

# (Bi,L)(Fe,Co)O<sub>3</sub> (L: ランタノイド) 強磁性・強誘電性薄膜における Bi に対するランタノイド置換が飽和磁化・垂直磁気異方性・磁気 Kerr 回転角に及ぼす効果

Soumyaranjan Ratha, 鈴木陸, 鈴木悠太, 武田航太朗, 山本大地, 江川元太, <sup>○</sup>吉村 哲 (秋田大)

Effect of Lanthanoids substitution against Bi on various magnetic properties of multiferroic (Bi,L)(Fe,Co)O<sub>3</sub> (L: Lanthanoids) thin films

S. Ratha, R. Suzuki, Y. Suzuki, K. Takeda, D. Yamamoto, G. Egawa, <sup>○</sup>S. Yoshimura (Akita Univ.)

**はじめに** 強磁性・強誘電材料は、電場( $E$ )もしくは磁場( $H$ )による磁化( $M$ )および電気分極( $P$ )の方向制御が可能とされていることから、電界駆動型の低消費電力な次世代電子デバイス用材料として研究が活発化してきている。高性能磁気デバイス用磁性材料薄膜には、大きな飽和磁化( $M_s$ )、大きな垂直磁気異方性( $K_u$ ) (1より十分に大きな、垂直保磁力( $H_{c\perp}$ )/面内保磁力( $H_{c\parallel}$ )および垂直角型比( $S_{\perp}$ )/面内角型比( $S_{\parallel}$ ))、大きな磁気 Kerr 回転角( $\theta_k$ )などの高い機能が求められるが、現行の強磁性・強誘電材料薄膜のそれらの値は小さく、本薄膜の使用により磁気デバイスの低消費電力化はできても高性能化は容易でない。著者らは近年、(Bi<sub>1-x</sub>Ba<sub>x</sub>)FeO<sub>3</sub> (BBaFO) 薄膜、(Bi<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>)(Fe<sub>1-y</sub>Co<sub>y</sub>)O<sub>3</sub> (BLaFCO) 薄膜における置換元素量の最適化により、BBaFO 薄膜では 90 emu/cm<sup>3</sup> 程度の  $M_s$ , BLaFCO 薄膜では 75 emu/cm<sup>3</sup> 程度の  $M_s$ , 1 を超える  $H_{c\perp}/H_{c\parallel}$  および  $S_{\perp}/S_{\parallel}$ , 大きな  $\theta_k$ , などが得られることを報告している。またこれらの薄膜を用いて、局所電界印加によりその部分の磁化反転にも成功し、デバイス駆動の検証も行っている<sup>1,2)</sup>。しかしながら、真にデバイス実装を実現するためには、更に磁気特性に優れた強磁性・強誘電薄膜を探索作製することが必要となる。これまでの検討から、Aサイトの置換元素とBサイトの置換元素の組み合わせにより、各元素単独での置換の場合とは全く異なる磁気特性が得られることが判っている。よって本研究では、種々のランタノイド元素 ( $L = \text{La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er}$ ) を置換元素に用いた(Bi,L)(Fe,Co)O<sub>3</sub> 薄膜を作製し、優れた磁気特性を有する材料薄膜の探索を行った。

**方法** (Bi<sub>0.6-0.4</sub>L<sub>0.4-0.6</sub>)(Fe,Co)O<sub>3</sub> ( $L = \text{La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er}$ ) (BLFCO) 薄膜 (膜厚 200 nm) を、反応性パルス DC スパッタリング法 (周波数: 100-200 kHz, 電力: 150 W, デューティー比: 2:1) を用いて、熱酸化膜付き Si 基板/Ta(5 nm)/Pt(100 nm)下地層上に成膜した。積層膜は、Ta を室温, Pt を 400 °C, BLFCO を 700 °C, の基板温度で成膜した。磁気測定は振動試料型磁力計(VSM)および磁気 Kerr 効果測定装置により評価を行った。

**結果** Table.1 に、作製した BLFCO 薄膜の  $M_s$ ,  $H_{c\perp}$ ,  $H_{c\perp}/H_{c\parallel}$ ,  $S_{\perp}/S_{\parallel}$ ,  $\theta_k$ , をそれぞれ示す。各置換元素の原子番号, イオン半径の比(対 Bi), Fe に対する Co 置換量, もあわせて示す。BLaFCO 薄膜について, Fe に対する Co 置換量が 25 at%程度において, いずれの磁気特性も最大値を示すことが判る。この結果をふまえて, BLFCO 薄膜における Fe に対する Co 置換量も 25 at%程度とした。BLFCO 薄膜において, 一様に大きな  $M_s$  が得られたが, その中でも特に Nd や Er で置換した薄膜において 140 emu/cm<sup>3</sup> 程度が得られた。そして, 一様に大きな  $H_{c\perp}/H_{c\parallel}$  が得られたが, その中でも特に Sm や Gd で置換した薄膜において,  $S_{\perp}/S_{\parallel}$  も 1.0 以上で明確に垂直磁気異方性が得られた。

