

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：16101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14515

研究課題名（和文）ナノ周期構造における光の反射を利用した高感度磁場センサーの開発

研究課題名（英文）Highly sensitive magnetic field sensor using reflectron of nano periodic structure

研究代表者

高島 祐介（TAKASHIMA, Yuusuke）

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・助教

研究者番号：10843948

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、光波長以下のナノ周期構造の反射現象を利用し、光と磁場の相互作用（磁気光学効果）を増強することで、光学式磁場センサーの高感度化を目的とするものである。

磁気光学効果を増強するため、ナノ周期構造における電磁界分布解析を行い、ナノ構造内の光状態と構造寸法との関係性を明らかにし、最適構造の設計を行った。電子線リソグラフィ法および電子ビーム蒸着法を用いて磁性体ナノ周期構造/誘電体ギャップ/磁性体を作製し、ナノ周期構造によって、磁性体単層膜の数倍程度大きな磁気光学効果が得られることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ナノ周期構造中を利用することで、同じ材料においても光-磁場の相互作用を人工的に増強することができることを実証しており、デバイス性能が磁性体材料の物性で決まるといった本質的な限界を克服する可能性を示した。また、本研究成果は、光集積回路等とも相性が良く、磁場センサーの高感度化だけにとどまらず、光波長切り替えや光アイソレーター等の全光集積回路の基盤技術への波及効果も期待できるため、その社会的な意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study is demonstrating highly sensitive optical sensor for magnetic field utilizing enhancement of magneto-optical (MO) effect with nano periodic structure. To design the structure geometry for MO enhancement, the electromagnetic field distribution was analyzed, and the optical and MO characteristics of the nano structure was estimated. The optimized Ni/SiO<sub>2</sub>/Ni-nano periodic structure was fabricated using e-beam lithography and evaporation techniques, and the several-fold MO enhancement than that of 100 nm Ni-film was experimentally demonstrated.

研究分野：光デバイス

キーワード：ナノ周期構造 磁場センサー

## 1. 研究開始当初の背景

各種センサーは、我々の生活に必要な不可欠なものになっており、位置や角度検出素子として使われる磁場センサーは、多様な電化製品にも搭載され、現代社会の基盤技術の一つである。さらに、高電気ノイズ環境において、地球や工業製品から生じる磁場（数十  $\mu\text{T}$  ~ 100 mT 程度）をリアルタイム検出できる磁場センサーが開発できれば、宇宙資源開発や原子力施設等での利用が期待できる。しかし、現在広く普及しているホール素子や磁気抵抗素子といった磁場を電圧や電流として出力する電気的な磁場センサーは、高感度である反面、電気ノイズの影響を受けやすく、高ノイズ環境下での使用は困難とされている。一方、光を利用した磁場センサーは、磁場印加で生じる磁性体の屈折率の異方性を電気的に中性な光の反射率変化として検出することに基づいているため、電気ノイズに耐性があり、測定環境を選ばず高 S/N 比を実現できる技術である。さらに、光の伝搬速度は非常に高速なため、リアルタイム測定が可能であり、電気配線も不要であるため素子設計の自由度も高い。しかし、バルク材料での磁場印加による屈折率異方性は非常に小さく、それに伴う反射率変化も非常に小さい。そのため、光学式磁場センサーの多くは高感度化に課題がある。

## 2. 研究の目的

上記の背景に基づき、本研究では光波長以下の磁性体ナノ周期構造をバルク材料表面に作製し、光を磁性体近傍に集中させることで光と磁場の応答の増強を試み、光学式磁場センサーの高感度化を目指す。また、本提案手法は、波長以下の極めて薄い構造により構成されるため、ナノインプリント等のデバイス量産技術とも相性がよく、二次元フォトニック結晶やプラズモニック結晶など光集積回路の一部分に取り込むことができる。したがって、磁場検出に留まらず、磁場を用いた光波長切り替えや光アイソレーター等、全光回路の基盤技術へ大きな波及効果も期待できる。

## 3. 研究の方法

(1)磁性体ナノ周期構造中の光固有モードを用いて光と磁場の相互作用(磁気光学効果)の増強にあたり、ナノ周期構造内において固有モードの位相・振幅と構造寸法(格子周期、高さ等)および光波長の関係を同定するために、光のエネルギーと運動量の関係(分散関係)および有限差分時間領域(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)法を用いて、固有モードの形成条件を明らかにする。この理論的基礎検討により固有モードのナノ周期構造において磁気光学効果が最大になる光波長や構造屈折率、周期、高さ、厚さといった条件検討を行い、これらの相関関係を明らかにし、高感度磁場センサーに向けた最適構造の設計を行う。

