

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04979

研究課題名(和文) プラズモニック結晶におけるトポロジカルな共鳴状態の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical research on topological resonant states in plasmonic crystals

研究代表者

西田 宗弘 (Nishida, Munehiro)

広島大学・先進理工系科学研究科(先)・准教授

研究者番号：10329112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：金属薄膜に開けた直径百ナノメートル程度の穴の中心に金属芯を導入した同軸型金属ナノホール列では、金属膜厚を変えることによりナノホール中のFabry-Perot共鳴条件を変えることができ、共鳴状態のバンド構造を大きく変えられることを明らかにした。さらに、共鳴状態からの放射の偏光に現れる渦構造がバンド反転によって変化することを示し、このトポロジー変化が、巻数1/2の偏光渦を伴う例外点対の生成消滅によってもたらされることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共鳴状態のバンド反転が例外点対の生成消滅を介して起こり、例外点対が持つ偏光渦によりバンドのトポロジー変化が規定されるという本研究で得られた知見は、トポロジカル光学(トポロジカル絶縁体)、非エルミート系、光渦という、現在注目を集めている3つの研究分野をつなぐものであり、その波及効果は非常に大きい。これにより分野の横断が必然的に起こり、新規光デバイスの基礎となる様々なアイデアが生まれる端緒となると考えられ、大きな発展が期待出来る。

研究成果の概要(英文)：In a periodic array of coaxial metallic nanoholes, in which a metallic core is introduced at the center of a hole of about 100 nanometers in diameter in a thin metallic film, the band structure of the resonant state can be significantly changed by changing the Fabry-Perot resonance condition in the nanoholes by changing the metal film thickness. Furthermore, we have shown that the vortex structure appearing in the polarization of radiation from the resonant state can be changed by band inversion. This topological change is caused by the generation and annihilation of exceptional point pairs with a polarization vortex whose winding number is 1/2.

研究分野：光工学

キーワード：プラズモニック トポロジック 連続準位中束縛状態 例外点 偏光渦 共鳴状態 同軸型ナノホール列
ファブリ・ペロー共鳴

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 直径数百ナノメートルの穴の列を開けた金属薄膜(金属ナノホール列)では、穴の導波モードと薄膜表面の表面プラズモンが結合し、薄膜中に局在しつつ放射場との結合を有する共鳴状態が形成される。この共鳴状態の励起によって、光学特性が特定の振動数領域で大きく変化するため、可視光領域での負の屈折率や完全光吸収体などを実現する「光メタ表面」の候補系の一つとして注目されている。

(2) 放射場との結合は外部損失の存在を意味し、必然的に共鳴状態の寿命は有限となる。このような有限の寿命をもった状態は、複素固有振動数によって特徴付けられ、非エルミート演算子の固有状態と捉えることが出来る。非エルミート演算子の複素固有値が縮退すると2つの状態が合体して一つになり、例外点と呼ばれる特異点が生じる。この例外点の近傍では、複素多価関数が作るリーマン面に相当するトポロジカルな構造が現れる。

(3) フォトニック結晶や、メタ・マテリアル系の研究領域では、「トポロジカル光学」という新しい分野が開拓されつつある。グラフェン中のディラック電子状態やトポロジカル絶縁体の発見以降、分散バンドの位相が波数空間で如何にねじれているかという大域的なトポロジーが、特異な現象を生み出す重要な要素であることが認識され、分散バンド構造に非自明なトポロジーを導入する方法が盛んに研究されてきている。これが実現されると、通常媒質との境界に後方散乱が禁止されたトポロジカルなエッジ状態が得られる。

2. 研究の目的

(1) 金属ナノホール列系に対して独自開発の強力な数値解析手法である結合モード法を用いた理論解析を行う事により、共鳴状態が実際にトポロジカルに非自明な状態を形成し得るのかを検証すると共に、放射場との結合や金属による内部損失がトポロジカルな性質に与える影響の詳細を解明する。