更に, 一様に大きな  $\theta_k$  が得られたが, その中でも特に Dy で置換した薄膜において 0.12° が得られた。Bi のランタノイドでの置換においては, 格子内のイオンバランスは変化しない(いずれも 3+) ことから, この置換が磁気特性に直接影響を与えるのではなく, Fe に対して置換された Co の各種磁性に対して, 各ランタノイド元素が及ぼす効果が異なるものと考えられる。

**参考文献** 1) S. Yoshimura et al., JJAP, 57, 0902B7 (2018) 2) M. Kuppen et al., Scientific Reports, 11, 11118 (2021)

Table 1 Magnetic properties of (Bi,L)(Fe,Co)O<sub>3</sub>-based films with various Lanthanoids substitution against Bi.

Substitution element	La						Nd	Sm	Gd	Dy	Er	Bi
Atomic number	57						60	62	64	66	68	83
Ratio of ion radius	1.11						1.09	1.07	1.06	1.04	1.04	1
Co <sup>2+</sup> / (Fe <sup>3+</sup> +Co <sup>2+</sup> )	0	0.05	0.12	0.17	0.28	0.31	0.25	0.25	0.24	0.27	0.24	—
$M_s$ (emu/cm <sup>3</sup> )	15	25	50	70	80	55	140	110	65	75	135	—
$H_{c\perp}$ (kOe)	0	0	2.8	3.1	2.6	2.7	2.1	1.9	2.2	2.7	1.9	—
$H_{c\perp}/H_{c\parallel}$	0	0	1.1	1.2	1.6	1.0	2.6	2.1	2.8	1.7	1.5	—
$S_{\perp}/S_{\parallel}$	0	0	0.8	0.9	1.3	0.5	1.0	1.4	1.4	0.6	0.6	—
$\theta_k$ (° @800 nm)	0	0	0.02	0.03	0.08	0.01	0.09	0.05	0.08	0.12	0.05	—

# BiFeO<sub>3</sub>系強磁性・強誘電薄膜におけるレーザーアシスト加熱成膜・後アニールが飽和磁化・磁気 Kerr 回転角に及ぼす効果

○鈴木陸, 江川元太, 吉村 哲

(秋田大)

Effect of laser-assisted heating / annealing on various magnetic properties of multiferroic BiFeO<sub>3</sub>-based thin films

○R. Suzuki, G. Egawa, S. Yoshimura

(Akita Univ.)

**はじめに** 室温において反強磁性・強誘電性を有する BiFeO<sub>3</sub> において Bi<sup>3+</sup>や Fe<sup>3+</sup>を適切な価数を有する元素で置換することで、強磁性が発現することが報告されている。我々は、反応性パルス DC スパッタリング法を用いて 695 °C で作製した (Bi,Ba)FeO<sub>3</sub>, (Bi,Nd)(Fe,Co)O<sub>3</sub> 薄膜において 90 emu/cm<sup>3</sup>, 140 emu/cm<sup>3</sup> 程度の高い飽和磁化 ( $M_s$ ) が得られることを報告している<sup>1)</sup>。しかし、電界駆動型磁気デバイスへ応用するにはさらに高い  $M_s$  が求められる。BiFeO<sub>3</sub> 系薄膜は、成膜後にアニール処理を行うことによる相形成の促進によって特性が向上すること、薄膜作製時の基板加熱温度の上昇により結晶性が向上すること、が一般的に知られている。本研究では (Bi,Ba)FeO<sub>3</sub>, (Bi,Nd)(Fe,Co)O<sub>3</sub> 薄膜において、真空成膜装置に取り付けた例はあまり報告されていないレーザーアシスト加熱機構を新規に用い、その基板温度に及ぼす性能を評価し、それを用いて更に高温での成膜および後アニールを行い、それぞれが構造と特性に与える効果の大きさについて検討した。

