

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05300

研究課題名（和文）磁気光学結晶-on-insulator基板の実現とナノフォトニクスへの応用

研究課題名（英文）Fabrication of magneto-optical crystal-on-insulator substrates and their applications to nanophotonics

研究代表者

太田 泰友 (Ota, Yasutomo)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90624528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁気光学（MO）材料単結晶ウェハをガラス上に融着し研磨とエッチングにより薄膜化することでMOO1基板（MO crystal On Insulator基板）の実現に成功した。また、MO材料のイットリウム鉄ガーネットに対する微細加工技術の構築に取り組み、様々なドライエッチング技術を検討した。加えて、MOO1基板を活用した磁気ナノフォトニクス構造を検討し、メタ表面、フォトニック結晶、シリコンとのハイブリッド構造を評価し、極薄Faraday回転子の設計に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜光学材料は、ナノ構造を用いて光を制御するナノフォトニクス技術に必要な不可欠と言える。これまで単結晶MO材料を同分野に有用な形で薄膜化することは難しく、磁気ナノフォトニクスの進展は限定的であった。本研究では単結晶MO薄膜をガラス上に装荷したMOO1基板を実現した。同基板を用いることで、通常の誘電体のみでは実現の難しい磁気ナノフォトニクス素子の実現が容易となる。同素子は、光通信やセンシングなどに有用であるとともに新しい学術探求の場としても魅力的である。

研究成果の概要（英文）：In this project, we realized magneto-optical (MO) crystal on insulator (MOO1) substrates by bonding monocrystalline MO-material wafers to glass and then grinding, polishing and etching them. We also worked on the development of nanopatterning techniques for the MO material (here we used yttrium iron garnets) by plasma dry etching based on different etching gases. In addition, we investigated magneto nanophotonic structures based on the MOO1 substrate, such as MO metasurfaces, photonic crystals, and hybrid structures with Si nanostructures, and found a design for ultrathin MO Faraday rotators.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：磁気光学 フォトニック結晶 メタ表面 集積フォトニクス

1. 研究開始当初の背景

薄膜光学材料は、ナノフォトニクス技術における要である。ガラス上シリコン薄膜の形成技術(いわゆる SOI 基板)がシリコンフォトニクス発展の土台であるように、高品質な薄膜光学材料の創出は、強い光-物質相互作用を活かした高機能ナノフォトニクスの開拓に不可欠である。一方、単結晶磁気光学 (Magneto-Optical, MO) 材料における薄膜化技術の進展は遅く、磁気ナノフォトニクスの発展は限定的であった。

MO 効果とナノフォトニクス技術を組み合わせることで、誘電体のみでは実現の難しい光機能や時間反転対称性の破れを利用した興味深い物理探求が可能になると期待される。これらの研究を進める上では、大きな MO 効果と小さな光吸収を両立する MO 材料を用いることが重要となる。そのような優れた MO 材料は室温・光通信波長帯を対象とすれば磁性ガーネットが最有力候補となる。中でも、最も研究の進むイットリウム鉄ガーネット(YIG)系材料でナノフォトニクス研究に適した単結晶薄膜を実現することが重要と考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、YIG 系単結晶を用いた MOOI 基板(Magneto-Optical crystal On Insulator 基板)の創出を目的とした。市販の YIG 単結晶ウェハを熱酸化膜付きシリコン基板上へ融着し、研磨とエッチングを組み合わせることで薄膜化することを目指した。加えて、YIG に対する微細加工技術の構築を目指すとともに、MOOI 基板を基礎とした磁気ナノフォトニクス構造の検討を行った。特に、MO metasurface、MO フォトニック結晶や YIG-Si ハイブリッド構造、転写プリント集積光アイソレーター等について数値解析を中心とした検討を行った。本研究は、MOOI 基板の開発を通じて、磁気ナノフォトニクスという新しい研究分野(図 1 にイメージ)を開拓するための第一歩と位置付けることができる。

