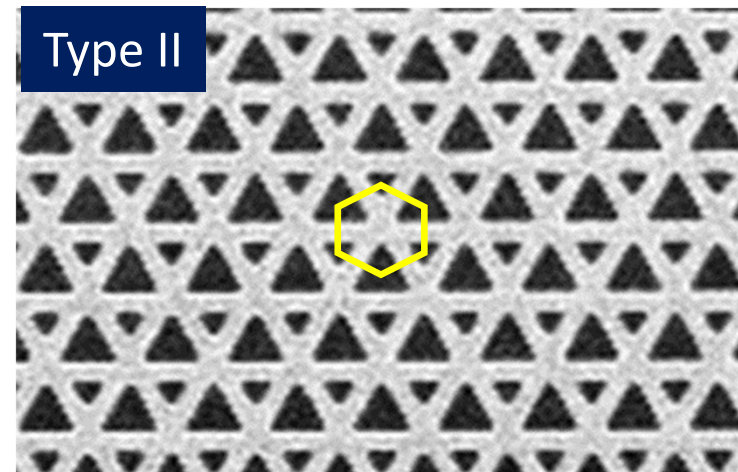
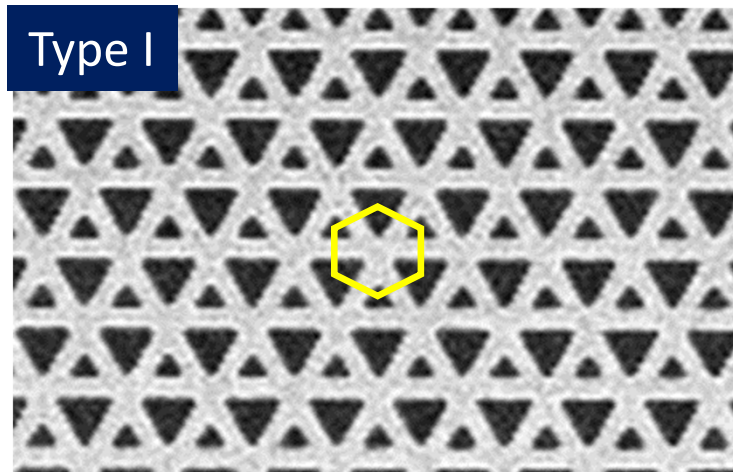


✓ フォトンバンド構造は同じだがそのトポロジカルな特徴が異なる

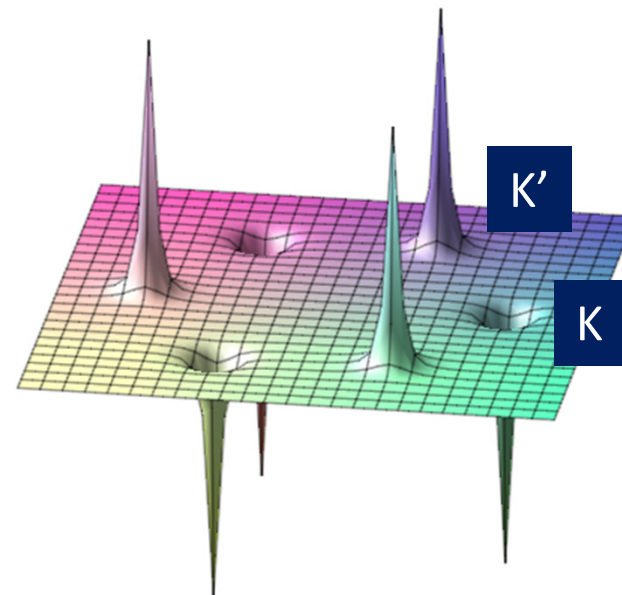
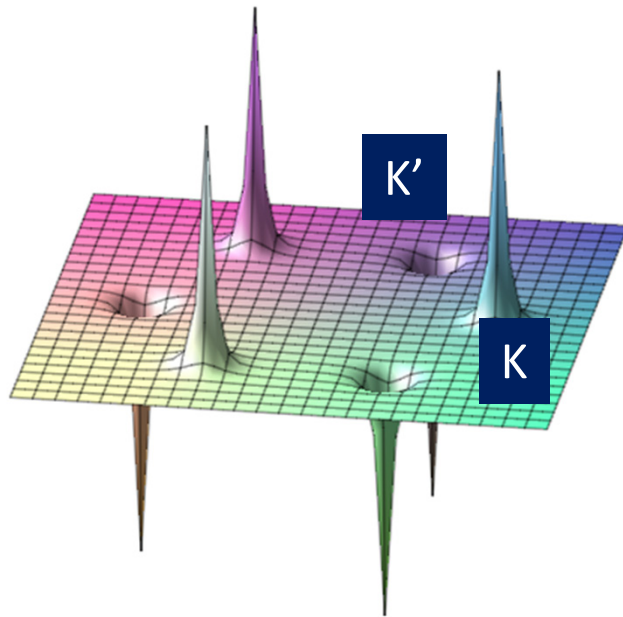


バレーフォトン結晶

半導体のみで実現可能なトポロジカルフォトン結晶の一つ

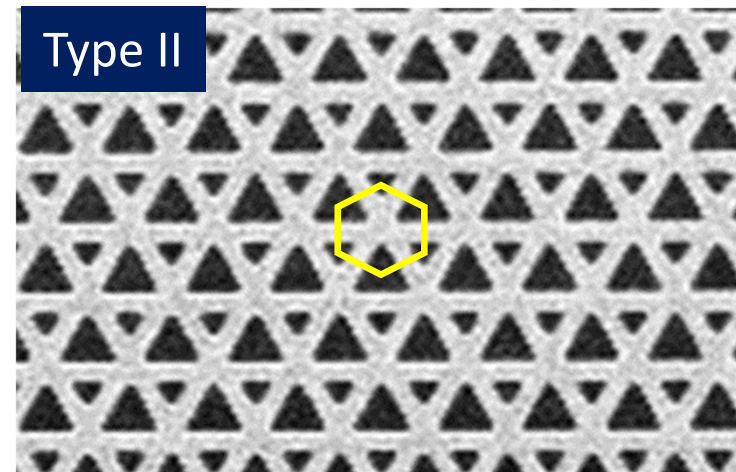
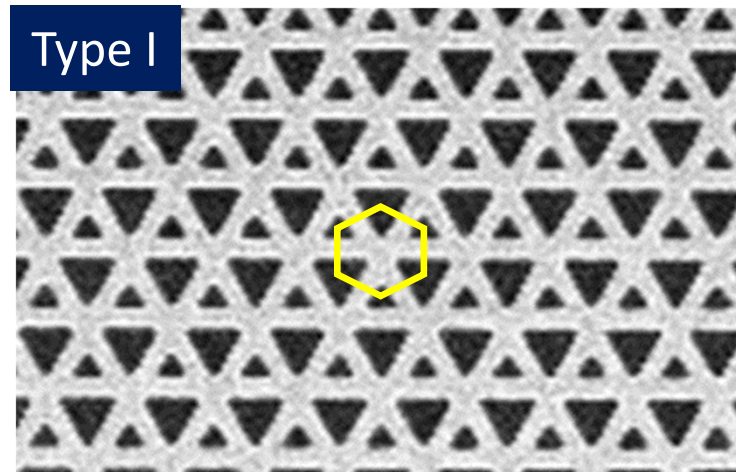