(2)設計した構造を電子線リソグラフィおよび真空蒸着等法を用いて作製を行い、デバイス性能を評価する。電子顕微鏡等を用いて作製した構造表面および断面形状等を複合的に評価し、作製時の構造の不完全性発生メカニズム解明およびその抑制を検討し、構造作製プロセスを最適化する。電磁コイルによって試作素子に磁場を印加し、印加磁場の大きさによって、どのように構造の反射率が変化するかを測定し、磁場センサー性能を評価する。

## 4. 研究成果

(1)図1に本研究で提案した磁性体ナノ周期構造の概略図を示す。ガラス基板上に磁性体金属(Ni)と誘電体薄膜( $\text{SiO}_2$ )が堆積しており、その上に周期 $\Lambda$ 、格子幅 $w$ 、格子高さ $h_g$ のNiナノ周期構造が配列している。また、 $\text{SiO}_2$ 薄膜の厚さは $h_s$ とし、Ni基板は無限に厚いものとした。ナノ周期構造によって回折された光の波数が金属表面における電荷の集団振動のそれと一致した場合、金属薄膜表面には、ある条件で光と電子の集団振動が結合した状態、表面プラズモンポラリトン(SPP: Surface Plasmon Polariton)が形成される。SPPが励起されると、光が磁性体表面近傍に強く閉じ込められるため、磁気光学効果の増強による大きな偏光の回転が期待できる。Niと $\text{SiO}_2$ 界面のSPP

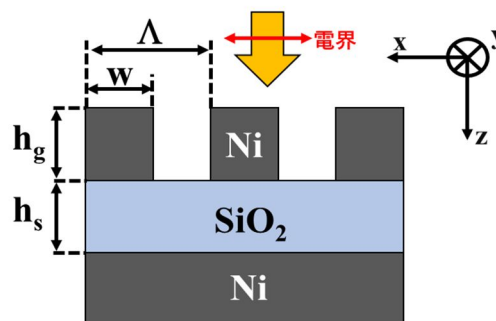


図1 磁性体ナノ周期構造

の分散関係に基づき、ナノ周期構造寸法および SiO<sub>2</sub> 膜厚の設計を行った。設計した構造は SiO<sub>2</sub> 膜厚  $h_s = 70$  nm、ナノ格子高さ  $t_g = 100$  nm、格子の充填率 ( $w/\Lambda$ ) を 0.5 とし、周期  $\Lambda = 200$  nm と  $\Lambda = 400$  nm の二つの構造を設計した。FDTD 法を用いて設計した構造中の電磁界分布を計算した。FDTD 計算では、光の電界が格子と直交している、すなわち x 方向に偏光した平面波を垂直に入射した(図 1)。図 2(a)(b)に FDTD 法により計算した設計構造の垂直反射スペクトルおよび磁気光学効果 ( $E_y^2/E_x^2$ ) ( $E_y$  および  $E_x$  は、それぞれ y 方向と x 方向の電界)を示す。なお、図 3(a)(b)中の  $E_x^2/E_y^2$  の値は、Ni 基板のみを配置した場合の値で規格化している。設計構造において、周期が 200 nm および 400 nm の場合、波長 365 nm および 645 nm 付近において反射率の深いディップが生じていることが分かる。また、反射率ディップの見られた波長において、 $E_x^2/E_y^2$  の比が大きく増強されており、磁気光学効果によって x 方向電界が y 方向に (図 2) だけ傾いたことが分かる。このとき、Ni 基板の場合に比べて、紫外域では最大で約 224 倍、可視域では約 32 倍の磁気光学効果が得られることが分かった。また図 3(a)、(b)に反射率ディップ時における z 成分の電界分布をそれぞれ示す。波長 365 nm (図 3(a)) および波長 645 nm (図 3(b))において、Ni 格子上部および Ni 格子と Ni 基板の間に z 成分の電界が集中しており、界面に沿う方向(x 方向)に伝搬している表面モード、すなわち SPP モードが存在していることを意味している。以上の検討により、Ni 基板/SiO<sub>2</sub>/Ni ナノ周期構造中の SPP モードを用いて光を磁性体近傍に集中させることで、大きな磁気光学効果の増強が実現できることが分かった。

