

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能
を有する材料・デバイスの創出」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者：胡 暁
(物質・材料研究機構 ナノアーキテクト
ニクス材料研究センター 特命研究員)

§1 研究実施の概要

(1)実施概要

本研究は代表者の世界に先駆けた半導体トポロジカルフォトニック結晶(PhC)創出に関する理論をベースに、ナノ加工技術を活用して新規トポロジカル光機能探索とデバイス開発を目的とする。プロジェクト期間中、理論グループと実験グループの密接な連携より、多くの優れた研究成果を輩出させた。特に、新規トポロジカル共振器面発光レーザーTCSELの開発や、トポロジカル PhC における新奇ホイヘンス-フレネル現象の発見及びトポロジカル全光干渉計スイッチの理論とデバイス加工による実現、従来のシリコン光回路の一部を蜂の巣型トポロジカル PhC に置き換えることによって新規光機能を実現する新しいコンセプト、トポロジカルフォトニック集積回路(TPICs)を提案し、それに必須となる「伝送」「入出力」「分岐」を担う一連の要素技術、およびそれらを用いたデバイスを開発し、さらに可視光域でのトポロジカル PhC ナノ加工とデバイス基礎技術を築いた。主な研究成果の詳細は以下の通りである。

胡グループは、①蜂の巣型トポロジカル PhC における新規光閉じ込め効果を見出し、実験家との協働で優れた垂直指向性を持つ微細トポロジカル共振器面発光レーザーTCSELの開発に成功した。室温下のレーザー発振閾値は市販の半導体レーザーダイオードと同程度に小さく、サイドモード抑制比等の特性がIEEE規格を満たす世界初のトポロジカルレーザーになっている;②トポロジカルリング共振器モードがレーザー発振での優位性を解明し、トポロジカル PhC 内の擬スピン/リング共振器軌道角運動量と、放射されたレーザー光の円偏光/光渦度との間の一対一対応を明らかにした。該当理論は、ドイツ・イスラエル合同チームが成功した世界記録となる30個VCSELに亘るコヒーレントなレーザー発振実験の理論指針になっている;③鏡映対称性と時間反転対称性を有するトポロジカルフォトニック PhC の中で、渦光源の周りに逆向きの大きな光渦を形成する特異な光渦伝搬様式を発見した。この新奇なホイヘンス-フレネル現象が、トポロジカルフォトニック結晶が示すディラック周波数分散関係の負の質量と深く関連し、長らく知られた光の負の屈折と双対をなすものである;④世界に先駆けてトポロジカル光導波路モード間の干渉効果を解明し、新規全光干渉計スイッチの理論を築いた。該当現象は量子スピンホール効果のスピン-運動量ロッキング特性に深く関わり、トポロジカルフォトニック結晶のスピンノール位相、幾何学位相及び外部より制御可能な電磁波相の三者の協奏によって発現する。本研究成果はトポロジカル特性研究の新しい局面を拓き、光電融合による新しい光機能探索に寄与することが期待される。

雨宮グループは、①光集積回路において、水平・垂直両方向からトポロジカル系への高効率な結合を可能とする“トポロジカルコンバータ”と“トポロジカルパーティカルカプラ”の提案および実現;②トポロジカル界面状態を用いることで光の内部自由度(光スピンと軌道角運動量)を保ったまま、任意の強度で信号を合成分波させる“トポロジカルスプリッタ/コンバイナ”の提案と実現;③トポロジカル界面における単位胞内の位相変化に着目した超小型の“トポロジカルスイッチ”の提案と実現;④特定のトポロジカル情報をもった信号を一意に伝送させるトポロジカルエッジ伝送路を提案とそれを用いた“無電力光渦合成分波器”の提案と作製;⑤トポロジカルレーザーの基礎検討;⑥各種フォトニック構造のバンドを高速で測定する“フォトニックバンド顕微鏡”の開発と実用化、フォトニックバンド情報を用いて観測対象の撮像を行う“フォトニックバンドイメージング”の開発と実用化、⑦トポロジカル光回路を内蔵した利便性に優れた“顕微円二色性分散計”の考案・開発を行った。これらの成果は、トポロジカルフォトニック集積回路を実現する上で不可欠なものであり、将来的な光電融合へ向けての礎となり得るものである。

菊池グループは、①独自の水素雰囲気異方性熱エッチング法を用いる窒化物半導体 PhC デバイスの極微細ナノ加工技術を格段に向上させ、②可視光域に対応する GaN 系物質のフォトニック構造の極微細ナノ加工に成功し、蜂の巣構造の制御によるバンド反転に伴う光トポロジーの発現を示した;③赤色光と黄色光のトポロジカル導波路伝搬の実空間観測に成功した;④可視光域トポロジカルレーザーの発振に向けて3D-FDTD法により共振器サイズによる共振モードの変化とQ値の関係を明らかにするとともに、緑色発光 InGaN/GaN 多重量子井戸を含むトポロジカル共振器構造を試作し、ナノ加工によって共振器領域の発光強度が十数倍に増強され、優れた発光特性を有することが確認された。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. トポロジカル共振器面発光レーザーTCSELの開発

