

磁場角度依存 X 線磁気円二色性による Si 基板上に作製した
 CoFe₂O₄/Al₂O₃ 極薄膜の界面付近の磁気異方性の評価
 Magnetocrystalline anisotropy at the interface of ultrathin CoFe₂O₄/Al₂O₃
 heterostructures grown on Si substrate proved by angle-dependent x-ray magnetic
 circular dichroism

野中洋亮^{1,*}, 若林勇希², 芝田悟朗¹, 坂本祥哉¹, 池田啓祐¹, 池震棟¹, 万宇軒¹, 鈴木雅弘¹,
 田中新³, 田中雅明^{2,4}, 中根了昌², 藤森淳¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻, 〒113-0033 文京区本郷 7-3-1

² 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻, 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

³ 広島大学大学院先端物質科学研究科, 〒739-8530 広島県東広島市鏡山 1-3-1

⁴ 東京大学スピントロニクス学術連携研究教育センター, 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

Yosuke NONAKA^{1,*}, Yuki K WAKABAYASHI², Goro SHIBATA¹, Shoya SAKAMOTO¹,

Keisuke IKEDA¹, Yuxuan WAN¹, Masahiro SUZUKI¹, Arata TANAKA³,

Masaaki TANAKA^{2,4}, Ryosho NAKANE², and Atsushi FUJIMORI¹

¹Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

²Department of Electrical Engineering and Information Systems, The University of Tokyo, 7-3-1
 Hongo, Bunkyo-ku, 113-8656, Japan

³Department of Quantum Matters, ADSM, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8530, Japan

⁴Center for Spintronics Research Network, Graduate School of Engineering, The University of
 Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

1 はじめに

Si ベースのスピントロニクスを実現する上で、スピン偏極した電流を Si に注入する技術が重要である。Si 基板上に Al₂O₃ をバッファとしてスピネルフェライトをエピタキシャル成長させた構造は、特定のスピンのみを選択的にトンネルさせることでスピン偏極電流を作り出すスピンフィルターとして大きな注目を集めている [1]。しかし、フェライトと Al₂O₃ の界面で磁気的なデッドレイヤーが形成されることが、実用性能を達成する上で大きな障害であった。最近若林らによって CoFe₂O₄/Al₂O₃/Si(111) の界面で、Fe, Co イオンがスピネルの A, B サイトに入る分布が変化し、デッドレイヤー形成に深く関わっていることが明らかにされた [2]。

我々は、複数の膜厚の CoFe₂O₄/Al₂O₃/Si(111) に対し、Fe L_{2,3} 吸収端 X 線吸収スペクトル (XAS)、X 線磁気円二色性 (XMCD) スペクトルの磁場角度依存性を精密に測定することで、界面付近のデッドレイヤーの磁気異方性を評価した。

2 実験

CoFe₂O₄ エピタキシャル薄膜を、Al₂O₃ をバッファ層として Si(111) 基板上に成長させた。CoFe₂O₄ 層の膜厚 d がそれぞれ 11, 4, 2.3, 1.4 nm である 4 種類の試料を作製した。図 1 に薄膜の断面構造及び断面 TEM 像を示す。作製した薄膜の結晶性が非常に高いことが確認できる。

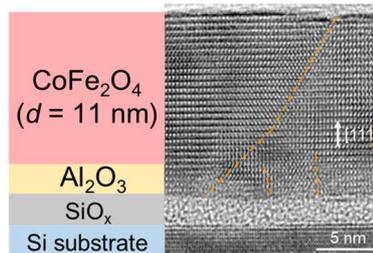


図 1 : CoFe₂O₄/Al₂O₃/Si(111) の構造及び断面 TEM 像。橙色の破線は Anti-phase boundary を示す。

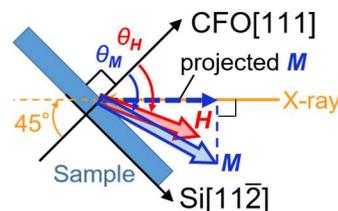


図 2 : 磁場角度依存 XMCD 実験の配置図。

XAS, XMCD の測定は Photon Factory の BL-16A において、10Hz の高速偏光スイッチングを利用して行った。入射光に対する吸収強度は全電子収量法 (TEY) で検出した。ベクトルマグネット実験装置 [3] による磁場角度依存 XMCD 実験の配置を図 2 に示す。試料の角度を、X 線が面内から 45° の方向から入射するように固定し、0.7 T の磁場を面直方向と X 線の入射方向を含む面内で回転させた。測定は室温で行った。