(2) 例外点が生む複素バンド上のリーマン面構造が、バンドの位相ねじれで生じる波数空間の大域的トポロジーに与える影響を明らかにする。系のパラメータを調節して例外点の発生条件を探り、見つかった例外点の周りでのバンド構造の大域的な変化の様子を観察し、そのメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 当初の計画では中空円筒型ナノホールの蜂の巣格子に半径の異なるナノホールを組み合わせた系を想定していたが、系のパラメータとして有効な選択範囲が狭く、共鳴状態のトポロジー変化を追うことが難しいと判明した。そこで、金属芯を有する同軸型ナノホール列と誘電体スラブ導波路の接合系(図1)にターゲットを変更した。同軸型ナノホール中の導波モードには、常に伝搬モードであるTMモードがあり、TE的なモードのカットオフ振動数も金属芯の半径によって大きく変えられるため、ナノホール中にFabry-Perot共鳴を起こしやすい。このことから金属膜の厚さ(穴の深さ) h によって共鳴バンド構造を大きく変えることが可能である。この系に対して結合モード法に基づくシミュレーション・ソフトウェアを開発し、それを用いて共鳴バンド構造の h 依存性を詳細に解析し、共鳴状態のトポロジー変化と例外点の関係を調べた。

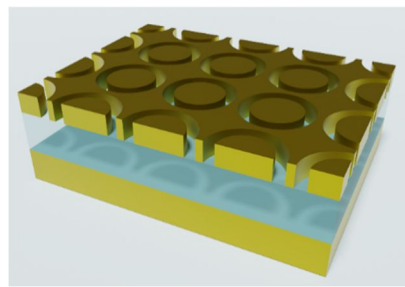


図1 同軸型金属ナノホール列

(2) 同軸型ナノホール列と同様にFabry-Perot共鳴を起こしやすいという特性を持つ1次元金属グレーティングと誘電体導波路の接合系に対して、共鳴バンド構造の変化を解析した。特に、放射が生じ得る振動数領域にありながら放射を伴わない状態(連続準位中の束縛状態、BIC)の存在に注目し、系のパラメータとバンド構造の変化の関係を調べた。

(3) 共鳴状態のトポロジカルな性質を調べるために、当初の計画では、エッジ状態の観察を行う予定だったが、明瞭な結果を得るには計算機資源が不足することが判明した。そこで、連続準位中の束縛状態(BIC)に関する先行研究において、共鳴状態からの放射の偏光に対する波数空間分布にトポロジカルな構造(偏光渦構造)が現れることが見出されていることに注目し、放射偏光分布のトポロジーを観察する方法に切り替えた。共鳴からの放射の偏光を、結合モード法により求めた散乱行列の発散固有値に対する固有ベクトルから求め、放射が存在する波数空間全域に渡る偏光渦構造を調べた。

4. 研究成果

(1) 1次元金属グレーティングと誘電体導波路の接合系において、BIC と例外点の存在を確認し、その特性について重要な知見が得られた。誘電体導波路中のモードがTE 偏光かTM 偏光かによって、モード間の結合係数の符号が変わり、入射光の偏光を変えるだけでBIC 発現ブランチを反転させられる事が分かった。さらに、モード間の結合係数は、グレーティング膜厚 h_{metal} を変えることで連続的に変化させられることが分かり、結合係数の符号変化に伴って BIC 発現バンドが反転することが明らかになった(図2)。符号変化の近傍に例外点が存在することも分かり、共鳴状態のバンド構造が例外点を介してトポロジカルに変化し、その影響で BIC の発現ブランチが反転していることが分かった。この発見は、BIC と例外点がバンドのトポロジーによって関係づいている事を示している。

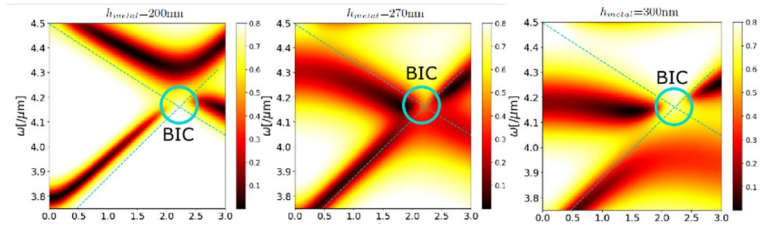


図2 BIC 発現ブランチの反転

(2) 金属芯のある同軸型ナノホール中の導波モードを求めるオープンソース・ソフトウェアを開発し、公開した (<https://github.com/mnishida/PyMWM>)。完全導体からなる同軸型導波管中の TM_{01} モードにはカットオフ振動数が無く、常に伝搬型のモードになることが知られているが、実際の金属で構成されたナノホール中でも常に伝搬型のモードになることが確かめられ、また、TE 的なモードのカットオフ振動数を金属芯の太さによって大きく変化可能であることを明らかにした(図3)。

