

深さ分解 XMCD による Co/Au 界面における異方的な磁気モーメントの観察 Observation of anisotropic magnetic moments at Co/Au interface by means of depth-resolved XMCD

雨宮健太^{1*}, 阪田薫穂¹

¹ 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
Kenta AMEMIYA^{1,*} and Kaoruko SAKATA¹

¹ Institute of Materials Structure Science,
High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

1 はじめに

磁性薄膜の原子レベルの界面における磁気モーメントの異方性は、膜全体の磁気異方性に大きな影響を与えるため、これまでも盛んに研究されている。一般に、十分に強い磁場中で X 線磁気円二色性 (XMCD) の入射角依存性を測定することによって、軌道磁気モーメントの面内、面直成分とスピン磁気モーメントを分離して求めることができる。一方、原子レベルの界面における磁気モーメント(およびその異方性)を直接的に観察することは簡単ではない。古典的には、磁性層の膜厚を変えて測定を行い、磁気モーメントの膜厚依存性から界面成分を推測することが行われてきたが、この方法では、膜厚を変化させても界面成分が変化しないことが前提となる。別の方法として、2 原子層の Co 薄膜を Au でサンドイッチした試料を用いることで、界面成分の観察を実現した報告がある[1]。2 原子層の場合、ほぼ全ての Co 原子が、一方は Co, 他方は Au に接しているという特殊な状況にあるため、全ての Co を Co/Au 界面とみなすことができる。ただし、この方法は 2 原子層以外の膜厚では適用することができない。

筆者らは以前から、電子収量法による XMCD 測定において、電子の出射角を弁別することによって検出深度を制御し、原子層レベルの深さ分解能を実現する「深さ分解 XMCD 法」を開発してきたが、最近、電子のかわりに蛍光 X 線を角度分解して検出することによって、磁場中での深さ分解 XMCD 測定を可能にした[2]。そこで本研究では、蛍光収量法による深さ分解 XMCD 法を Au/Co/Au 薄膜に適用し、2 原子層よりも厚い Co 薄膜に対して、Co/Au における磁気モーメントの異方性を観察した[3]。

2 実験

Au/Co/Au 薄膜は、室温において Al₂O₃(0001)単結晶基板上に Au と Co を電子衝撃加熱法で順次蒸着することによって作製した。Co の膜厚は 2 nm (10 原子層程度に相当)とした。この試料を Photon Factory BL-16A の電磁石 XMCD 装置(±12 kOe までの磁場を

印加可能)にセットし、真下に軟 X 線 CCD カメラを設置することによって、磁場中での蛍光収量深さ分解 XMCD 測定を行った(図 1)。試料は図のように鉛直軸周りに回転できるため、XMCD の入射角依存性も測定することができる。

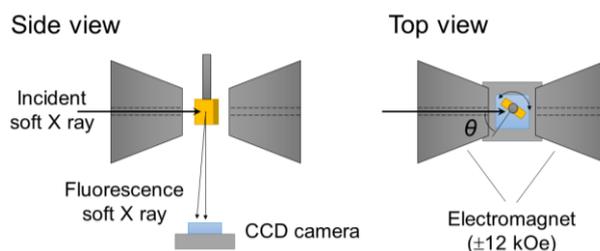


図 1 : 磁場中での蛍光収量深さ分解 XMCD 測定のセットアップ。

3 結果および考察

検出深度(λ)0.4 nm において測定した XMCD スペクトルの入射角(θ)依存性を図 2 に示す(θ は試料法線と入射 X 線のなす角度)。ここで検出深度とは、深さ λ で発生した蛍光 X 線が、表面に到達して検出されるまでに $1/e$ に減衰する(深さ 2λ なら $1/e^2$ に減衰)という意味であり、深さ λ からのシグナルだけを見ているわけではない[2]。当然、 λ が小さいほど表面付近からのシグナルの占める割合が大きくなる(表面敏感になる)。得られた XMCD 差分スペクトルは、直入射条件の方が低エネルギー側の負のピークが大きい。XMCD では、スペクトル全体をエネルギー軸にそって積分した値が軌道磁気モーメントに比例するため、このことは、直入射条件(面直方向の磁気モーメントを観察)の方が、軌道磁気モーメントが大きいことを示している。

様々な検出深度および入射角で測定した XMCD スペクトルから得られた磁気モーメントを図 3(a)(b)にまとめる。有効スピン磁気モーメント($m_s + 7 m_T$)は検出深度にはあまり依存しないが、入射角に関しては直入射の方が大きくなっている。一方、軌道磁気

