

## 層間結合した強磁性多層膜における 非線形スピンドダイナミクスの観測

屋富祖 稔<sup>A</sup>, 宮崎 圭司<sup>A</sup>, 木村 崇<sup>A,B</sup>  
九大理<sup>A</sup>, 九大スピNSE<sup>B</sup>

Observation of nonlinear spin dynamics  
in an interlayer-coupled ferromagnetic multilayer film

<sup>A</sup> Dept. of Phys. Kyushu Univ.,

<sup>B</sup> Research Center for Quantum Nano-Spin Science, Kyushu Univ.

M. Yafuso<sup>A</sup>, K. Miyazaki<sup>A</sup>, and T. Kimura<sup>A,B</sup>

### はじめに

複数の磁性層を持つ磁性多層膜において、マイクロ波を照射すると、各磁性層の共鳴状態に対応した磁化の歳差運動が励起される。この場合、磁性層間の層間相互作用や歳差運動により生じるスピン流注入などにより、各磁性層の共鳴モードは変調される。一方で、強磁性/非磁性重金属の界面において、新奇な相互作用が近年多々報告されており、多層膜の共鳴特性において、より興味深い物性が期待される。特に、2つの磁性層の共鳴条件が近い場合、歳差運動は結合し、同期共鳴による位相ロックモード、あるいは反交差モードなどの特殊状態の観測が期待できる。そのような多層膜の多重共鳴を観測するために、今回、CoFeB/Pt/NiFe 多層膜を作成し、各磁性層の共鳴特性に関して、詳細に評価したので報告する

### 実験方法

CoFeB/Pt/NiFe は超高真空スパッタ装置を用いて連続成膜した。結晶性や静磁場特性は X線回折や試料振動型磁力計などを用いて評価した。

共鳴特性は磁場掃引の強磁性共鳴法によって評価した。さらに本実験においては、スペクトルの半値幅を正確に測定しダンピング定数を見積もるために、小さな交流電流による変調磁場をかけることでマイクロ波吸収曲線の微分のスペクトルを得ている。

### 実験

図1に微分強磁性共鳴法によって実際に得られた各種単層膜と多層膜の共鳴スペクトルの比較図を示している。多層膜化によってCoFeBの共鳴磁場が高磁場側に、NiFeでは低磁場側に移動していることが明確に確認されている。さらに、スペクトルのパワー依存性を評価したところ、図2に示すようにCoFeB層のダンピング定数が、マイクロ波強度に従って大きくなる傾向がみられた。これらは強磁性共鳴によって発生した熱により熱スピン注入が起源であると我々は考えている。これらの詳細について講演では言及する。

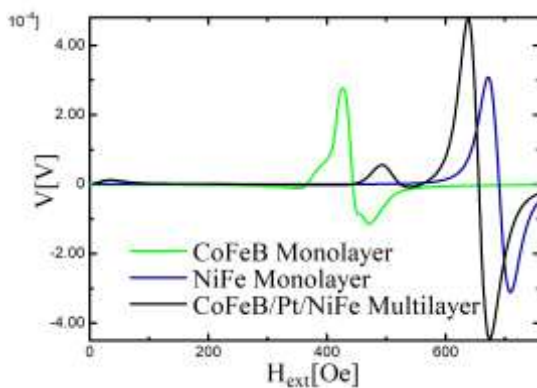


図1 微分 FMR によって得られたスペクトル(9.2GHz 20dBm)

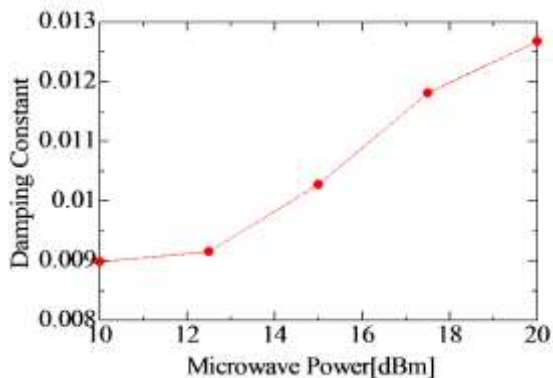


図2 CoFeB/Pt/NiFeにおけるCoFeBのダンピング定数のマイクロ波強度依存性

## Co-Fe-B 薄膜における磁化ダイナミクスの温度依存性

遠藤 恭, 田中 治憲, Nguyen Thi Van Anh, 佐藤 英夫, 池田 正二, 遠藤 哲郎 (東北大学)