- ✓ フォトンバンド構造は同じだがそのトポロジカルな特徴が異なる
- ✓ Berry曲率(波数空間に“渦”)の符号が異なる(“渦”の向きが逆)



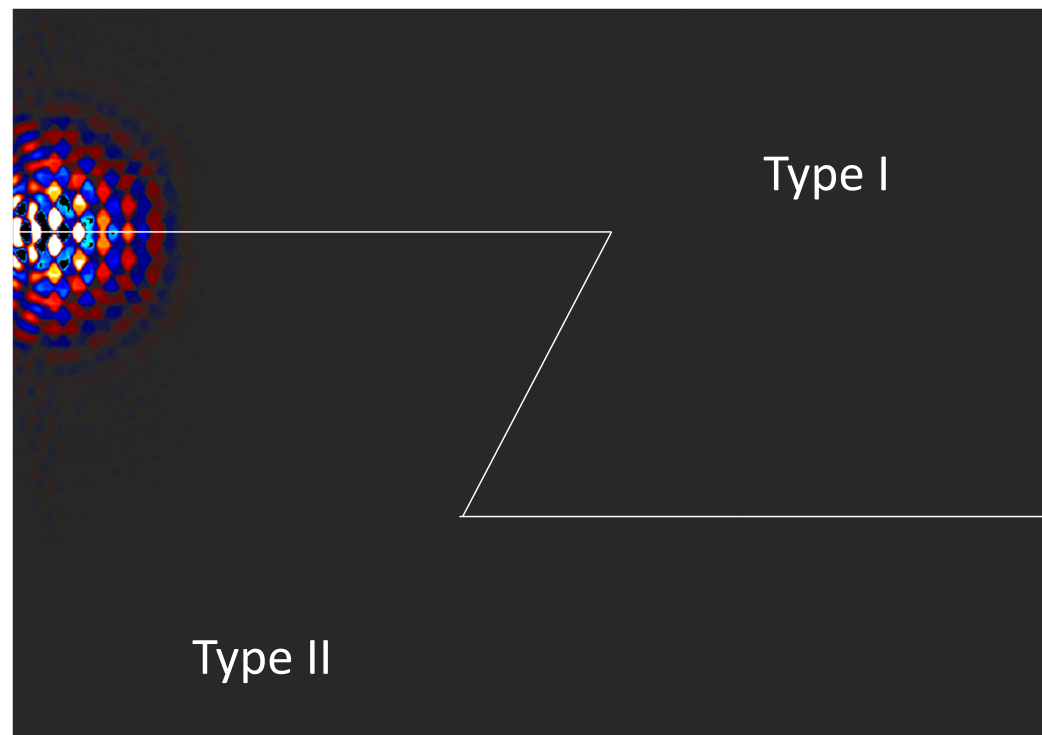
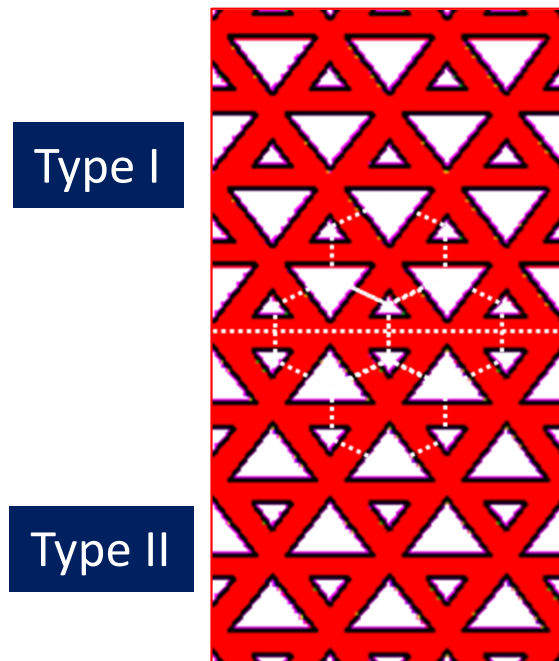
バレーフォトン結晶