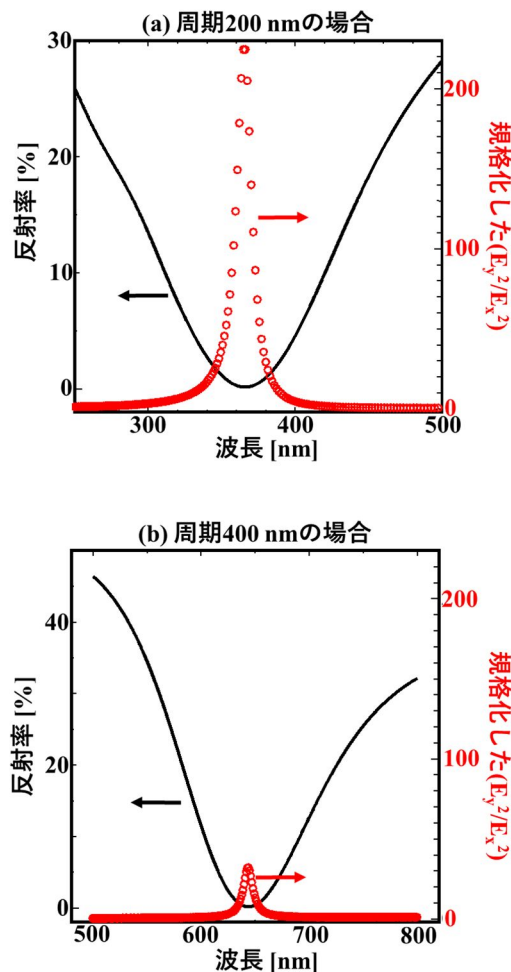


図 2 設計構造の反射スペクトル および磁気光学効果  
(a) 周期 200 nm、(b) 周期 400 nm  
(Takashima et al. Opt. Rev. 29, 62 (2022.))

(2) 上記の理論的な検討に基づき、電子線リソグラフィ法および真空蒸着法を用いて設計構造の作製を行い、その光学特性および磁場応答について評価を行った。なお、実際に磁場センサーとして使用する観点で、比較的安価な光源や光学素子等が豊富な可視域で動作する構造の作製を行った。電子線露光量および真空蒸着レート等の作製プロセスを最適化し、ガラス基板上に Ni (100nm)/SiO<sub>2</sub>(70nm)/Ni ナノ周期構造 (100nm) の作製に成功した。図 4 に 100 nm の Ni 膜と作製した構造の反射率特性を示す。100 nm Ni 膜の場合、入射波長の増加に伴い、反射率が緩やかに増加していることがわかる。一方、作製した Ni//SiO<sub>2</sub>/Ni ナノ周期構造では、波長 610 nm 付近に SPP 励起に起因する深い反射率のディップを示し、電磁界シミュレーションから予想された光学特性と良好一致を示した。また、作製したサンプルに磁場を垂直に印加した際の反射率変化  $\Delta R$  を 2 枚の偏光子が直交しているクロスニコル配置光学系 (2 枚の偏光子はわずかに直交からずらしている) により評価した。図 5 に各サンプルにおける  $\Delta R$  の波長依存性を示す ( $\Delta R$  は、各サンプルに対し 3 回測定を行い、その平均値をプロットした)。なお、 $\Delta R$  は、 $100 \times (R(0) - R(B)) / R(0)$  で定義しており、 $R(0)$  および  $R(B)$  は、磁場非印加、および磁場印加時

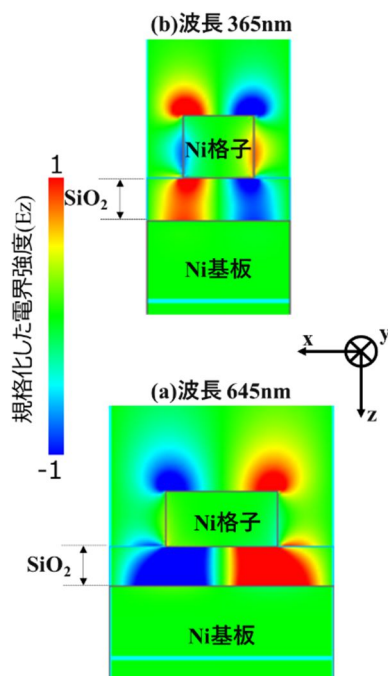


図 3 z 成分電界の空間分布  
(a) 波長 365 nm、(b) 波長 645 nm  
(Takashima et al. Opt. Rev. 29, 62 (2022.))