Change in the magnetization dynamics of Co-Fe-B thin films with temperature

Y. Endo, H. Tanaka, T. V. A. Nguyen, H. Sato, S. Ikeda, T. Endoh (Tohoku Univ.)

### はじめに

MRAM, スピントルク発振素子, スピンロジック等のスピントロニクスデバイスを開発していく上で, デバイスを構成する Co-Fe-B 薄膜の磁化ダイナミクスに関する研究が盛んに行なわれている. この磁化ダイナミクスを制御するためには, 磁化ダイナミクスの主要なパラメータの一つである, 磁化の制動トルクを決めるダンピング定数 ( $\alpha$ ) を理解することが必須である. しかしながら,  $\alpha$  の温度に対する挙動に関しては十分に理解されていない. 本研究では, 低温から室温での膜厚の異なる Co-Fe-B 薄膜の  $\alpha$  を, ブロードバンド強磁性共鳴(FMR)測定法を用いて検討し, 得られた結果を Co-Fe-B 薄膜における  $\alpha$  の温度依存性を議論する.

### 実験方法

5-15 nm 厚の Co-Fe-B 薄膜は, ガラス基板上に RF マグネトロンスパッタを用いて製膜した. 作製した Co-Fe-B 薄膜の組成は  $\text{Co}_{37}\text{Fe}_{43}\text{B}_{20}$  である. 結晶構造解析および表面形状評価には XRD, TEM, AFM を用いた. なお, 結晶構造および表面形状に関しては, 膜厚に関係なくアモルファスおよび RMS の低い平坦な薄膜である. また, 高周波磁気特性に関しては, 物理特性評価装置に組み込まれた温度可変型ブロードバンド強磁性共鳴測定法 (PPMS-FMR) を用いた. 測定温度範囲は 50 K~室温である.

### 結果および考察

図 1 に, 15 nm 厚の Co-Fe-B 薄膜における 100 K および室温での FMR スペクトルの外部磁界依存性を示す. 50 K 以上の測定温度領域では, FMR スペクトルの微分波形が観測でき, 測定温度に関係なく周波数の増加にともない微分波形が高磁界側へ移動した. また, それらの微分波形強度 (極大と極小との差分) は測定温度の低下とともに減少した. 一方, 膜厚が 10 nm 以下の場合には, 100 K 以上の測定温度領域において膜厚 15 nm の場合と類似した結果が得られた. これらの観測されたすべての微分波形に対してローレンツ関数 (微分形) でフィッティングを行い, 共鳴磁界 ( $H_r$ ) とその波形の半値幅 ( $\Delta H_r$ ) を決定した. 各測定温度での  $\Delta H_r$  の FMR 周波数 ( $f_r$ ) に対する線形増加量 (傾き) からダンピング定数 ( $\alpha$ ) を評価した. 図 2 に示すように, いずれの膜厚においても,  $\alpha$  は温度の低下とともに増加した. これらの挙動は電気伝導度の挙動に比例しているものと考えられる<sup>1)</sup>. また, 膜厚 5 nm の場合,  $\alpha$  は 200 K 以下になると著しく増加した. この原因は温度の低下にともなう表面磁気異方性の増大もしくは異方性分散等の磁氣的不均一性の増大によるものと考えられる.

### 謝辞

本研究の一部は, 東北大学先端スピントロニクス研究開発センター, 東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター, 東北大学国際集積エレクトロニクス開発センターおよび情報ストレージ研究推進機構 (ASRC) の支援のものと行われた. また, 本研究の一部は, 科研費基盤研究 (B) (No. 17H03226), 科研費特別研究員奨励費 (No. 17F17070) の補助のもとで行われた.