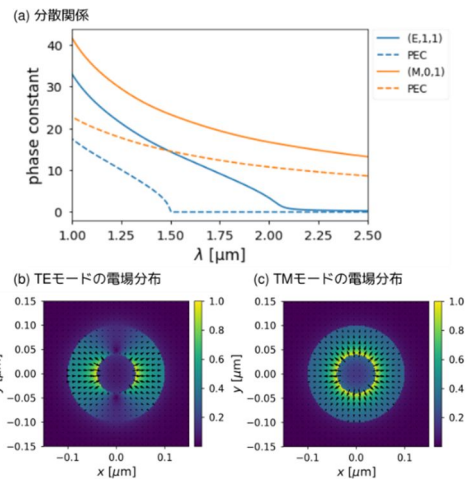


図3 同軸型ナノホール中の導波モード

(3) 同軸型ナノホール中のモード電磁場と外部放射平面波との重なり積分を定式化し、既に開発済みだった結合モード法のソフトウェアに組み込むことにより、同軸型ナノホール列に対する散乱行列を高速に算出可能なソフトウェアを開発した。厳密結合波解析(RCWA)法に比べて数百倍高速に散乱行列を求められ、共鳴状態のバンド構造と共鳴状態からの放射が持つ偏光渦構造を系統的に調べることが可能になった。

(4) 上記のソフトウェアを用い、図1のような同軸型金属ナノホール列と誘電体スラブ導波路の接合系における共鳴状態のバンド構造と共鳴からの放射の偏光渦構造について金属膜厚 h を変化させながら系統的に調べた。 TM_{01} モードと TE_{11} 的なハイブリッド・モードが膜厚 h の中で Fabry-Perot 共鳴を形成すること、及び、 h を変えると共鳴波長をシフトさせることができ、全体のバンド構造を大きく変えられることが確認できた。さらに、例外点对の生成を起点としてバンド反転が起こることが明らかとなった。

結晶の対称性由来するバンドの縮退点、バンドの接触によって形成される例外点、連続準位中の束縛状態(BIC)の3者が偏光特異点となり偏光渦構造を支えている。特に、例外点对は巻数 $1/2$ の偏光渦構造を伴うため、バンド反転で複数の例外点对が生成消滅することにより、BICの巻数を変化させることが出来る。図4はこのトポロジー変化の一例であり、偏光角度の波数空間マップが金属膜厚 h と共に大きく変化して行く様子を示している。 $h=200nm$ では巻数-1の偏光渦を伴うBICが存在しているが、黄色楕円で示した巻数 $+1/2$ の4つの例外点对が、対の組み換えを起こしながら最終的に一点で消滅する事により、BICの巻数を $+1$ に変化させていることが分かる。以上により、例外点の生成消滅を介したバンド反転により共鳴状態のトポロジー変化が実際に起こることを示すことが出来た。

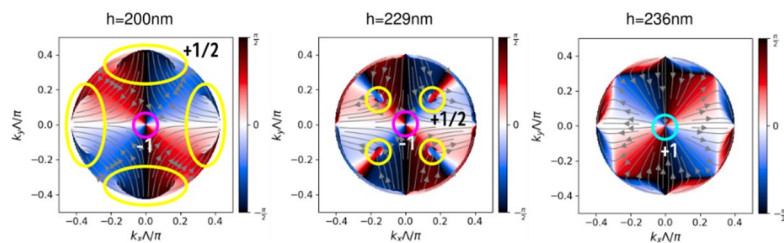


図4 金属膜厚 h による偏光渦構造の変化

(5) 表面プラズモン・ポラリトン(SPP)による共鳴吸収を利用した全反射減衰(ATR)法は、基本的

に、反射スペクトルに現れる急峻な共鳴ディップ構造を介してSPPの分散関係の変化を評価する方法と考えられている。しかし、この共鳴ディップは Fano 共鳴、すなわち、共鳴反射過程と共鳴を伴わない直接反射過程の間の干渉によって生じている。この Fano 共鳴の観点から ATR