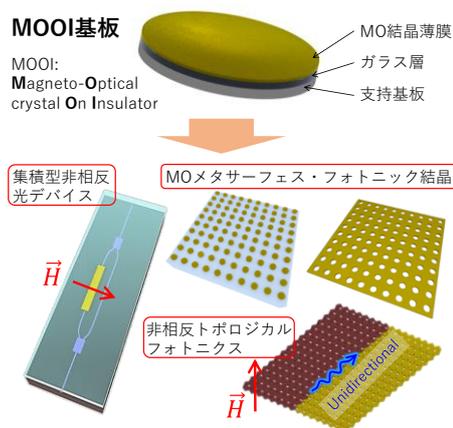


図 1 MOOI 基板と磁気ナノフォトニクス

3. 研究の方法

(1) MOOI 基板の作製

市販の YIG 単結晶基板を洗浄し、プラズマ活性化処理をしたのちに熱酸化膜付きシリコン基板上へウェハ融着した。シリコン基板上にシリケートやシルセスキオキサンからなるスピノンガラスをスピノコートし、中間接着層として用いる方法も並行して検討した。この場合には、塗布後の適度なキュアリングを施したのちにプラズマ活性を施し融着を行った。実験では、洗浄や処理条件を様々に試し、再現性よく高い強度の融着ができる条件を探索した。融着後、機械研磨により YIG の薄膜化を行った。研磨スピードを数段階に変化させつつ、10 μm 程度までの薄膜化を行った。研磨に用いる研磨盤、スラリー、負荷などの条件を変えつつ実験を進めた。最終段階では化学機械研磨による鏡面化も施した。また研磨後、加圧アニール処理をすることで接着強度の向上を図った。最後に、YIG に対してプラズマドライエッチングを行い、その膜厚をフォトニクス応用に適した数百 nm とした。

(2) YIG に対する微細加工

YIG 単結晶基板に対して電子線リソグラフィーによりマスクパターンを形成し、ドライエッチングによる微細パターンの形成を試みた。マスクにはハードマスクとしてスパッタ成膜した二酸化ケイ素を用いた。ハードマスク層の上に電子線レジストを塗布し、電子線描画を行い、フロン系のドライエッチングにより、ハードマスクのパターンを形成した。パターンはラインアンドスペースとした。YIG 層は ICP 反応性ドライエッチング装置により加工した。塩素や三塩化ホウ素ガスあるいはメタン水素ガスといった様々なガスによるプラズマドライエッチングを試した。エッチング後の試料はクリープし、その断面を電子顕微鏡により評価した。

(3) 磁気ナノフォトニクス構造の光学解析

電磁界数値シミュレーションを活用した磁気ナノフォトニクス構造の光学解析を行った。MOOI 基板を出発点として比較的容易に実現が見込まれる metasurface やフォトニック結晶といった構造を中心に解析を行った。有限要素法を用いた解析では、固有モード解析を行い、その空間モード分布や透過スペクトル、偏波応答などを調べた。特に周期構造を対象とした解析を進めた。その際には平面波展開法も併用した。また、有限差分時間領域法を用いて局在モードの時間応答などを解析した。

4. 研究成果

(1) MOOI 基板の作製

図2に作製した MOOI 基板の一例を示す。同基板は YIG と熱酸化膜付き Si 基板との直接接合により得た。YIG 層の厚みは平均で 700nm 程度であり、ドライエッチングにより一層薄くすることにも成功している。基板内では 600-800 nm の範囲で YIG 厚みの分布がある。同分布を反映した干渉模様が見られる。厚み分布は研磨条件を調整することで改善できることが分かっている。研磨プロセスなどにおいて YIG 層に多少の欠けなどが見られるものの、広い面積で光学応用に適した YIG 単結晶薄膜を得ることに成功した。

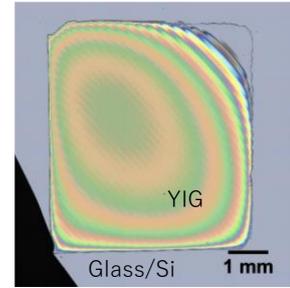


図2 作製した MOOI 基板

(2) YIG に対する微細加工

図3にエッチング条件を最適化して得られた結果の一例を示す。SiO₂ハードマスクを利用して YIG 基板を約 100nm 程度エッチングすることに成功している。加えてエッチング側壁角が 79°となっており、60°程度であった先行研究に比べて大幅に改善できている。同実験ではエッチングガスにメタン水素を用いており、カーボン生成物がハードマスク層に選択的に付着することで保護膜として働いたとみられる。また水素によるダメージ層の形成を通して YIG のエッチングが促進された可能性もある。

