

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14634

研究課題名（和文）トポロジカルフォトリック結晶におけるヘリカルエッジ状態の観測

研究課題名（英文）Observation of helical edge states in topological photonic crystals

研究代表者

猪瀬 裕太（Inose, Yuta）

京都大学・理学研究科・特定助教

研究者番号：90634501

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、トポロジーの異なる2つのフォトリック結晶における電磁波の波動関数をテラヘルツ帯において観測した。両試料の透過スペクトルからトポロジーの違いに起因してバンド反転が生じる様子を確認し、またバンド構造に対応した周期的な電場空間像を観測することに成功した。一方で外部光の結合効率が低いために、構造境界における界面モードの空間像を明瞭に観測するまでには至らなかった。本研究ではまた、社会実装を想定した光集積デバイスの応用研究を実施した。小型テラヘルツ光源とフォトリック結晶の結合デバイスについて検証を行い、相互作用によって放射光が顕著な狭線化と安定化を示すことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フォトリック結晶の特性は、スペクトル情報を通して評価されることが多い。本研究では電磁場の波動関数を直接観測したが、これは局在モードや導波モードなど光集積デバイスに用いられる各要素を精密に評価する手法としての応用が期待できる。

また、小型テラヘルツ光源とフォトリック結晶の結合デバイスに関する検証は、将来的に社会実装が期待される高効率な光集積デバイスの創成に繋がる成果である。

研究成果の概要（英文）：We prepared two kinds of photonic crystals that have band gaps near 1 THz, and observed band inversion due to differences in the topology using terahertz time-domain spectroscopy. We directly observed the periodic spatial image of the electric field generated in the photonic crystals by real-time terahertz near-field microscope. However, our approach didn't reach an adequate level of signal intensity to get the evident image at the boundary of the two structures because of the lack of coupling efficiency of external light into the samples. In addition, we conducted the behavior of a combined device consisting of compact terahertz light source and photonic crystal. We demonstrated that the spectrum of radiated terahertz light becomes narrow and stable under the influence of self-injection into the light source.

研究分野：フォトリック結晶、共鳴トンネルダイオード発振器

キーワード：トポロジカルフォトリックス フォトリック結晶 共鳴トンネルダイオード発振器 テラヘルツ

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体は波動関数の形状特性に起因して生じるもので、固体電子系では物質界面の無散逸電流などが報告されてきた[1]。パリティが波動関数の変形に対して保たれる性質は位相幾何学の用語で「トポロジー」と呼ばれ、そのような保存量を「トポロジカル不変量」と呼ぶ。本研究で取り上げるトポロジカル絶縁体とは、バンド反転によって通常の絶縁体とは異なるトポロジカル不変量を持つ物質である。異なる不変量をもつ2つの絶縁体界面での連続遷移は禁止されているため、界面では絶縁体ではない新たな金属状態が形成される。この界面は異なる不変量を結びつける特異な状態となり、無散逸電流などの特性が現れる。

このようなトポロジカル絶縁体の発現は電磁波でも実現が期待されてきたが[2]、外部磁場や磁気物質を用いるなどデバイス応用には不向きな系が多かった[3]。ところがごく最近になり、誘電体フォトニック結晶を用いた光トポロジカル絶縁体が提案されたことで[4]、この分野は新たな段階へ進んでいる。この提案は、既存の半導体加工技術で実現可能なものであり、また小型の光集積回路などへの応用も期待できることから注目を集めている[5, 6]。

トポロジカルフォトニック結晶では、トポロジーの異なる構造間においてバンドギャップの直上・直下にあるバンドの電磁場固有モードが入れ替わるバンド反転[7]が生じる。また両構造の界面には、無散逸な伝播モードであるヘリカルエッジ状態が発現することが知られている。しかしながら、トポロジーを担うバンドエッジ状態、あるいはヘリカルエッジ状態における波動関数の空間分布を実験的に直接観測した例はない。

2. 研究の目的

本研究では、トポロジカルフォトニック結晶における電磁場の波動関数を直接観測することで、トポロジカル特性の実証を目指した。具体的には、“テラヘルツ波”の波長に対応したトポロジカルフォトニック結晶を作製して、試料内に形成された電磁場の空間分布を直接的に観測するという手段によって、トポロジカルフォトニック結晶の特性評価を実施した。トポロジーの異なる2つのフォトニック結晶における電場空間像を直接的に観測することができれば、固有状態が入れ代わるバンド反転の様子を波動関数によって観測することになり、また両構造の界面において形成されるヘリカルエッジ状態の様子も直接的に観測することにつながる。一般的に、フォトニック結晶の特性は、スペクトル情報を通して評価されることが多い。フォトニック結晶内における電磁場を直接観測するという本研究のアプローチは、局在モードや導波モードなど光集積デバイスに用いられる各要素を精密評価する手法としての応用が期待される。

また本研究では、フォトニック結晶を用いた光集積デバイスの特性についても評価を実施した。小型テラヘルツ光源とフォトニック結晶を組み合わせた系を検証することによって、新たなテラヘルツ結合デバイスの動作を理解することを目指した。この応用研究は、将来期待される光集積デバイスの社会実装に貢献するものである。