半導体のみで実現可能なトポジカルフォトン結晶の一つ



2つのタイプのバレーフォトン結晶の界面にトポジカルエッジ状態

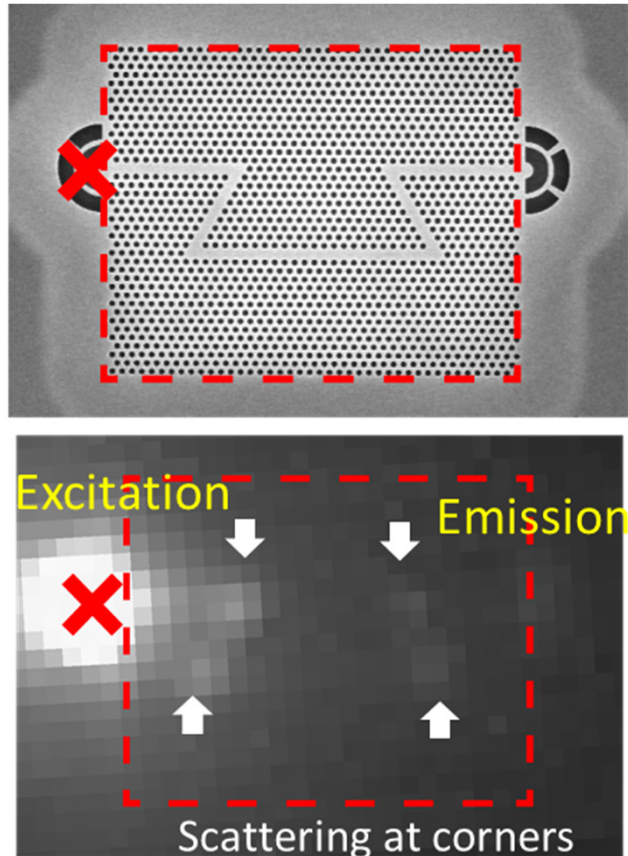
Zigzag界面



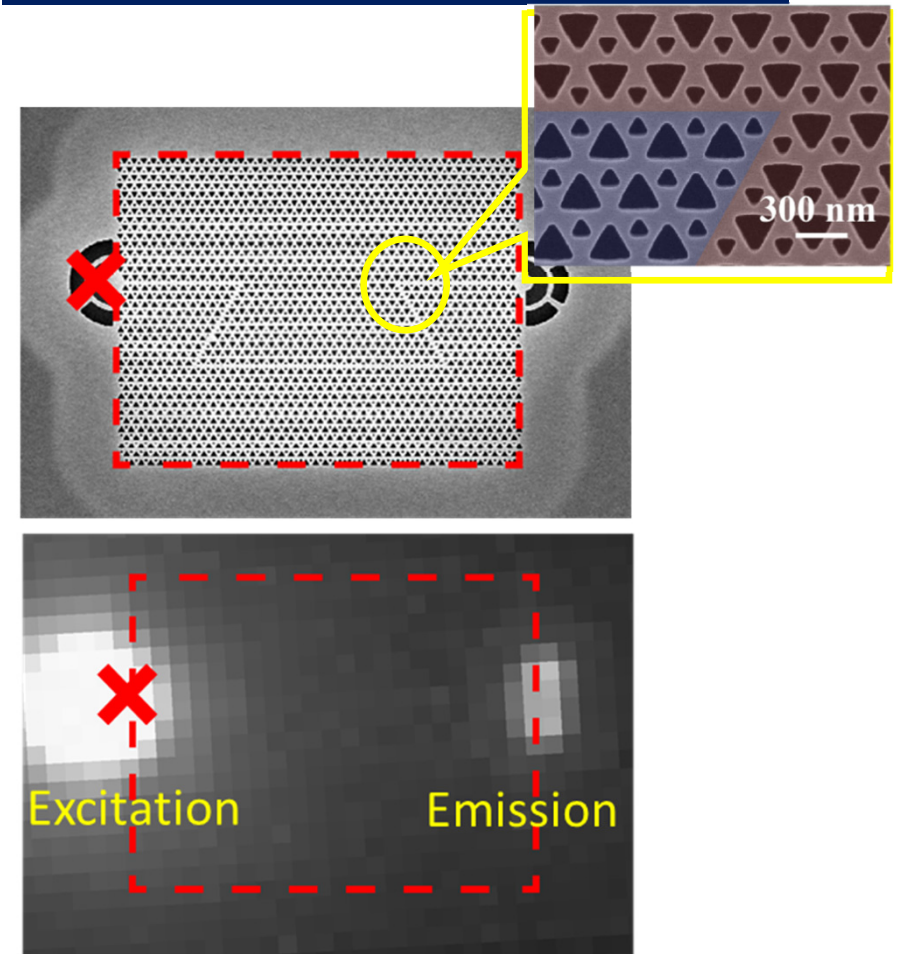
(3D-FDTD)

バレーフォトン結晶導波路

通常のフォトン結晶導波路(W1型)



バレーフォトン結晶導波路



バレーフォトン結晶: 曲がりでの散乱抑制、高い透過効率

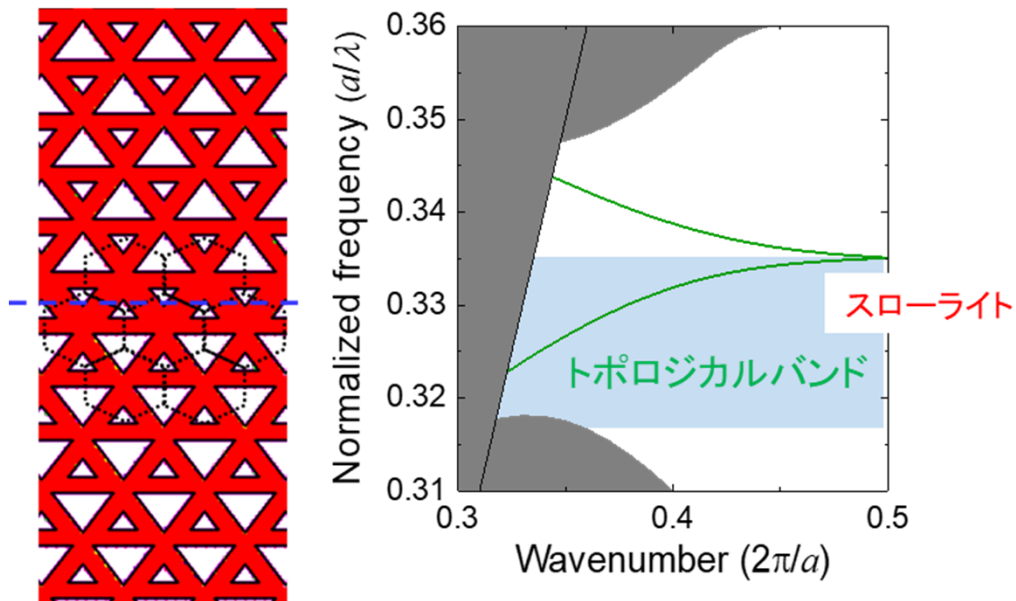
定量的評価(オランダグループによる)