**方法** (Bi,Ba)FeO<sub>3</sub>, (Bi,Nd)(Fe,Co)O<sub>3</sub> (BBFO, BNFCO) 薄膜 (200 nm) を反応性パルス DC スパッタリング法によって成膜した。熱酸化膜付き Si 基板上に Ta (5 nm)/Pt (100 nm) を下地層として成膜した。このとき Ta 層は DC 電源を用いて室温で、Pt 層は RF 電源を用いて 400 °C で成膜した。BBFO, BNFCO 層は、薄膜作製装置に付属のランプヒーターを用いて 695 °C で成膜 (通常成膜), 695 °C で成膜した後に酸素雰囲気中で 30 分間の後アニール (後アニール成膜), ランプヒーターが ON の状態において更にレーザー光を照射するアシスト加熱を行って成膜した後にそのまま酸素雰囲気中で 30 分間の後アニール (レーザー照射後アニール成膜), の各手法を用いて作製した。Fig.1 にレーザーアシスト加熱機構を取り付けた超高真空スパッタリング装置の概略図を示す。Pt および BBFO, BNFCO 薄膜を成膜する際、結晶性の向上を図るため、VHF プラズマを照射した。スパッタリングターゲットには、BBFO 層は Ba-Fe-O 粉末, Fe 粉末を、BNFCO 層は Nd-Fe-O 粉末, Fe 粉末, Co 粉末を焼結させて作製した導電性ターゲットに Bi シートを配置したものを用いた。反応性パルス DC スパッタリング法におけるパルス条件として、BBFO, BNFCO 薄膜は、周波数をそれぞれ 100 kHz, 200 kHz, 電力は 150 W, ON:OFF 比は 3:2 とした。磁化曲線の測定には振動試料型磁力計 (VSM) を、磁気 Kerr 回転角の評価には磁気 Kerr 測定装置を用いた。

**結果** ランプヒーター加熱に加えてレーザーアシスト加熱 (6 W) を併用することで、基板温度を 695 °C から 858 °C へと増大させることができた。Fig.2 に通常成膜 (緑), 後アニール成膜 (青), レーザー照射後アニール成膜 (赤), の各手法を用いて作製した BBFO 薄膜の  $M_s$  における Bi に対する Ba の置換量依存性および代表的な  $M-H$  曲線を示す。Ba 置換量が 50~60 at% の薄膜において、通常成膜と比較して後アニール成膜では、 $M_s$  は増加し、さらにレーザー照射後アニール成膜において  $M_s$  は 98 emu/cm<sup>3</sup> と増加し、これまでの BBFO 薄膜の中では最も高い値が得られた。薄膜の結晶性の向上や表面平坦性の改善によるものと思われることから、大きな  $M_s$  が得られたと考えられる。当日の学術講演会では、レーザー照射後アニール成膜が BNFCO 薄膜の磁気特性に及ぼす効果、BiFeO<sub>3</sub> 系薄膜の磁気 Kerr 回転角に与える影響についても述べる予定である。

**参考文献** 1) 吉村 他, 第 45 回日本磁気学会学術講演会, 31aB-5

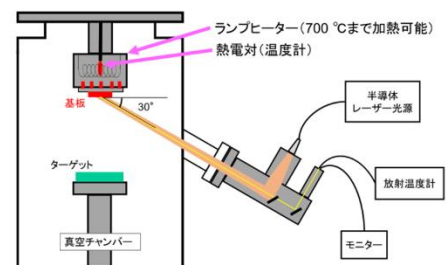


Fig.1 Schematic diagram of ultra-high vacuum sputtering equipment with laser assisted heating system.

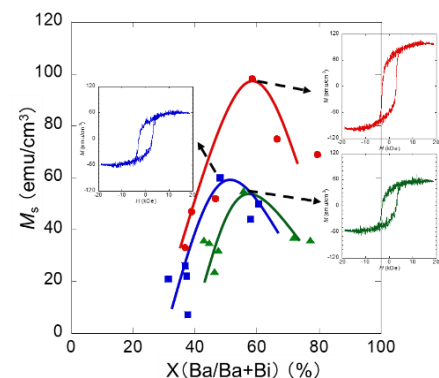


Fig.2 Dependence of Saturation magnetization of BBFO thin films on amount of Ba substitution against Bi. Typical  $M-H$  curves are also shown in figure.

## Perpendicular magnetic anisotropy of an interface of Fe/NiO investigated by polar magneto-optic Kerr effect

S. Jung<sup>1</sup>, A. Hidaka<sup>1</sup>, and H. Yanagihara<sup>1</sup>

1. Department of Applied Physics, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8573, Japan

The voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA) is of great interest in that its properties can lead to useful low energy consuming, high speed spintronics devices. According to Maruyama *et al.*, the VCMA property and perpendicular magnetic anisotropy (PMA) were found at the interface of ultrathin Fe and MgO<sup>1</sup>. However, the change in its VCMA is not enough to be utilized for devices as it is. Inspired by the result, Kobayashi *et al.* recently found that the interface of ultrathin Fe and NiO shows PMA which is measured by VSM<sup>2</sup>. They also evaluated the thickness dependency of the interface with AHE measurements, from which the interfacial magnetic anisotropy energy of 1.07 mJ/m<sup>2</sup> was derived. As it is hard to investigate VCMA properties with conventional magnetization measurement, a suitable method should be considered. In this research, the magnetic properties of the interface investigated by polar magneto-optic Kerr effect (PMOKE) are presented.