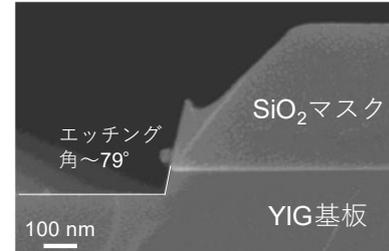


図3 エッチング断面

(3) MO メタ表面

図4に検討した MO メタ表面構造を示す。Bi:YIG ディスクを正方格子上に周期的に配置した構造となっている。同構造に対して垂直に光を入射し、その光透過率とMO偏波回転 (Faraday 回転) の様子を調べた。最適設計時には透過率~1、偏波回転~8°となった。次に、YIG ディスクの側壁に傾きがある場合を調べ、透過率や偏波回転角への影響を評価した。計算では、側壁角が 80°となるだけで透過率が半分となることが分かった。そこで、側壁傾きを補償する方法として、上下非対称クラッドを検討した。その結果、メタ表面上下のクラッド屈折率を微調整することで、構造非対称性に起因する複異方性が補償され、メタ表面の光学応答が回復することが分かった。79°の側壁角でも十分に補償できることを確認しており、作製の難しい YIG を用いても高い性能を示す MO メタ表面が実現できることを明らかにした。これは、YIG 系に限らず全誘電体メタ表面研究にとって重要な示唆を与える結果である。

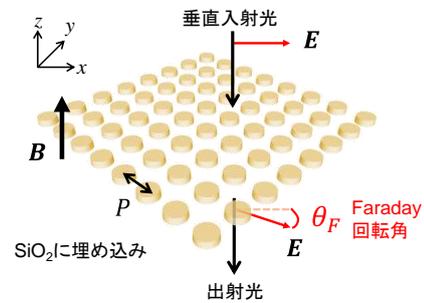


図4 MO メタ表面

(4) MO フォトニック結晶

図5に検討した MO フォトニック結晶構造を示す。MO メタ表面の場合と同様に、垂直入射時の光透過と偏波回転を調べた。フォトニック結晶のユニットセル内には円孔が二つ含まれている、同円孔を楕円に歪ませることで対称性を低下させ、連続場の束縛状態 (BIC) 状態を励振した。同状態は高い Q 値を示すため、YIG 層における光物質相互作用が高まり、MO 偏波回転が増大すると期待される。実際、適切にパラメータを調整することで、YIG 層の厚みが 300nm 程度の素子において 45°の Faraday 回転角と 80% 程度の光透過率を同時に実現できることが分かった。同素子を用いることで効率的な偏波回転による光アイソレーターが実現できることになる。同結果は、これまで実現の難しかった極薄 Faraday 回転子の設計を提案するものであり、光通信や磁気センサー応用等にとって重要な結果と位置付けることができる。

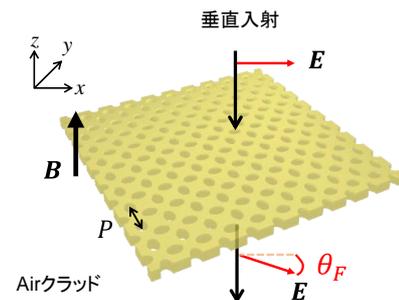


図5 MO フォトニック結晶

(5) YIG-Si ハイブリッドメタ表面

さらに、MOOI 基板上に Si フォトニック結晶を装荷したハイブリッドメタ表面構造の検討も進めた。MO フォトニック結晶の研究と同様に BIC 状態を活用し、MOOI 基板の YIG 層におけるガイドモード共鳴を励振することで、高い共振器 Q 値を得て光物質相互作用の増大を図った。最適設計においては、フォトニック結晶の例と同様に 45°の Faraday 回転角を得た。一方光透過率は 70%程度と若干の劣化が見られた。これは素子構造が複雑になり様々な光干渉効果が影響した結果であると考えられる。提案構造は YIG 層の微細加工を伴わないものあり、早期の実験的な実現が期待されるだけでなく、磁気ナノフォトニクスを探索する新しいアプローチとして、さらなる発展が期待される。