S. Arora et al., Light: Sci. Appl. **10**, 9 (2021).

バレーフォトン結晶導波路は通常のフォトン結晶導波路に比べて100倍ロバスト

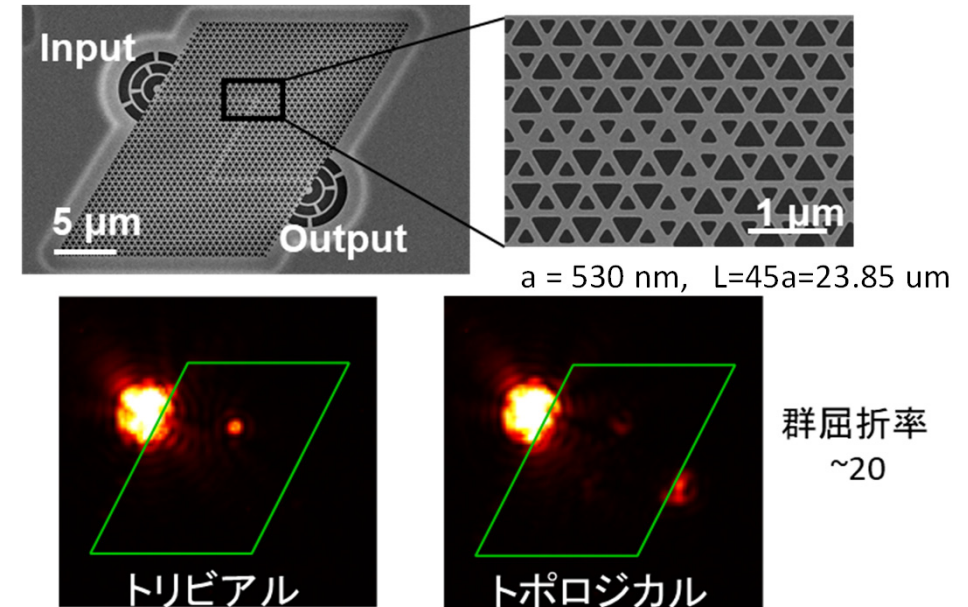
トポロジカルスローライト導波路

全誘電体トポロジカルスローライト導波路の提案



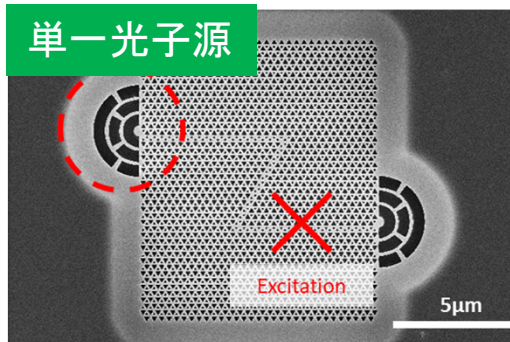
H. Yoshimi *et al.*, Opt. Lett. **45**, 2648 (2020).

Siトポロジカルスローライト導波路の実現

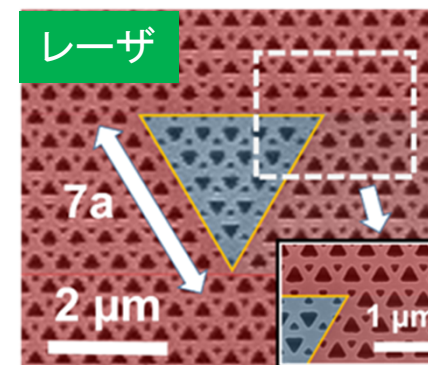
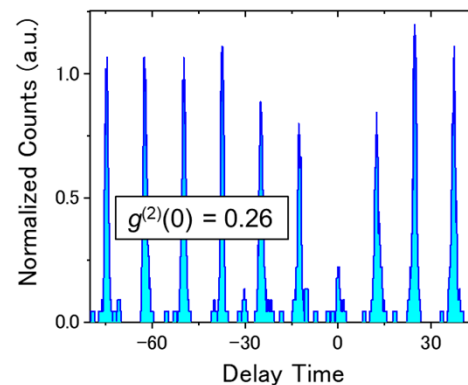