For the measurement, a Cr (2)/Fe (0-3)/NiO (10) thin film was prepared with reactive RF magnetron sputtering method grown on MgO (001) substrate. A NiO layer was grown at 500°C, while Fe and Cr layers were grown at room temperature. The thickness gradient with a range of 0 to 3nm was applied to the Fe layer. The Cr layer was used as a cap layer. After the fabrication, the sample was annealed at 450°C for 1 hour. The crystal structure and saturation magnetization of the film were investigated by an x-ray diffractometer (XRD) and VSM measurement, respectively. The magnetic properties at the interface were investigated using PMOKE. From the analysis, the evaluated interfacial magnetic anisotropy energy was 0.93 mJ/m<sup>2</sup>.

In order to study the VCMA effect of the Fe/NiO interface, a thin film of conductive spinel oxide CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> was inserted as a bottom electrode between the NiO and MgO substrate, which makes it possible to apply voltage to the interface of Fe/NiO layer. The insertion of the electrode layer did not greatly affect the interfacial magnetic anisotropy energy of the interface.

### References

- 1) T. Maruyama *et al.*, Nat. Nanotechnol **4**, 158 (2009)
- 2) S. Kobayashi *et al.*, 16p-Z19-7, JSAP Spring Meeting (2021).

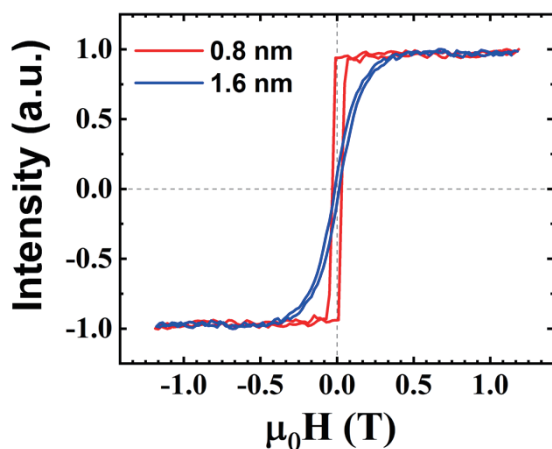


Fig 1. Normalized Kerr signal which is derived from two sites on a wedged Fe layer with thickness of 0.8 and 1.6 nm grown on NiO, for applied magnetic fields.

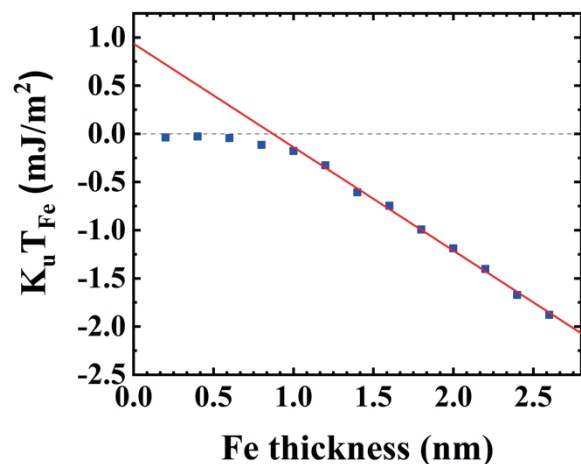


Fig 2. Interfacial magnetic anisotropy energy of the Fe/NiO interface evaluated with PMOKE measurement. The red line is extrapolated from a linear part of some measured values.

