

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14551

研究課題名（和文）非エルミート光学を用いた新奇なプラズモニック光学素子の実現

研究課題名（英文）Novel plasmonic optics using non-Hermitian photonics

研究代表者

森竹 勇斗（Moritake, Yuto）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：50783049

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非エルミート光系を用いて新奇な光学素子を提案・実証した。グラフェン装荷フォトニック結晶を用いて例外点を用いたカイラルな光機能を実証した。またこのカイラル応答を用いることで、高感度なセンシングが行えることを提案した。動的な光学応答の変調技術として、GSTの要素技術開発およびナノフォトニック構造への適用を行い、光学応答の動的な変調を実現した。さらに、例外点を用いた切り替え可能な一方向性放射現象を提案した。非エルミート系特有の局在現象をもちいた光軌道角運動量の生成手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した非エルミート性による光機能は、従来の光学素子の高機能化や、新しい光機能につながるものである。また、GSTによる光学応答の動的変調技術は、光回路等で必要な光スイッチなどのデバイス応用にむけた重要な要素技術である。これらにより、例えば、低消費エネルギーなデバイスや高感度な生化学センサ等の開発につながる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed and demonstrated a novel optical device using a non-Hermitian optical system. Using graphene-loaded photonic crystals, we demonstrated a chiral property of exceptional points. We also proposed that this chiral response can be used for high-sensitivity sensing. As a modulation technique for dynamic optical response, we developed experimental techniques about GST and applied it to nanophotonic structures to realize dynamic modulation of optical response. Furthermore, we proposed a switchable unidirectional radiation phenomenon using exceptional points. We proposed a method for generating optical orbital angular momentum with a localization phenomenon unique to non-Hermitian systems.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：ナノフォトニクス プラズモニクス フォトニック結晶 非エルミート系 相変化材料

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、PT (時間・空間反転) 対称性をもつ非エルミート (Non-Hermitian: NH) なハミルトニアンによって記述される物理系が注目を集めている。この PT 対称 NH 系では、例外点 (EP) と呼ばれる特異点をまたいだ PT 相転移という NH 系特有の現象が発現する。光学系では、屈折率の虚部 (損失、利得に対応) を用いて時間反転と同等な操作が可能となるため、屈折率の虚部の空間分布を制御することで、PT 対称な NH 系を実現できる。さらに、EP や PT 相転移では、非相反現象や新しい光トポロジカル相の発現など、従来の常識を覆すような新奇な光学現象が可能であることが提案され、非エルミートフォトンクス研究が活発になっている。

例外点 (EP) では、系を記述する行列が対角化不可能になり固有値がひとつしか得られないだけでなく、その固有状態は $(1, i)$ になり、これは位相が $\pi/2$ ずれた振動を表している。本研究では、この特異な固有状態が光学系の現象にどのように発現するのか、という点に着目する。これまで、EP 固有状態を用いることで円偏光状態を得るカイラル EP と呼ばれる現象が報告されている。この状態は、構造が完全に 2 次元系であるにもかかわらず、カイラルのような応答を示すという点で学術的にも応用的にも興味深い NH 系特有の現象である。

2. 研究の目的

本研究では、この特異な単一円偏光状態 (カイラル EP) を、結合プラズモニック共振器によって実験的に実現する。また、相変化材料を用いることで、その特性を動的に制御するデバイスの実現を目指す。さらに、例外点の固有状態を用いた新しい光機能を提案する。

3. 研究の方法

本研究では図 1(a) のような結合プラズモニック共振器を用いる。二つの金ナノワイヤが、石英基板上に 2 次元周期的に配列している。ここで、縦長の金ナノワイヤのみに、吸収媒質として GST (Ge₂Sb₂Te₅ 結晶相) を配置することで、損失 (虚部) に差をつける。このような GST の選択的な配置によって、結合プラズモニック共振器を PT 対称な NH 系にすることができる。

GST は相変化材料であるため、光や熱による相転移を利用して、その屈折率の虚部を大きく変えることができる。特に 1.5 μm では、アモルファス相 (a-相) では虚部がほぼゼロであるのに対し、結晶相 (c-相) では大きな虚部をもつ (図 1(b))。これを利用すると、a-相では、損失差のないエルミートな系、c-相では NH 系になるような、NH 光学系の動的なスイッチングが可能になる。GST の子の特長はすでにこれまで光系に実装されてきているが、ナノフォトニック構造に導入した例はほとんどない。本研究では GST によるナノフォトニック構造の動的変調にも取り組む。

本研究は、シミュレーションによる設計、微細加工による作製、光学測定による評価の 3 つのステップで研究を推進する。設計は有限要素法を用いたソフトウェア (COMSOL 等) を使用し行う。作製では、電子線描画・真空蒸着・エッチングといった微細加工技術を用いて行う。評価では、偏光状態を評価するための偏光評価測定系を新たに構築する。

