

# 深さ分解 XMCD により評価したグラフェン/ $L1_0$ 規則合金界面に誘起された異方的軌道モーメント

## Anisotropic orbital moment induced at graphene / $L1_0$ -alloy hybrid interface evaluated by depth-resolved XMCD

永沼博<sup>1</sup>, 雨宮 健太<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻, <sup>2</sup> KEK 物構研, 〒305-0801 茨城県つくば市大穂

<sup>1</sup>H. NAGANUMA <sup>2</sup>K. AMEMIYA

<sup>1</sup> Tohoku University, <sup>1</sup>Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan,  
<sup>2</sup> Institute of Materials Structure Science, KEK, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

### 1 はじめに

極薄の絶縁体を 2 枚の強磁性層で挟んだ強磁性トンネル接合(MTJ)素子は強磁性の磁化方向の保持特性を利用した不揮発性磁気メモリ(MRAM)として実用化されている. DRAM および eFlash を代替するためには MTJ 素子の接合直径がおよそ 10 nm にまで微小化しても 10 年以上経過しても情報が保持できる性能が求められる. 現在、実用化されている MRAM 用の MTJ 素子は CoFeB(強磁性層)/MgO(絶縁層)/CoFeB(強磁性層)の三層構造を基本としており、CoFeB/MgO 界面において酸素( $O_{pz}$ )と鉄( $Fe_{dx2}$ )の混成軌道から誘起される垂直磁気異方性を利用している. しかし、界面垂直磁気異方性のみだと 10 nm まで微小化したときに磁化の熱擾乱による書き込みエラーおよび 10 年の情報保持が困難となる問題がある.  $L1_0$ 規則合金は高い結晶磁気異方性を有することから界面磁気異方性を代替する将来の MTJ 素子の記録層の材料として期待されている. しかし、 $L1_0$ 規則合金の強い垂直磁気異方性を利用するためにはエピタキシャル成長させて磁気異方性の方向を揃える必要がある. しかし、MgO 障壁層と格子不整合率が約 10%もあることから平滑な界面を形成することが難しく、実用化に至っていない.  $L1_0$ 規則合金の格子不整合の問題から解放されるアイデアとして、我々はファンデルワールス力に着目している. ファンデルワールス力は MgO などのイオン結合に比べて弱い分子結合のため格子不整合による制約が殆どない. ファンデルワールス力を有しており、かつトンネル障壁として利用できる、かつ極薄化が可能である、という条件を満たす物質として二次元物質系がある. 二次元物質系の多くは六方晶系の対称性であり、正方晶系の  $L1_0$ 規則合金とは異種結晶系となるため、ファンデルワールス力により接合するのが疑問であった. そのような状況のなか、我々は  $L1_0$ -FePd 規則合金上に六方晶系のグラフェンを化学気相堆積(CVD)法により形成することに成功した. [1] 六方晶グラフェンと六方晶 Ni の二層膜では界面垂直磁気異方性が誘起されることが報告されているが、結晶系の異なるグ

ラフェン/ $L1_0$ -FePd 規則合金では調べられていない. 界面垂直磁気異方性が誘起されているとすると、 $L1_0$ -FePd 規則合金の高い結晶磁気異方性と界面磁気異方性の相乗効果が期待できるため、接合直径を微小化するときの情報保持特性に大変、有利であることが期待できる. そこで本研究では、界面の電子構造および磁気特性を理解するために、BL-16A にある蛍光ディテクターを用いて、深さ分解 X 線磁気円二色性測定を行った.

### 2 実験

FePd は  $SrTiO_3(100)$ 基板上に r.f.マグネトロンスパッタ法により製膜し、その後、グラフェンを CVD 法により形成した. キャップ層は製膜していない. 走査型電子顕微鏡観察および反射率 X 線解析から、FePd は高い規則度を有しており、グラフェンが原子レベルに平坦に形成されており、平滑な界面となっていることがわかった. 蛍光ディテクターを用いた X 線吸収および XMCD 測定は BK-501X, BITRAN 社製の CCD カメラを用いて垂直入射と  $30^\circ$  入射の 2 種類の方向から評価した. 外部磁場は 0.87 T として、室温で測定を行った. [図 1]

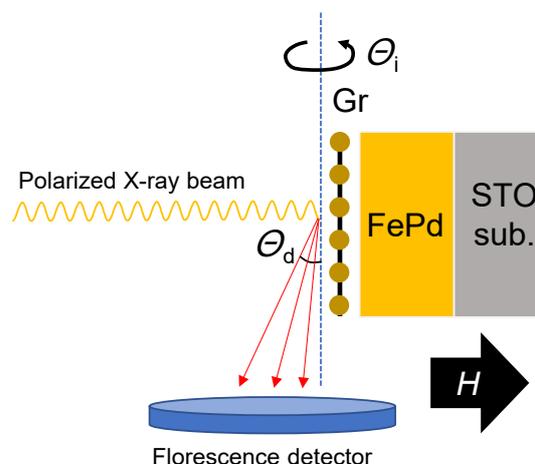


図 1 深さ分解 XAS および XMCD の測定セットアップ.  $\theta_i = 90^\circ, 30^\circ, H = 0.87$  T

### 3 結果および考察

図2に垂直入射( $90^\circ$ )と $30^\circ$ 入射の深さ分解測定の表面に起因したスペクトルのみを示す。(深さ方向全体のスペクトルについて投稿準備中)方位によりXMCDスペクトルの形状が異なることがわかる。