**参考文献** 1) B. Heinrich et al., J. Appl. Phys. 50, 7726 (1979).

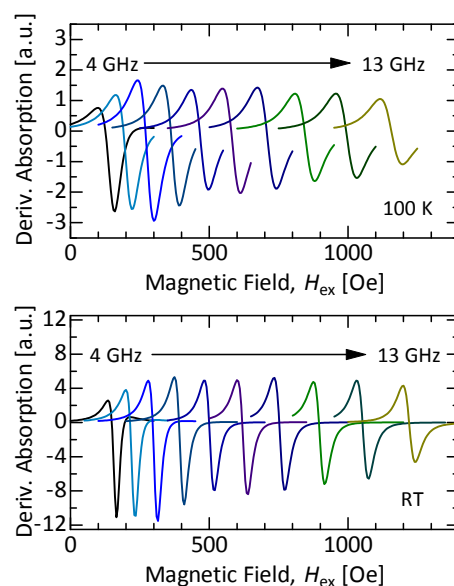


Fig. 1. FMR spectra at 100 K and RT of the 15-nm thick Co-Fe-B thin film.

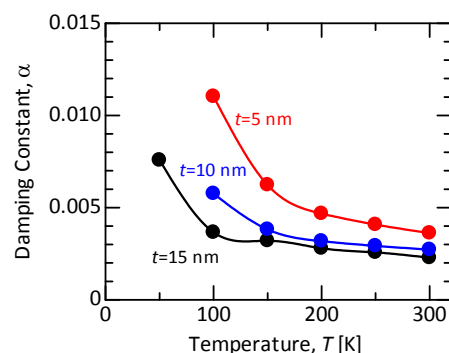


Fig. 2. Change in the damping constant ( $\alpha$ ) of various thick Co-Fe-B thin films with temperature.

# SiN マトリックスナノグラニューラー薄膜の磁気光学効果

池田賢司、小林伸聖、荒井賢一  
(公益財団法人 電磁材料研究所)

Magneto-optical effect in nanogranular films with SiN matrix

K. Ikeda, N. Kobayashi, K. I. Arai

(Research Institute for Electromagnetic Materials, DENJIKEN)

## はじめに

ナノグラニューラー薄膜は、絶縁体のマトリックス中に磁性金属ナノ粒子を分散させた構造を有しており、高周波軟磁気特性、トンネル型磁気抵抗 (TMR) 効果などの物性を示すことで知られている。我々はフッ化物系ナノグラニューラー膜において、磁性金属組成がおよそ 30 at. %以下の領域において光透過性を示すことを確認し<sup>1)</sup>、Bi-YIG に対して 40 倍のファラデー効果を示すことを見出した<sup>2)</sup>。ナノグラニューラー薄膜における大きな磁気光学効果は、マトリックス界面近傍の磁性原子の磁気モーメントがエンハンスされることに起因すると考えられる<sup>2)</sup>。大きい磁気光学効果を示すナノグラニューラー薄膜は磁気光学デバイスへの応用が期待されるが、フッ化物のマトリックスは高い光透過性を示す反面、屈折率が低いため、光導波路のコア材などの高屈折率材料が求められるデバイスへの適用は困難である。本研究では、高屈折率を有するナノグラニューラー薄膜の作製を目的として、半導体プロセスとの親和性が高く、高屈折率材料である SiN をマトリックスとしたナノグラニューラー薄膜の作製を検討した。本報告では、反応性スパッタによって作製した FeCo-SiN ナノグラニューラー膜の、薄膜作製条件とファラデー効果の関係などについて報告する。

## 実験方法

ナノグラニューラー薄膜は、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ターゲットに Fe<sub>60</sub>Co<sub>40</sub> チップを配置した複合ターゲットを用い、Ar と N<sub>2</sub> の複合ガス雰囲気において RF スパッタ装置による反応性スパッタにより作製した。成膜は加熱雰囲気で行い、膜厚が約 700 nm の薄膜を作製した。結晶構造は XRD、微細構造は TEM によって解析した。磁化曲線は VSM で測定し、ファラデー効果は、6 波長光源ファラデー効果測定装置 (NEOARK, BH-600LD2M) を用いて評価した。薄膜の光透過率は、分光光度計 (Shimadzu, UV-3150) を用いて測定した。