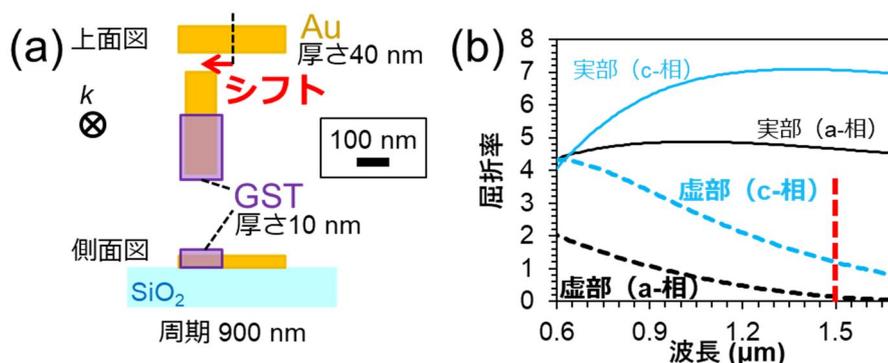


図 1: (a) NH プラズモニック結合系 (b) GST の複素屈折率

4. 研究成果

カイラル EP 系

本研究で着目したカイラル EP は金属を用いたプラズモニック系でなくても原理的に実現可能である。そこで、シリコンフォトニック結晶にグラフェンを選択的に装荷することにより、カイラル EP 状態の実現を行った (図 2(a))。従来研究と異なり、系の周期性や対称性を系統的に考慮することにより、カイラル EP が発現する幾何学的条件をあきらかにした。また設計した構造を作製し、そのスペクトル応答を観測することで、カイラル EP 状態の観測に成功した。これは、従来と異なる原理の円偏光発光等につながる成果である。

プラズモニック系におけるカイラル EP を用いることで、高感度なセンシングを行う手法を開

発した。本手法は、系のジョーンズ行列の固有偏光状態を用いるという新しい原理に基づくもので、例外点の性質を用いることで、高感度なセンシングが行える。その基本特性を解析的・数値的に示し、特許化した。

GST 相転移実験とナノフォトニック構造の動的変調

ナノフォトニック構造を動的に制御するための要素技術として、GST のパターニング技術および、GST のレーザによる可逆的相転移技術を開発した。シリコンをベースとしたナノフォトニック構造に数百ナノメートルスケールの寸法をもつ微細な GST パターンを形成することに成功した (図 2(b))。また、パルスレーザを用いた系を構築し、GST の可逆的相転移を確認した。

GST のナノパターニングにより、トポロジカルフォトニック結晶における動的なバンド反転の実験的実証に成功した。これは、単に GST 薄膜をナノフォトニック構造上に堆積するだけでは得られない機能であり、GST のナノパターニングにより初めて可能になった実験である。また、フォトニック結晶共振器の動的変調にも成功した。共振状態の動的なオンオフだけでなく、共振波長・Q 値を変調できることを実験的に示した。これは、ナノフォトニクス素子の低省エネルギー化につながる成果である。

例外点を用いた指向性放射の提案

例外点の特異な固有状態をおうようした光機能として、上下切り替え可能な一方向性放射現象を提案した (図 2(c))。プラズモニック結合系を用いることで、PT 対称な NH 系を実現し、例外点で構造共鳴がもつ電磁場分布がホイヘンスダイポールと呼ばれる一方向性放射場と同等になるように設計した。これにより例外点における一方向性放射を実現した。また、例外点を用いる利点として、構造のわずかな変調で放射方向の上下を切り替えられることを示した。これは NH 系を用いることで生まれる応用上の優位性を端的に示すものである。

異方性一様媒質における NH スキン効果

NH 系に特有の現象として、NH スキン効果 (NHSE) が近年注目を集めている。NHSE は系の固有状態のほとんどが局在状態になる現象で、光系においては新たな局在モードの形成方法として有用と考えられる。本研究では、これまで考えられていなかった、周期性をもたない一様媒質における NHSE を提案した (図 2(d))。またこれを実現する方法として多層膜メタマテリアルを用いる方法を提案した。さらにこの特異な局在状態を用いることで光の軌道角運動量を生成できることを示した。これは新しい光渦などのトポロジカル光源の開発につながる成果である。

その他の成果

映進対称と呼ばれる対称性をもつフォトニック結晶導波路に PT 対称性を導入することで、その NH 性により超光速状態が実現できることを数値的・理論的に示した。

アンチ PT 対称と呼ばれる対称性をもつ NH 系では、系の利得損失差ではなく、共鳴周波数の調整によって例外点を実現できる。そのためナノフォトニック系ではより単純な調整機構で例外点を実現しやすくなる。ただし、虚数結合 (位相がずれた結合) が費用用となるデメリットがある。この問題を 3 共振器系を用いることで解決し、アンチ PT 対称性による例外点がフォトニック結晶共振器により実現できることを提案した。また GST の相転移によって、アンチ PT 対称性を動的に制御できることも示した。

