

Ta/NiFe/Pt 三層膜の界面垂直磁気異方性の評価

平山重之^{***}、葛西伸哉^{**}、三谷誠司^{***}

(*筑波大学、**物材機構)

Characterization of interface perpendicular magnetic anisotropy in Ta/NiFe/Pt trilayers

S. Hirayama^{***}, S. Kasai^{**}, S. Mitani^{***}

(*Univ. of Tsukuba, **NIMS)

背景

Pt のような非磁性重金属と NiFe を代表とする 3d 強磁性金属積層膜は、スピンホール効果による磁化ダイナミクスを誘起・検出できることから、スピントロニクス分野で現在注目を集めているヘテロ接合系である。強磁性共鳴 (FMR) は磁化ダイナミクスの研究におけるポピュラーな測定技術の一つであり、実際に NiFe/Pt 積層膜の評価に有効である[1]。FMR の解析では磁気異方性が重要であるが、NiFe 系積層膜の界面磁気異方性の研究は必ずしも十分ではなく[2,3]、界面垂直磁気異方性の定量評価などの詳細な検討が必要であると考えられる。本研究では、Ta/NiFe/Pt 三層膜の磁化過程を詳しく調べ、界面垂直磁気異方性の定量化を試みた。

実験方法

RF マグネトロンスパッタを用いて、熱酸化シリコン基板上に Ta をバッファー層とした Ta/Ni₈₀Fe₂₀/Pt 三層膜を作製した。NiFe 膜厚 t は 1 nm から 5 nm、Ta 及び Pt 膜厚は 5 nm である。試料の磁気特性は振動試料型磁力計を用いて室温で測定した。垂直磁気異方性エネルギー K_u は、飽和磁化 M_s と困難軸方向の飽和磁場 H_k より、 $K_u = M_s \cdot H_k / 2$ で近似した。

実験結果

得られた試料の磁化測定の結果、試料は全て面内磁化を示した ($K_u < 0$)。Fig. 1 に、 $M_s \cdot t$ と $K_u \cdot t$ の膜厚依存性を示す。Fig. 1(a)では、直線的な依存性が得られており、いわゆるデッドレイヤーが成り立っているように見える。デッドレイヤーを仮定した場合のその厚さ t_d は 0.58 nm と見積もられた。この場合の界面垂直磁気異方性は、 $t_d = 0.58$ nm での $K_u \cdot t$ に相当すると考えられ、Fig. 1(b)より界面垂直磁気異方性エネルギー K_i は 0.2 erg/cm^2 となる。一方、デッドレイヤーモデルの対極として、一様磁化を仮定したモデル場合には、概ね $H_k \sim 4\pi M_s$ の関係も得られ、磁化測定の結果は K_i の存在の明確な証拠にはなっていないことも分かった。上記2つのモデルはある種の極限ケースであるため、実際の界面垂直磁気異方性の大きさは、0 と 0.2 erg/cm^2 の間にあると考えられる。

参考文献

- [1] K. Kondou, H. Sukegawa, S. Mitani, K. Tsukagoshi and S. Kasai, Appl. Phys. Express **5** (2012) 073002.
- [2] F. J. A. den Broeder, W. Hoving and P. J. H. Bloemen, J. Magn. Mater. **93** (1991) 562.
- [3] M. S. Gabor, C. Tiusan, T. Petrisor, Jr. and T. Petrisor, IEEE Trans. Magn. **50** (2014) 2007404.