## Co/Ru/Co 人工フェリ磁性体の磁化過程

久田優一、小森祥央、井村敬一郎、谷山智康  
(名古屋大学)

Magnetization process of Co/Ru/Co Synthetic Ferrimagnets

Yuichi Hisada, Sachio Komori, Keiichiro Imura, and Tomoyasu Taniyama

(Department of Physics, Nagoya University, Japan)

### はじめに

反強磁性結合において、磁気モーメントが打ち消しあわず、有限の値を示すフェリ磁性体は、強磁性体のように容易に磁場に応答し、かつ反強磁性体のような高速な磁場応答を示す[1,2]ため、近年研究が盛んに行われている。その中でも、本研究では、強磁性体/非磁性体/強磁性体構造から実現される人工フェリ磁性体に着目した。この構造では、非磁性層を介し、二つの強磁性層がフェリ磁性のように結合されることが知られているが、その磁化過程については十分な研究がなされていない。今回我々は、人工フェリ磁性体の磁化過程において特異な現象を見出したので、報告する。

### 実験方法

RF マグネトロンスパッタリングを用いて、(011)配向の  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT) 基板の上に、人工フェリ磁性体  $\text{Nb}(3 \text{ nm})/\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Ru}(d_{\text{Ru}})/\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Nb}(5 \text{ nm})$  を成膜し、磁気特性を磁気光学 Kerr 効果及び振動試料型磁力計によって測定した。

### 実験結果

Fig. 1 に、 $\text{Nb}(3 \text{ nm})/\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Ru}(d_{\text{Ru}})/\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Nb}(5 \text{ nm})$  人工フェリ磁性体における飽和磁場の Ru 膜厚依存性を示す。 $d_{\text{Ru}} = 0.5 \text{ nm}$  付近において、飽和磁場の値が極大となり、Ru を介した二つの Co 間の反強磁性結合が強くなることが確認された。 $d_{\text{Ru}} = 0.5 \text{ nm}$  の試料の磁化曲線を Fig. 2 に示す。ゼロ磁場付近では、フェリ磁性特有の強磁性成分が確認された。また、500 Oe 付近において、反強磁性体と類似したスピンドロップのような磁化過程が確認された。この現象については現在調査中である。講演当日には、フェリ磁性体の磁気異方性や、さらには電界効果についても報告をする。

### 参考文献

- [1] K. J. Kim *et al.*, Nat. Mater. **16**, 1187 (2017)  
[2] L. Caretta *et al.*, Nat. Nanotechnol. **13**, 1154 (2018)

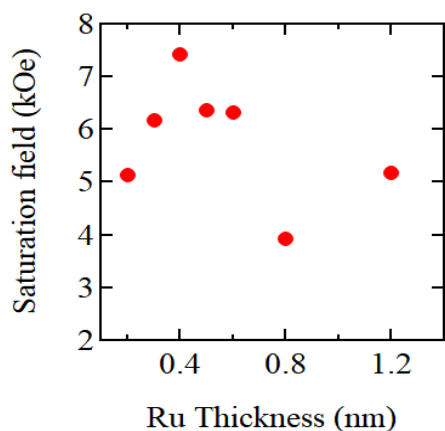


Fig. 1 Saturation field versus Ru thickness for  $\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Ru}(d_{\text{Ru}})/\text{Co}(3 \text{ nm})$  synthetic ferrimagnets.

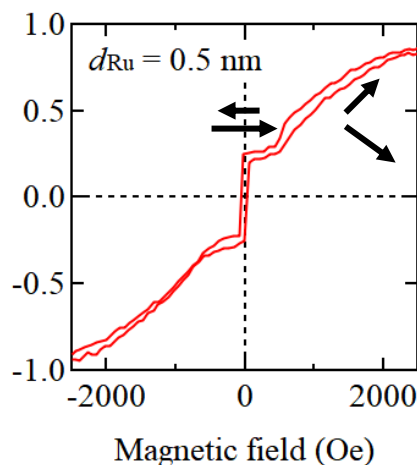


Fig. 2 Magnetization curve for a  $\text{Co}(3 \text{ nm})/\text{Ru}(0.5 \text{ nm})/\text{Co}(3 \text{ nm})$  synthetic ferrimagnet.



# FeCo-SiN ナノグラニューラー薄膜の磁気光学ヒステリシスの解析

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 hysteresis analysis in FeCo-SiN nanogranular films

Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, Ken-Ichi Arai

(Research Institute for Electromagnetic Material, 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、多様な物性を示すことで知られている。我々のグループは、フッ化物系ナノグラニューラー膜が光透過性を示し<sup>1)</sup>、巨大な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>。ナノグラニューラー構造では、ナノ磁性粒子に起因する超常磁性を示すことが多いが、強磁性としてファラデーヒステリシスを形成することが可能となれば、磁界が印加されていない状態であっても磁気光学効果を発現することが期待される。本研究では、磁気光学ヒステリシスを有するナノグラニューラー薄膜の作製を目的として、SiNをマトリックスとしたナノグラニューラー薄膜を解析した。本報告では、FeCo-SiN ナノグラニューラー膜の、ファラデーループの解析結果について報告する。

