

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600041

研究課題名(和文) グラフェン・フェライト垂直磁化膜を用いた可変波長レーザー発光素子の創出

研究課題名(英文) Laser elements based on graphene and ferrite perpendicular magnetic thin films

研究代表者

劉 小晰 (LIU, Xiaoxi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：10372509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：(1)半透明な保磁力が10 kOe以上と非常に優れた垂直磁化コバルトフェライト薄膜の形成が成功した。(2)対向式スパッタ装置を用いて、薄膜面内磁気異方性の導入により、方向性の制御できる縞状磁区構造の形成方法を確立した。(3)これらのフェライト薄膜を用いて、テープ剥離法を用いて、フェライト薄膜上に、グラフェン膜の形成を成功した。(4)赤外顕微鏡付きマスクレス露光装置を用いて、電極を作製し、素子を形成した。50MHzから20GHzまでのスピン輸送現象を確認したところ、レーザー発光と考えられる縞状磁区構造の周期(150 ナノメートル)と対応したスピン輸送共鳴現象を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have successfully prepared optically half transparent ferrite films with excellent perpendicular magnetic anisotropy. The perpendicular anisotropy of the films is as large as 10 kOe. Crystallographic characterization of the films shows the origin of the perpendicular magnetic anisotropy is stress that is developed during the post-annealing process. Of particular interesting is that by a thin unerlayer of FeCo can decrease the crystallization temperature dramatically that we can even prepare ferrite films onto glass substrate. This technique is every important to the practical applications of the films. Large area stripe domains were found in the films prepared by facing targets sputtering system. Graphene wires were fabricated onto ferrite films with stripe domain walls. The spin transport properties of graphene show resonant properties at the domain wall resonant frequency of the ferrite films.

研究分野：磁気と磁性材料工学

キーワード：磁区構造 グラフェン膜 スピン共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

次世代超高速・超低消費電力情報通信技術 (ICT) の基盤技術の構築ためにはエレクトロニクスデバイスの速度限界を超える超高速な全光ネットワーク技術、光情報処理、光コンピューティング技術の基本デバイスの開発が必須である。それ故、光の指向性・収束性に優れたコヒーレント光であるレーザーの発生及び制御が最も重要な事柄である。レーザーは誘導放出を起こす物質 (媒体) によって、固体レーザー、液体レーザー、ガスレーザー、化学レーザー、金属蒸気レーザー、自由電子レーザー及び半導体レーザー等の種類に分けられる。安価で小型の半導体レーザーはすでに光通信や CD・DVD・BD 等情報記録デバイスのデータの書き込み・読み取りに使用されている。しかしながら、半導体レーザーの場合は、pn 接合の構成元素によって発振する中心周波数、つまりレーザー光の色が決まり、可変色の半導体レーザーは存在しない。しかし、更なる次世代超高速・超低消費電力の光波長多重通信に応用されるために、より多くの媒体中に自由に転送できる、周波数 (波長) 可変なレーザーの発生が必要になる。

## 2. 研究の目的

グラフェンをはじめ、シート状 (二次元) の電子チャネル内の電子の移動度は、室温では驚くほど高く (グラフェンの場合は  $15,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )、伝導電子の平均自由行程は一般金属材料の数倍の  $1000 \text{ nm}$  を超える。本研究では、このような超長平均自由行程、超高移動度を利用し、良好な絶縁体であるフェライト垂直磁化膜を用いて、ナノスケールの周期化した磁界を加えることによって、伝導電子と電磁場との共鳴的な相互作用によるコヒーレント光であるレーザー光の発生素子の実現及びその超高速レーザー情報処理・光コンピューティングデバイスへの応用を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 垂直磁化フェライト薄膜の作製

対向ターゲット式スパッタ法を用いて、透明度の高いフェライト薄膜を石英ガラス基板上に形成する。後続のグラフェンとの密着性を確保するために、薄膜の平坦化は必要になる。本研究室所有の対向ターゲット式スパッタ装置は、表面算術平均粗さ (Ra) が  $0.4 \text{ nm}$  以下の薄膜の形成ができるため、本研究に必要なフェライト薄膜の平坦化の確保ができる。透明度については、一般的に、フェライト薄膜の透過率が結晶構造、鉄イオンの化学形態に依存する。特に 2 価鉄イオンを含有する場合は、可視光帯域の透過率が激しく低下する。ここでは、スパッタ時の酸素分圧を精

密に制御しながら薄膜を作成することによって、2 価の鉄イオンの含有を防ぐ。薄膜中の鉄イオンの化学形態に関して、X 線光電子分光 (XPS) 装置 (共用装置) を用いて測定する。

