## 界面スピン軌道相互作用誘起の Fe 超薄膜の垂直磁気異方性の変化

山本真吾 <sup>A</sup>、山本航平 <sup>A</sup>、田久保耕 <sup>A</sup>、福田憲吾 <sup>B</sup>、大島大輝 <sup>C</sup>、加藤剛志 <sup>B</sup>、岩田聡 <sup>C</sup>、和達大樹 <sup>A</sup>、松田巌 <sup>A</sup> (東大物性研 <sup>A</sup>、名古屋大工 <sup>B</sup>、名古屋大未来材料・システム研究所 <sup>C</sup>) Study of perpendicular magnetic anisotropy change of Fe ultrathin film induced by interfacial spin-orbit interaction Sh. Yamamoto <sup>A</sup>, K. Yamamoto <sup>A</sup>, K. Takubo <sup>A</sup>, K. Fukuta <sup>B</sup>, D. Oshima <sup>C</sup>, T. Kato <sup>B</sup>, S. Iwata <sup>C</sup>, H. Wadati <sup>A</sup>, I. Matsuda <sup>A</sup> (AISSP Univ. of Tokyo, BNagoya Univ., CNagoya Univ. IMaSS)

## はじめに

スピントロニクス分野においてデバイスの高密度・集積化のために、面直磁化膜が注目を集めている。しかし垂直磁気異方性(Perpendicular Magnetic Anisotropy: PMA)の発現に関して、詳細な理論での解釈が完全にはなされていない。これまで PMA やその電場依存性は、界面へのドーピングの効果から説明がなされてきていた[1]。それに対して近年、理論的な先行研究によって強磁性体の交換相互作用と界面におけるラシュバスピン軌道相互作用の協奏によって強磁性体超薄膜に PMA が発現し、その電場依存性についても説明ができるとされた[2]。本研究ではスピン軌道相互作用の大きな 5d 金属 Au と絶縁体 MgO といった異種の層の間に 3d 遷移金属 Fe の超薄膜を挟み込んだ系(Au/Fe/MgO 系,Fig.1(a)) について、Fe を同種の層(Au)で挟んだ場合と比較し、その垂直磁気異方性に関してスピン軌道相互作用との関連を議論する。

## 実験方法

Au/Fe/MgO 系は分子線エピタキシー法により成膜し、構造は反射高速電子線回折、薄膜 X 線回折により行った。またその磁気曲線の評価は AGM(Alternating Gradient Magnetometer)測定により行い、Fe の軌道・磁気モーメントは、放射光施設 UVSOR にて X 線磁気円二色性測定を行い、その結果を総和則と組み合わせて導出した。また界面由来の垂直磁気異方性エネルギーをトルク磁力計測定によって決定した。

#### 実験結果

Fe 超薄膜の磁気モーメントの L/S の比、PMA エネルギーはいずれも異種で挟んだ方が同種の場合よりも大きかった。これは、異種で挟み込んだ場合の方が、界面スピン軌道相互作用の垂直磁気異方性への影響が強く現れることを主張する理論の先行研究と整合していた。また、異種で挟み込んだ Fe 超薄膜は、膜厚が薄くなるに従って PMA が大きくなり (Fig. 1(b))、同時に、軌道磁気モーメントも大きくなることが観測された。講演では、膜構造も含めてこの系の垂直磁気異方性と界面スピン軌道相互作用の関係について議論する。

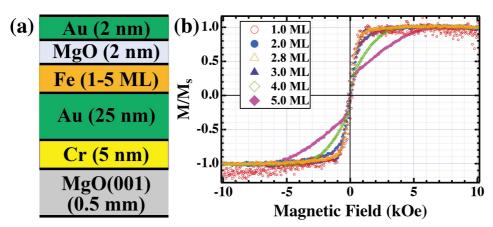


Fig. 1 (a) Film stack of Au/Fe/MgO system

(b) Thickness dependence of magnetization curves obtained by AGM in out-of plane configuration

#### 参考文献

[1] T. Maruyama et al., Nat. Nanotechnol., 4, 158, 2009 [2] S. E. Barnes et al., Sci. Rep., 4, 4105, 2014

# 軌道磁気モーメントが支配する TbCo 系垂直磁化膜の磁化特性と磁化 反転挙動

安達美咲<sup>1</sup>、柴山茜<sup>1</sup>、鈴木宏輔<sup>1</sup>、櫻井浩<sup>1</sup>、劉小晰<sup>2</sup>、安居院あかね<sup>3</sup> (群馬大<sup>1</sup>、信州大<sup>2</sup>、量研機構<sup>3</sup>)

Magnetization switching behavior of a TbCo amorphous perpendicular magnetic anisotropy film dominated by orbital magnetic moment

