

研究報告書

「磁気光学効果を利用した光の伝搬特性制御」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 26 年 3 月

研究者: 東海林 篤

1. 研究のねらい

光は、電子と異なり電荷を持っていないことから、目的の所へ伝搬させ利用するには鏡や光ファイバ、導波路といった素子で経路を予め準備しておく必要がある。しかし、もし光の進路を外部から印加する場、とりわけ磁場によって制御できるようになれば、電子の伝搬と同様に自由に扱うことが可能となり、これまでにない新たなデバイス開発へと発展させることが出来るようになる期待される。磁場で光を制御する手法には、透過光や反射光に強度や偏光の変化を誘起させる磁気光学効果が知られており、光アイソレータや光サーキュレータといったデバイスに応用されている。しかし、これらは光の偏光を利用したデバイスであり伝搬方位を制御するデバイスではない。磁気光学効果は、テンソルで表される物質の誘電率の非対角成分が磁場に依存した複素数値を持つことに起因しており、これらのデバイスはその虚数部による効果を応用したものである。これに対し、本研究では非対角成分の実数部を、とりわけフォークト配置(光の進行方向と磁場の方向が垂直の配置)において活用し、発現する効果の展開を狙う。

従来、バルク結晶中に於いてこの実数部の効果は二次であることから非相反性(磁場による非対称性)は示さず、また光を吸収する成分であるとして、詳しく研究されることはなかった。しかし、光の波長と同程度の大きさの微小構造体においてこの実数部は、光誘起分極(光によって物質内部に誘起される分極)の向きを変え入射光とは異なった方位へ光を散乱させるという特異な効果をもたらす。従って、この成分を効果的に利用することが出来れば、これまでにない新たな光の伝搬制御技術へと発展させていくことができると期待される。

本研究では、この誘電率非対角成分の実数部が引き起こす、これまでにない新たな光伝搬制御の実証を行い、開拓する。とはいえ、前述のようにバルク体では興味深い現象は生じない。そこでこの実数部の効果に、例えば球や円柱の内面を周回するウィスパリングギャラリモードのような幾何学的共鳴、或いはフォトニック結晶における結晶構造共鳴といった光の波長と同程度の大きさの構造体で構成された共鳴体・微小構造共鳴体を組み合わせ、活用を図る。そして、本研究による実証実験を礎に、誘電率非対角成分の実数部というこれまで利用されることのなかった成分を利用した新たな光伝搬制御法をさまざまに展開させていく狙いである。

2. 研究成果

(1) 概要

これまで理論グループとの共同研究によって誘電率非対角成分の実数部がフォトニック結晶において非相反的なバンド構造を誘発することが明らかとなった。そこで本研究ではまずこのバンド構造の非相反性に着目し、どのような光伝搬特性が得られるのかを数値シミュレー

ションを用いて探索した。結果、光の波長が構造体の周期と同程度になる領域において、入射光および磁場方向に対し直交する方向への光エネルギーの流れが生じることが明らかとなった。これは虚数部のみが導入されている場合には見られなかった新たな振る舞いであり、この実数部はフォトニック結晶において特異な伝搬特性を誘発することが明らかとなった。

次にこの実数部の効果を実験的に実証すべく、簡単な系を使った光伝搬制御の実験を行った。ただし、単一の微小構造体からの光の散乱の方向変化を直接検出するのは困難である。そこで微小体を一次元に配列し、干渉効果によって生じる回折光の検出を行った。誘電率が詳しく調べられている材料を用いて回折格子を作製、光学実験を行ったところ、理論通り磁場に依存した左右非対称的な光伝搬特性が観測された。

さらに誘電率非対角成分の実数部が大きな材料を用いてフォトニック結晶の作製を行い、光伝搬制御の実証を行った。ただし、材料の厚膜化が困難であることから、下位のバンドを利用するスラブ型のフォトニック結晶として設計した。光学測定の結果、光の散乱強度が外部磁場の向きに依存して右または左方向へ変化する様子が観測された。この散乱強度の変化が期待した非対角成分の実数部による伝搬制御効果であると考えられ、数値シミュレーションを用いた解析を現在進めている。

本研究ではこれまで利用されることのなかった誘電率非対角成分の実数部の「光の散乱方向を変える」という効果を利用した新たな光伝搬制御法の提案と実証を行った。これまで利用されることのなかったこの実数部の利用法の一端が本研究により明らかとなったことにより、今後様々な光学現象の発現と応用への展開が行われると期待される。