### (2) 周期化した磁束密度分布の形成

本研究では、レーザーを形成するため、周期化した磁束密度分布の形成は重要である。ここでは、縞状磁区構造を持つ垂直磁化膜に関して具体的に検討する。

### (3) グラフェン薄膜の形成及び電極の微細加工

グラフェンを形成するために、テープ剥離法と呼ばれるグラファイト (黒鉛) 結晶からグラフェン薄膜を粘着テープで 1 枚ずつ引き剥がしてシリコン基板上に転写するという機械的な方法、SiC などカーボンの化合物薄膜からグラフェンを形成する方法などさまざまな方法がある。本研究では、テープ剥離法を用いて、縞状磁区構造を有するフェライト薄膜の上に、高品質なグラフェンを転写する。テープ剥離法では大面積のグラフェンの形成はほぼ不可能であるが、この方法で形成したグラフェンの欠陥は少ないため、グラフェン材料の有効性を実証する優れた方法である。本研究室所有の赤外線磁区観察顕微鏡付きマスクレス露光装置を用いて、グラフェンの場所、磁区の配向を確認しながら電極の形成並びにグラフェンのエッチングを行う。そして、素子を完成させる。

## 4. 研究成果

図 1 に本研究で得られたフェライト薄膜の磁化曲線を示す。

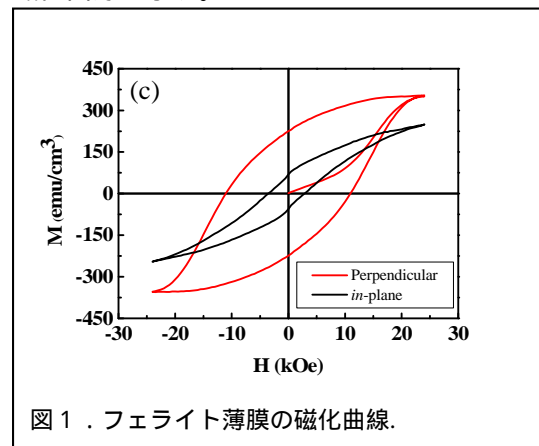


図 1. フェライト薄膜の磁化曲線。

図 1 に示す試料は透明なガラス基板上に成膜したフェライト薄膜の磁化曲線である。薄膜面直方向では、保磁力、残留磁化ともに高く。一方、面内方向では、保磁力、残留磁化ともに低く。これらの特性は、薄膜は優れた垂直磁気異方性を示す。特に、研究室所有の振動試料型磁力計の最大印加磁界の  $24 \text{ kOe}$  において、フェライト薄膜は完全に飽和していない

いことから、このようなフェライト薄膜は、極めて高い磁気異方性を有することと考えられる。垂直方向の保磁力は 10 kOe と極め

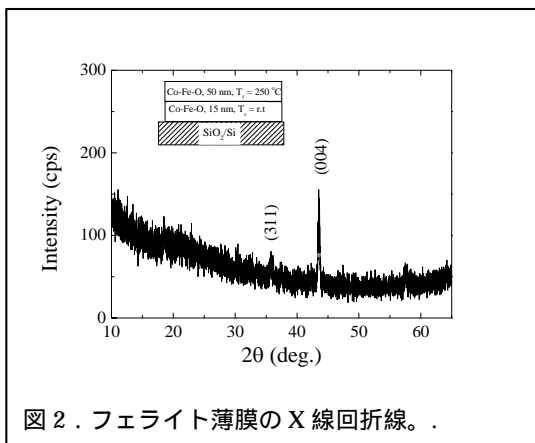


図 2 . フェライト薄膜の X 線回折線。

て高い。  
本研究では、X 線回折手法を用いて、薄膜の結晶構造を評価しました。薄膜 X 線回折では、一般的な  $\omega$ -2 $\theta$  走査法及び in-plane 走査法と分けられる。前者では、結晶の薄膜面と平行した面の面間隔を検出できる。一方、in-plane 法では、薄膜面と垂直している結晶面の面間隔を検出できる。図 2 に  $\omega$ -2 $\theta$  走査法の結果を示す。強度が一番高い回折線は (004) 面からである。これは、(004) 面は薄膜面と平行していることを示す。更に、図 3 に示すように、 $\omega$ -2 $\theta$  走査法(a)及び in-plane 走査法(b)の(004)回折線の位置がずれることを明らかにした。これは、本来の立方体であるスピネル結晶構造は、薄膜面と垂直の c 軸の縮みによる正方体になったことを示す。