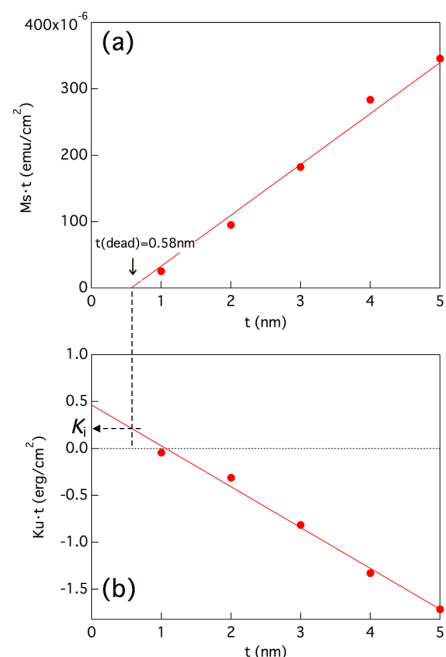


Fig. 1. (a) $M_s t$ and (b) $K_u t$ as a function of t for Ta/NiFe/Pt trilayers. From the linear dependence in (a), the dead-layer thickness was determined to be 0.58 nm. By assuming the 0.58 nm thick dead-layer in (b), K_i is evaluated to be $\sim 0.2 \text{ erg/cm}^2$.

Underlayer-dependent perpendicular magnetic anisotropy of $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ Heusler alloy ultra-thin films

○Mingling Sun^{1,2}, Shigeki Takahashi³, Takahide Kubota^{2,4}, Arata Tsukamoto⁵,
Yoshiaki Sonobe³, and Koki Takanashi²

(¹. Grad. School of Eng., Tohoku Univ., ² IMR, Tohoku Univ., ³ Samsung R&D Institute Japan,

⁴ CSRN, Tohoku Univ., ⁵ Dept. Electronic Eng., Nihon Univ.)

Introduction

Spin transfer torque magnetoresistive random access memory (STT-MRAM) is being developed as a candidate for the next generation non-volatile memories. For the development of giga-bit-class STT-MRAM, perpendicularly magnetized films with high spin polarization are required [1]. Some Co-based Heusler alloys, such as Co_2FeAl , $\text{Co}_2(\text{Fe-Mn})\text{Si}$, are known as half-metallic compounds and their ultra-thin films with perpendicular magnetic anisotropy (PMA) have been investigated [2-4]. Our group has been studying PMA in $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ (CFMS) ultra-thin films with a Pd underlayer [3, 4], showing perpendicular magnetization. However, the underlayer dependence of PMA in CFMS ultra-thin films is unclear. In this work, we have systematically investigated PMA in CFMS ultra-thin films with different kinds of underlayers.

Experimental methods

The stacking structure of samples was as follows: MgO (100) substrate / underlayer(s) / CFMS (t_{CFMS}) / MgO (2 nm) / Ta (5 nm), in which the CFMS layer thickness, t_{CFMS} was changed in the range from 0.6 to 1.4 nm. Pd, Ru and Cr were chosen as underlayers. For Pd and Ru underlayers, Cr was first deposited on the substrate as a buffer layer in order to get a smooth surface. The metallic layers were deposited using an ultrahigh-vacuum sputtering system with a base pressure less than 2×10^{-7} Pa, and the MgO layer was deposited using electron beam evaporation system. *In-situ* post-annealing process was done after the deposition of Cr buffer at 700°C for 1 hour. The deposition temperature for the Pd layer was 350°C, and other layers were deposited at an ambient temperature. After the deposition of all layers, the samples were annealed in a vacuum furnace. The annealing temperatures (T_{anneal}) were 200°C, 300°C, 400°C and 500°C. Hysteresis loops of all samples were measured by superconducting quantum interference device-vibrating sample magnetometer (SQUID-VSM) at 300 K. The maximum applied magnetic field was 30 kOe.

Results

Perpendicularly magnetized films were achieved in the samples with $t_{\text{CFMS}} = 0.6$ and 0.8 nm using the Pd underlayers and $T_{\text{anneal}} = 400^\circ\text{C}$. However, all films exhibited in-plane magnetization in the samples using the Ru and Cr underlayers, regardless of the annealing temperatures. The maximum value of PMA energy (K_u) were 1.7×10^7 ($t_{\text{CFMS}} = 0.6$ nm), 7.3×10^6 ($t_{\text{CFMS}} = 1.0$ nm) and 7.1×10^6 ($t_{\text{CFMS}} = 0.8$ nm) erg/cm³ for Pd, Ru and Cr underlayers, respectively. T_{anneal} for the optimum condition was 400°C for all. The maximum value of interface anisotropy energy (K_s) were 1.2, 0.3 and 0.2 erg/cm² for the Pd, Ru and Cr underlayers, respectively at the optimum T_{anneal} . It is suggested that the differences in the dead layer thickness and the amount of the interdiffusion possibly result the underlayer dependence of the PMA in CFMS ultra-thin films.

