

2024年 1月 4日

電気・電子情報工学専攻	学籍番号	第 173270 号	指導教員	Lim Pang Boey
氏名	吉原 優紀			中村 雄一 内田 裕久

## 論文内容の要旨 (博士)

博士學位論文名	集積型スピン制御レーザーに向けた磁気光学マイクロ構造体の開発
---------	--------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

情報通信、材料、医療などの幅広い産業分野にわたり小型かつ高出力なレーザー機器の実現が求められている。磁気光学材料で共振器内の光吸収を制御する「磁気光学Qスイッチ」とそれを用いた「スピン制御レーザー」(SCL)は集積化可能な能動型Qスイッチレーザーとして着目を集めている。しかし、レーザー共振器と集積でき、かつ磁気光学Qスイッチとしての動作が可能な磁気光学材料の研究開発はこれまで行われてこなかった。本研究では、集積型スピン制御レーザーを実現するために必要な、磁気光学材料およびマイクロ構造体を開発することを目的とした。

まず、集積型SCLに求められる磁気光学材料の特性要件を整理した。SCLの動作実証に関する報告とその動作原理、そして異なるファラデー回転角を有する磁気光学結晶を用いた磁気光学Qスイッチ発振実験から、(1)14.6度以上のファラデー回転角を有すること、(2)迷路状磁区構造を発現すること、(3)成膜による形成が可能であること、(4)レーザー結晶上に形成が可能であること、の4点が本研究で作製する材料もしくは構造体で実現されるべき要件であると決定した。

本研究では近赤外波長域で良好な特性を示すセリウム置換イットリウム鉄ガーネット(Ce:YIG)を磁気光学材料として使用した。イオンビームスパッタ(IFS)法によるCe:YIG作製条件探索のため、真空アニール法を併用して多結晶Ce:YIGを作製した。多結晶膜として先行研究の3倍以上の磁気光学性能指数が得られた一方、各特性は膜厚依存性を示した。これは非晶質界面層の形成および厚膜表面の割れによるものであった。厚膜化による大きなファラデー回転角と磁区構造を得るために、Ce:YIGと類似した結晶特性を有するガーネットを基板材料とする必要が生じた。

レーザー結晶として一般的に用いられるイットリウムアルミニウムガーネット(YAG)およびガドリニウムガリウムガーネット(GGG)結晶基板上に、IFS法でCe:YIGのエピタキシャル成長を行った。これまでにCe:YIG/YAGの成長例はなかったが、いずれの基板にも磁気光学特性を示すCe:YIG膜を成長することができた。GGG上Ce:YIG膜は基板との格子定数差によって面内圧縮応力を受け、その磁歪特性から垂直磁気異方性を示し、迷路状磁区構造が得られた。また、既報値と同等のファラデー回転角を波長1064 nmで示した。格子不整合が約3%におよぶCe:YIG/YAGでは膜中に柱状の格子欠陥が生じており、磁気光学性能の低下と面内磁気異方性を誘起していた。

迷路状磁区構造と十分なファラデー回転角を両立するCe:YIG厚膜を作製するために、Ce:YIGとGGGから成るオールガーネット磁性フォトニック結晶(AG-MPC)の構造を提案した。Ce:YIGとGGGとの屈折率差による光の局在で、厚膜領域でも磁気光学性能を維持し、周期的なGGGの積層で垂直磁気異方性の発現に必要な格子歪みをCe:YIGに印加した。設計はマトリクスアプローチ法で行い、合計20ペア40層のAG-MPCをGGG上に作製した。設計波長1064 nmに対して1111 nmで光の局在ピークが現れ、48.3%の透過率と-4.2度のファラデー回転角が得られた。垂直磁気異方性を有し、迷路状磁区構造が観察された。同様の設計のAG-MPCを直径5 mm、厚さ3 mmのNd置換型GGGレーザー結晶上に形成し、単層膜同等のファラデー回転角と迷路状磁区構造が実際のレーザー結晶上で両立することを確認した。構造の軽微な修正と成膜条件等の最適化で要件を達成可能であることをシミュレーション上で明らかにした。以上の結果もって、本研究で集積型スピン制御レーザーに向けた磁気光学マイクロ構造体の開発を達成した。