3. 研究の方法

本研究で用いた試料は、図1に示すようなスラブ型フォトニック結晶である。シリコン薄膜に正三角形の空孔を空けた構造で、図の a_0 は単位格子サイズ、 R は単位格子中心から6つの空孔中心までの距離である。単位格子を図に示すような大きな六角形にとることによって、 $R=a_0/3$ において回転対称性に起因したクラマース縮退が誘起され、ディラック型の分散関係が現れる。このように大きな単位格子をとった上でさらに R のみを変調すると、ギャップレスであった状態にバンドギャップが生じ、電子系での p 軌道や d 軌道に相当する電磁場モードが発生する。 R を小さく $R<a_0/3$ とした Shrunken 構造では、通常の(Trivialな)バンドギャップが生じる。一方で R を大きくして $R>a_0/3$ とした Expanded 構造では、トポロジカル絶縁体が発現する。すなわち、 R の値を調整することによって、トポロジカル不変量が異なる構造を作製することが可能である。図のように両構造を接触させた状態をつくると、その構造界面にはヘリカルエッジ状態が誘起される。

フォトニック結晶の材料には薄膜シリコンウェハを使用し、フォトリソグラフィと深掘りドライエッチングによって加工することで、テラヘルツ帯に対応する試料を作製した。フォトニックバンド構造を計算することによって試料設計を行ったが、計算には汎用性の高い電磁場解析手法である3次元 FDTD 法[8]を用いた。試料の透過スペクトルの測定にはテラヘルツ時間領域分光法を用い、電場の空間分布測定には図2に示すような実時間テラヘルツ近接場顕微鏡[9]を使用した。図のようにフォトニック結晶と電気光学結晶(LiNbO₃)を接近させた状態でテラヘ

ルツ波を入射し、EO サンプリングと CMOS カメラを組み合わせることで、電場分布の時間変化が測定できる。取得した電場の時空間情報を解析することによって、最終的に周波数分解された電場空間分布を得ることができる。

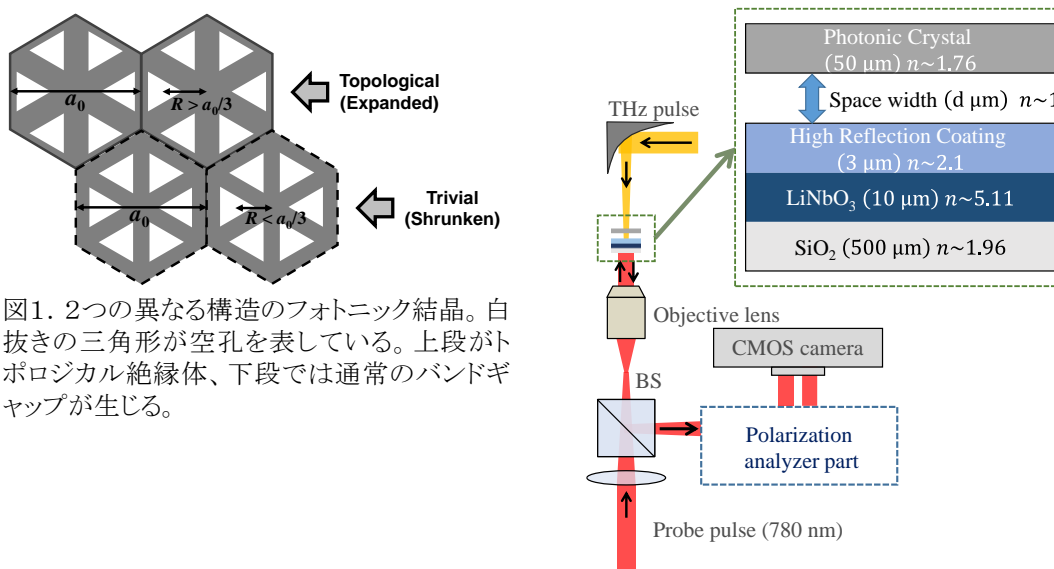


図2. 実時間テラヘルツ近接場顕微鏡の概略図。

4. 研究成果

本研究で作製した試料の顕微鏡像を図3(a)に示す。三角形の穴形状が丸みを帯びるとバンド構造が敏感に変化し、理論との比較が難しくなることが懸念された。しかしながら、加工法として採用した深掘りドライエッチングによって、真っ直ぐに精度良く穿孔することができた。

3次元 FDTD 法を用いて計算したフォトニックバンド構造を図3(b)に示す。 Γ 点において記載している(p, d)は、双極子モード(電子系での p 軌道)および四重極子モード(電子系での d 軌道)に相当する電磁場モードが固有状態となっていることを表している。試料外部から直線偏光の平面波を入射した場合、双極子モードとの結合効率は高いのに対して、対称性の関係から四重極子モードとの結合効率は低い。図3(c)には、テラヘルツ時間領域分光法によって両試料の透過スペクトルを取得した結果を示す。図には垂直入射した場合の結果を示しており、これはバンド構造における Γ 点を励起したことに相当するが、計算したバンド構造の周波数とよく一致していることが分かる。