(2) 詳細

研究テーマ A「フォトニック結晶における光の伝搬方向制御のシミュレーション」

フォトニック結晶の誘電率の非対角成分に実数部を導入すると、フォトニック結晶のバンド構造に非相反性が生じることが共同研究(大阪府立大学石原研究室: 福島宏一氏・合田健太氏)によって明らかとなった。このような非相反性は非対角成分が純虚数の場合には現れず、実数部が有限の場合のみに現れる特異な現象である。そこでこの非相反性によってどのような光の伝搬特性が現れるのか、時間領域差分法(FDTD法)を用いたシミュレーションを行った。構造は三角格子状にロッドが並んだものである。シミュレーションの結果、非対角成分の実数部が有限の場合に、そして構造体の並びの周期と光の波長が同程度になるスケールにおいて、ポインティングベクトル(光のエネルギーの流れ)がロッドの周りで渦を形成し、全体として入射光および磁場に対して垂直方向へのエネルギーの流れが誘起されることが明らかとなった。この結果よりフォトニック結晶に非対角成分の実数部を導入するとこれまでにない多彩な光学現象が発現する可能性が明らかとなった。

研究テーマ B「誘電率非対角成分の実数部を使った伝搬制御の実証」

本研究が提案する光の伝搬制御では、誘電率非対角成分の実数部によって誘起された光誘起分極の向きの変化を利用する。そこでこの実数部によって光伝搬の制御が可能であることの実証実験を行った。

材料には誘電率が詳細に調べられているビスマス置換イットリウム鉄ガーネット(Bi:YIG)を採

用。Bi:YIG 結晶を形成するための組成を有する有機金属の有機溶媒液(MOD 法)に対し、市販の回折格子を転写するレプリカ法によって回折格子試料の作製を行った。Bi:YIG は波長 450nm 付近において非対角成分の実数部が最大に、虚数部がほぼゼロとなる。そこで 450nm のレーザー光を回折格子に照射し、 ± 1 次の回折光強度の外部磁場依存性の測定を行った。磁場を時間的周期的に反転したところ、二つの回折光の強度が磁場の反転に依存して入れ替わる様子が観測された。この強度変化は、光誘起分極の向きが変化したため回折光強度に変化が生じたという解析結果と一致した。

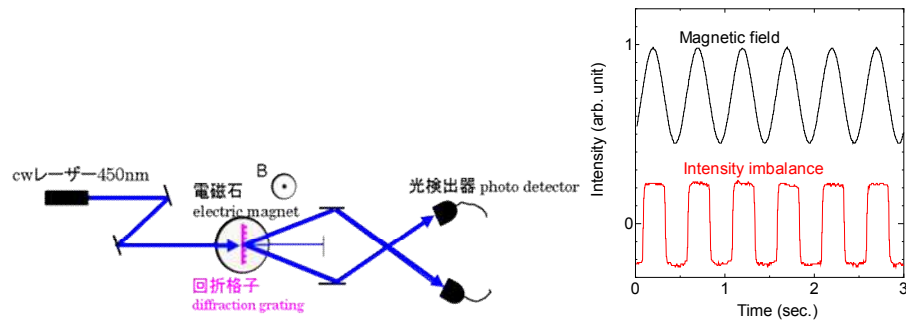


図1: 誘電率非対角成分の実数部を使った光伝搬制御の実証のための光学系(左)と、観測された磁場方向に依存した回折光強度のアンバランス(右)

研究テーマ C「誘電率非対角成分実数部の大きな材料を使ったフォトニック結晶の作製と伝搬制御の実証」

フォトニック結晶を使った実証実験には、結晶異方性が小さく、誘電率非対角成分の実数部が可視域から近赤外域付近内で大きな値を示すこと、さらに光吸収が小さいことという条件からセリウム置換イットリウム鉄ガーネット(Ce:YIG)を採用した。この材料は偏析が起りやすいため $1\mu\text{m}$ 程度の厚さの膜しか得られないという難点があるものの、上記の条件を満たす材料であることからフォトニック結晶の第一、第二バンドを利用するスラブ型のフォトニック結晶として使用することで厚さの問題を回避した。