Acknowledgment

This work was partially supported by MEXT-Supported Program for the Strategic Research Foundation at Private Universities, 2013–2017.

References

- [1] H. Yoda, *et al.*, *Curr. Appl. Phys.* **e10**, 387 (2010).
- [2] Z. Wen *et al.*, *Adv. Mater.* **26**, 6483–6490 (2014).
- [3] T. Kamada *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 2600304 (2014).
- [4] T. Kubota *et al.*, *Mater. Trans.* **57**, 773 (2016).

有機金属分解法を用いて作製した磁性ガーネット薄膜の磁気異方性

齊藤日菜、芦澤好人、中川活二
(日本大学)

Magnetic anisotropy of garnet films fabricated by metal organic decomposition method

H. Saito, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa

(Nihon University)

はじめに

酸化物フェリ磁性体である磁性ガーネットはダンピング定数が小さいため、スピン波伝搬用材料として注目されている。我々は高機能化・高性能化を目指して種々の元素を置換した磁性ガーネット¹⁾の検討を行っている。一般的に Liquid Phase Epitaxy (LPE)法で作製した薄膜の結晶性は優れているが、多種の組成のガーネット膜作製には効率が悪い。そこで我々は、幅広く組成の異なる薄膜作製試作が比較的容易な有機金属分解 (MOD)法によるガーネット膜作製を行い、まず基本特性を求め、その後 LPE 法による成膜へのステップを考えた。MOD 法で作製した磁性ガーネット薄膜は、その結晶性の不十分さからスピン波の散乱等の欠点も予想され、この点もクリアにしていきたい。本報告では、ガラス基板上、Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG)単結晶基板上に MOD 法による磁性ガーネット薄膜を作製・評価した。

実験方法

試料には、Y_{1.5}Bi₁R_{0.5}Fe₄Ga₁O₁₂ (R = Dy, Eu)を用いた。Y₃Fe₅O₁₂ (YIG)をホストガーネットとし、磁気光学効果が大きい Bi を置換し、また磁気歪み定数が異なる Dy, Eu を置換した。コーニング社製ガラス基板、GGG (111)単結晶基板上にそれぞれ MOD 溶液を塗布、スピコートし、有機溶媒を蒸発させるために 100 °C で 10 分間、乾燥させた。次に有機物を分解し揮発させるために 450 °C で 10 分間、仮焼成を行った。スピコートから仮焼成までの工程を 1 回行うことで膜厚は 40 nm 程度である²⁾。この工程を 4 回繰り返したため膜厚は 160 nm 程度である。最後に試料を結晶化させるために 750 °C で 3 時間、本焼成を行った。試料の磁気特性を磁気ファラデー効果により評価した。薄膜の歪み誘導磁気異方性エネルギー K_u は次のように表される¹⁾。

$$K_u = -\frac{3}{2}\lambda \frac{E_f}{1-\nu_f} \left[(1-\eta) \frac{a_s - a_f}{a_f} + \eta(\alpha_f - \alpha_s)\Delta T \right] \quad (1)$$

ここで λ は薄膜の磁気歪み定数、 E_f 、 ν_f はそれぞれ薄膜のヤング率、ポアソン比、 a_f 、 a_s はそれぞれ薄膜、基板の格子定数、 α_f 、 α_s はそれぞれ薄膜、基板の熱膨張係数、 ΔT は成長温度と室温の差である。また、 η は薄膜が受ける基板の結晶格子による歪みの開放度であり、その膜応力は $\eta = 0$ では格子定数差で決定され、 $\eta = 1$ では熱膨張力差で決定されることを意味する。

