

【特別推進研究】

究極の光デバイス実現に向けた非エルミート・ナノフォトニクスの開拓

研究代表者	京都大学・工学研究科・教授	
	野田 進 (のだ すずむ)	研究者番号:10208358
研究課題情報	課題番号: 22H04915	研究期間: 2022年度~2026年度
	キーワード: フォトニック結晶, 非エルミート, 半導体レーザー, 導波路	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

フォトニクス技術は、センシング・加工・情報通信などの応用を可能とする、今後のスマート社会を支える重要な基盤技術である。これまで、フォトニクス分野においては、光デバイス性能の向上のために、光の散乱・放射・吸収等に起因するエネルギー損失を極力抑制すること (= エルミート性) が重要視されてきた。本研究では、光の波長程度の周期で空孔が周期的に並んだフォトニック結晶を舞台に、エルミート性のみならず、光のエネルギー損失現象 (= 非エルミート性) をも、逆に積極的に活用・制御することで、これまでに無い新しい物理現象を見出し、超大面积単一モード半導体レーザーや、一方向性光デバイス等の従来の常識を覆す光デバイスの実現を目指していく (図1)。これにより、『非エルミート・ナノフォトニクス』とも呼ぶべき新たな学術分野の開拓が期待される。

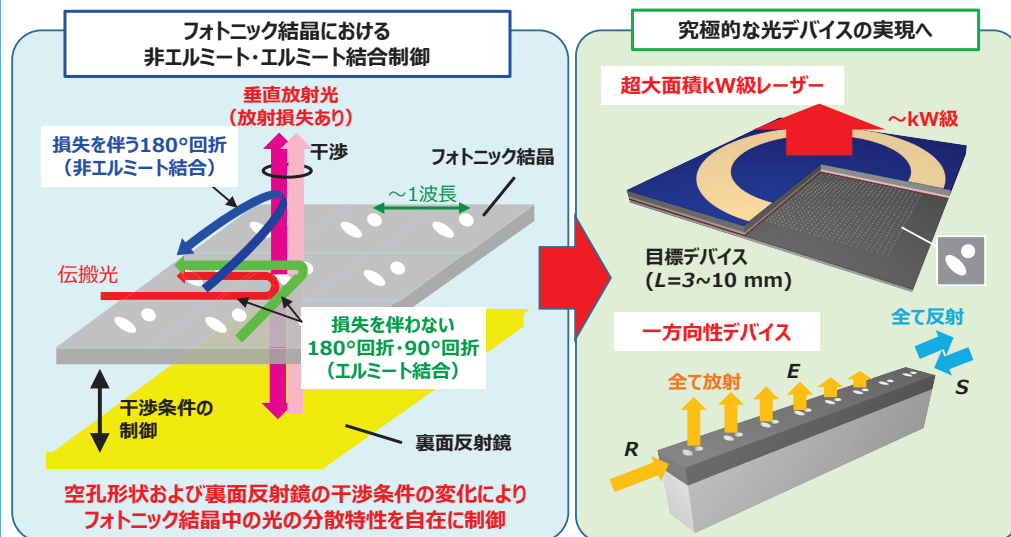


図1 究極の光デバイス実現に向けた非エルミート・ナノフォトニクスの開拓のイメージ図

●本研究の独自性

近年、様々な物理の分野において、エネルギー損失が存在する非エルミート系への関心が高まっており、フォトニクスの分野においても、エネルギー損失を導入することで、エネルギーが保存された系では生じないような、特異な物理現象が生じることが指摘されている。しかしながら、これまでの研究は、特異な現象を観測すること自体を目的とした、基礎研究にとどまっており、それを活用して、既存の光デバイスの性能を飛躍的に向上させたり、全く新しい機能を実現した例は、研究代表者の知る限り存在しない。

それに対して、本研究では、長年、フォトニクスの分野で、「好ましくないもの」と考えられてきたエネルギーの損失を、逆に積極的に活用することで、超大面积単一モードレーザーをはじめとする究極的な光デバイスの実現を目指しており、「非エルミート性は、真に光デバイスの性能を向上させることができるか」という核心的な問いの解決を目指す点で、他の研究にない独自性を有すると考えられる。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●研究計画