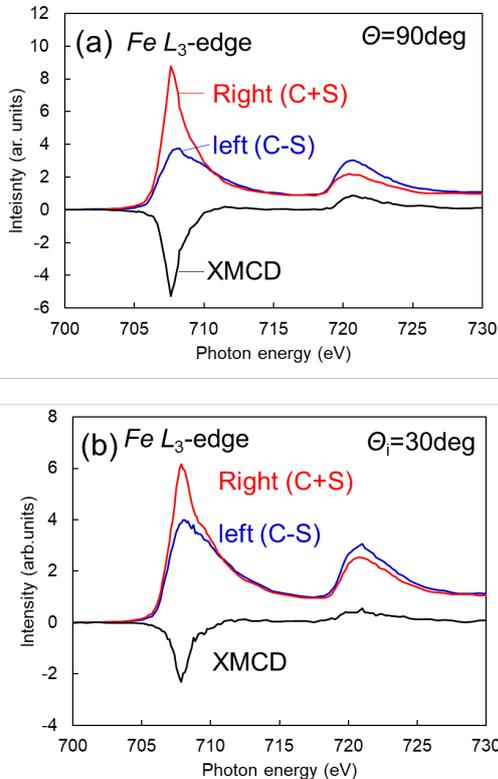


図2：入射角度を垂直方向( $90^\circ$ )と $30^\circ$ の方向としたXASおよびXMCDスペクトル

そこでSUMルールを適用してスピン磁気モーメント( $M_s$ )と軌道磁気モーメント( $M_l$ )をフィッティングにより算出した。その結果を表1に示す。 $30^\circ$ 入射に対して垂直入射( $90^\circ$ )の軌道磁気モーメントとスピンモーメントとの比( $M_l / M_s$ )が増大していることがわかる。一方、内部層については $M_l / M_s$ の変化が少ないことがわかる。このことから、界面の軌道磁気モーメントには垂直方向に異方的軌道磁気モーメントが誘起されていることがわかる。

表1：SUMルールにより算出したスピン磁気モーメント( $M_s$ )、軌道磁気モーメント( $M_l$ )およびその和と比( $M_l / M_s$ )

$\theta_i=90^\circ$	$M_s$	$M_l$	$M_{total}$	$M_l/M_s$
内部層	2.3	0.32	2.62	0.14
界面層	2.7	0.16	2.86	0.06
$\theta_i=30^\circ$	$M_s$	$M_l$	$M_{total}$	$M_l/M_s$
内部層	1.1	0.11	1.21	0.09
界面層	1.7	0.11	1.81	0.07

この界面における垂直方向の異方的軌道磁気モーメントはFePdが本来、有するバルクの垂直磁気異方性に加えられるため、FePd層を極薄化した微小接合においても情報を保持できることが期待される。そこで、マイクロマグネティクスシミュレーションにより熱安定性について計算したところ、接合直径が10 nm、膜厚が2 nmの微小な記録層としても熱安定性指数( $\Delta$ )は57以上となり、10年以上、情報を保持できることが示された。このような微小体積とすることは現行のCoFeB/MgO系では不可能であり、本成果は超高記録密度のMRAMの実用化において有意義な知見を示すことができた。

### 4 まとめ

深さ分解XMCD測定により、異種結晶界面において異方的な軌道磁気モーメントが誘起されていることを明らかにし、接合直径が10 nmのMTJ素子を超高記録密度MRAMへ応用できることが示された。また、六方晶系の二次元物質が正方晶系とファンデルワールス力より結合できることが示され、トンネル接合のための材料の組み合わせの選択肢の自由度が高くなることを示した。

### 謝辞

グラフェンの製膜は仏国CSRNのBruno Dlubak博士、およびパリ南大学Pierre Seneor教授の協力によりおこなわれました。STEM観察は西嶋雅彦准教授(現大阪大学)のご協力により行われました。また、本研究はCSISの研究助成および東北大学のクロスアポイント制度の支援を受けております。

### 参考文献

[1] H. Naganuma, V. Zlatko, M. Galbiati, F. Godel, A. Sander, C. Carretero, O. Bezencenet, N. Reyren, M. - B. Martin, B. Dlubak, and P. Seneor, *Appl. Phys. Lett.* **116**, 173101 (2020).

\* hiroshi.naganuma.c3@tohoku.ac.jp