概要: 蜂の巣型トポロジカル PhC における新規光閉じ込め効果を見出し、優れた垂直指向性を持つ高品質なトポロジカル共振器面発光レーザーTCSELの開発に成功した。室温下のレーザー発振閾値は市販の半導体レーザーダイオードと同程度に小さく、サイドモード抑制比等の特性が IEEE 規格を満たし、今までに報告されたトポロジカル絶縁体レーザーの特性を大きく上回り、光トポロジーを活用した超微細レーザー開発の新しい道を切り開いた。

2. トポロジカルフォトリック結晶における新規ホイヘンス-フレネル現象の発見

概要: 鏡映対称性と時間反転対称性を有するハニカム構造のトポロジカルフォトリック結晶の中で、光渦光源に誘起された多数の小さな光渦が干渉し合い、大局的にはその結果光源の周りに逆向きの大きな光渦を形成する特異な光渦伝搬様式を発見しました。この新奇なホイヘンス-フレネル現象が、トポロジカルフォトリック結晶が示すディラック周波数分散関係の負の質量と深く関連し、長らく知られた光の負の屈折と双対をなすものである。

3. トポロジカル全光干渉計スイッチの提案

概要: 世界に先駆けてトポロジカル光導波路モード間の干渉効果を解明し、新規全光干渉計スイッチの理論を築いた。該当現象は量子スピンホール効果のスピン-運動量ロッキング特性に深く関わり、トポロジカルフォトリック結晶のスピンノール位相、幾何学位相及び外部より制御可能な電磁波相の三者の協奏によって発現する。本研究成果はトポロジカル特性研究の新しい局面を拓き、光電融合による新しい光機能探索に寄与することが期待される。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. トポロジカルフォトリック集積回路の提唱と要素技術開発

概要: 従来のシリコン光回路の一部をトポロジカルフォトリック系に置き換えることによって新規光機能を実現する新しいコンセプト、トポロジカルフォトリック集積回路 TPICs を提案した。その要素技術として、「伝送」「入出力」「分岐」を担う一連のパッシブ素子を実現した。特に光スイッチは、トポロジカル界面における軌道角運動量の干渉効果を利用しており、究極的にはトポロジカルフォトリック結晶の単位胞レベルまでダウンサイズ化を図ることができる。

2. フォトリックバンド顕微鏡との開発と顕微円二色分散計の考案

概要: ハイパースペクトルイメージングの原理に基づいて、フォトリック結晶の周波数バンドを高い効率で測定できるフォトリックバンド顕微鏡、フォトリックバンド情報を用いて観測対象の撮像を行う新しいイメージング機器 (PBI; Photonic Band Imaging) の開発と実用化に成功した。また、トポロジカルフォトリック単一方向伝搬特性を利用して、タンパク質や DNA など生体分子のキラリティーを少量のサンプルで簡単に高感度評価できる顕微円二色性計測装置を考案し、企業と共にデモ実験を行った。

3. 窒化ガリウム系物質のナノ加工及び可視光トポロジカル導波路の構築

概要: 独自技術である高温低圧水素雰囲気下における結晶方位に依存する高温熱分解反応を利用する GaN の低損傷ナノ加工技術 (HEATE 法) を格段に発展させ、深さ 200nm でサイドエッチング 5nm 以下という高アスペクト加工を可能にし、可視域 PhC のみならず、光集積回路や FinFET など様々な光・電子デバイスへの応用が期待される。また、電流注入発光可能な GaN 系物質におけるトポロジカル導波路の実証により、可視光領域におけるトポロジカル光デバイスの可能性を示した。

< 代表的な論文 >

1. Z.-K. Shao, H.-Z. Chen, S. Wang, X.-R. Mao, Z.-Q. Yang, S.-L. Wang, X.-X. Wang, X. Hu,

and R.-M. Ma, “A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-induced reflection”, Nature Nanotechnology vol. 15, 67 (2020).

概要: 蜂の巣型トポロジカル PhC における新規光閉じ込め効果を見出し、優れた垂直指向性を持つ高品質なトポロジカル共振器面発光レーザー (TCSEL) の開発に成功した。室温下のレーザー発振閾値は市販の半導体レーザーダイオードと同程度に小さく、サイドモード抑制比等の特性が IEEE 規格を満たし、今までに報告されたトポロジカル絶縁体レーザーの特性を大きく上回り、光トポロジーを活用した超微細レーザー開発の新しい道を切り開いた。

2. H. Kagami, T. Amemiya, S. Okada, N. Nishiyama and X. Hu, “Topological converter for high-efficiency coupling between Si wire waveguide and topological Si waveguide”, Optics Express vol. 28, 33619 (2020).