Date of Submission (month day, year) : 1 4, 2024

Department of Electrical and Electronic Information Engineering	Student ID Number	D173270	Supervisors	Pang Boey Lim
Applicant's name				Yuki Yoshihara

**Abstract (Doctor)**

Title of Thesis	Development of magneto-optical microstructures for integrated spin-controlled lasers
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Approx. 800 words

The development of compact, high-power laser systems is highly desired across various industrial sectors, including information technology, material science, and medical industries. Magneto-optical (MO) Q-switches, which utilize MO materials to control optical absorption in the laser cavity, and spin-controlled lasers (SCLs) based on this technology are attracting attention as the active Q-switched lasers that can be fabricated as on-chip laser devices. However, the development of MO materials that can be integrated with the laser crystal or cavity directly and functionable as MO Q-switches has not yet been accomplished. Thus, the aim of this study is to focus on developing MO materials and microstructures that will enable the realization of integrated SCLs.

As a first step, the characteristic requirements of the MO material to be developed in this study was organized. The organization of these requirements involved referencing previous SCL studies and principles. The MO Q-switching oscillation experiments with the bulk MO crystals which has each different Faraday rotation (FR) angles was also carried out. Through these considerations, four essential characteristic requirements were established for this study: (1) demonstrating a 14.6 degrees of FR angle, (2) exhibiting a magnetic maze-domain structure, (3) being fabricable through sputter deposition, and (4) enabling direct fabrication on laser crystal.

Cerium-substituted yttrium iron garnet (Ce:YIG) emerges as an excellent candidate for this study due to its favorable MO properties in the near-infrared wavelength region. To investigate the fabrication conditions of Ce:YIG thin films, polycrystalline Ce:YIG films of various thicknesses were fabricated using ion beam sputtering (IBS) and a vacuum annealing method. A threefold increase in the MO figure of merit was achieved, surpassing previous reports as polycrystalline film. However, the observed characteristics exhibited a dependence on film thickness. The formation of interfacial amorphous layers and surface cracks in thicker films was noted. Achieving a large FR angle and a magnetic maze-domain structure in thicker films necessitated the growth of Ce:YIG films on a garnet substrate that is both structurally and thermally compatible with Ce:YIG.

Ce:YIG films were epitaxially grown onto the yttrium aluminum garnet (YAG) and gadolinium gallium garnet (GGG) crystal substrates, which commonly used as the laser crystals. Epitaxial Ce:YIG films which exhibiting MO characteristics were obtained on each substrate though there are no former reports about Ce:YIG/YAG growth. Ce:YIG grown on GGG undergoes in-plane compressive strain which induces perpendicular magnetic anisotropy (PMA) and formation of a maze-domain structure because of the magnetoelastic properties of Ce:YIG. Furthermore, a FR angle comparable to earlier reports was observed at a wavelength of 1064 nm on Ce:YIG/GGG. Ce:YIG on YAG exhibited columnar-shaped lattice deformation, attributed to approximately a 3% lattice mismatch, causing degradation in both magnetic properties and PMA.

To meet the requirements of having a sufficient FR angle and a maze domain structure, the all-garnet magnetophotonic crystal (AG-MPC) structure consisted by Ce:YIG and GGG layers was proposed. Difference of optical constants between Ce:YIG and GGG layers lead to light localization at specific wavelength, preserving MO performance even in thick films. Periodic GGG layers applies lattice distortion to Ce:YIG, which is necessary to induce PMA. 40 layers AG-MPC consisted with 20 pairs of Ce:YIG and GGG was designed by matrix approach method. AG-MPC was fabricated onto the GGG substrate by IBS. The center wavelength of 1111 nm was observed instead of the designed center wavelength of 1064 nm. Fabricated AG-MPC showed -4.2 degrees of FR and 48.3% of transmittivity at the center wavelength. PMA and maze-domain structure were also observed. Same structure was fabricated onto the actual Nd:GGG laser crystal rod. The FR angle which equivalents to the Ce:YIG monolayer film was obtained. The maze-domain structure was also demonstrated on the AG-MPC fabricated by IBS on the actual laser crystal directly. Simulation results showed that the characteristic requirements can be achieved with optimization of the AG-MPC structure and deposition conditions. With these results, the development of MO microstructures for integrated SCLs has achieved.