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 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Siyuan Gao, Yasutomo Ota, Feng Tian, Tianji Liu, and Satoshi Iwamoto	4. 巻 31
2. 論文標題 Optimizing the optical and magneto-optical response of all-dielectric metasurfaces with tilted side walls	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 13672-13682
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.480415	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 該当する
1. 著者名 Tianji Liu, Nobukiyo Kobayashi, Kenji Ikeda, Yasutomo Ota, and Satoshi Iwamoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Topological Band Gaps Enlarged in Epsilon-Near-Zero Magneto-Optical Photonic Crystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 1621-1626
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsp Photonics.1c01942	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 該当する
1. 著者名 太田 泰友、岩本 敏、荒川 泰彦	4. 巻 J104-C
2. 論文標題 転写プリント法を用いた量子/古典光源のハイブリッド光集積	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 326-334
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transelej.2021JC10002	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 太田 泰友、岩本 敏、荒川 泰彦	4. 巻 48
2. 論文標題 転写プリント法によるナノ光素子のシリコン上ハイブリッド集積	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 545-549
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14件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Siyuan Gao, Yasutomo Ota, Tianji Liu, Satoshi Iwamoto
2. 発表標題 Design of an All-dielectric Magneto-optical Metasurface with Giant Faraday Effect and High Light Transmission
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota and S. Iwamoto
2. 発表標題 Design of an Ultra-thin Faraday Rotator based on a Magneto-Photonic Crystal
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-XIII) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota and S. Iwamoto
2. 発表標題 Design of a Magneto-Photonic Crystal Exhibiting a Giant Faraday Rotation
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北井達也, 高思源, 岩本敏, 太田泰友
2. 発表標題 イットリウム鉄ガーネットに対するアルゴン・メタン水素混合ガスを用いたプラズマドライエッチングの検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田泰友, 高思源, 北井達也, 岩本敏
2. 発表標題 全誘電体メタ表面を用いた磁気光学効果の増強
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Ota, S. Iwamoto and Y. Arakawa
2. 発表標題 Transfer printing for hybrid-integrated nanophotonics on chip
3. 学会等名 OPJ2021 - Optics & Photonics Japan 2021 Joint Symposia on Optics Program, 27pCJ5, Tokyo, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ota, S. Iwamoto and Y. Arakawa
2. 発表標題 Hybrid integrated light sources on silicon assembled by transfer printing
3. 学会等名 2021 IEEE Photonics Conference (IPC), Oct.2021 (online format) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota, T. Liu and S. Iwamoto
2. 発表標題 Design of an All-dielectric Magneto-optical Metasurface Exhibiting a Giant Faraday Rotation
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会, 24p-E303-1, 青山学院大学相模原キャンパス + オンライン (2022.3)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota, F. Tian, T. Liu and S. Iwamoto
2. 発表標題 Faraday rotation in a magnetic metasurface based on circular truncated nanocones
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会, 11p-N205-9, オンライン (2021.9)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Siyuan Gao, Yasutomo Ota, Feng Tian, Yasuhiko Arakawa and Satoshi Iwamoto
2. 発表標題 Fabrication of a Sub-micron-thick Monocrystalline Magneto-optical Garnet Thin Film on Insulator Substrate
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 18p-P03-2, オンライン (2021.3)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田泰友、岩本敏、荒川泰彦
2. 発表標題 転写プリント法による微小光源の光ハイブリッド集積
3. 学会等名 電子情報通信学会, C1-2-3, オンライン (2020.9) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 太田泰友
2. 発表標題 光ハイブリッド集積技術を活用した量子光源
3. 学会等名 量子情報工学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota, F. Tian, Y. Arakawa, and S. Iwamoto
2. 発表標題 Fabrication of Monocrystalline Magneto-optical Garnet Thin Film on Insulator Substrates as a Basis for Exploring Magneto-nanophotonics
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会, 13p-PA7-10, 上智大学, 東京 (2020).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Gao, Y. Ota, F. Tian, Y. Arakawa, and S. Iwamoto
2. 発表標題 Toward magneto-nanophotonics based on thin-film yttrium iron garnet: wafer bonding and grinding for substrate preparation
3. 学会等名 第4回JSAPフォトニクスワークショップ, 沖縄青年会館, 沖縄 (2019)
4. 発表年 2019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

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