概要: Si 細線導波路からトポロジカル光導波路への高い結合効率を示すトポロジカルコンバータの設計・作製に成功した。楔型結合部でシリコン細線導波 TE/TM モードの等位相面の傾斜回転が生まれ、トポロジカル単一方向光伝搬を支配する光スピン状態が発現する。トポロジカルコンバータはゼロエネルギー消費トポロジカル光多重分・合波器の基礎部分に当たり、その設計作製はトポロジカルフォトニクスデバイス開発の極めて重要な一環である。

3. X.-X. Wang, Z. Guo, J. Song, H. Jiang, H. Chen and X. Hu, “Unique Huygens-Fresnel electromagnetic transportation of chiral Dirac wavelet in topological photonic crystal”, Nature Communications vol. 14, 3040 (2023).

概要: 渦光源が置かれた蜂の巣型 PhC では、近隣の正六角形単位胞に渦光源と同じ向きのカイラル電磁エネルギー流が誘起され、それらが2次光源になり、同じパターンの電磁モードが遠方に伝搬していく。特異な現象として、トポロジカル PhC では、渦光源の周りに渦光源とは逆向きの環状電磁エネルギー流が現れる。該当現象はトポロジカル PhC の負のディラック質量と深く関わっていることが判明し、マイクロストリップ系を用いた原理実証実験も成功した。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 胡グループ

研究代表者: 胡 暁

(物質・材料研究機構 ナノアーキテクニクス材料研究センター 特命研究員)

研究項目

- ・新規トポロジカル物理現象・光新機能の理論探索
- ・軌道角運動量によるトポロジカル単一方向光伝搬の理論探索
- ・トポロジカルレーザー理論の構築

② 雨宮グループ

主たる共同研究者: 雨宮 智宏 (東京工業大学工学院 電気電子系 准教授)

研究項目

- ・光通信帯域新奇トポロジカルフォトニクス現象と新機能の実験探索
- ・光通信帯域光渦 MUX/DEMUX 素子の制作・評価
- ・光通信帯域トポロジカルレーザーの制作・評価

③ 菊池グループ

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)

研究項目

- ・可視光領域トポロジカルフォトニクス現象の実験的探索用基盤技術の開発
- ・可視光領域トポロジカルフォトニクス状態の実現
- ・GaIn 系トポロジカル可視光レーザー実現に向けたデバイス化技術の開発

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1)トポロジカル共振器面発光レーザーTCSELの開発

中国北京大学 Ma グループとの協働で世界に先駆けて TCSEL の開発に成功した。Ma 氏は半導体微細レーザーの専門家であり、研究代表者と議論を重ね、光トポロジーを利用した面発光レーザーを発見した。トポロジカル特性に由来する新しい光閉じ込め機構、それを利活用して優れた指向性レーザー発振は専門家から画期的な研究成果と評価されている。

2)高周波導波路マイクロストリップを利用した新規トポロジカル電磁特性の探索

中国 Tongji 大学 Chen グループとの協働でトポロジカルフォトニック結晶における新奇なホイヘンス-フレネル現象を発見した。Chen 氏はマイクロストリップ等高周波導波系の専門家で、マイクロストリップにおける電磁場の強度と位相の精密な測定技術を生かし、研究代表者が理論的に予言した、光トポロジーに由来する光渦の反転現象の実験検証に成功した。

3)分子グラフェンを用いたトポロジカル状態の創成と操作

オランダ Utrecht 大学 Swart 氏は STM 技法を用いて Cu[111]表面に CO 分子を整列させることによって得られる“分子グラフェン”の構成と制御の分野で世界最高の技術を有し、研究代表者の蜂の巣構造を利用したトポロジカル状態発現の原理実証実験を電子系において世界で初めて成功した。CREST プロジェクト期間中研究交流を重ね、共同研究が進行中である。

4)フォトニックバンドギャップ測定用の装置開発

東京インスツルメンツ社と共同で、ハイパースペクトルフーリエ分光の原理に基づいて、フォトニック結晶の周波数バンドを高速・高精度に測定できる「フォトニックバンド顕微鏡」、フォトニックバンド情報を用いて観測対象の撮像を行うイメージング機器「フォトニックバンドイメージング」を開発した。また、トポロジカルフォトニクス の原理を用いた世界初の実用化装置として「顕微円二色性計測装置」を考案し、東工大・NIMS・東京インスツルメンツ社の共同で特許出願を行った上で、現在、実用化に向けた装置開発が進んでいる。