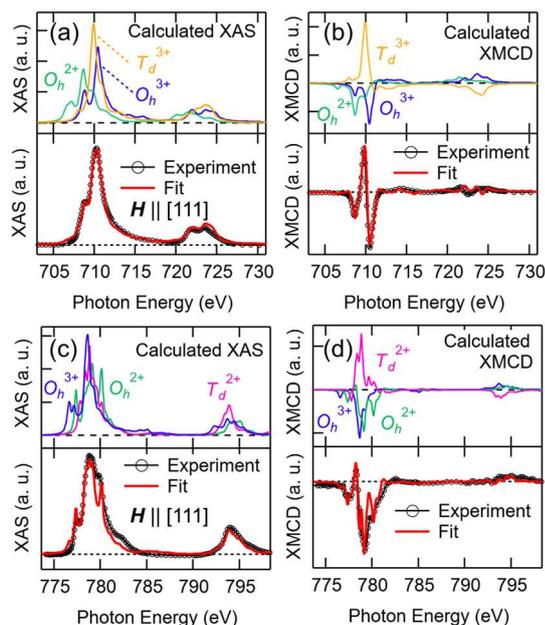


図3：膜厚 $d = 11$ nm の $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}(111)$ の XAS, XMCD スペクトル及びクラスターモデル計算によるフィッティング結果。(a), (b) Fe $L_{2,3}$ 吸収端。(c), (d) Co $L_{2,3}$ 吸収端。

3 結果および考察

図3に膜厚 $d = 11$ nm の試料に対する XAS, XMCD の測定結果を示す。得られたスペクトルに対し、若林らの報告 [2] と同じパラメータを用いて、クラスターモデル計算 [4] によるフィッティングを行った。

図4(a)-(d)に $d = 11, 4, 2.3, 1.4$ nm の試料で得られた Fe $L_{2,3}$ 端 XMCD スペクトル強度の磁場角度依存性を示す。ここで、クラスターモデル計算の結果と比較し、1 分子当たりの磁化になるように縦軸を取り直した。磁場角度依存 XMCD では、図2(a)に示すように磁化の光軸射影成分に比例する XMCD スペクトル強度の磁場角度依存性が得られる。そのため、磁場が十分強く磁化が常に磁場と平行であれば、得られる角度依存性は正弦波波形となる。しかし、図4(a)は明瞭に正弦波とは異なる依存性を示している。これは、得られた磁場角度依存性が、磁気異方性によって磁化が磁場と異なる方向に向いていることを反映している。

より詳細に磁気異方性を議論するため、Stoner-Wohlfarth model [5] によるシミュレーションを行った。ここで、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}(111)$ では複数の結晶ドメインが存在するため結晶磁気異方性をシミュレーションで考慮することが難しく、形状磁気異方性のみが存在する場合を計算した。図4(a)-(d)にシミュレーション結果を実線で示す。膜厚の大きい $d = 11, 4$ nm では実験結果はシミュレーションで再現できず、この差は結晶磁気異方性の存在を示す。しかし、膜厚の小さい $d = 2.3, 1.4$ nm では実験結果とシミュレーションが良く一致した。