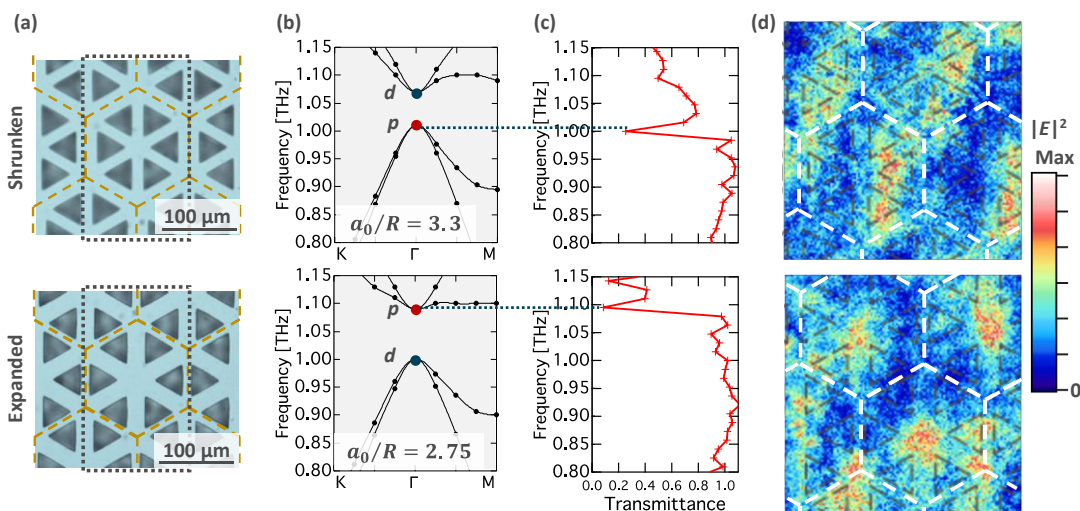


図3. (a) 作製したフォトニック結晶の顕微鏡像、(b) 計算から得たフォトニックバンド構造、(c) 垂直入射での透過スペクトル、(d) バンドギャップ近傍における電場強度分布。いずれも、上段と下段は Shrunken 構造および Expanded 構造を表している。

時空間分解測定から得られた電場空間像の結果を図3(d)に示す[10]。周波数分解能が足りないために上下のバンド端を分離することはできなかったが、試料構造に起因した周期的な電場空間像を観測することに成功した。外部光と結合する双極子モードの電場分布は、Shrunken 構造と Expanded 構造では異なることが数値計算から分かっているが、図における分布の違いはそれを反映していると考えられる。その一方で、空間分布の周期性は少し乱れているように見える。これは、外部光を集光入射していることおよび周波数分解能が不足していることから、 Γ 点のバンド端以外の状態も合わせて観測されていることが原因であると推察される。一方で、両構造を接合させた界面近傍の空間像を観測したが、外部光の結合効率が低いため界面を伝播する様子を明瞭に観測するはできなかった。フォトニック結晶の構造にあえて欠陥を入れることで結合効率の上昇が見込めることが理論的には分かっているが[11]、研究実施期間内では実験的な追検証には至らなかった。スペクトル情報に加えて、電磁場の波動関数を直接観測するという本研究のアプローチは、光集積デバイスに用いられる局在状態や導波状態などを精密に評価する手法のひとつとして今後応用が期待される。

本研究ではさらに、小型テラヘルツ光源とフォトニック結晶を結合させた光共振器デバイスに関する検証を行った。その結果、光源が自己注入による影響を受けて、放射されるテラヘルツ波のスペクトルが顕著な狭線化と安定化を示すことが明らかになった[12]。この応用研究は、将来期待される光集積デバイスの社会実装へと繋がる成果である。

<引用文献>

- [1] D. J. Thouless et al., Phys. Rev. Lett. 49, 405 (1982).
- [2] S. John, Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987).
- [3] L. Lu et al., Nat. Photonics 8, 821 (2014).
- [4] L.-H. Wu et al., Phys. Rev. Lett. 114, 223901 (2015).
- [5] M. A. Gorlach et al., Nat. Commun. 9, 909 (2018).
- [6] S. Barik et al., Science 359, 666 (2018).
- [7] S. Barik et al., New J. Phys. 18, 113013 (2016).
- [8] K. Sakoda et al., Phys. Rev. B 64, 045116 (2001).
- [9] F. Blanchard et al., Opt. Express 19, 8277 (2011).
- [10] K. Takiguchi, Y. Inose, et al., the 8th Optical Terahertz Science and Technology, 2019.
- [11] 雨宮智宏 他, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会.
- [12] 猪瀬裕太 他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 猪瀬裕太, 平岡友基, 有川敬, 田中耕一郎
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオード発振器における自己注入の等価回路計算
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪瀬裕太, 平岡友基, 有川敬, 田中耕一郎
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオード発振器における自己注入の回路シミュレーション
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takiguchi, Y. Inose, T. Arikawa, and K. Tanaka
2. 発表標題 Direct observation of the band topology in photonic crystals by terahertz spectroscopy
3. 学会等名 The 8th Optical Terahertz Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ

<http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------