H. Yoshimi *et al.*, Opt. Express **29**, 13441 (2021).

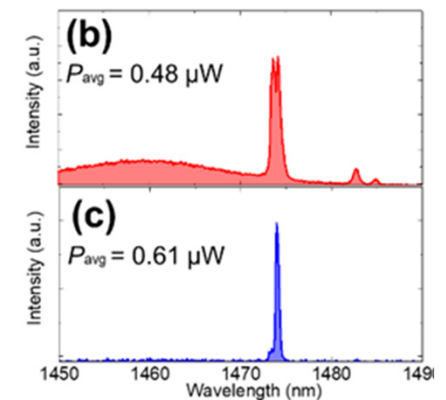
トポロジカルスローライト導波路の応用



K. Kuruma *et al.*, Laser & Photonics Reviews **16**, 2200077 (2022).



R. Miyazaki *et al.*, SSDM 2021 E-5-04 (2021)



“曲げられる”スローライトデバイスの可能性

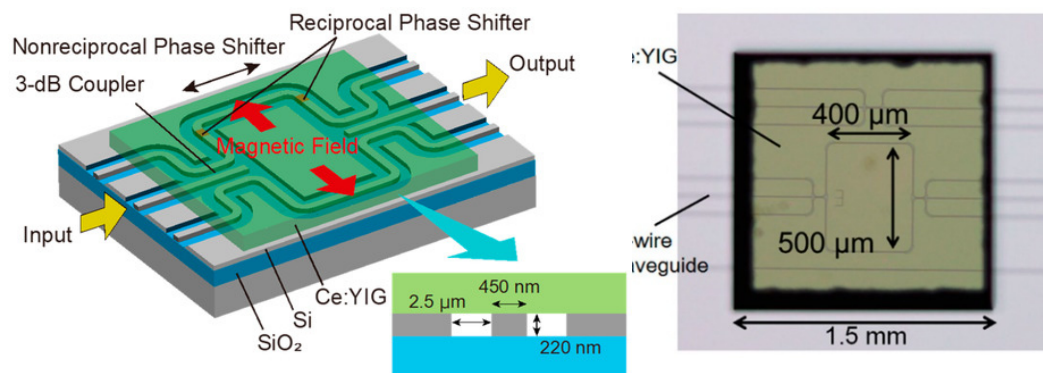
いずれも時間反転対称性を有する相反性デバイス

非相反光デバイス

時間反転対称性を破った光デバイス

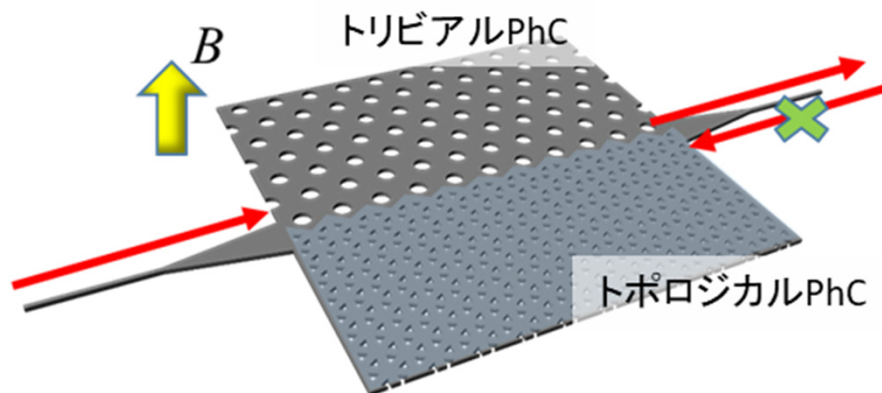
例) アイソレータ、サーキュレータなど

磁気光学効果



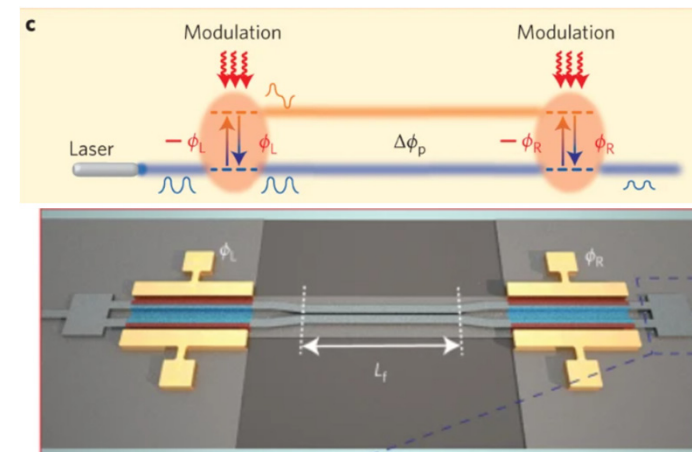
Y. Shoji and T. Mizumoto, Appl. Sci. **9**, 609 (2019).

トポロジカルフォトンクス?



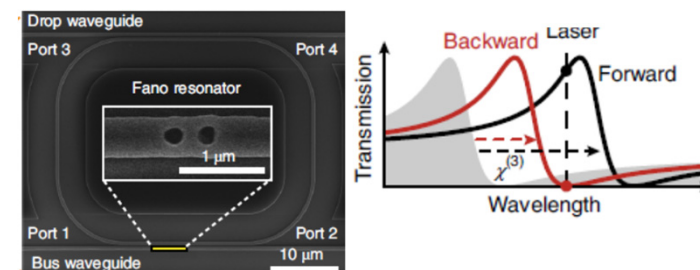
トポロジカルフォトンクスの究極目標の一つ

時間変調



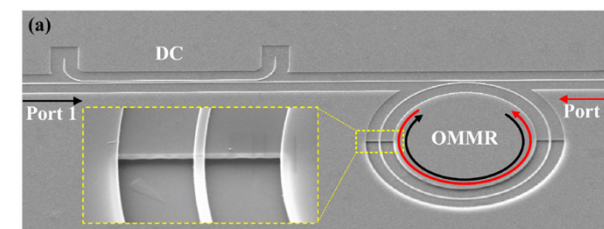
L. D. Tzuang *et al.*, Nat. Photon. **8**, 701 (2014).

非線形光学



K. Y. Yang *et al.*, Nat. Photon. **14**, 369 (2020).

オプトメカニクス



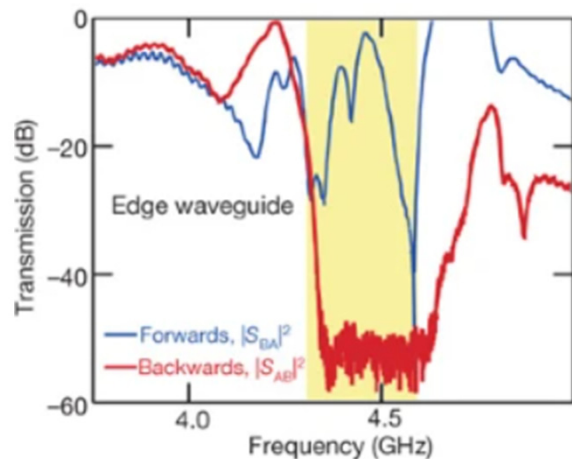
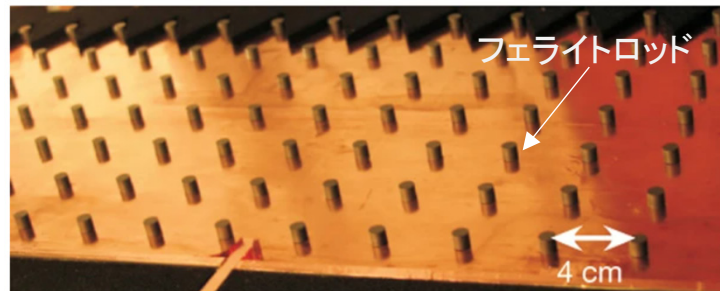
L. Ren *et al.*, ACS Photon. **7**, 2995 (2020).