## 実験結果

Ar/N<sub>2</sub> ガスの反応性スパッタで作製した FeCo-SiN ナノグラニューラー薄膜の断面 TEM 像を Fig.1 に示す。アモルファスの SiN マトリックスに FeCo ナノ微結晶が分散したナノグラニューラー構造を形成していることが分かる。

Fig.2 に Ar/N<sub>2</sub> ガスの流量比率を変化させて作製した FeCo-SiN ナノグラニューラー薄膜のファラデー回転角の波長依存性を示す。全ての試料が波長の増加に応じてファラデー効果の符号が正から

負へ反転する波長依存性を示し、符号が反転する波長帯域は、窒素ガス比率の増加に応じて高波長側にシフトすることが確認される。フッ化物マトリックスの実験結果において確認されたように、FeCo-SiN 膜においてもマトリックス界面近傍の磁気モーメントのエンハンス<sup>2)</sup>などによって大きなファラデー効果が発現したと推測できる。

## 参考文献

- 1) N. Kobayashi, H. Masumoto, S. Takahashi and S. Maekawa, Sci. Rep., 6, 34227 (2016).
- 2) N. Kobayashi, K. Ikeda, B. Gu, S. Takahashi, H. Masumoto and S. Maekawa, Sci. Rep., 8, 4978 (2018).

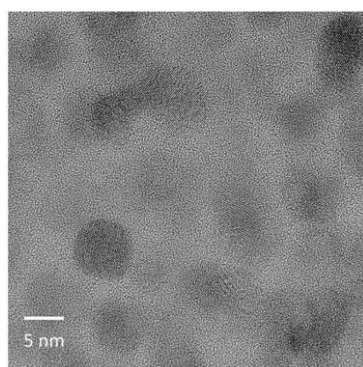


Fig.1 Cross-sectional TEM image of FeCo-SiN nanogranular film.

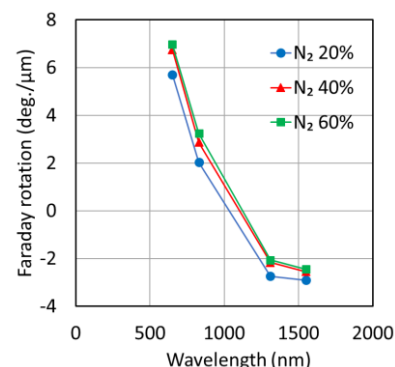


Fig.2 Wavelength dependence of Faraday rotation of FeCo-SiN nanogranular films.

# FeCo-BaF ナノグラニューラー膜の構造と巨大ファラデー効果

小林伸聖, 池田賢司, 岩佐忠義, 荒井賢一  
(公益財団法人 電磁材料研究所)

Structure and giant Faraday effect in FeCo-BaF nanogranular films

N. Kobayashi, K. Ikeda, T. Iwasa, and K. I. Arai

(Research Institute for Electromagnetic Materials, DENJIKEN)

## はじめに

ファラデー効果を有する材料は、光アイソレーター等の光通信用デバイスに用いられており、高度情報化社会に欠かせないものである。我々は、強磁性金属とフッ化物から成るナノグラニューラー膜に関し、そのファラデー効果を検討した結果、光通信の波長帯(1550 nm)においてビスマスガーネット(Bi-YIG)の約 40 倍もの大きなファラデー効果を示すことを明らかにした<sup>1)</sup>。このナノグラニューラー膜を光アイソレーター等の光磁気デバイスに用いることを考えた場合、大きなファラデー効果と同時に高い光透過率を示すこと、すなわち性能指数が高いことが必要である。ナノグラニューラー膜では、光透過特性はマトリックスを形成するフッ化物の光学特性に依存すると考えられる。本報告では、BaF<sub>2</sub>をマトリックス材料としてナノグラニューラー膜を作製し、基板温度や熱処理による BaF<sub>2</sub>の結晶性の向上と、性能指数の関係について検討した結果を報告する。