M.Adachi, A.Shibayama, K.Suzuki, H.Sakurai, X.Liu, A.Agui (Gunma Univ<sup>1</sup>, Shinshu Univ<sup>2</sup>, QST<sup>3</sup>)

## はじめに

近年、磁気トンネル接合に垂直磁気異方性をもつ希土類・遷移金属(RE-TM)層を加え、磁気スイッチングを制御する研究が進められている。角型比の高い垂直磁化膜は保磁力が高いため、高いスイッチング磁場が必要であり、その低減が課題である。そのため、RE-TM 合金の磁気スイッチング特性の解明が求められている。最近、磁気コンプトン散乱と SQUID 磁力計を組み合わせてスピン選択磁化曲線(SSMH)と軌道選択磁化曲線(OSMH)を分離して測定する手法が報告されている。本研究では、Al 層と TbCo 層の厚さを制御した TbCo/Al 多層膜について、磁気コンプトン散乱実験によるスピン選択磁化曲線、軌道選択磁化曲線の測定を行い、磁化反転挙動を調べた。

### 実験方法

RF スパッタリング装置を用いて 2 種類の試料 [TbCo120nm/Al5nm]  $_{10}$ 、[TbCo110nm/Al4nm]  $_{10}$  を作製した。作製した 2 種類の試料について、X 線回折測定からアモルファス構造を確認し、EPMA 測定で  $Tb_{20}Cos_0$  の組成を確認した。 SQUID 磁力計を用いて磁化測定を行った。その後大型放射光施設 SPring-8 のBL08W で磁気コンプトン散乱測定を行い、磁気コンプトン散乱から SSMH を求めた。さらに、SQUID 磁力計による磁化曲線とSSMH の差から OSMH を求めた。また、磁気コンプトン散乱から求めた磁気コンプトンプロファイルを解析し、Tb と Co の元素別磁化曲線を求めた。

## 実験結果

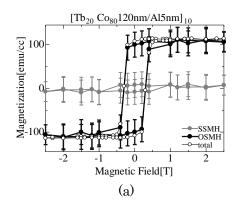
Fig.1(a)(b)に[TbCo120nm/Al5nm]<sub>10</sub> 及び[TbCo110nm/Al4nm]<sub>10</sub>の全磁化曲線(total)、SSMH 及び OSMH の図を示す。

[TbCo120nm/Al5nm] $_{10}$  の保磁力は約 0.3T、[TbCo110nm/Al4nm] $_{10}$  の保磁力は約 1.5T となり、Al 層と TbCo 層の厚さを制御して垂直 磁化膜の保磁力が制御されることがわかる。

また、両試料共に、軌道選択磁化曲線は全磁化曲線と似た挙動を示し、スピン選択磁化曲線の寄与は小さい。したがって、2つの試料の磁化反転はの振る舞いは、軌道磁気モーメントの磁場応答に大きく支配されていることがわかった。

## <u>参考文献</u>

- 1) K. Yakushiji et. al. Appl. Phys. Express 3, 053003 (2010).
- 2) M. Itou et. al. Appl. Phys. Lett. 102, 082403 (2013).
- 3) A. Agui et. al. Appl. Phys. Express 4, 083002 (2011).



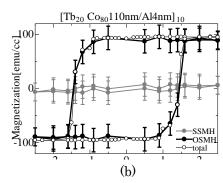


Fig.1 Spin selection, Orbit select and total magnetization curve
(a) [TbCo120nm/Al5nm]<sub>10</sub> and

(b) [TbCo110nm/Al4nm]<sub>10.</sub>

# CoFeB/MgO 多層膜におけるスピン・軌道選択磁化測定

柴山茜、山添誠敏、加藤忠、鈴木宏輔、安達美咲、星和志、伊藤真義、櫻井吉晴、櫻井浩 (群馬大、JASRI)

Spin/orbital specific magnetization measurement for CoFeB/MgO multilayers A.Shibayama, M.Yamazoe, T.Kato, K.Suzuki, M.Adachi, K.Hoshi, M.Itou, Y.Sakurai and H.Sakurai (Gunma Univ., JASRI)

## はじめに

次世代高密度不揮発性メモリ(MRAM)において、磁気スイッチング磁場が低減できる垂直磁気異方性を有する強磁性電極の磁気トンネル接合(MTJ)が注目されている。磁気スイッチングにおける消費電力低減のためには、磁気スイッチングのプロセスを解明する必要がある。

本研究では固体エピタキシーを利用した CoFeB/MgO 磁気トンネル接合膜におけるスピン磁気モーメントの磁化曲線(SSMH)と軌道磁気モーメントの磁化曲線(OSMH)をもとめ、電子論的視点から磁気スイッチングプロセスを検討する。