本研究では、前頁の研究目的を達成するため、以下の3つの研究項目に沿って研究を推進する。

項目①フォトニック結晶における非エルミート・エルミート結合制御による分散特性制御

光の波長程度の周期で空孔が周期的に並んだ構造 (フォトニック結晶) では、図1左に示すように、内部を伝搬する光が、エネルギーを保ったまま180°方向より90°方向に回折される (エルミート結合) とともに、垂直への放射を介して、エネルギーを失いながら互いに結合する (非エルミート結合)。本研究では、これら2種類の結合の強さを、空孔の形状や、裏面反射鏡との距離を変えて制御することで、図2に示すように、フォトニック結晶中を伝搬する光の周波数と放射損失の大きさ (= 分散特性) の自在な制御を目指す。これらの分散特性の制御は、項目②③の究極的なデバイスの実現の基礎となる。

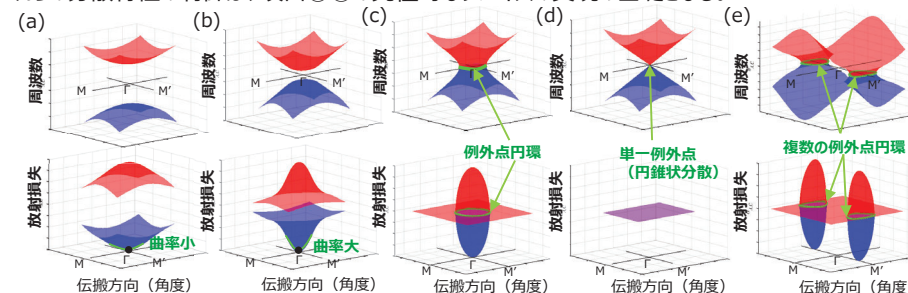


図2 フォトニック結晶における非エルミート・エルミート結合制御による分散特性制御のイメージ図

項目②超大面积kW級フォトニック結晶レーザーの実現

項目①で検討する分散特性の制御を活用した究極的なデバイスの一例として、図1の右上に示すような、超大面积 (3~10mm) kW級フォトニック結晶レーザーの実証を目指す。通常の半導体レーザーにおいては、面積を拡大すると、多数のモードも同時に発振し、出射されるビームの形状が大きく乱れてしまう。それに対し、本研究では、図2(b)に示すように、Γ点 (垂直方向) から角度が少しずれた時に、放射損失が急峻に増大するフォトニック結晶構造を採用することで、斜め方向に光を出射する高次モードの発振を抑制し、狭いビーム拡がり角を維持しながら、kW級のレーザー出力を得ることを目指す (図3)。

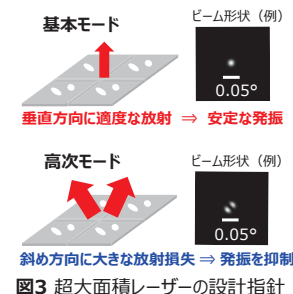


図3 超大面积レーザーの設計指針

項目③一方向性光デバイスの提案および実証

項目②の検討と並行して、非エルミート性を活用した新たな機能を有する光デバイスの例として、図1の右下に模式図を示した一方向性光デバイスの提案と実証を行う。本デバイスでは、図2(d)に示すように、2つのバンドがΓ点のみで交差する分散特性を示すフォトニック結晶構造を活用する。本構造では、フォトニック結晶の空孔が存在するにもかかわらず、ある方向から光を入射した際に、反対方向への光の回折が全く生じなくなる。その結果、図1の右下に示すように、一方向 (R) から光を入射すると100%光が放射され、逆方向 (S) から光を入射すると100%光が反射する興味深い現象が生じることが理論的に予測される。本研究では、上記の一方向性デバイスの実験的な実証を目指すとともに、その性質を応用して、無放射光増幅アンテナや一方向性光共振器等、これまでにない新機能光デバイスの提案と実証を行うことを目指す。

●期待される成果と意義

本研究は、エネルギー損失を伴う系特有の物理現象を探索するという基礎物理学の側面のみならず、フォトニクスの分野において、これまでに実現されていなかった光デバイスを開発するという応用物理学の側面を併せ持った学際的な学術研究であり、期待される意義・インパクトは極めて大きい。例えば、項目②で実証を目指す、直径3~10mmの超大面积コヒーレントレーザーは、現在産業用途で広く利用されている固体レーザー・ガスレーザー・ファイバーレーザー等の大型かつエネルギー効率の低いレーザーを、ワンチップで置き換えることが出来る究極的なデバイスといえる。また、項目③で提案している一方向デバイスも、光の入射方向によって完全放射と完全反射状態を切り替えることが出来る、従来には存在しない光デバイスであり、種々の新しいデバイスの創成に寄与することが期待される。