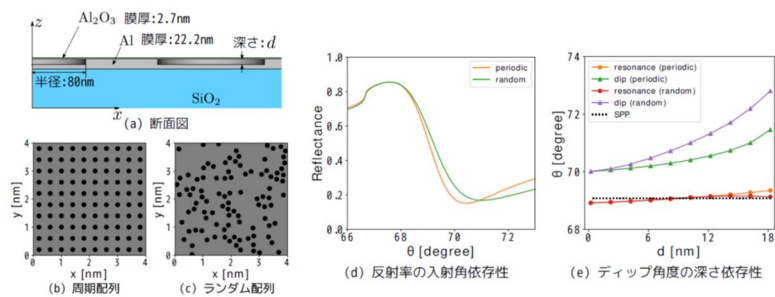


図 5 ATR スペクトルに対する金属表面状態の影響

スペクトルを理論的に再検討することにより、金属腐食等による表面の荒れ、特に、孔食によるナノホールの形成が ATR スペクトル形状に影響を与えることを明らかにした(図 4)。時間的結合モード法により得られた反射係数の表式を元に、共鳴スペクトル形状を決める重要な特徴量を同定し、金属表面にナノホールの周期配列やランダム配列を形成した場合のスペクトル形状を解析することにより、スペクトルの特徴量と表面状態には明瞭な相関があることを示した。これにより、ATR 法を用いた新しい金属初期腐食検出法の理論的な基礎を確立した。

< 引用文献 >

B. Zhen, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 257401 (2014).
 T. Kosako, M. Nishida and Y. Kadoya, IEEE Sensors Journal **20**, 9091-9096 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kikkawa Ryo, Nishida Munehiro, Kadoya Yutaka	4. 巻 22
2. 論文標題 Bound states in the continuum and exceptional points in dielectric waveguide equipped with a metal grating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 073029 ~ 073029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab97e9	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 Kikkawa R, Nishida M, Kadoya Y	4. 巻 21
2. 論文標題 Polarization-based branch selection of bound states in the continuum in dielectric waveguide modes anti-crossed by a metal grating	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 113020 ~ 113020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab4f54	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 Nishida Munehiro, Matsumoto Taisei, Koga Hiroya, Kosako Terukazu, Kadoya Yutaka	4. 巻 101
2. 論文標題 Evaluation of surface roughness of metal films using plasmonic Fano resonance in attenuated total reflection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085414-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.085414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 吉川 遼, 合田 圭佑, 上山 大輝, 西田 宗弘, 角屋 豊	4. 巻 47
2. 論文標題 金属グレーティングによる半導体中表面近傍の光増強 - 金属開口下の増強を決める要因	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 375 ~ 379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 竹安隼哉, 西田 宗弘, 角屋 豊
2. 発表標題 全反射光取り出し2層金属グレーティングの特性を支配する機構の分析
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田京華, 竹安隼哉, 宮田滉平, 西田宗弘, 角屋豊
2. 発表標題 非対称 2 層金属グレーティングによる全反射 THz 波の高効率取り出し
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Kikkawa、Munehiro Nishida、Yutaka Kadoya
2. 発表標題 Bound states in the continuum in the dielectric waveguide with metal grating controlled
3. 学会等名 The 42nd Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田宗弘、松本大聖、古賀大也、小迫照和、角屋豊
2. 発表標題 Fano共鳴を用いた金属表面状態の特性評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川 遼、西田 宗弘、角屋 豊
2. 発表標題 金属グレーティングを有する誘電体導波路における反交差を伴う連続準位中束縛状態：金属厚さ依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川陽太、堀野直樹、西田宗弘、角屋豊
2. 発表標題 エルミートガウスビームによる金属ナノホール列中の表面プラズモン励起
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yanai, M. Nishida
2. 発表標題 Bound states in the continuum in a dielectric slab waveguide on a metallic nanodimple array
3. 学会等名 2019 the 3rd International Conference on Materials Engineering and Nano Sciences (ICMENS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋吉紳司, 前田憲佐, 吉川遼, 西田宗弘, 角屋豊
2. 発表標題 電気回路モデルによるメタ表面設計における基板効果の検討
3. 学会等名 応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 合田圭佑, 吉川遼, 上山大輝, 西田宗弘, 角屋豊
2. 発表標題 THz波検出用光伝導アンテナのための金属グレーティングの設計
3. 学会等名 応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究協力者	角屋 豊 (Kadoya Yutaka) (90263730)	広島大学・先進理工系科学研究科・教授 (15401)	

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