### 実験方法

CoFeB(4nm)/MgO(1nm)多層膜を Al フォイル基板、Si(111)基板上に RF スパッタリング法で作製し、360℃、2 時間の条件で熱処理を行った。参照試料として CoFeB(4nm)/MgO(1nm)多層膜(熱処理なし)、CoFeB 単層膜(熱処理なし、熱処理あり)を作製した。 X線回折測定から、CoFeB(4nm)/MgO(1nm)多層膜(熱処理あり)では CoFe(001)/MgO(001)配向を確認した。 SPring-8,BL08W にて磁気コンプトン散乱実験を行い、 SSMH を求めた。 SQUID 磁力計を用いて全磁化曲線を求めた。 全磁化曲線と SSMH の差から OSMH を求めた。 なお測定における印可磁場は膜面垂直であった。

## 実験結果

Fig.1は、CoFeB単層膜(熱処理なし、熱処理あり)、CoFeB(4nm)/MgO(1nm) 多層膜(熱処理なし、熱処理あり)の4つの試料についての磁化曲線を示している。SSMH は各試料において、形状磁気異方性を反映した挙動を示している。熱処理なしのCoFeB 単層膜では、OSMH はSSMH と同様の挙動を示している。一方、熱処理したCoFeB 単層膜、CoFeB/MgO 多層膜(熱処理なし、熱処理あり)では、OSMH はSSMH と異なる挙動を示している。これは結晶化または多層膜界面における軌道磁気モーメントの異方性が寄与している。

#### 参考文献

- 1) B.Cui, J.Alloys. Compd. 559(2013)112-115.
- 2) M. Itou et. al., APL102, 082403(2013).
- 3) Agui et. al., H. Kawata, J. Synchrotron Radiat. 17, 321(2010).
- 4) A. Agui et. al., J. Appl. Phys. 114, 183904(2013).

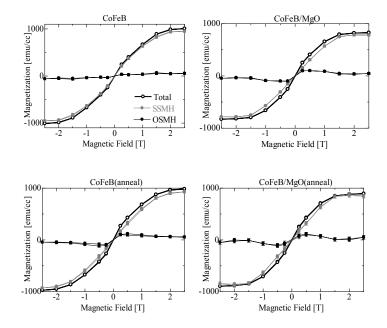


Fig.1 Magnetization curves

## Co/Pd 多層構造の元素別軌道磁気モーメントの異方性

岡林 潤、宗片比呂夫\* (東大、\*東工大)

Anisotropic Orbital magnetic moments in Co/Pd multilayers
Jun Okabayashi and Hiro Munekata\*
(Univ. of Tokyo, \*Tokyo Tech.)

#### **Introduction**

CoPd is a candidate for the spintronics materials possessing perpendicular magnetic anisotropy (PMA) which can be utilized for the high-density recording technology [1]. The 4d transition metal (TM) system of Pd is well recognized as the sustainable elements of 5d TM system in Pt toward the PMA materials combined with the magnetic 3d TMs. In order to understand the mechanism of PMA in CoPd, the contributions of orbital magnetic moments of each element have to be clarified explicitly. Bruno theoretically proposed the orbital moment anisotropy in TM multilayers as a second perturbation of spin-orbit interaction [2]. However, even in the strong spin-orbit coupled cases using 4d or 5d TMs, the applicability of this formula has been still debated [3]. Our aim in this study is to discuss both orbital and spin moments of Co and Pd for PMA and in-plane anisotropy samples by using angular-dependent X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) in Co L-edge and Pd M-edges.

#### **Experimental**

We prepared two kinds of samples of Co/Pd multilayered structures: Co (0.69 nm)/Pd (1.62 nm) for PMA and Co (1.03 nm)/Pd (1.62 nm) for in-plane anisotropy with stacking five periods on the Si substrates [4]. Sample surfaces were sputtered by Ar ions before the XMCD measurements in order to remove the oxygen contamination. We performed XMCD experiments at BL4B, UVSOR, Institute of Molecular Science. Total electron yield mode was adopted. A magnetic field of ±5 T was applied along the direction of the incident polarized soft x-ray.

#### **Results**

We observed XMCD signals in Pd M-edges after the removal of surface contamination as shown in Fig. 1. Although the X-ray absorption spectroscopy (XAS) line shapes overlap with those of O K-edge absorption, clear

XMCD signals induced by the proximity with Co layers are observed. The Pd *M*-edge XMCD line shapes in both PMA and in-plane samples almost remain unchanged. Magneto-optical sum rule analysis, which is defined in the TM *L*-edge absorption, cannot be applicable for *M*-edge XMCD. Precise XAS line shapes in Pd *M*-edges are necessary for the determination of absolute values of spin and orbital moments. On the other hand, clear Co *L*-edge XAS and XMCD with angular dependence reveal the enhancement of orbital moments in the surface normal direction because of PMA.