## 実験方法

ナノグラニューラー薄膜の成膜には、シリコンナイトライドターゲット上に Fe<sub>60</sub>Co<sub>40</sub> 合金チップを配置した複合ターゲットを用い、Ar+N<sub>2</sub>の混合ガス雰囲気において作製した。成膜は 400°Cの加熱雰囲気で行い、膜厚が約 800 nm の薄膜を作製した。結晶構造は XRD で解析し、磁化曲線は VSM で測定した。ファラデー効果は、分光式ファラデー効果測定装置 (NEOARK, BH-501F-SVI)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。光学定数はエリプソメータ(Horiba, UVISEL-Plus)による解析により求めた。

## 実験結果

スパッタ中の混合ガス雰囲気を変えて成膜した FeCo-SiN ナノグラニューラー薄膜の磁化曲線を Fig.1 に示す。窒素ガス比率が高くなるに従い、超常磁性から強磁性に変化することが確認される。Fig.2 に N<sub>2</sub> 雰囲気で作製した薄膜のファラデー回転角ループ(1310 nm)を示す。明瞭なファラデー回転ヒステリシスを示すことが確認される。10 kOe 印加時の Faraday 回転角が 1.9 deg./ $\mu$ m であるのに対し、ゼロ磁界での回転角は 0.8 deg./ $\mu$ m であり、磁界の印加がない状態であっても高い Faraday 回転角を示すことが分かる。今回の結果は、スパッタ時のガス雰囲気を変えることにより FeCo 粒子の磁気異方性が変化したことが影響していると推測できる。

## 謝辞

本研究は JST-CREST、JPMJCR19T1 および JSPS 科研費 20K03843, 20H02468, 19K21959 の助成を受けたものです。

## Reference

- 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).

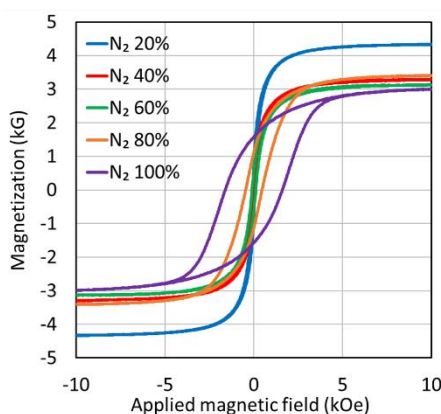


Fig.1 Magnetization hysteresis curves of FeCo-SiN films.

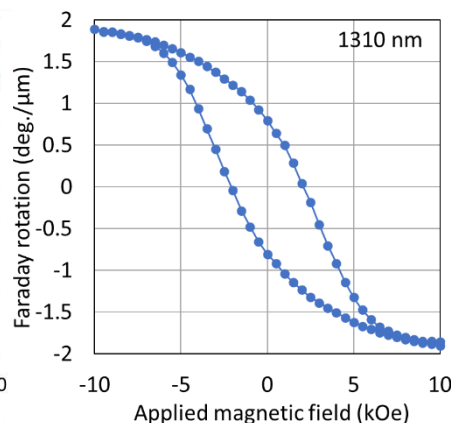


Fig.2 Faraday hysteresis loop of FeCo-SiN film.

# Co-SiO<sub>2</sub> グラニューラー薄膜の光学および磁気光学特性

船木佑也, 北原旭, 橋本良介\*, 内田裕久  
(豊橋技科大, \*鈴鹿高専)

Optical and magneto-optical properties of Co-SiO<sub>2</sub> granular thin films  
Yuya Funaki, Akira Kitahara, Ryosuke Hashimoto, Hironaga Uchida  
(Toyohashi University of Technology, \*NIT. Suzuka College)

## はじめに

新しい磁気光学 (Magneto-optical : MO) 材料として磁気光学グラニューラー薄膜が注目されている。この材料は、誘電体媒体中に強磁性粒子が分散したグラニューラー構造を持ち、近赤外波長域で高い光透過率と大きな MO 効果が発現することが報告されている<sup>1)</sup>。我々は、このグラニューラー薄膜について、高い透過率や大きなファラデー回転角を得るために誘電体や強磁性材料の種類や組み合わせ、作製方法の検討を行ってきた<sup>2)</sup>。先行研究では、Co-SiO<sub>2</sub> 磁気光学グラニューラー薄膜で基板加熱無しで作製した試料で、波長 900 nm 近傍で光透過率 25%、ファラデー回転角  $-1.6 \text{ deg./}\mu\text{m}$  の試料を作製することができた<sup>3)</sup>。本研究では、この試料を用いて、光学および磁気光学測定を行い、その機構について考察を進める。