## 実験方法

薄膜試料は、RF スパッタ装置を用いタンデム法<sup>2)</sup>によって作製した。2つのターゲットホルダーの一方に、Fe<sub>60</sub>Co<sub>40</sub>合金ターゲット(76 mm φ)を、他方に BaF<sub>2</sub>(76 mm φ)粉末焼結ターゲットを配置し、Ar ガス雰囲気中にて同時にスパッタした。基板には、50×50×0.5 mm のコーニング社製イーグル XG ガラスおよび石英ガラスを用いた。成膜中の基板温度は 400~700 °C に設定した。膜組成は、波長分散型分光分析法(WDS)を用いて分析し、磁化曲線は、振動試料磁力計(VSM)を用いて測定した。光透過率の測定は分光光度計を用いた。ファラデー回転角は、6つの波長のレーザー光源(405, 515, 650, 830, 1310 および 1550nm)を供えたネオアーク社製 BH-600LD2M を用いて測定した。尚、これらの測定は全て室温にて行った。膜の構造解析には、X線回折法および高分解能透過電子顕微鏡(HRTEM)を用いた。

## 結果

Fig.1 には、Fe+Co 量と光路長 1 μm での波長 1550 nm における光透過率を示した。それぞれ、FeCo-BaF 膜は 600 °C、FeCo-AIF は 660 °C、そして FeCo-YF 膜は 500 °C に加熱した基板上に成膜した結果である。光透過率は Fe+Co 量の増加によって減少する。FeCo-BaF 膜は FeCo-AIF および FeCo-YF 膜に比較してより高い Fe+Co 量においても光透過性を維持し、FeCo-BaF 膜において磁気光学材料としての性能指数が向上することが明らかとなった。この結果は、マトリックスを形成する BaF<sub>2</sub>の結晶性に由来すると考えられる。

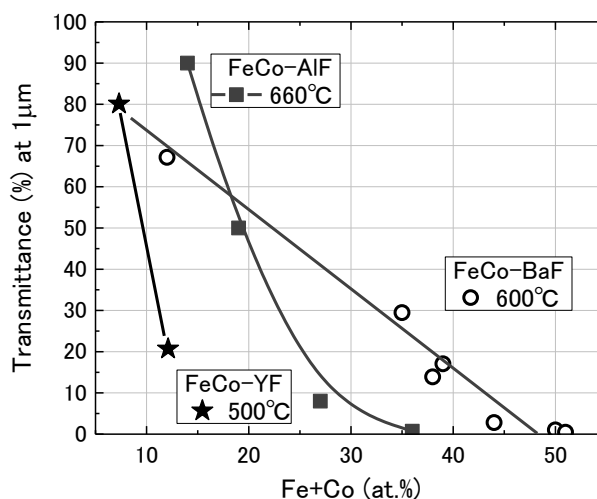


Fig.1 Relationship between Fe + Co content and transmittance of FeCo-BaF, FeCo-AIF and FeCo-YF films at 1550nm.

## 参考文献

- 1) N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, and S. Maekawa, Scientific Reports, 8, 4978 (2018)
- 2) N. Kobayashi, S. Ohnuma, T. Masumoto, and H. Fujimori, J. Magn. Soc. Jpn. 23, 76-78 (1999).

# 磁気カイラルメタ表面による近赤外光の非相反マジックミラー

富田知志、大西庸嵩\*、柳久雄\*、黒澤裕之\*\*  
(東北大、\*奈良先端大、\*\*情報通信機構)

Non-reciprocal one-way mirrors with magneto-chiral metasurfaces in near-infrared region

Satoshi Tomita, Nobutaka Onishi\*, Hisao Yanagi\*, Hiroyuki Kurosawa\*\*

(Tohoku Univ., \*NAIST, \*\*NICT)