光トポロジカル状態を活用した一方向性導波路への挑戦

- ✓ 時間反転対称性の破れた系で現れる**光のカイラルエッジ状態**の活用
- ✓ **磁気光学効果**を使って系の時間反転対称性を破ることが必要

マイクロ波

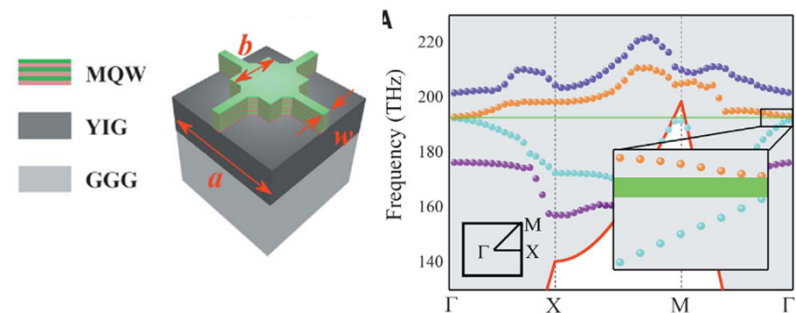
大きな磁気光学応答を示す材料が利用可能



Z. Wang et al., Nature **461**, 772 (2009).

光領域

利用可能な材料の磁気光学効果
は弱い



YIG(Yttrium iron garnet)を活用

帯域 42pm@1550nm

B. Bahari et al., Science **358**, 636 (2017).

- 詳細な特性の検討
応用の可能性の議論が進んでいない
- **広帯域カイラルエッジ状態**の実現が
求められる
- **より大きな磁気光学効果**の利用が必要

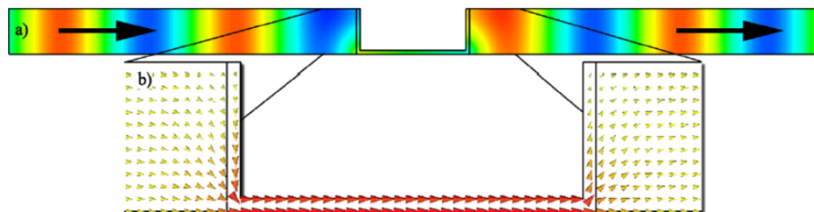
我々のアプローチ

- ✓ ENZ (Epsilon-Near-Zero) 効果による磁気光学効果の増強
- ✓ 新たな磁気光学材料の活用

ENZフォトンクス

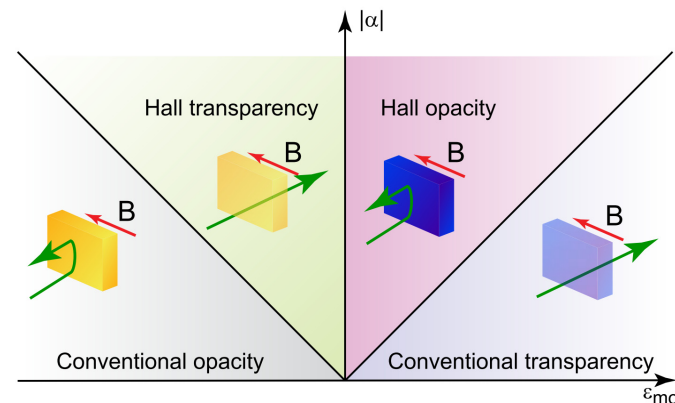
誘電率の実部を0近傍まで小さくすること(ENZ: Epsilon-Near-Zero)で
特異な光学現象が発現

特異な光伝搬



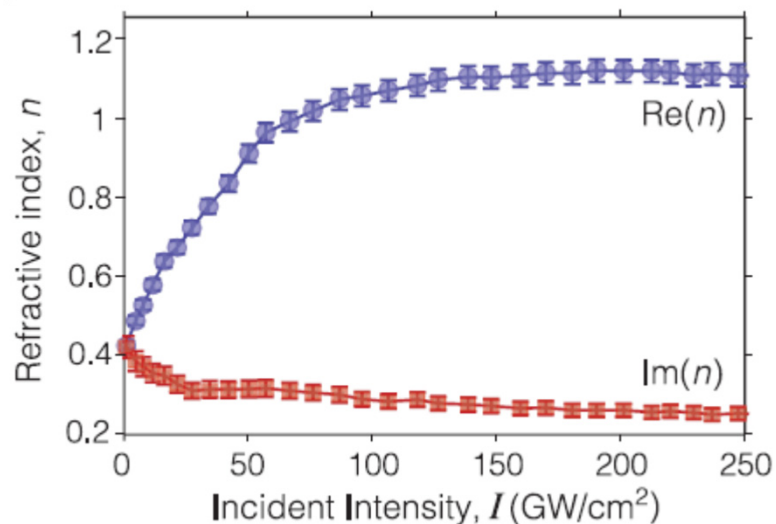
B. Edwards *et al.*, PRL **100**, 033903 (2008).

磁気光学効果の増強



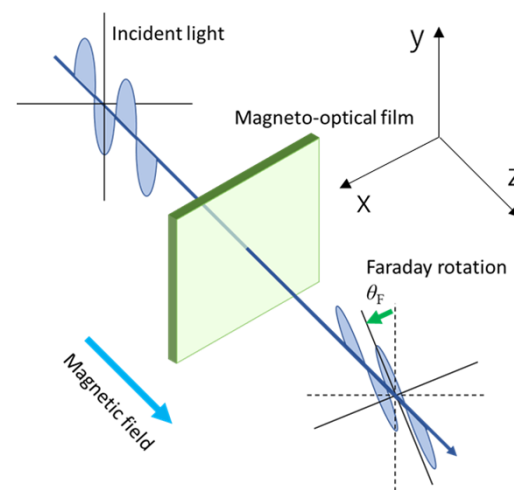
A. R. Davoyan *et al.*, PRL **111**, 257401 (2013).

非線形光学効果の増大



M. Z. Alam *et al.*, Science **352**, 795 (2016).

ファラデー効果を例に



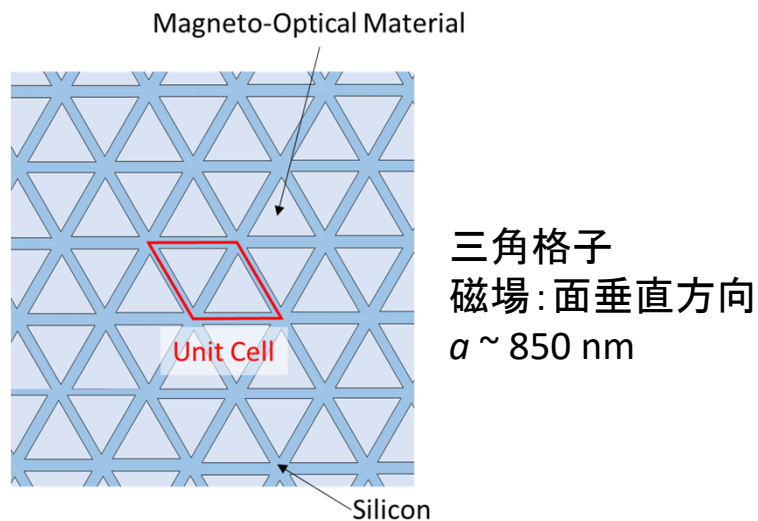
$$\theta_F = \frac{\pi L}{\lambda} \frac{i\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}}}$$