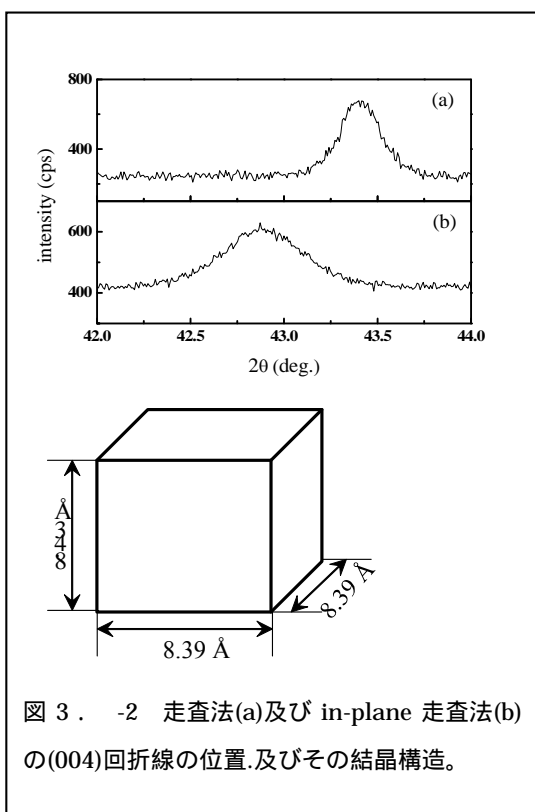


図 3 .  $\omega$ -2 $\theta$  走査法(a)及び in-plane 走査法(b)の(004)回折線の位置.及びその結晶構造。

図 4 にフェライト薄膜の磁区構造を示す。これは、典型的な縞状磁区であり。更に、本研究では、特殊なスパッタ装置を用いて、縞状

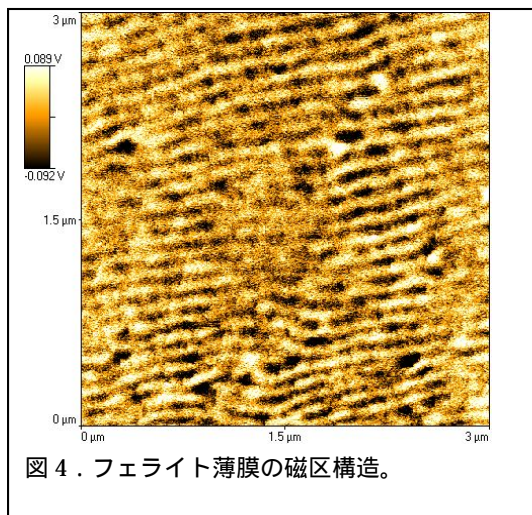


図 4 . フェライト薄膜の磁区構造。

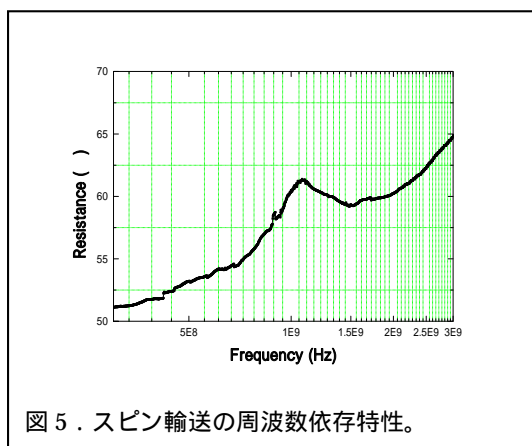


図 5 . スピン輸送の周波数依存特性。

磁区の配向の制御を成功した。  
図 5 に本研究作製した素子の 50MHz~20GHz までのスピン輸送現象を示す。レーザー発光と考えられるスピン輸送共鳴現象の確認ができた。

5 . 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)  
Xiaoxi Liu, Sagar Shirasath, Kwnsuke Shindoh  
Co-Ferrite Thin Films With Perpendicular Magnetic Anisotropy.  
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS , 査読有、Vol. 51, No.1, Article No. 2200304(4 pages), Nov. 2015.  
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2436394

[学会発表](計 3 件)  
原 佑輔, 劉 小晰,  
FeCo 下地層を用いた Co フェライト薄膜の配向制御  
9pA-6, 第 39 回日本磁気学会学術講演概要集  
(名古屋大学東山キャンパス), 2015 年 9 月 8

日 11 日。

王 斯遠, 馬 闖, 劉 小晰

Nd-Fe-B 薄膜磁石垂直磁気異方性の基板温度依存

9aB-8, 第 39 回日本磁気学会学術講演概要集  
(名古屋大学東山キャンパス), 2015 年 9 月 8  
日 11 日

Xiaoxi Liu (招待講演)

Co-Ferrite Films with Large Perpendicular  
Magnetic Anisotropy. (invited),  
ICMAT15-A-0331(X)

(8th International Conference on Materials  
for Advanced Technologies of the Materials  
Research Society of Singapore & 16th  
IUMRS-International Conference in Asia  
SUNTEC Singapore, June 29, 2015.

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

劉 小晰 (LIU, Xiaoxi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号 : 10372509