## はじめに

磁性体とカイラル構造を組み合わせた人工構造においては、磁気光学効果と光学活性の協奏によって、偏光無依存・方向依存複屈折（磁気カイラル効果）が発現することが知られている。我々はこれまで各種共鳴を組み合わせることで、磁気カイラル効果が増強できることをマイクロ波領域の実験と理論で報告してきた[1]。今回は数値計算を用いて、近赤外光領域で強い光学活性を示す金・シリカ・金三層膜の卍型構造[2]の下に、ビスマス置換イットリウム鉄ガーネット（Bi:YIG）を挿入したメタ表面で、磁気カイラル効果が発現することを明らかにする。これはランダム偏光の太陽光などに対する、非相反マジックミラーへの道を拓く。

## 計算方法

計算には有限要素法（COMSOL Multiphysics）を用いる。計算する磁気カイラルメタ表面を Fig.1 に示す。ガラス基板の上に Bi:YIG 膜を置き、その上に金・シリカ・金三層膜を卍型に加工したナノ構造を置く。金とシリカの膜厚はそれぞれ 25nm とする。x および y 方向には周期的境界条件を適用する。z 軸方向の直流磁場によって生じる Bi:YIG の磁気光学（ファラデー）効果は、誘電率の対角項（5.58）と非対角項（0.002）で表現する。ポートから  $yz$  方向に入射した直線偏光の透過係数に対応する S パラメータ ( $S_{21}$  と  $S_{12}$ ) を、波長 1000~1500nm の範囲で掃引しながら計算する。そしてその差分である  $S_{21} - S_{12}$  を求める。また Bi:YIG の膜厚を変化させ、 $S_{21} - S_{12}$  差分スペクトルを調べる。

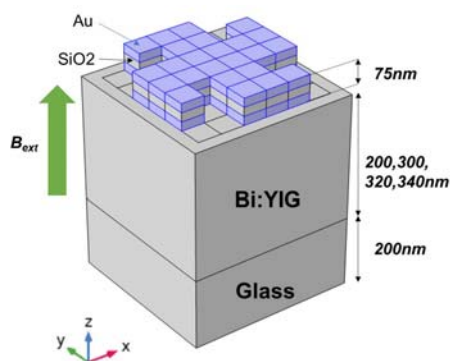


Fig. 1 Numerical calculation setup

## 結果と考察

Fig.2 に Bi:YIG の膜厚を 200、300、320、340nm とした場合の  $S_{21} - S_{12}$  差分強度スペクトルを示す。全てのスペクトルで、波長 1030nm 付近にディップが見える。また波長 1300nm 付近には、YIG200nm ではピークが、それ以外のスペクトルではディップが見える。これらの信号は磁気カイラル効果に起因すると思われる。1030nm 付近の差分ディップ強度は、磁性体の膜厚と共に増加している。これは Bi:YIG 膜中での光の多重反射に起因していると考えられる。よって構造の最適化を行うことで、更なる非相反性の増大が期待される。近赤外光の偏光無依存・非相反マジックミラーとしての可能性も議論する。

## 参考文献

- 1) S. Tomita et al., Phys. Rev. Lett. 113, 235501 (2014); S. Tomita et al., Phys. Rev. B 95, 085402 (2017); S. Tomita et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 083001 (2018).
- 2) M. Decker et al., Opt. Lett. 32, 856–858 (2007).

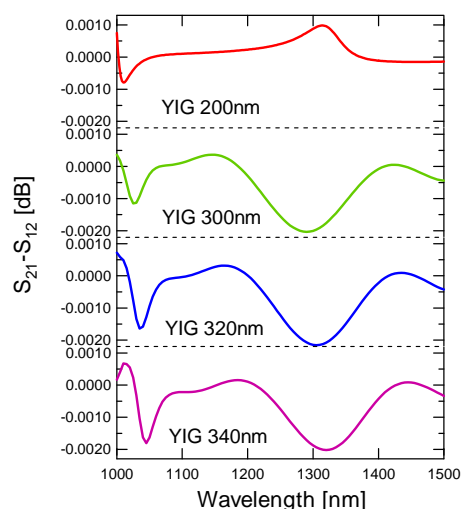


Fig. 2 Calculated spectra for metasurfaces with various Bi:YIG thickness