(5.41mT)の反射率である。図5に示すように、作製したNi/SiO<sub>2</sub>/Ni ナノ周期構造では、波長500 nmから650 nmにおいて100nmのNi膜のみを製膜した場合の数倍程度の反射率変化が得られることを実験的に確認した。以上のように、磁性体ナノ周期構造により光と磁場の相互作用を増強させ、光学式磁場検出の高感度が可能であることを実証した。

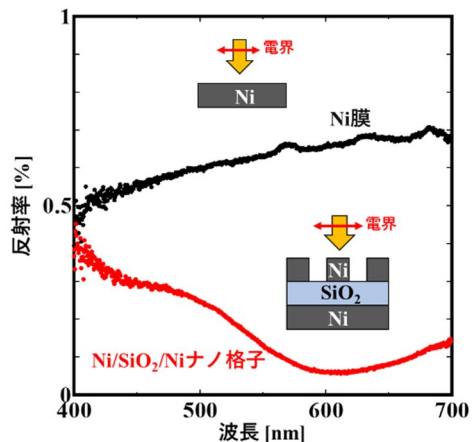


図4 Ni/SiO<sub>2</sub>/Ni ナノ周期構造および100nm-Ni膜の反射スペクトル

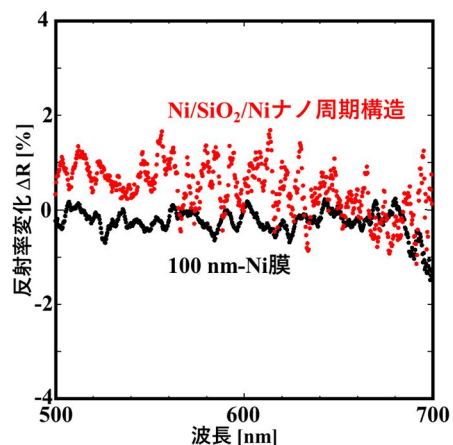


図5 磁場印加時の反射率変化 $\Delta R$ の波長依存性

## 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 2件）

1. 著者名 Takashima Yuusuke, Haraguchi Masanobu, Naoi Yoshiki	4. 巻 11
2. 論文標題 Highly reflective visible color filter based on a double layer TiO <sub>2</sub> subwavelength structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 2712 ~ 2712
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OME.433431	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 Takashima Yuusuke, Haraguchi Masanobu, Naoi Yoshiki	4. 巻 29
2. 論文標題 Numerical finite-difference time-domain calculation for extreme enhancement of magneto-optical effect at ultraviolet wavelength using Ni-subwavelength grating on SiO <sub>2</sub> /Ni structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 62 ~ 67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-021-00711-2	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 Takashima Yuusuke, Nagamatsu Kentaro, Haraguchi Masanobu, Naoi Yoshiki	4. 巻 30
2. 論文標題 Ultra-thin deep ultraviolet perfect absorber using an Al/TiO <sub>2</sub> /AlN system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 44229 ~ 44229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.474847	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11件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高島 祐介、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 光吸収を持つ導波路構造を利用した屈折率検出の高感度化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会(Web会議)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島 祐介、笹田 侑、永松 謙太郎、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 AINサブ波長回折格子を用いた深紫外ミラーの広帯域化(Web会議)
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島 祐介、永松 謙太郎、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 高屈折率を有するTiO <sub>2</sub> 極薄膜を用いた深紫外光吸収体
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会(Web会議)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹田侑、宮川拓己、高島祐介、永松謙太郎、原口雅宣、直井美貴
2. 発表標題 エアギャップ型高屈折率差サブ波長格子を用いた深紫外高反射リフレクターの提案
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 根津武寛、宮川拓己、高島祐介、永松謙太郎、原口雅宣、直井美貴
2. 発表標題 2層サブ波長格子による紫外域用高感度屈折率検出素子の検討
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuusuke Takashima、Masanobu Haraguchi、Yoshiki Naoi
2. 発表標題 Enhancement of Polar Kerr Magneto-Optical Effect in wide wavelength region using TiO <sub>2</sub> /Fe/Ag multilayer system
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会 JSAP-Optica-SPP Joint Symposia 2022(Web会議)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 優遼、高島 祐介、永松 謙太郎、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 高屈折率差サブ波長周期構造を2つ組み合わせた2波長屈折率センサーの検討
3. 学会等名 一般社団法人 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高島 祐介、永松 謙太郎、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 大きな光損失性材料を含む多層膜構造を用いた高感度屈折率検出の提案
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 高島 祐介
2. 発表標題 サブ波長構造の特異な光伝搬を利用したフラット型フォトニックデバイス
3. 学会等名 第26回光科学若手研究会(Web会議) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高島 祐介、永松 謙太郎、原口 雅宣、直井 美貴
2. 発表標題 高屈折率ナノ構造による深紫外-可視域での発光およびセンシングデバイス
3. 学会等名 第173回ラドテック研究会講演会(Web会議) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuusuke Takashima, Kentaro Nagamatsu, Masanobu Haraguchi, Yoshiki Naoi
2. 発表標題 Ultraviolet violet applications utilizing high refractive index subwavelength structure with ultra-thin thickness
3. 学会等名 The 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2022) (Web会議) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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