置換型ガドリニウムガリウムガーネット基板上に作製した厚さ $1\mu\text{m}$ 程度の厚さの Ce:YIG 膜に対し収束イオンビーム装置を用いて微小穿孔加工を行った。加工パターンは直径 220nm、深さ $1\mu\text{m}$ の穴が 350nm 間隔で並んだ三角格子状の構造であり、Ce:YIG の誘電率非対角成分の実数部が大きくなる付近 900nm にフォトニックバンドギャップの端が来るパターンとなっている。作成した試料に対し光学測定を行ったところ、光の散乱強度が外部磁場の向きに依存して右または左方向へ変化する様子が観測された。この測定結果から、誘電率非対角成分実数部の大きな材料を使ったフォトニック結晶の作製に成功。また観測されたこの散乱強度の変化は、期待した非対角成分の実数部と結晶構造共鳴による伝搬制御効果であると示唆され、現在、誘電率非対角成分を考慮に入れた数値シミュレーションを使い解析を進めている。

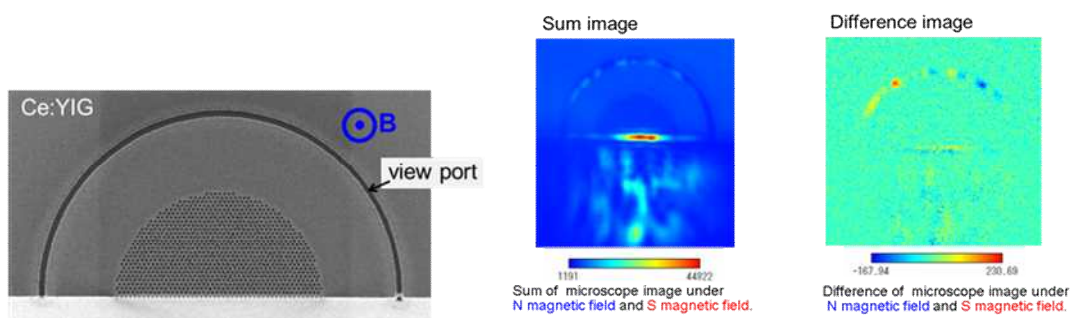


図2: 作製したフォトニック結晶の SEM 画像(左)と観測された散乱光強度の磁場依存性(中、右)

研究テーマ D「多重反射解析による Ce:YIG の誘電率の測定」

本研究で使用した Ce:YIG は前述の理由から誘電率非対角成分の実数部を利用した様々な研究や応用に今後非常に重要な材料になると考えられる。しかし薄膜しか得られていないことから誘電率が未だ測定されておらず、本研究を進めていく上で、そしてさらなる研究や応用を進めていくためにもこれを取得しておく必要がある。

通常、磁性体の誘電率はバルクの結晶を使った反射スペクトルの測定によって得られている。しかし薄膜しか得られない本結晶は、裏面からの反射による多重反射の影響により従来行われてきた手法を使うことが出来ない。そこで狭帯域円偏光レーザーを結晶に照射、結晶の角度を変えながら透過光と反射光に現れる多重反射を観測しフィッティングを用いて円偏光複素屈折率を求める多重反射解析法を開発した。誘電率は円偏光複素屈折率から直接算出可能である。現在 900nm において $\epsilon_{xx}=4.45+0.0721i$ 、 $\epsilon_{xy}=0.0167-0.00159i$ という値が得られている。この実験で得られた誘電率を使うことで、本研究におけるフォトニック結晶作製のためのデザイン、そして光伝搬のためのシミュレーション計算が可能となり、さらには今後 Ce:YIG を使ったさまざまな研究提案を進めていくことが可能となる。

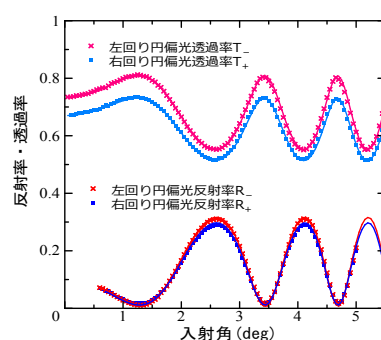


図3: 多重反射解析法による磁性薄膜の誘電率測定のための円偏光反射率と透過率の測定結果とフィッティング結果。

3. 今後の展開

本研究では FIB 加工によって作製したスラブ型のフォトニック結晶を用いて誘電率非対角成分の実数部による光伝搬制御の実証実験を進めてきた。しかしシミュレーションで得られるような顕著な伝搬応答を実現するためには面内の周期構造に対して十分な深さ(アスペクト比)を有す