## 実験結果および考察

Co-SiO<sub>2</sub> 磁気光学グラニューラー薄膜は、RF マグネトロンスパッタ法で室温 (厚さ 330 nm, Co 41 atom%) および 200°C (厚さ 280 nm, Co 39 atom%) で加熱して作製した。Fig. 1 に、室温と 200°C で加熱して製膜した Co-SiO<sub>2</sub> 磁気光学グラニューラー薄膜の透過率スペクトル (UV-3150, Shimadzu) を示す。200°C で成膜したグラニューラー薄膜のこの実験では、薄膜中の Co の割合は同程度であったが、200°C で加熱製膜した場合の透過率は低下してしまった。さらに高い温度である 400°C と 600°C で加熱成膜した場合でも同様に透過率は低下した。

エリプソメータ (RC2-DI, J. A. Woollam) によって導出した室温と 200°C で成膜した薄膜の屈折率  $n$  と消衰係数  $\kappa$  を Fig. 2 に示す。600 nm 以下の波長では光の透過はほとんどなくなるが、これは大きな消衰係数によるものである。600 nm 以上で室温成膜した薄膜の透過率が大きいのは、室温成膜した試料の消衰係数がより小さいことに起因するものである。

磁気光学効果測定装置 (J-1700FK, 日本分光) によって室温で作成したグラニューラー薄膜のファラデー楕円率角スペクトルを測定し、さらにクラマース・クローニッヒの式を用いて、ファラデー楕円率角を求めた。それらのスペクトルを Fig. 3 に示す。ファラデー回転角は 400~600 nm では正の方向に回転し、800 nm 以上では負の方向に回転するのが、この試料の大きな特徴であり、赤外光域での利用の可能性がある。ファラデー楕円率角のスペクトルは回転角の変化に対応したものになる。今後、このグラニューラー薄膜の誘電率テンソルを求め、シミュレーションなどにより解析を進める。

## 参考文献

- 1) N. Kobayashi et al., Scientific Reports 8, 4978 (2018).
- 2) 西本光佑 他, マグネティックス研究会資料, MAG-19-227, 35-29 (2019).
- 3) 北原旭 他, 第 44 回日本磁気学会学術講演概要集, 17pB-4, 207 (2020).

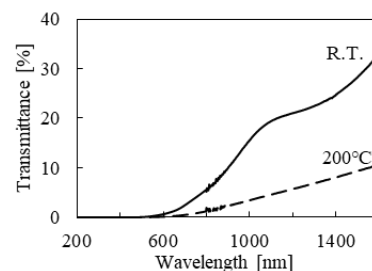


Fig. 1 Transmissivity spectra for films deposited at room temperature and 200°C

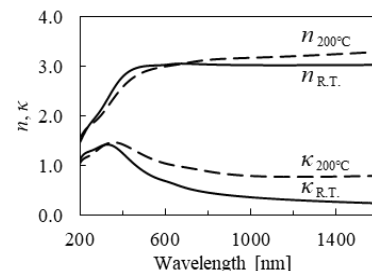


Fig. 2 Refractive index and extinction coefficient spectra

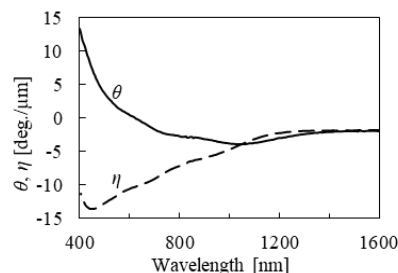


Fig. 3 Spectra of Faraday rotation angle and faraday ellipticity angle

## 反強磁性結合を有する CoPt/Ru 積層膜における表面プラズモン共鳴

山根治起、小林政信\*、安川雪子\*  
(秋田県産業技術センター、\*千葉工業大学)

Magneto-optical surface plasmons on CoPt/Ru stacked films with antiferromagnetic coupling

H. Yamane, M. Kobayashi\*, Y. Yasukawa\*

(Akita Industrial Technology Center, \*Chiba Institute of Technology)

## はじめに

大きな磁気光学応答は、光アイソレータや光検知式バイオセンサなど光機能デバイスの高性能化に繋がる  
と期待されている。我々は、*hcp*(001)-Co<sub>80</sub>Pt<sub>20</sub> 垂直磁化膜にナノ構造を付与することで、プラズモン共鳴や光  
学干渉による磁気光学効果の増強/変調、ならびに、化学センサへの応用について検討を進めている [1], [2]。  
本研究では、反強磁性結合を有する [CoPt/Ru/CoPt] 垂直磁化積層膜において、表面プラズモン共鳴が磁気光学  
特性(極 Kerr 効果)に与える影響について検討を行った。