実験結果

ガラス基板上 Y_{1.5}Bi₁R_{0.5}Fe₄Ga₁O₁₂ (R = Dy, Eu)薄膜は、XRD から多結晶であることを確認した。磁気トルク測定より、ガラス基板上 Dy, Eu 置換薄膜の K_u はそれぞれ 3.92×10^3 erg/cc、 5.63×10^3 erg/cc であった。一方、 λ を R₃Fe₅O₁₂ (R = Y, Dy, Eu)の磁気歪み定数¹⁾の加重平均値とし、 $\eta = 1$ での K_u を式(1)より算出すると、Dy, Eu 置換薄膜の K_u は 3.72×10^4 erg/cc、 -7.40×10^3 erg/cc となり磁気トルク測定結果と一致しない。これより、熱膨張係数差だけの議論は不十分であり、歪み緩和等の考慮も必要だと考えられる。

GGG 単結晶基板上 Y_{1.5}Bi₁R_{0.5}Fe₄Ga₁O₁₂ (R = Dy, Eu)薄膜は XRD からエピタキシャル成長が確認され、それぞれの格子定数は 12.45 Å、12.43 Å であった。GGG 基板上に作製した Dy, Eu 置換薄膜の膜面垂直の磁気ファラデーヒステリシスを Fig. 1 に示す。これより Eu 置換薄膜の有効磁気異方性が Dy 置換薄膜の場合より大きいと考えられる。前述同様に加重平均した λ を用いて、格子定数差と熱膨張係数差の寄与を考えるために、 $\eta = 1$ 、0 のときの GGG 基板上の K_u を求め、Table 1 に示す。基板との格子定数差から歪み誘導磁気異方性が誘起される条件である $\eta = 0$ のとき、Dy, Eu 置換薄膜の K_u はそれぞれ負、正となり、Fig. 1 の傾向と一致し、XRD の結果とも整合した。

謝辞

本研究の一部は、平成 25～29 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311020) の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) K. Matsuumi, "Magnetic bubbles", edited by S. Iida and H. Kobayashi (Maruzen, Japan, 1977), pp. 84-92. [in Japanese]
- 2) T. Ishibashi, A. Mizusawa, N. Togashi, T. Mogi, M. Houchido, K. Sato: J. Crystal Growth, **275**, e2427-e2431 (2005).

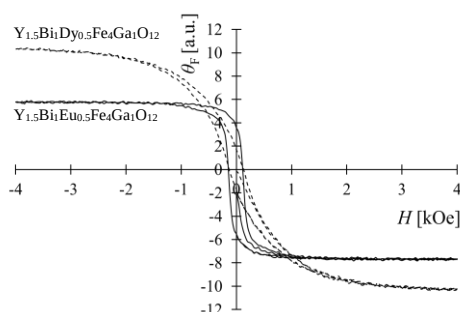


Fig. 1 Magnetic Faraday loop of Y_{1.5}Bi₁R_{0.5}Fe₄Ga₁O₁₂ (R = Dy, Eu) garnet films on Gd₃Ga₅O₁₂ substrates.

Table 1 Magnetic anisotropy energy K_u of Y_{1.5}Bi₁R_{0.5}Fe₄Ga₁O₁₂ (R = Dy, Eu) garnet films on Gd₃Ga₅O₁₂ substrates calculated from Eq. 1.

R	K_u [erg/cc]	
	$\eta = 0$	$\eta = 1$
Dy	-14.45×10^4	2.21×10^4
Eu	2.57×10^4	-0.66×10^4

スピネルフェライト薄膜の一軸異方性と軌道角運動量

井上順一郎^{1,2}、田結庄健¹、松本光玄¹、柳原英人¹、喜多英治¹

(筑波大学理工学域¹、東北大学応用物理学専攻²)

Uniaxial magnetic anisotropy and orbital angular momentum of spinel-ferrite thin films

J. Inoue^{1,2}, T. Tainosho¹, M. Matsumoto¹, H. Yanagihara¹, and E. Kita¹

(Inst. Appl. Phys., Univ. of Tsukuba¹, Dept. Appl. Phys. Tohoku University²)

はじめに

CoFe₂O₄ および NiFe₂O₄ などのスピネルフェライトはよく知られた酸化物磁性体である。最近スパッタ法を用いてエピタキシャル成長させたこれらのスピネルフェライト薄膜において、良好な磁気特性が発現する。特に、MgO(001)基板上のコバルトフェライトは 10Merg/cm³ 以上の一軸異方性を示す[1]。さらに MgAl₂O₄(001)基板上の CoFe₂O₄ および NiFe₂O₄ 薄膜も面内磁気異方性ながら大きな磁気異方性を示す[2,3]。このよう大きな磁気異方性はスピネルフェライトの格子定数が(001)基板により変調されるため生じると理解され、現象論を用いて定式化されている[4]。しかしながら、その現象論では異方性エネルギーと格子定数 c/a との関係が不明瞭のままとなっている。そこで本研究では電子論を用いて、磁気異方性と c/a との関係を明らかにする。併せて、磁性イオンの軌道角運動量の c/a 依存性を求め、実験と比較する。

モデル

磁性イオンとその周りの再隣接酸素イオンを含むクラスターに、p-d 混成とスピン軌道相互作用 (SOI) を取り入れた 1 電子モデルを採用する。電子状態の計算には既存の tight-binding 法を採用する。SOI としては原子内 SOI を採用する。磁化方向を変化させたときの基底状態のエネルギーから磁気異方性エネルギーを求める。

計算結果

スピネルフェライト内 Fe²⁺, Co²⁺, Ni²⁺イオンの面直・面内磁気異方性エネルギーの c/a 依存性をそれぞれ Fig. 1 (a), (b), (c)に示す。緑色で示した領域が実験値に対応する。SOI の値を 0.01-0.02 eV/atom とすると実験結果をよく説明できる。また現象論の結果も再現している。

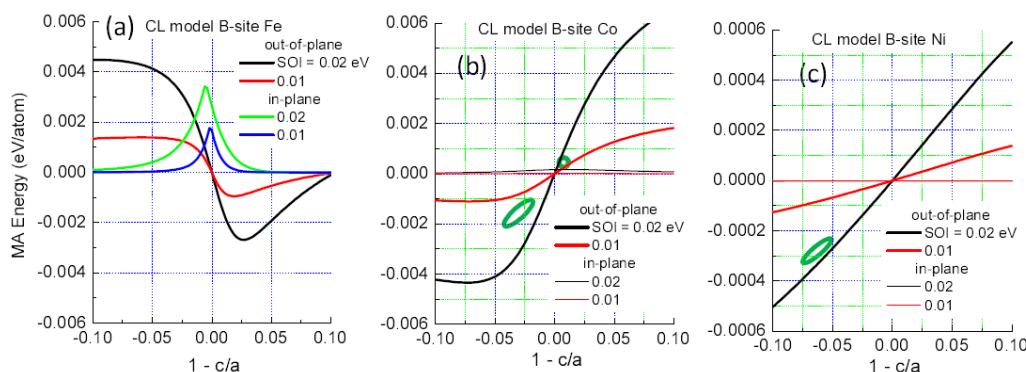


Fig.1 (a) Fe²⁺, (b)Co²⁺, (c) Ni²⁺における面直・面内磁気異方性の c/a 依存性。緑枠領域が実験値。

参考文献 : [1] T. Niizeki et al., APL103, 162409(2013), [2]田結庄ら、日本磁気学会 8pB14 (2015)、[3]松本ら、日本磁気学会 8pB12 (2015)、[4] J. Inoue et al., Matr. Res. Exp. 1, 046106 (2014).