るフォトニック結晶を作製する必要がある。本研究の結果より FIB 加工で作製したフォトニック結晶は磁性体としての機能を十分有していることが明らかとなった。また本研究では当初懸念されていた偏析はこれまでのところ認められていない。そこで、今後厚膜の作製と中性粒子ビームやボッシュプロセスといった深掘り技術を導入することにより顕著な光伝搬応答の実現を進めていく。一方、今回は三角格子状のフォトニック結晶についての検討を行ってきた。今後は正方格子やハニカム格子といった他の格子を用いた場合にどのような現象が発現されるか検討していく計画である。

本研究ではフォトニック結晶を用いた実証を進めてきたが、誘電率非対角成分の実数部は他の微小構造体を使った場合にも様々な光伝搬制御を発現させることができる。共同研究(大阪府立大学石原研究室:福島宏一氏・合田健太氏)によって示されたような、単一微小円柱内のウィスパリングギャラリモードに形成される非対称な渦状の散乱場や、その円柱を一行に配列した場合に発現する斜め前方や横方向への光エネルギーの流れなどである。しかしガーネット結晶では真球や真円柱の作製は困難であることからアモルファス材料などの開拓を行い、これらの効果の実験的実証を進めていく計画である。

4. 評価

(1) 自己評価

これまで多くの透明磁性体の誘電率がほとんど明らかにされて来ず、また薄膜透明磁性体の誘電率測定法も研究されていなかったことから、本研究期間中にこの基本的特性の新たな測定方法の開発と実際の測定を進めつつ、本研究の目的であるフォトニック結晶のような微小構造体の作成やデザイン、光学的評価を進めてきた。そのため多くの時間を費やしてしまい、シミュレーションで期待された顕著な伝搬制御の実証までは到達できなかった。しかし本研究の狙いの基本である誘電率非対角成分の実数部が光の散乱方向を変えること、そして微小構造共鳴体・フォトニック結晶と組み合わせることにより光伝搬の方向の制御ができることを実証した。この実証実験は今後の研究の礎となり、誘電率非対角成分の実数部を利用した様々な光学現象が様々な展開されていくと期待される。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

物質の光学的特性を示す誘電率はテンソルで表され、その非対角成分は外部からの印加磁場で変化する複素数値をもつ。光アイソレータや光サーキュレータといったデバイスに応用されている磁気光学効果はその非対角成分の虚数部を利用したものであり、透過光や反射光に偏光の変化を誘起させることにより動作させている。しかし、これらは光の偏光を利用したデバイスであり伝搬方位を制御するデバイスではない。

東海林研究者は、誘電率テンソルの非対角成分の実数部を積極的に活用することに着眼した。この非対角成分の実数部は、光を吸収する効果となることから、これまであまり着目されてこなかった。しかし光の波長と同程度の大きさの微小構造体においてこの実数部は、光によって物質内部に誘起される分極・光誘起分極の向きを変化させ、入射光とは異なる方位へ光を散乱させるという特異な効果をもたらす。この実証実験を行うために2次元の磁性フォトニック結晶を試作し、実際に期待される効果が実現することを確認した。

磁場で光伝搬制御をしたいという想いが実現し、原理と実験課題が明らかにされた。試作したフォトニック結晶は試作段階であり、加工手法には改良余地があり、将来大幅な性能向上が期待できる。そのためにも、外部機関との共同研究なども視野に入れて仕上げてゆくと、デバイス・システムレベルの応用が見えてくるものと判断する。ユニークな視点で立ち上げたこの研究の魅力が一見してわかるようなデモンストレーションをしており、それによりこの研究の認識が高まることを期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Astushi Syouji, Hiroki Tominaga "Magneto-optical effects of transparent magnetic diffraction gratings" Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2013) vol. 347, 47-50.

(2) 特許出願

該当無し

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 東海林篤 「透明磁性誘電体 Bi:Ga:YIG を用いた磁性回折格子による磁気光学効果」 2011 年 第 22 回光物性研究会 IIB-58.
2. 富永裕輝、東海林篤 「偏光の透過率と反射率の微小角解析による Bi:YIG 薄膜の誘電率テンソルの測定」 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 29p-PB9-2.
3. 富永裕輝、東海林篤 「円偏光の多重反射解析による YIG 薄膜の誘電率テンソルの測定」 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 17a-P10-4.
4. 福島宏一、中島龍也、東海林篤、石原一 「磁性フォトニック結晶による非相反的光伝搬制御の理論 Ⅲ」 日本物理学会2013年秋季大会 26pPSB-51.
5. 富永裕輝、東海林篤 「円偏光の多重反射解析による Ce:YIG 薄膜の誘電率テンソルの測定」 2013 年 第 24 回光物性研究会 IA-8.