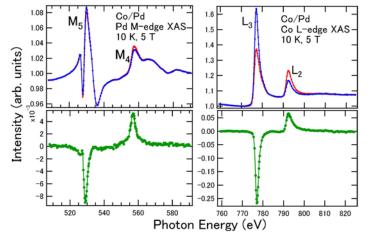


Fig. 1, XAS and XMCD of Pd *M*-edge and Co *L*-edge in perpendicularly magnetized Co (0.69 nm)/Pd (1.62 nm) multilayer.

### **References**

- [1] M.T. Johnson et al., Rep. Prog. Phys. **59**, 1409 (1996). [2] P. Bruno, Phys. Rev. B **39**, 865 (1989).
- [3] C. Andersson et al., Phys. Rev. Lett. 99, 177207 (2007).
- [4] K. Yamamoto et al., IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 49, 3155 (2013).

# Co/Ni 垂直磁化人工格子膜の核形成磁界および磁壁抗磁力に対する 下地層効果

吉岡涼,田浦皓士,田中輝光,松山公秀 (九州大学)

Effect of seed layer in nucleation field and domain wall coercive force in Co/Ni multilayer with perpendicular magnetic anisotropy

R. Yoshioka, T. Taura, T. Tanaka and K. Matsuyama (Kyushu University)

## はじめに

Co/Ni, Co/Pd 等の垂直磁化人工格子膜は、レーストラックメモリ等の磁壁移動型デバイスの材料としての応用が期待されている。磁壁抗磁力は、磁壁移動型デバイスにける磁壁移動の容易さ、即ち動作電力に影響する重要な磁気特性である。保磁力に関しては Ta, Pt 等における顕著な下地層効果 1),2)が報告されている。本研究では、磁壁抗磁力と核形成磁界との関係性に注目して、これらの Au 下地層厚依存性について系統的な実験を行った。

### 実験方法

電子ビーム蒸着法によりガラス基板上に Ti(0.5 nm)/Au (t nm)を成膜後,その上に DC マグネトロンスパッタリング 法で  $[Co(0.2 \text{ nm})/Ni(0.8 \text{ nm})]_N$  の成膜を行った.磁気特性の評価は極 Kerr 効果測定により行った.磁気ヒステリシス曲線から核形成磁界  $H_N$ を評価し,交流消磁状態からの初磁化曲線より磁壁抗磁力  $H_W$ を求めた.

## 実験結果

Fig.1 に示す[Co(0.2 nm)/Ni(0.8nm)] $_5$  のヒステリシス曲線と初磁化曲線の Au 下地層厚依存性に示されるように、 $H_N$ 、 $H_W$ は t の増大に伴い顕著に増大している  $^3$ . 同様の Au 下地層厚依存性は  $^3$  Co(0.2 nm)/Ni(0.8nm)] $_N$  (N=3,5)における  $H_W$  / $H_N$ の t 依存性を示している.  $H_W$  / $H_N$ 以は t の増大に伴い増加していることが分る. 多層膜の積層数 N 及び Au 層厚の異なる種々の試料について、 $H_W$  / $H_N$  と  $H_N$  の関係をプロットした結果を Fig.3 に示す. 同図に示されるように、 $H_W$  / $H_N$  と  $H_N$  とは積層数に係わらずほぼ同じ相関傾向を呈していることが分る.  $H_N$ は垂直磁気異方性を反映することから、 $H_N$ の小さい膜では磁壁幅( $\sim \pi$  ( $A/K_U$ ) $^{1/2}$ )が大きくなることが推測され、これにより異方性分散等に起因する磁壁ピン止め効果が低減される結果  $H_W$  / $H_N$  が減少するものと考えられる.

#### 参考文献

- 1) R. Law et al., Appl. Phys. Lett., 91, 242504 (2007).
- 2) J. Fukami et al, Appl. Phys. Express., 3, 113002 (2010).
- 3) Y. B. Zhang et al, IEEE Trans. Magn., Vol.30, No.6, Nov. 1994

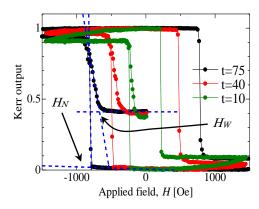


Fig.1. Hysteresis and initial magnetization curves  $[Co(0.2nm)/Ni(0.8nm)]_5$  on Au(tnm).

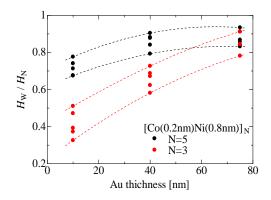


Fig.2. Dependence of  $H_W/H_N$  on Au thickness.

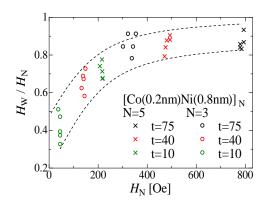


Fig.3. Dependence of  $H_W/H_N$  on  $H_N$  measured for various Au thicknesses.