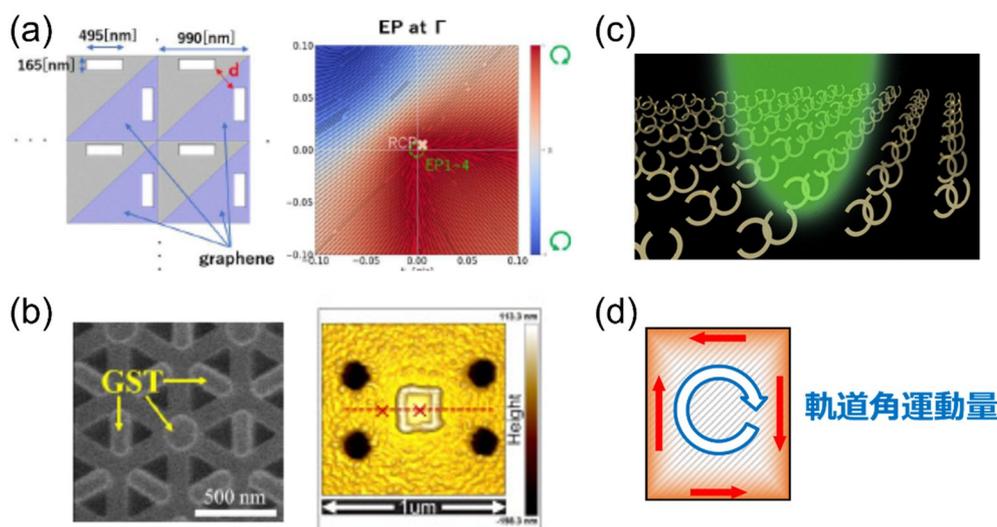


図 2 : (a)PT 対称フォトニック結晶 (b)GST のナノパターニング
(c)NH 結合系による一方向性放射 (d)NHSE による軌道角運動量生成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Uemura Takahiro, Chiba Hisashi, Yoda Taiki, Moritake Yuto, Tanaka Yusuke, Ono Masaaki, Kuramochi Eiichi, Notomi Masaya	4. 巻 32
2. 論文標題 Nanocavity tuning and formation controlled by the phase change of sub-micron-square GST patterns on Si photonic crystals	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1802 ~ 1802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.510757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Dai Wei, Yoda Taiki, Moritake Yuto, Notomi Masaya	4. 巻 32
2. 論文標題 Large transmittance contrast via 90-degree sharp bends in square lattice glide-symmetric photonic crystal waveguides	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3946 ~ 3946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.513685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Moritake Yuto, Notomi Masaya	4. 巻 10
2. 論文標題 Switchable Unidirectional Radiation from Huygens Dipole Formed at an Exceptional Point in Non-Hermitian Plasmonic Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 667 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.2c01692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件（うち招待講演 8件／うち国際学会 12件）

