

胡 暁

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
MANA 主任研究者

人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発

§ 1. 研究成果の概要

誘電体円柱配列の位置を蜂の巣格子から僅かに調整するだけで、軌道角運動量によって司られるトポロジカルフォトンクス状態が実現できることが理論的に解明され、トポロジカル単一方向電磁伝搬が最近マイクロ波における原理実証実験によって確認されている。本研究プロジェクトは、チームメンバーの独創的な理論研究成果、各種光通信デバイスをはじめとしてメタマテリアルや磁気光学の光能動デバイス研究における世界屈指の経験と技術、数十ナノメートル寸法の世界最高レベルの超微細の窒化ガリウムナノ結晶作製技術を最大限に生かして、格段に優れたトポロジカルフォトンクス状態の創成と新規フォトンクス機能の探索を目指している。

プロジェクトの初年度にあたる 2018 年度では、次のような研究成果を得ている。

(1) 新しいフォトニックトポロジカル絶縁体の理論解明: ジャイロ物質の光学パラメータを調整すれば、電磁波の電場成分と磁場成分がそれぞれ電子のスピンアップ状態とスピンドアウン状態を模擬できることを理論的に明らかにした。この理論に従って設計したトポロジカルフォトンクス結晶における擬スピン電磁・光トポロジカル単一方向伝播を、計算機シミュレーションを通じて確認した[代表的な原著論文1]。この研究成果はトポロジカルフォトンクス状態の多様性を示し、トポロジカルフォトニック結晶の設計に新しい示唆を与えている。

(2) トポロジカルレーザーの動作原理の理論解明: 蜂の巣トポロジカルフォトニック結晶と自明なフォトニック結晶の界面に現れるリング共振器モードを利用したトポロジカルレーザーの構築に向けた基礎理論の研究を行った。リング共振器モードのトポロジカル特性によって、安定な単一モードレイジングと高いレイジング効率等の優れた特性が得られることを理論的に解明した。この研究成果は今後のトポロジカルレーザーの作製及び新規フォトンクス機能創成の基礎となる。

(3) トポロジカル伝送路の理論解析: 研究代表者により提案された C_{6v} 対称性を有する誘電体が蜂の巣格子状に配列されたフォトニック構造を用いることで、光渦伝送が可能な Si 系トポロジカルエッジ伝送路の設計を行った。特に、本構造を特定の指針に基づいて設計することで、 $l = -2$ から l

= +2 までのチャージ数を持った光渦を一意的に伝送可能であることを示した。

(4)トポロジカルスプリッタ/コンバイナの提案と理論解析: トポロジカルエッジ伝送路におけるカプラ構造の提案を行った。素子は、二つのトポロジカル伝送路の間に 12 個の単位セルで構成されたナノカプラを配置した構造となっている。ナノカプラ領域に、自明なフォトニック結晶からトポロジカルなフォトニック結晶の間に当たるバンド構造を有する適当なトポロジカル構造を配置することで、出力の分配比を連続的に調整可能であることを明らかにした。

(5)Si 光回路上にトポロジカル構造を導入するための作製プロセス構築: SOI ウェハ上において蜂の巣型フォトニック結晶の作製条件を検討した。CAD によるパターン形状と電子ビーム描画装置の露光条件をセットとして、出来上がった全ての構造を走査電子顕微鏡で観測することで、最終的にトポロジカル構造作製のためのプロセステーブルを完成させた。併せて、将来的なトポロジカルレーザの作製に必要な Si 光回路と III-V ハイブリッド構造についての検討を行った[代表的な原著論文 2]。

(6)ICP エッチングと GaN の熱分解エッチングを用いて AlGaIn メンブラン型トポロジカル PhC 構造の試作を行い、エアブリッジ型メンブラン PhC 構造の形成に成功した。

(7) 高温減圧水素雰囲気下での熱分解をナノ構造形成に利用する水素雰囲気異方性熱エッチング(HEATE)法による GaN の高アスペクトナノ加工技術のエッチング条件依存性を探索し、幅 20nm、深さ 1500nm という高アスペクト比(=75)極微細ナノレンチ構造や、直径 55nm、深さ 990nm の円形ナノホールアレイの作製に成功した。

(8)窒化物系エアホール型トポロジカルフォトニック結晶の作製に必要とされる一辺 100nm 以下の微細三角空孔アレイパターンの電子ビーム描画条件を検討した。描画パターンの工夫により、頂点部や辺部の曲がりを抑制して正三角形に近い形状を得るための描画条件を得た。

(9)HEATE 法を用いて直径の異なる InGaIn/GaN ナノピラーアレイを作製し、InGaIn/GaN 量子井戸構造の InGaIn ディスク直径依存性を評価した。微細化に伴う PL 発光強度の増加現象と表面非発光再結合による強度の減少を系統的に評価した。直径 150nm 以下の極微細領域では表面非発光再結合が支配的になり、発光効率が急速に低下することが、飽和オゾン水処理による表面酸化膜形成により、発光強度が著しく増大することを確認した。

【代表的な原著論文】

1. Xiao-Chen Sun, Cheng He, Xiao-Ping Liu, Yi Zou, Ming-Hui Lu, Xiao Hu and Yan-Feng Chen, "Photonic Topological States in a Two-Dimensional Gyrotropic Photonic Crystal", Crystals vol. 9, 137, 2019
2. Xu Zheng, Tomohiro Amemiya, Zhichen Gu, Kouichi Saito, Nobuhiko Nishiyama, Shigehisa Arai, "Design of GaInAs/InP membrane p-i-n photodiodes with back-end distributed Bragg reflector," Journal of Optical Society of America B, vol. 36, 1054-1061, 2019

§ 2. 研究実施体制

(1) 胡グループ

① 研究代表者: 胡曉

(物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点 MANA 主任研究者)

② 研究項目

- ・人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発の理論研究
- ・新奇トポロジカル現象と特性の理論研究
- ・トポロジカルレーザーの動作原理の理論解析

(2) 雨宮グループ

① 主たる共同研究者: 雨宮智宏

(東京工業大学科学技術創成研究院未来産業技術研究所 助教)

② 研究項目

- ・トポロジカルフォトニクス of 光通信デバイス応用の実験研究
- ・トポロジカル光回路の実現
- ・トポロジカルフォトニクスを利用した近赤外トポロジカルレーザーの実現
- ・トポロジカルフォトニクスを利用した光渦多重素子の実現

(3) 菊池グループ

① 主たる共同研究者: 菊池昭彦

(上智大学理工学部機能創造理工学科 教授)

② 研究項目

- ・GaN 系ナノ結晶による可視光領域トポロジカル状態の実験研究
- ・GaN 系極微細ナノ構造作製技術の開発と発光特性の評価
- ・GaN 系トポロジカル可視光レーザーに向けたデバイス化技術の開発