

一方通行の光回路をナノ加工したシリコンで実現

[1] 要旨

光波のトポロジカルな性質を研究する分野はトポロジカルフォトンクスと呼ばれ、近年、世界規模で研究が急進展中である。本研究では、有限要素法による試料設計に基づいて、汎用性の高いシリコン系素材をナノ加工してトポロジカルフォニック結晶を作製した。トポロジカルな性質の異なる2種類のフォニック結晶の境界上で一方通行の光回路の実現し、高分解能赤外反射測定で実証された。

[2] 本文

自然界には原子が規則的に配列した各種の結晶が存在する。例えば、ダイヤモンドや食塩 (NaCl)、あるいは、氷の結晶、シリコンやゲルマニウムのような半導体の結晶、等々である。これらの結晶は、構成元素の種類や配列の仕方によって絶縁体や半導体、金属や超伝導体、あるいは、磁性体といった、それぞれの結晶に特有な性質を示す。多くの場合、それらの特性を担っているのは電子であり、結晶中での電子の流れ易さ等のミクロな性質が結晶全体の性質を特徴づけている。

規則的な配列で制御できるのは電子ばかりでなく、光の波（電磁波）も同じような手法で制御できる。光の波を対象とする規則的な配列はフォニック結晶と呼ばれる。ただし、電子波の波長（ドブロイ波長）がおおむねオングストローム (10^{-10}m) 程度であるのに対して、光波の波長がマイクロン (10^{-6}m) 程度であることから、フォニック結晶の単位構造は、自然界の結晶の場合よりも1万倍ほど大きい。図1は、本研究で用いられたフォニック結晶の電子顕微鏡写真で、シリコン薄膜のナノ加工で作製したものである。単位構造の大きさは約2マイクロンである。

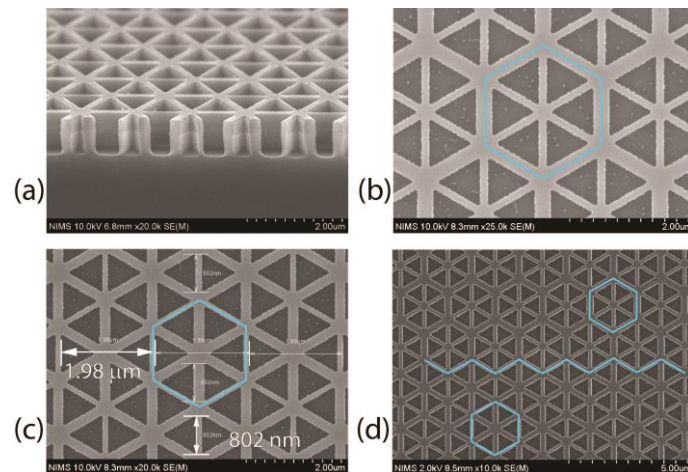


図1. トポロジカルフォニック結晶の電子顕微鏡写真

- (a) 破断面（側面）の鳥観図。白く見えるのはSi、その下の灰色はSiO₂。
- (b) 通常の（トポロジカルに自明な）フォニック結晶の上面図。
- (c) トポロジカルに非自明なフォニック結晶の上面図。青く囲んだのは単位構造。
- (d) 2種のフォニック結晶の境界（青色のジグザグ線）に出来た一方通行光導波路。

さて、2016年のノーベル物理学賞は、「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績により、David J. Thouless、F. Duncan M. Haldane、J. Michael Kosterlitzの3氏に贈られた。物質のトポロジカルな特徴は、種々の興味使い物性発現につながっている。

通常の結晶では、もし、電子が右に流れることができるのであれば、左にも流れることができる。しかし、トポロジカルな性質の異なる2種類の結晶の境界上では、スピンの上向きの電子は必ず右方向へ流れ、下向きの電子は必ず左方向へ流れる、というような一方通行が実現する。同じように、トポロジカルな性質の異なる2種類のフォトニック結晶を貼り合わせると、その境界上では、右円偏光（‘スピン’が上向きに相当）の光波は必ず右方向へ進み、左円偏光（‘スピン’が下向きに相当）の光波は必ず左方向へ進む、といった一方通行の光導波路（光回路）が実現する。

本研究では、このような一方通行の光回路を隣接する2種類のフォトニック結晶の境界上で実現した。具体的には、有限要素法による計算でフォトニック結晶を設計し、電子線リソグラフィで厚み0.4ミクロンのシリコン薄膜をナノ加工してフォトニック結晶を作製した。フォトニック結晶の特性は、自作した高分解能赤外反射測定装置で検証された。

本研究のように、光波のトポロジカルな性質を研究する分野はトポロジカルフォトンクスと呼ばれ、近年、世界規模で研究が急進中である。その背景には、①マイクロ波から光波領域までの広い波長範囲で実現が可能、②ナノ加工のCADデータを書き換えるだけで試料設計が可能なので、新しいアイデアを試しやすい、③電子では測定の難しい性質が、光波では容易に測定できる場合がある、④工学的応用にも近い、といった理由がある。このような状況の中で、本研究は、汎用のシリコン系素材を用いてトポロジカルフォトニック結晶を実現し、高分解能反射測定で一方通行光回路の特性などを直接検証したという意義がある。フォトニック結晶のナノ加工の精度は高く、設計値と実測値はたいへん良い一致を示した。本研究では、トポロジカルフォトニック結晶の最も基本的な特性の実証を行ったが、材料系の汎用性が高いことから試料設計の自由度も大きく、工学的応用を含めて、今後いっそうの発展が期待される。

原論文（2023年10月19日公開済）

[Design and Observation of Topological Band Gaps and Edge Modes of SOI Photonic Crystal Slabs in the Mid-infrared Range](#)

A. Begum, Y. Yao, T. Kuroda, Y. Takeda, N. Ikeda, Y. Sugimoto, T. Mano, and K. Sakoda

J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 114402 (2023).

<情報提供：迫田 和彰（物質・材料研究機構、NIMS 特別研究員）>