モーメントは、直入射の場合には表面敏感なほど大きいのに対し、斜入射では逆になる。これは Au との界面付近の Co が面直方向に大きな軌道磁気モーメントを有することを強く示唆している。

このような磁気モーメントの検出深度および入射角依存性から、5つの磁気モーメントの深さ分布を求めることができる。解析では、深さ z における軟 X 線の吸収によって発生した蛍光 X 線が、 $\exp(-z/\lambda)$ のファクターで減衰することを用いて、実験的に得られた磁気モーメントの検出深度依存性を最もよく再現するような磁気モーメントの深さ分布を決めた。この際、2 nm の Co のうち、Au と接している 1 原子層 (0.2 nm) のみが、内部の Co と異なるモーメントを持つと仮定した。得られた結果を図 3(c)(d)(e) に示す。スピン磁気モーメント (m_s) は深さによらずほぼ一定だが、軌道磁気モーメントは界面において面直成分 (m_l^{\perp}) が面内成分 (m_l^{\parallel}) に比べて大幅に増大している。ダイポール磁気モーメントの面直、面内成分 (m_T^{\perp} , m_T^{\parallel}) は、いずれもかなり小さいが、特に内部層においてわずかに面直成分が大きい。このような磁気モーメントの分布から再現される検出深度依存性を、図 3(a)(b) に実線で示す。

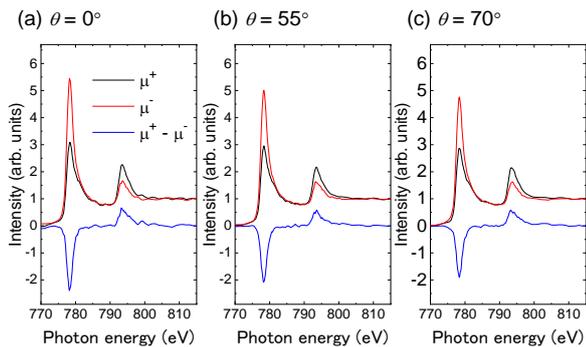


図 2 : 検出深度(λ)0.4 nm において測定した Co L 吸収端 XMCD スペクトルの入射角(θ)依存性。

4 まとめ

Au/Co/Au 薄膜に対して、磁場中での蛍光収量深さ分解 XMCD 測定を様々な入射角で行い、Co/Au 界面における磁気モーメントの異方性を観察した。これは、従来のような膜厚を変えた測定を行わなくても界面の磁気モーメントをその異方性も含めて観察できることを意味しており、今後、様々な磁性薄膜への応用が期待できる。

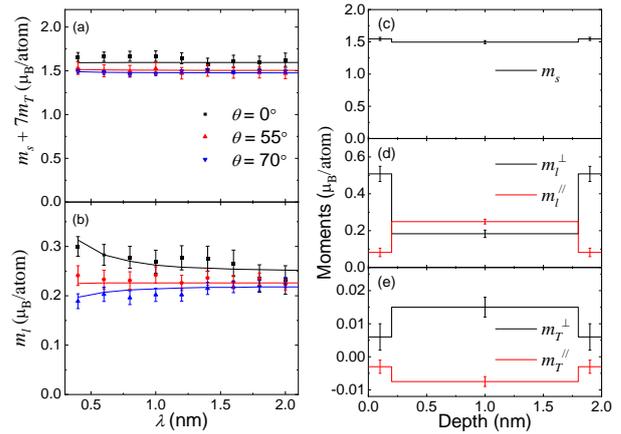


図 3 : XMCD スペクトルから得られた(a)有効スピン磁気モーメント($m_s + 7 m_T$)および(b)軌道磁気モーメント(m_l)の入射角(θ)および検出深度(λ)依存性と、それらから見積もった(c)スピン磁気モーメント(m_s), (d)軌道磁気モーメントの面直、面内成分(m_l^{\perp} , m_l^{\parallel}), および(e)ダイポール磁気モーメントの面直、面内成分(m_T^{\perp} , m_T^{\parallel})の深さ分布。

参考文献

- [1] T. Koide *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 257201 (2001).
- [2] M. Sakamaki and K. Amemiya, *Rev. Sci. Instr.* **88**, 083901 (2017).
- [3] K. Amemiya and K. Sakata, *Phys. Rev. B* **106**, 134424 (2022).

* kenta.amemiya@kek.jp