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{xx} \end{pmatrix}$$

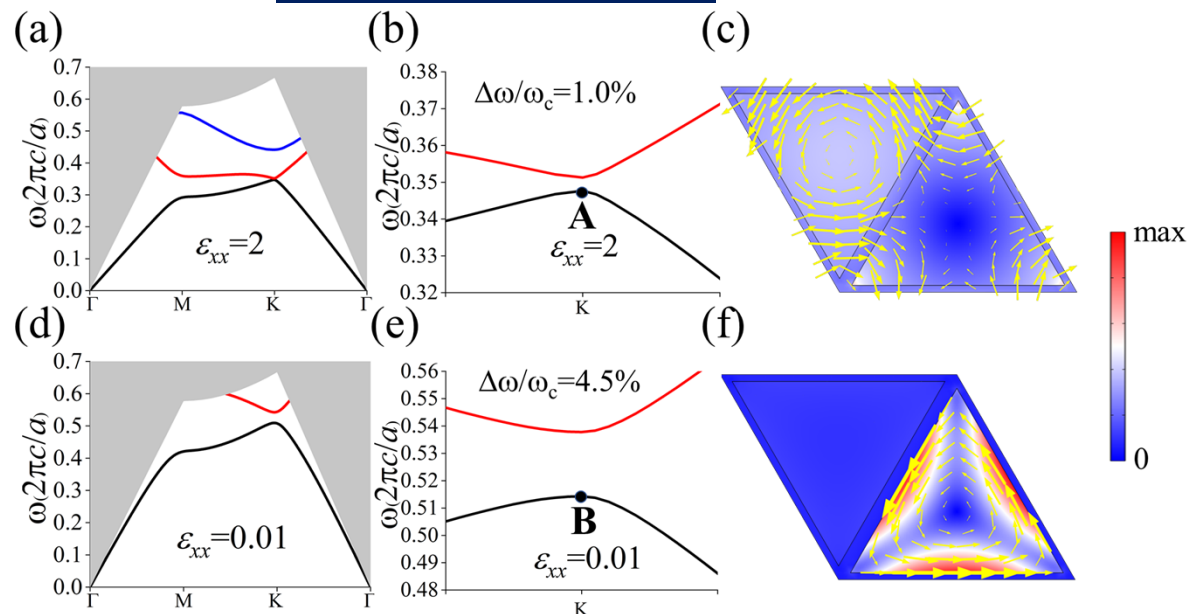
誘電率対角成分が小さくなると効果が増大

ENZ-磁気光学材料(ENZ-MO)を用いたトポロジカルフォトニック結晶

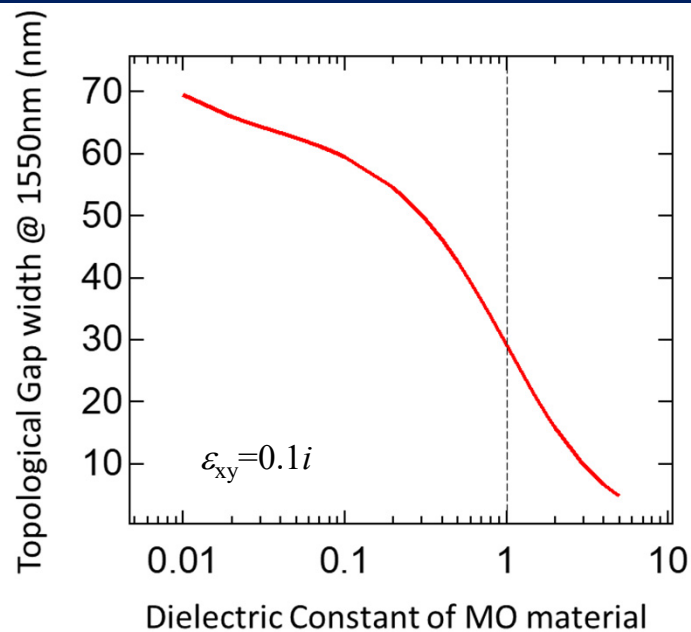
構造



バンド構造と光分布



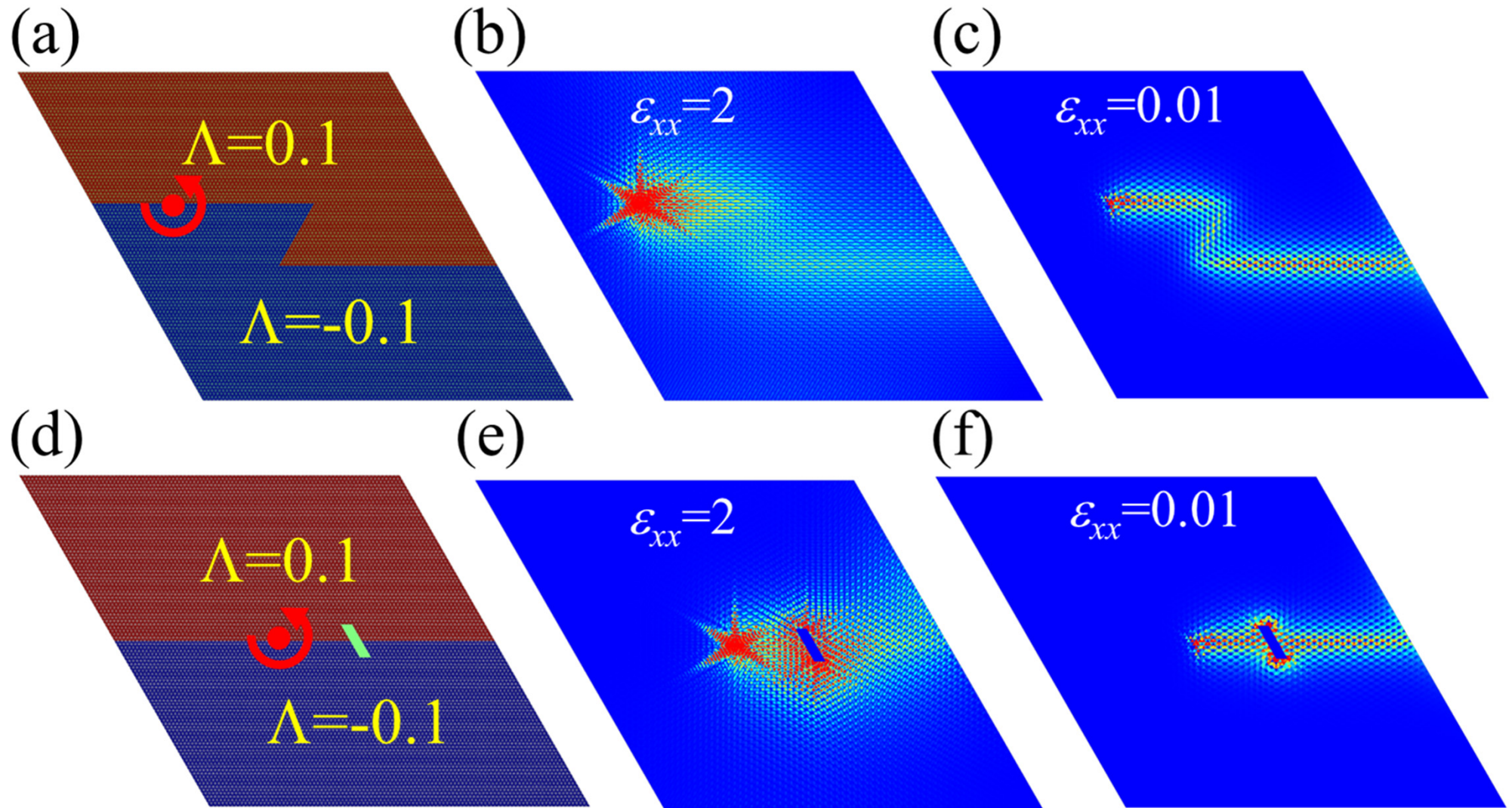
トポロジカルギャップ幅の誘電率依存性



- ✓ 低誘電率化でギャップ幅の大幅な拡大
- ✓ 誘電率0.01で約70nm(従来の1000倍以上の帯域)の動作帯域実現可能性
*非対角成分の値はナノグラニューラー膜に相当する数値を使用
- ✓ ギャップ全域にわたってカイラルエッジ状態の存在も確認

誘電率制御の有効性を理論的に示す

ENZ-磁気光学材料(ENZ-MO)を用いたトポロジカルフォトニック結晶



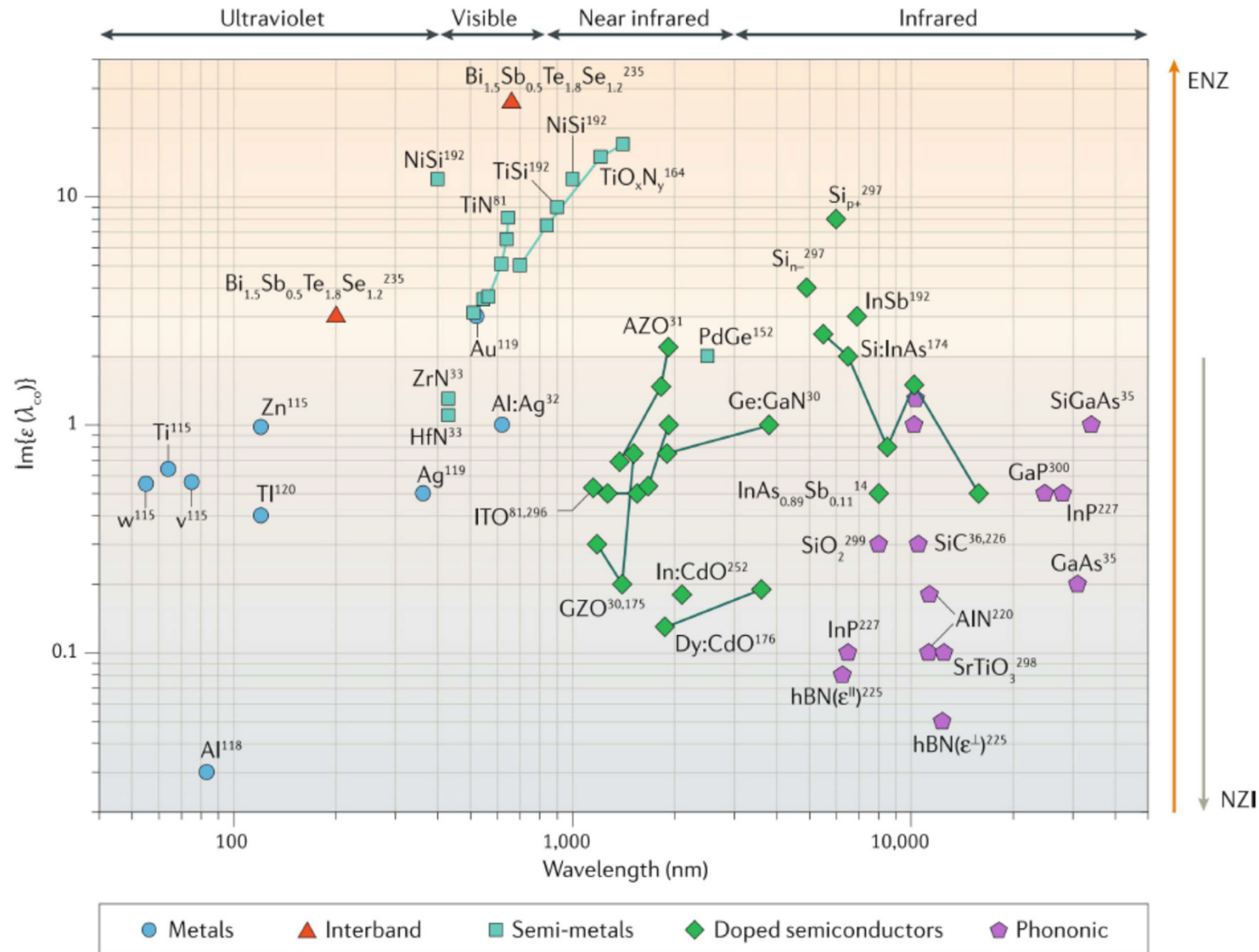
T. Liu *et al.*, ACS Photonics **9**, 1621 (2022).

誘電率対角成分の低減により、曲げや欠陥に対してより堅牢な光伝搬が可能に

ENZ効果で実際に磁気光学効果が増強されるのか？

ENZ材料

- ✓ 有効ENZ媒質: 積層構造やメタマテリアル、フォトニック結晶
- ✓ 周波数領域に応じて様々な材料が利用可能



まとめ

- ✓ トポロジカルフォトンクス: 物性物理学で進展してきた(バンド)トポロジーの概念をフォトンクス技術に適用
- ✓ 光カイラルエッジ状態の実現とその一方向性導波路への応用に対する期待
→ 光領域での実現は困難でトポロジカルフォトンクスの究極目標の一つ
- ✓ ENZ特性を示す磁気光学材料が、広帯域で機能する一方向性トポロジカル光導波路への道を拓く可能性
- ✓ ENZ特性を示す材料における磁気光学効果の増強を初めて実証
- ✓ 一方向性トポロジカル光導波路実現にむけた材料開発、素子設計、試作を推進中→ 実現できれば大きなインパクト

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。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、現・中国科学院長春光学精密機械・物理研究所)、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。