## 実験方法

試料の膜構造は、Fig. 1 に示すように、[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5 nm)/CoPt(4.8 nm)/Ru(x nm)/CoPt(4.8 nm)/Al-ZnO(30 nm)]/ガラス基板とし、Ru  
中間層の厚さを変えることで CoPt 層間の磁気結合を制御した。試料の作製にはマグネトロンスパッタ装置を用い、垂直磁気特  
性の向上を図るために Al-ZnO 下地層、および、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面保護層を形成した。直角プリズムと光学結合させた全反射光学系  
にて、表面プラズモンを励起した。基板裏面側から、p 偏光(半  
導体レーザー:  $\lambda = 658$  nm)を照射した状態で、膜面垂直方向に磁  
場を印加する極 Kerr 配置にて磁気光学効果の測定を行った。

## 実験結果

[CoPt/Ru/CoPt] 積層膜では、Ru 中間層を介して CoPt 層間に  
働く RKKY 的な交換相互作用によって磁化の反平行配列状態  
が実現される。Fig. 2 に、通常の極 Kerr 装置にて測定したマイ  
ナーループのシフト磁界(交換結合磁界:  $H_{EX}$ )の Ru 層厚依存性  
を示す。Ru 層厚: 0.26~1.0 nm の範囲で、反強磁性結合(AFC)  
が実現されているのが分かる。次に、Fig. 1 で示した全反射光  
学系において、AFC-CoPt 積層膜の反射光強度および偏光状態  
の磁場依存性を測定した。その結果、表面プラズモンの共鳴条  
件では、大きな磁気 Kerr 効果(偏光角:  $\theta_K = 74.5$  度)とともに、  
反射光強度も磁場印加によって大きく変化することが確認さ  
れた。Fig. 3 は、Ru 層厚が 0.77 nm の試料の結果であり、CoPt  
層の磁化配列(平行/反平行)に依存して、反射光強度が大きく  
異なることが分かる。本現象は、偏光度に依存する表面プラズ  
モン共鳴に起因した光学吸収の違いによって説明できる。飽和  
磁化状態では、反射光は主に s 偏光成分で構成されるのに対し  
て、反平行配列では疑似的な非磁性状態となり、磁気光学効果  
が消失して s 偏光成分は生じないために反射光強度が減少する。  
本研究は、科研費(20K05375)の助成を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] H. Yamane *et al.*, *J. Appl. Phys.* **124**, 083901 (2018)  
[2] H. Yamane, *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, SCCG01 (2021)

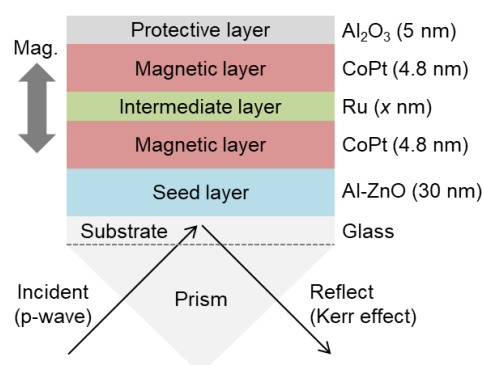


Fig. 1 Schematic illustration of AFC-CoPt magneto-plasmonic system.

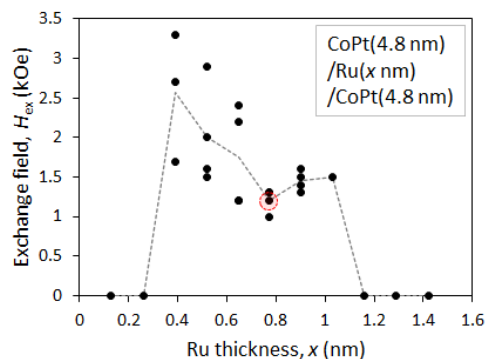


Fig. 2 Dependence of exchange coupling field on Ru thickness for AFC-CoPt films.

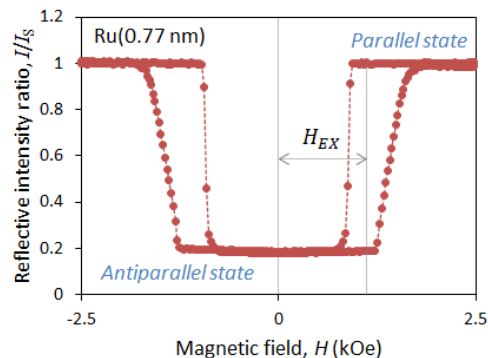


Fig. 3 Change in reflective intensity of AFC-CoPt by magnetic applied field.