1. 発表者名 森竹勇斗、養田大騎士、納富雅也
2. 発表標題 ナノフォトリクスを用いたトポロジカル・非エルミート系の物理と機能
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Moritake
2. 発表標題 PT-symmetric non-Hermitian plasmonic systems for switchable radiation control
3. 学会等名 The 13th International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META ' 23 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Moritake
2. 発表標題 Topologically protected plasmonic edge states in metallic nanostructures
3. 学会等名 The 9th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems AES2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuto Moritake, Taiki Yoda, Masaaki Ono, Eiichi Kuramochi, and Masaya Notomi
2. 発表標題 Fourier plane imaging spectroscopy for visualization of topological photonic band structures
3. 学会等名 IMC20 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hikaru Saito, Daichi Yoshimoto, Yuto Moritake, Taeko Matsukata, Naoki Yamamoto, and Takumi Sannomiya
2. 発表標題 Visualizing propagation of valley-polarized plasmonic edge mode by cathodoluminescence
3. 学会等名 IMC20 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Suzuki, Syutaro Otsuka, Yuto Moritake, Taiki Yoda, Takahiro Uemura, Masaaki Ono, Eiichiro Kuramochi, and Masaya Notomi
2. 発表標題 Non-Hermitian Chirality and Topological Properties of Graphene-Loaded Photonic Crystals
3. 学会等名 CLEO2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Uemura, Yuto Moritake, Taiki Yoda, Hisashi Chiba, Yusuke Tanaka, Masaaki Ono, Eiichi Kuramochi and Masaya Notomi
2. 発表標題 Experimental Demonstration of Reconfigurable Photonic Topological Phase Transition With Phase-Change Materials
3. 学会等名 CLEO2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高田 健太、養田 大騎、森竹勇斗、納富雅也
2. 発表標題 非エルミート表皮効果を示す異方性フォトニック結晶スラブの励振
3. 学会等名 第84回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森竹勇斗、養田 大騎、高田 健太、納富雅也
2. 発表標題 MT対称性をもつ媒質における光非エルミートスキン効果の解析
3. 学会等名 第84回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 聡、大塚 秀太郎、上村 高広、養田 大騎、森竹勇斗、小野 真証、倉持 栄一、納富雅也
2. 発表標題 非エルミートフォトニック結晶の対称性を利用した例外点の波数空間制御
3. 学会等名 第84回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村 高広、千葉 永、養田 大騎、森竹勇斗、田中 祐輔、小野 真証、倉持 栄一、納富雅也
2. 発表標題 Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ の選択的装荷による光トポロジカル相転移の実験的実証
3. 学会等名 第84回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村 高広、千葉 永、養田 大騎、森竹勇斗、田中 祐輔、小野 真証、倉持 栄一、納富雅也
2. 発表標題 フォトニック結晶導波路上へのGe ₂ Sb ₂ Te ₅ パターンニングによる共振器形成
3. 学会等名 第84回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Notomi, T. Uemura, Y. Tanaka, Y. Moritake
2. 発表標題 Reconfigurable Nanophotonics and Topological Photonics using Phase-change Materials
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村 高広、養田 大騎、森竹 勇斗、大塚 秀太郎、高田 健太、納富 雅也
2. 発表標題 k・p摂動に基づく映進/時間反転対称フォトリック結晶導波路における例外点の解析
3. 学会等名 第71回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 来馬 龍治、滝口 雅人、Haidt Peter、森竹 勇斗、納富 雅也
2. 発表標題 GaN多角形中空ナノワイヤ構造を用いた光軌道角運動量生成
3. 学会等名 第71回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 堀口 義仁、上村 高広、養田 大騎、森竹 勇斗、小野 真証、倉持 栄一、納富 雅也
2. 発表標題 相変化薄膜材料装荷ナノ共振器による反PT対称性の透過スペクトル解析
3. 学会等名 第71回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 武田 稜成、養田 大騎、森竹 勇斗、高田 健太、納富 雅也
2. 発表標題 MT対称性をもつ媒質における光非エルミートスキン効果によるOAM生成
3. 学会等名 第71回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 森竹 勇斗、川崎 大輝、田中 拓男、納富 雅也
2. 発表標題 Jones行列の固有偏光状態を用いたプラズモニック例外点センサの提案
3. 学会等名 第71回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Moritake
2. 発表標題 Visualization of photonic topological edge states in 1D and 2D plasmonic structures in the optical region
3. 学会等名 The 12th International Conference of Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics META ' 22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Moritake
2. 発表標題 Radiation control with exceptional points in non-Hermitian plasmonic systems
3. 学会等名 The 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems AES2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Moritake
2. 発表標題 Singular photonic states and functionalities in non-Hermitian photonic systems
3. 学会等名 Metamaterials and Plasmonics World Forum Plasmomat2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taiki Yoda, Yuto Moritake, Kazuki Yokomizo, Shuichi Murakami, Masaya Notomi
2. 発表標題 Optical non-Hermitian skin effect in continuous media
3. 学会等名 CLEO-PR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Syutaro Otsuka, Yuto Moritake, Taiki Yoda, Takahiro Uemura, Masaaki Ono, Eiichi Kuramochi, Masaya Notomi
2. 発表標題 Chiral response observed at exceptional points in graphene-loaded photonic crystals
3. 学会等名 CLEO-PR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Moritake and M. Notomi
2. 発表標題 Switchable Polarization Eigenstates in non-Hermitian Plasmonic Systems With Phase Change Materials
3. 学会等名 CLEO2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 養田 大騎、森竹勇斗、横溝 和樹、村上 修一、納富 雅也
2. 発表標題 連続媒質における光の非エルミートスキン効果
3. 学会等名 第69回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森竹勇斗、養田 大騎、納富 雅也
2. 発表標題 異方的メタ表面における光非エルミートスキン効果の検討
3. 学会等名 第69回日本応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森竹勇斗、納富雅也
2. 発表標題 非エルミートプラズモニック系における例外点を用いたホイヘンスダイポールの形成
3. 学会等名 第82回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚 秀太郎、上村 高広、養田 大騎、森竹 勇斗、納富 雅也
2. 発表標題 グラフェン装荷フォトニック結晶における非点での例外点の検討
3. 学会等名 第82回日本応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光化学センサ装置	発明者 森竹勇斗、納富雅也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-031558	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------	---------