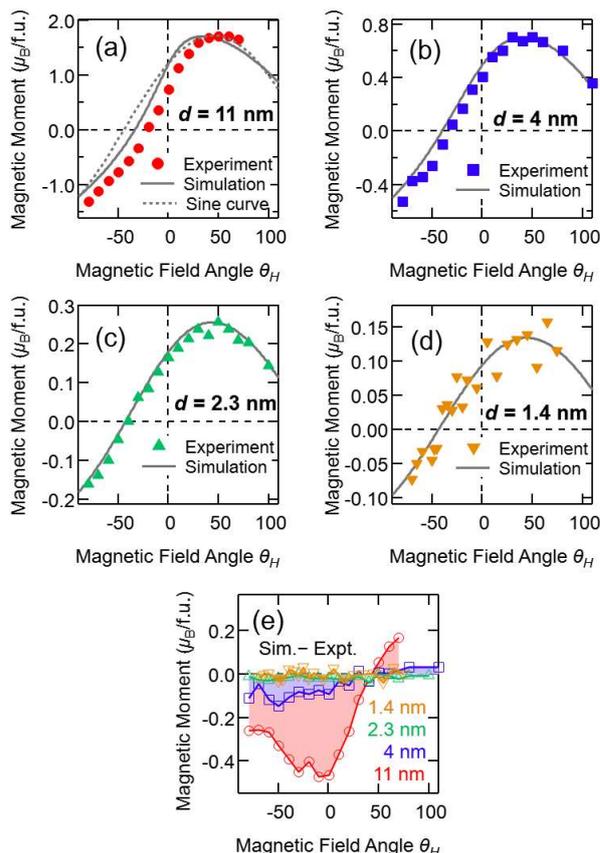


図4： CoFe_2O_4 の磁化の光軸射影成分の磁場角度依存性。(a)-(d) 膜厚 $d = 11, 4, 2.3, 1.4$ nm の実験結果及びシミュレーション結果の比較。(e) 各膜厚における実験とシミュレーションの差。

実験結果とシミュレーションの差を図4(e)に示す。差は膜厚の減少に伴い減少しており、磁氣的デッドレイヤーが存在する界面付近で結晶磁気異方性も大きく減少している事を示している。 CoFe_2O_4 の結晶磁気異方性は強い磁気異方性をもつ O_h サイトの Co^{2+} に由来する [6] 事を踏まえ、この磁気異方性の減少は若林らの報告にあるように、デッドレイヤーで O_h サイトの Co^{2+} が減少し、 Fe^{2+} に置換されていることとコンシステントであり、デッドレイヤーの磁性が Fe, Co イオンの分布に強く影響されていることを示している。

4 まとめ

$\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}(111)$ について、4通りの膜厚 ($d = 11, 4, 2.3, 1.4$ nm) の試料に対して磁場角度依存 XMCD の測定を行った。形状磁気異方性のみを考慮した Stoner-Wohlfarth model によるシミュレーション結果と比較し結晶磁気異方性を評価したところ、膜厚の減少に伴って結晶磁気異方性も減少していることが明らかになった。この傾向は、若林らによって報告された界面付近における Fe, Co イオン分布の変化とコンシステントであった。

引用文献

- [1] R. Bachelet, P. de Coux, B. Warot-Fonrose, V. Skumryev, G. Niu, B. Vilquin, G. Saint-Girons, and F. Sánchez, *CrystEngComm* **16**, 10741 (2014).
- [2] Y. K. Wakabayashi, Y. Nonaka, Y. Takeda, S. Sakamoto, K. Ikeda, Z. Chi, G. Shibata, A. Tanaka, Y. Saitoh, H. Yamagami, M. Tanaka, A. Fujimori, and R. Nakane, *Phys. Rev. B* **96**, 104410 (2017).
- [3] M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, and S. Fujihira, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23**, 4100704 (2013).
- [4] A. Tanaka and T. Jo, *J. Phys. Soc. Jpn* **63**, 2788 (1994).
- [5] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A* **240**, 599 (1948).
- [6] M. Tachiki, *Prog. Theor. Phys.* **23**, 1055 (1960).

成果

- 1. 2017 年度量子ビームサイエンスフェスタ学生奨励賞受賞

* nonaka@wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp