

## Ni/Cu 多層構造の電場誘起 XMCD

岡林潤<sup>1\*</sup>・谷山智康<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東大理・<sup>2</sup>東工大

### Electric-field induced XMCD in Ni/Cu multilayer

Jun Okabayashi<sup>1</sup> and Tomoyasu Taniyama<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology

磁気異方性の電場による制御は、スピントロニクス研究において低消費電力による動作を可能にするため重要な技術となる。強磁性体と絶縁体の界面での電場による電荷変調について研究が行われている。一方、誘電体と磁性体の積層構造では、誘電体からの力学的な応力による界面磁気異方性の変調を実現できる。誘電体 BaTiO<sub>3</sub> への電場印加によって、ドメイン構造の変化により、格子定数の変調が可能である。また、Ni/Cu 磁性多層構造は、界面での歪みにより垂直磁気異方性が生じる。BaTiO<sub>3</sub> 上の Ni/Cu 多層構造では、電場により界面での歪み応力を制御でき、それにより垂直一面内の磁化容易軸が変化する[1]。しかし、電場印加による元素選択的な磁化測定やその変調の起源については、明確になっていない。そこで本研究では、電場を印加できるシステムを作製し、電場印加時の X 線磁気円二色性 (EXMCD) を行った。

[Cu (9 nm)/Ni (2 nm)]<sub>5</sub> の多層構造を BaTiO<sub>3</sub> (001) 面上に堆積した。EXMCD 測定は、KEK-PF BL-7A にて常設した ±1.2 T の電磁石を用いた XMCD 装置を改造して行った。室温にて、蛍光収量法を用いた。試料表面と裏面の間に電場を印加した。EXMCD 測定は、試料表面が光と磁場に垂直となる配置にて行った。

電場印加しない場合は垂直磁化を示し、Ni L<sub>2,3</sub> 端の XMCD と L<sub>3</sub> 端での XMCD 磁化曲線からも確認した。一方、3 kV/cm の電場印加時には、面内磁化に変化した。電場による BaTiO<sub>3</sub> の格子変調は約 1 % と見積もられ、BaTiO<sub>3</sub> と Ni/Cu 層の界面での歪み応力の変化により磁気異方性が変化した。EXMCD のスペクトル形状にも変化が見られ、軌道磁気モーメントの変化を観測した。また、EXMCD スペクトル形状は、電圧印加に対して可逆的に変化することも確認した。さらに、Ni/Cu 層の面内格子定数を変化させた際の第一原理計算を行った。面内応力が大きくなると軌道磁気モーメントは増大する傾向にあることが判り、EXMCD の結果を説明できることが判った。

誘電体と磁性体の界面において電場により格子定数を変調させ、EXMCD 法により軌道磁気モーメントの変化を観測できた。理論解析も含めて講演において詳しく議論したい。

[1] Y. Shirahata et al, NPG Asia Materials 7, e198 (2015).

## Ir-SAF 構造での GMR 効果

福島 章雄、杉原 敦、薬師寺 啓、久保田 均、湯浅 新治  
(産業技術総合研究所、スピントロニクス研究センター)

GMR effect in Ir-SAF structure

A. Fukushima, A. Sugihara, K. Yakushiji, H. Kubota, S. Yuasa  
(Spintronics Research Center, AIST)

### はじめに

近年、高密度 STT-MRAM 用途として垂直磁化材料を用いた MgO バリア MTJ 素子の開発が盛んである。安定したメモリ動作のためには、強固な磁化参照層が必要である。それに対し、最近、Ir スペーサを用いた CoPt 多層膜の積層反強磁性層にて、MH の測定から 1T を超える反平行層間交換結合 (AF 結合) があること、微小素子 ( $\sim 25\text{nm}\Phi$ ) に加工した後でも 0.9T の AF 結合があること [1] が報告されている。この MTJ 素子の MR カーブを子細に検討したところ、1T 近傍に Ir-SAF 構造部分の GMR 由来と考えられるわずかな抵抗変化を確認した。今回、Ir-SAF 構造を持つ GMR 素子を作成し、その磁気抵抗曲線を調べたので報告する。

### 実験

3 種類の GMR 素子 (1) 下フリーCu スペーサ: Sub./ Buffer/ フリー層/ Cu 6 nm (スペーサ)/ SAF 層/ Cap、(2) 下フリーIr スペーサ: Sub./ Buffer/ フリー層/ Ir 3nm (スペーサ)/ SAF 層/ Cap、(3) 上フリーIr スペーサ: Sub./ Buffer/ SAF 層/ Ir 3nm (スペーサ)/ フリー層/ Cap、フリー層は Co 0.8nm、SAF 層は [CoPt 3nm/ Ir 0.5nm/ CoPt 3nm] で共通、を作成した。直径およそ  $50\text{nm}\Phi$  の接合に加工した後、超電導マグネットを用い  $\pm 3\text{T}$  の範囲で MR カーブを測定した。測定は交流 2 端子法 (リード線の抵抗は  $0.2\Omega$  程度) で行い、周波数 7.93kHz、測定電流  $10\mu\text{A}$ 、素子の抵抗値が  $20\Omega \sim 40\Omega$  程度であるので、測定時に素子にかかる電圧は  $0.5\text{mV}$  以下である。

### 測定結果

下フリーCu スペーサ素子では、 $\pm 1.1\text{T}$  で大きな磁気抵抗が現れ、その後 3T に至るまで抵抗が徐々に変化している。また、下フリーIr スペーサ素子では  $\pm 1.4\text{T}$  で SAF 層の結合に起因する磁気抵抗が観測された。また、上フリーIr スペーサ素子でも同様に、SAF 結合起因の磁気抵抗が観測され、その反転磁界は下フリーIr スペーサ素子より高い磁場 ( $\pm 1.7\text{T}$ ) であった。上フリー構造で反転磁界が高いのは、SAF 層に対して、微細加工時のダメージがより少ないためではないかと考えられる。これらの磁気抵抗は数十  $\text{m}\Omega$  以上の変化を示すため測定しやすく、これを使って、微細加工後の SAF 結合の強さを調べる事が可能である。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構 (JST) を通して委託されたものである。

### 参考文献

K. Yakushiji, A. Sugihara, A. Fukushima, H. Kubota, and S. Yuasa, Appl. Phys. Lett. **110**, 092406 (2017)

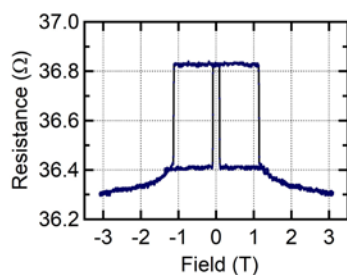


Fig. 1 下フリーCu スペーサ素子の GMR

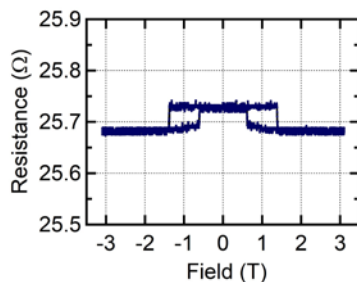


Fig. 2 下フリーIr スペーサ素子の GMR

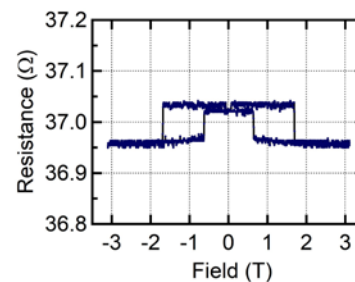


Fig. 3 上フリーIr スペーサ素子の GMR

# Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ 素子における電圧制御磁気異方性変化

上野鷹幸、金城秀和\*、船橋信彦\*、麻生慎太郎\*、  
加藤大典\*、青島賢一\*、久我淳\*、本橋光也、町田賢司\*  
(東京電機大工、\*NHK 技研)

Change of Voltage-controlled Magnetic Anisotropy for Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ Devices

Takayuki Ueno, Hidekazu Kinjo, Nobuhiko Funabashi, Shintaro Aso,

Daisuke Kato, Kenichi Aoshima, Kiyoshi Kuga, Mitsuya Motohashi, Kenji Machida

(Tokyo Denki Univ., NHK STRL)

## はじめに

電圧制御磁気異方性 (VCMA) 効果は、数原子層の極薄膜の磁化を制御することが可能であり、低消費電力化への期待から磁気メモリー分野で活発に研究されている<sup>1)</sup>。この効果を磁気光学式空間光変調器に適用するには、磁気光学効果の得られる厚い膜での検討が必要である。これまでに、Tb-Fe-Co/MgO/Gd-Fe MTJ 素子において、MgO 絶縁層と Gd-Fe 光変調層の間に Co-Fe/Gd 層を挿入することで、厚さ 9 nm の Gd-Fe 光変調層の VCMA 効果を観測した<sup>2)</sup>。今回、膜構成を変えた素子を作製し、厚い膜で生じる VCMA の起源について検討した。

## 実験方法

表面熱酸化シリコン基板の上にイオンビームスパッタにて、Ru(3 nm)/Ag(30 nm)/Ru(3 nm)/Tb-Fe-Co(10 nm)/Co-Fe(0.5 nm)下地層、MgO(3 nm)絶縁層、Co-Fe(0.3 nm)/Gd(0.1, 0.2 nm)/Gd-Fe(9 nm)光変調層、Ru(3 nm)保護層を室温で製膜した後、電子線描画とイオンビームミリングにより 10  $\mu\text{m}$  角素子に加工し、In-Zn-O 上部透明電極を形成した。上部電極側をプラスとして DC 電圧を印加した状態で、マイクロカー効果測定装置により素子のカーヒステリシスループを取得した。測定波長は 658 nm とし、素子に対して垂直方向の磁界を印加した。

## 実験結果

Co-Fe/Gd 層のない素子は、角形比 1 の垂直磁化を示したが、膜厚が厚いため、VCMA 効果は観測されなかった。これに対し、図 1 に示した Co-Fe(0.3 nm)/Gd(0.2 nm)/Gd-Fe(9 nm)光変調層では、垂直磁気異方性が減少し、角形比が大幅に劣化した。この素子に、 $\pm 1.3$  V の電圧を印加したところ、電圧印加方向に応じて面内および垂直に磁気異方性が変化した。また、界面の Gd を 0.1 nm に減らしたところ、面内磁気異方性を示したが、電圧印加によって異方性が変化していることがわかる。規格化したカーヒステリシスループから求めた VCMA 係数は、19 fJ/Vm と小さな値であったにもかかわらず、0.5 nm 以下の極薄 Co-Fe/Gd 層を挿入することで、9 nm 厚の光変調層の磁気特性が劇的に変化する VCMA 効果が観測された。Co-Fe/Gd/Gd-Fe 光変調層では、MgO 絶縁層と強磁性層との界面が光変調層全体の磁気異方性を支配することを実験的に確認している。界面の Co-Fe 層に生じた VCMA 効果が、Gd-Fe 層を含めた厚い膜の磁気異方性に影響を与えたと考えられる。

## 参考文献

- 1) M. Weisheit, Science, vol. 315, pp. 349-351 (2007).
- 2) N. Funabashi, IEEE Trans. Magn., DOI: 10.1109/TMG.2017.2711639 (to be published 2017).

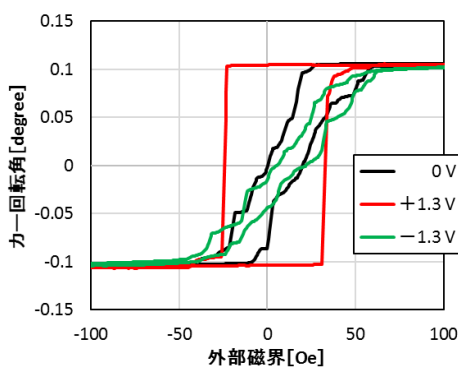


図 1 Co-Fe(0.3)/Gd(0.2)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

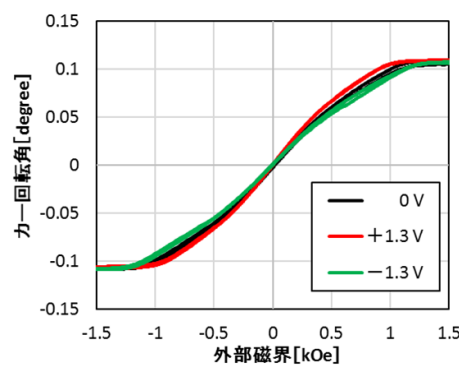


図 2 Co-Fe(0.3)/Gd(0.1)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

# 垂直磁化 Co<sub>2</sub>FeSi 膜を用いた磁気トンネル接合多層膜の作製

スタットラー 嘉也, 篠原 光貴, 高村 陽太, 中川 茂樹  
(東京工業大学)

Fabrication of magnetic tunnel junction multilayer with perpendicularly magnetized Co<sub>2</sub>FeSi films

Y. Stutler, K. Shinohara, Y. Takamura, S. Nakagawa  
(Tokyo Institute of Technology)

## はじめに

垂直磁化型磁気トンネル接合(p-MTJ)は、高密度集積化・低消費電力化の面で優れており、次世代のMRAM用メモリセルとして期待され、近年ではCoFeB/MgO/CoFeB構造でのp-MTJ素子が実現されている<sup>[1][2]</sup>。本研究では、高いTMR比を持つp-MTJの実現のため、スピン分極率が100%のハーフメタル強磁性体(HMF)として期待されるフルホイスラー合金Co<sub>2</sub>FeSi(CFS)を用いたCFS/MgO/CFS構造のp-MTJ多層膜の作製に取り組んでいる。その結果、MgO層下部に位置する下部CFSは、理想的なCFS/MgO界面の形成とCFSの結晶へ加えられる歪みが垂直磁化発現に寄与していることを見出した。またMgO層上の上部CFSは、キャップ層との界面が垂直磁化の発現に影響している可能性が高いことを見出した。これら上下のCFS層の垂直磁化の発現機構が異なるため、保磁力差による2段ステップを有する磁化特性の獲得に成功したので報告する。

## 実験方法

試料は、対向ターゲット式スパッタ法を用いてMgO(100)単結晶基板上に作製した。試料構造はMgO基板/Cr(40nm)/Pd(50nm)/CFS(0.6nm)/MgO(2nm)/CFS(0.6nm)/Pd(10nm)で、MgOはRFスパッタ、それ以外の膜は全てDCスパッタで成膜した。成膜温度は下部CFS層が300°C、それ以外の膜は室温とし、成膜後に300°Cでアニール処理を行った。また、下部CFSを成膜した後、室温で酸素曝露を2.0Pa、10minという条件で行った。

## 実験結果

Fig. 1に作製したCFS/MgO/CFS試料の磁化特性を示す。Fig. 1(a)は面内方向と垂直方向の磁化特性を示したものである。垂直方向の角型比が100%に近いことが分かり、垂直磁気異方性を有していることが確認できる。また、低磁場領域の磁化特性をFig. 1(b)に示す。明瞭な2段ステップを有する磁化特性が得られた。下部CFS層の垂直磁気異方性は、CFS/MgO界面への酸素曝露による効果<sup>[3]</sup>とCFSに誘起された結晶歪みの効果もあるものと考えられる。上部CFS層の垂直磁気異方性は、XRD測定によりPdキャップ層が(111)配向していることが分かったため、CFS/Pd界面によるものであると考えられる<sup>[4][5]</sup>。

## 参考文献

- [1] S. Ikeda *et al.*, *Nat. Mater.* **9**, 721 (2010)
- [2] H. Sato *et al.*, *IEEE Magn. Lett.*, vol. **3** (2012)
- [3] J. Okabayashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **105**, 122508 (2014)
- [4] N. Matsushita *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **106**, 062403 (2015)
- [5] M. Sawada *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72**, 1161 (2003)

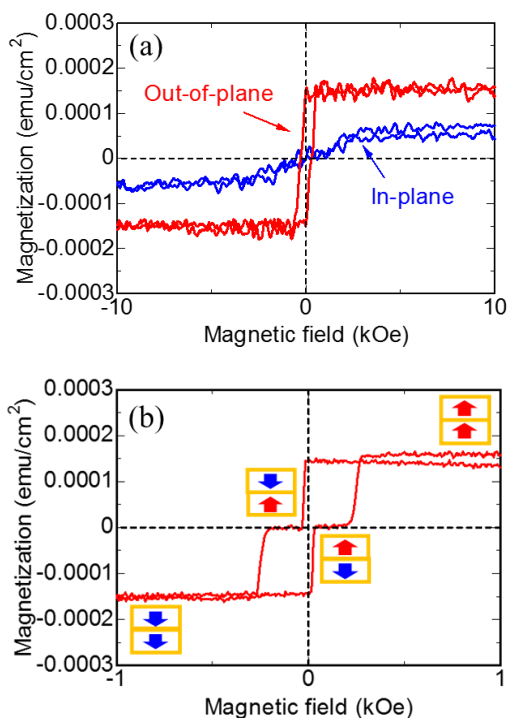


Fig. 1 :  $M$ - $H$  loops of CFS/MgO/CFS films. (a) Comparison between out-of-plane and in-plane loops, (b) out-of-plane loop at low field region.

## $D0_{22}$ - $Mn_3Ge$ 薄膜の垂直磁気異方性の膜厚依存性

藪下 大嗣, 松下 直輝, 高村 陽太, 川戸 良昭\*, 園部 義明\*, 中川 茂樹  
(\*サムスン日本研究所, 東京工業大学)

Thickness dependence of perpendicular magnetic anisotropy of  $D0_{22}$ - $Mn_3Ge$  films

T. Yabushita, N. Matsushita, Y. Takamura, Y. Kawato\*, Y. Sonobe\*, and S. Nakagawa  
(\*Samsung R&D Institute Japan, Tokyo Institute of Technology)

### はじめに

STT-MRAM に用いられる垂直磁化 MTJ 素子の強磁性層には、垂直磁気異方性定数とスピン分極率がそれぞれ高い材料が適している。 $D0_{22}$ - $Mn_3Ge$  は正方晶構造であるため  $c$  軸方向に大きな一軸磁気異方性を持っている。そのため、 $c$  軸配向させることにより垂直磁気異方性が得られる。また、ハーフメタル強磁性体ほどではないが高いスピン分極率も期待できる。この  $D0_{22}$ - $Mn_3Ge$  薄膜を MTJ 強磁性層として用いるには、薄い膜厚領域での特性制御が重要となる。極薄膜領域では成長表面構造が重要になると考えられる。本報告では下地膜により成長面構造を変化させて成膜し膜厚依存性を評価した。

### 実験方法

対向ターゲット式スパッタ法にて成膜を行った。作製したサンプルは  $MgO(001)$  基板上に  $Cr$ ,  $Pd$  を 40nm 堆積し、その後  $Mn_3Ge$  の膜厚を 100~3nm の間で変化させて成膜した。 $Mn_3Ge$  薄膜に成膜温度は 400°C である。作製したサンプルは結晶性を X 線回折法、磁化特性を SQUID にて評価した。

### 実験結果

Fig.1 にサンプルの X 線回折法の測定結果を示す。 $Mn_3Ge$  膜厚 100, 30, 10nm のサンプルにおいて明確な  $Mn_3Ge(004)$  ピークが確認できた。従って、 $Mn_3Ge$  が (001) 配向していることがわかる。また、ピーク位置は膜厚が薄くなるほど高角側へシフトしていることがわかる。これにより、 $Mn_3Ge$  薄膜は薄い領域で下地層である  $Pd$  の結晶格子の影響を強く受け、結晶が面直方向に収縮していることがわかる。Fig.2 に面直方向の単位面積で規格化した磁化特性評価結果を示す。 $Mn_3Ge$  膜厚 10nm 未満でははっきりとしたヒステリシスを確認できなかったが、10nm 以上ではヒステリシスループが確認できた。MTJ 強磁性層の膜厚は磁化反転に必要な電流密度低減のため 5nm 程度まで薄くする必要がある。10nm より薄い膜厚で  $Mn_3Ge$  薄膜を作製するため、さらなる成膜条件最適化が求められる。

### 謝辞

SQUID 測定において便宜を図っていただきました日本大学の塚本新教授に感謝します。

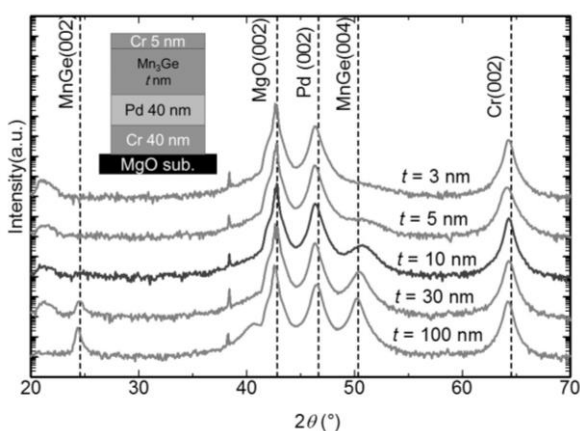


Fig.1: XRD profile of  $Mn_3Ge$  ( $t$  nm) films

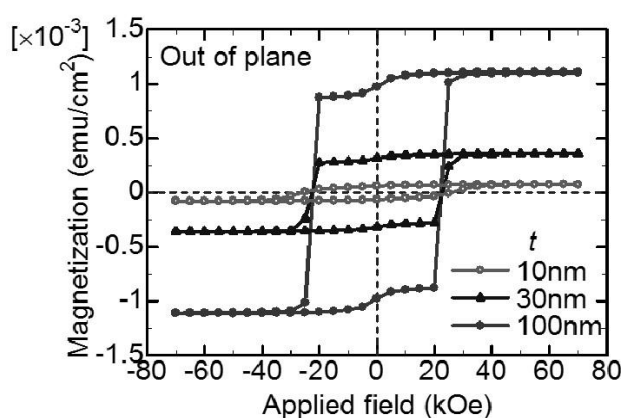


Fig.2: M-H loops of  $Mn_3Ge$  ( $t$  nm) films

# 講演取消

# 反強磁性結合した強磁性多層膜細線上の 磁区の電流駆動の挙動調査

田中雅章, 濱田浩史, 島崎夢志, 住友翔, 本多周太\*, 壬生攻, 栗野博之\*\*  
(名古屋工業大学, \*関西大学, \*\*豊田工業大学)

Study of current-induced magnetic domain movement on ferromagnetic multilayer wire with  
antiferromagnetic coupling

M. A. Tanaka, H. Hamada, M. Shimazaki, S. Sumitomo, S. Honda\*, K. Mibu, H. Awano\*\*  
(Nagoya Institute of Technology, \*Kansai University, \*\*Toyota Technological Institute)

磁性細線上に生成した磁区は細線に電流を流すことで駆動することが出来る<sup>1)</sup>。この現象を利用した新たな磁気記録が注目を集めている。垂直磁化膜の磁区の電流駆動では Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)やスピントラップ効果などの物理現象が関わり、それらの効果を利用することで移動速度の高速化や低消費電力化に寄与できる可能性がある。強い反強磁性結合をした3層構造の強磁性/非磁性/強磁性細線では、磁区の電流駆動は通常とは異なる挙動を示し、単層構造の磁性細線のおよそ2倍以上の速度で移動するという報告がされている<sup>2)</sup>。本研究では、Rh層を介して反強磁性結合する(Tb/Co)<sub>n</sub>/Rh/(Co/Tb)<sub>n</sub>構造にPtキャップ層を付けた細線上の磁区の電流駆動現象を調べた。

電子線描画装置とスパッタ装置を用いたリフトオフ法で、上下のTb/Co多層膜が反強磁性結合をする(Tb/Co)<sub>4</sub>/Rh/(Co/Tb)<sub>4</sub>/Pt細線とRh層を含まない(Co/Tb)<sub>7</sub>/Pt細線を作製した。細線上に膜面垂直磁場中でのレーザー加熱で磁区を生成し、パルス電流を印加した後の極化顕微鏡観察で磁区の挙動を調べた。また、細線長手方向への磁場印加中で電流駆動による磁区移動速度を測定し、Pt層あるいはRh層と接することで生じるDMIによる有効磁場の大きさを評価した。

Fig. 1(a)に反強磁性結合をした細線の下向き磁区に対して、Fig. 1(b)に(Co/Tb)<sub>7</sub>/Pt細線の下向き磁区に対して、それぞれ約 $4 \times 10^{11}$  A/m<sup>2</sup>、100 nsのパルス電流を20回印加した際の極化顕微鏡観察画像を示す。反強磁性結合をした試料では磁区は電子方向に移動しており、Rhを含まない試料では磁区が電子流とは逆方向に移動しているが分かる。また、面内方向への磁場印加下における電流による磁壁の移動速度の評価から、いずれの試料もネールライクな磁壁構造を持ち、反強磁性結合膜とRhを含まない試料ではDMIによる有効磁場の方向が逆になっており、その大きさが50~300 Oe程度であることがわかった。

以上の結果から反強磁性結合をした試料では磁壁のカイラリティーを決定するのはPt層ではなく、Rh層であると考えられる。一方で、上部のPt層のスピントラップ効果によるスピントラップが電流駆動現象に対して支配的であるため、Rh層を含まない試料では電子の逆方向に磁壁が移動し、反強磁性結合膜では電子流と同じ方向に磁壁が移動したと考えられる。

## 参考文献

- 1) A. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **92**, 077205 (2004).
- 2) S. -H. Yang *et al.*, Nat. Nanotechnol., **10**, 221 (2015).

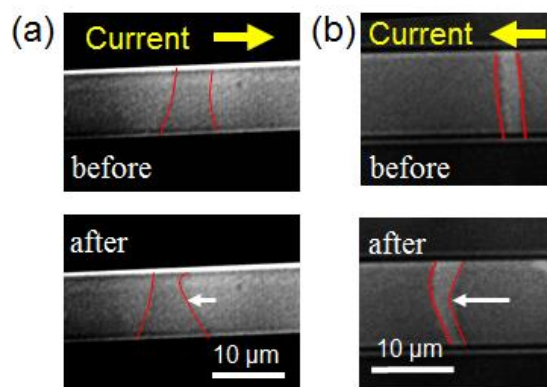


Fig.1 (a)(Tb/Co)<sub>4</sub>/Rh/(Co/Tb)<sub>4</sub>/Pt 構造細線と (b)(Co/Tb)<sub>7</sub>/Pt 構造細線に生成した磁壁の電流印加による挙動。

# ホイスラー合金強磁性体／反強磁性体エピタキシャル積層膜における異方性磁気抵抗効果を用いた反強磁性磁気モーメントの検出

羽尻哲也, 松下将輝, 倪遠致, 浅野秀文  
(名大工)

Detecting antiferromagnetic moment in Heusler-type ferromagnet/antiferromagnet epitaxial bilayers using anisotropic magnetoresistance

T. Hajiri, M. Matsushita, Y. Z. Ni and H. Asano  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

反強磁性体は THz 領域での超高速動作, 外部磁場や電荷に対する安定性, 漏洩磁場が無いなど, 強磁性体と比較すると多くの優位性を示す [1]。しかしながら, 正味の磁化がゼロであるため, 反強磁性体の磁気モーメントの検出や制御は難しいという問題がある。近年, スピン軌道トルクを用いる方法 [2] や強磁性体との積層膜におけるトンネル異方性磁気抵抗効果 (TAMR) [3] を用いる方法などにより, 反強磁性体の磁気モーメントの検出や制御が盛んに研究され始めている。本研究では, エピタキシャル成長したホイスラー合金  $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$  積層膜において, 異方性磁気抵抗測定により反強磁性磁気モーメントの検出に成功し, また印加磁場方向により磁気抵抗の違いを観測した [4] ので報告する。

## 実験方法

ホイスラー合金  $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$  積層膜は DC マグネトロンスパッタリングにより作製した。交換結合は 375 K で  $H = +10$  kOe の外部磁場中で 30 分間保持した後, 外部磁場を印加したまま 4 K まで冷却する事で得た。磁気抵抗測定は直流 4 端子法により測定を行った。

## 実験結果

$\text{Ru}_2\text{MnGe}$  薄膜のネール温度以上である 375 K に加熱後,  $[010]$  方向に 10 kOe で磁場中冷却を行った積層膜における 4 K での磁気抵抗の印加磁場方向依存性を Fig. 1 に示す。印加磁場が  $[110]$ ,  $[-110]$  方向の磁気抵抗は AMR に類似した対称的な曲線を示しているのに対して, 印加磁場が  $[100]$ ,  $[010]$  方向の際は TAMR 研究で報告されている異方的な曲線を示すことが明らかになった。 $[100]$ ,  $[010]$  方向の異方的な磁気抵抗曲線は反強磁性磁気モーメントが検出されている事を示している。また  $\text{Fe}_2\text{CrSi}$  は  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle -110 \rangle$  方向が磁化困難軸,  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 010 \rangle$  方向が磁化容易軸 [5] である事から, 強磁性体  $\text{Fe}_2\text{CrSi}$  の結晶磁気異方性が反強磁性磁気モーメントの回転に影響していることが示唆される。また磁気抵抗は最大で 5.9% が得られた。

講演では  $\text{Fe}_2\text{CrSi}/\text{Ru}_2\text{MnGe}$  積層膜における交換結合および磁気抵抗の  $\text{Ru}_2\text{MnGe}$  膜厚依存性と温度依存性も示し, 交換結合と磁気抵抗の関係についての議論も行う。

## 参考文献

- 1) H. V. Gomonay and V. M. Loktev, *Low Temp. Phys.* **40**, 17 (2014).
- 2) P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).
- 3) B. G. Park *et al.*, *Nat. Mater.* **10**, 347 (2011).
- 4) T. Hajiri *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 134413 (2017).
- 5) Miyawaki *et al.*, *J. Appl. Phys.* **114**, 073905 (2013).

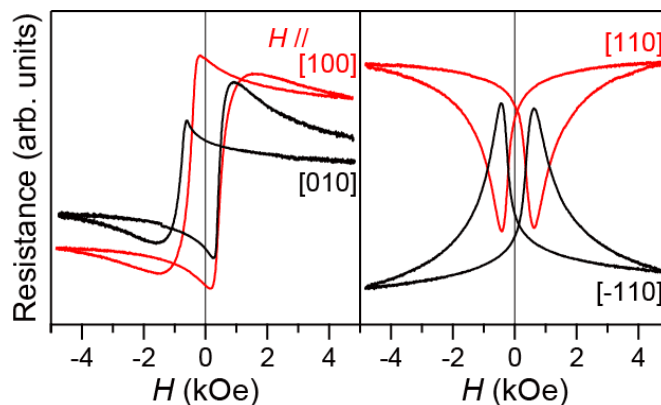


Fig. 1. Applied-field direction-dependent Magnetoresistance of  $\text{Fe}_2\text{CrSi}$  (5 nm) /  $\text{Ru}_2\text{MnGe}$  (20 nm) bilayers at  $T = 4$  K.



# 傾斜電界印加による反強磁性体磁壁移動シミュレーション

久保田 圭祐<sup>1</sup>、山田 啓介<sup>2</sup>、仲谷 栄伸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>電気通信大学 情報理工学研究所、<sup>2</sup>岐阜大学 工学部

## Computer simulation of an Antiferromagnetic Domain Wall Motion by a Slope Electric Field

Keisuke Kubota<sup>1</sup>, Keisuke Yamada<sup>2</sup>, and Yoshinobu Nakatani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Gifu University

### はじめに

近年、磁壁を利用したストレージの提案をうけ、磁壁移動に関する研究が盛んに行われている[1]。磁壁移動の手法として外部磁界による手法やスピン電流を注入する手法があるが、これらの手法では消費電力の低減が課題となっている。現在、消費電力低減のための新たな手法として、電界による磁壁移動方式が提唱されており[2,3,4]、文献[4]では傾斜電界による強磁性細線での磁壁移動についての調査が行われた。しかし、強磁性体(FM)での磁壁移動では Walker Break Down(WBD)が起ると磁壁移動速度が遅くなる問題がある。一方、反強磁性体(AFM)での磁壁移動では WBD が発生しないためこの問題を解決できると期待される。本研究では AFM の磁性細線において傾斜電界による磁壁移動のマイクロマグネティックシミュレーションを行い、FM での磁壁移動に対する AFM での磁壁移動の優位性を調査した。

### 実験結果

計算で用いた FM と AFM の磁性細線は長さ方向  $x = 1000$  nm、膜厚方向  $z = 1.0$  nm、奥行き方向  $y$  は無限大の薄膜とした。材料定数は飽和磁化  $10000/4\pi$  emu/cm<sup>3</sup>、異方性定数  $0.2$  Merg/cm<sup>3</sup>、交換スティフネス定数  $0.16$   $\mu$ erg/cm、反強磁性交換定数  $1/\pi$  Gerg/cm<sup>3</sup>、損失定数  $0.01$  とした[5]。電界効果は、異方性定数が変調する効果とした[4]。傾斜電界効果は、磁性細線長さ方向に対し異方性定数を線形に減少させることで実現し、線形減少量を  $\Delta K_u$  (erg/cm<sup>4</sup>) と定義した。磁壁の初期位置は、細線中心 ( $p = 0$  nm) とした。

図 1(a),(b)に時の FM と AFM の磁壁の時間変化を示す。図 1(a)から、AFM の方が FM より速度の立ち上がりが早いことが分かった。また、図 1(b)から FM では WBD が起きた一方、AFM では WBD が発生しないことが分かった。以上より、傾斜電界により磁壁が異方性減少方向 (+x 方向) へ移動することが確認でき、AFM は FM より速度の立ち上がりが早いことが分かった。図 2 に、 $\Delta K_u$  による FM と AFM の磁壁速度の変化を示す。図から、AFM では線形減少量に対し磁壁移動速度が比例して増加することが分かる。一方、FM では徐々に速度が上らなくなり、WBD 発生後は速度が減少することがわかる。以上の結果から、AFM の方が速度の立ち上がりにおいて FM より優位性があり、また  $\Delta K_u > 1.5$  Gerg/cm<sup>4</sup> では、AFM の方が速度面の優位性があることが分かった。

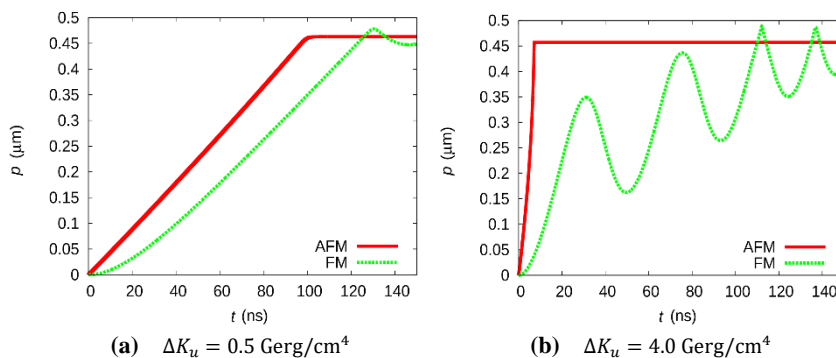


Fig. 1 Change in time of DW position by the slope electric field

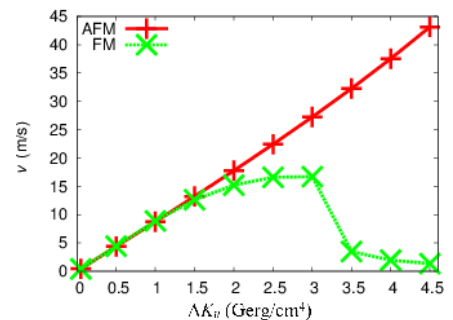


Fig. 2 Comparison of domain-wall velocity between AFM and FM

### 参考文献

- [1] S. S. P. Parkin, *et. al.*, Science **320**, 190 (2008). [2] A. J. schellekens, *et. al.*, Nat. Commun. **3**, 848 (2011). [3] D. Chiba, *et. al.*, Nat. Commun. **3**, 888 (2012). [4] K. Yamada, *et. al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 202405(2016). [5] Y. Yamane, *et. al.*, Phys. Rev. B **93**, 180408(R) (2016).

# $\mu\text{m}$ スポットレーザー光による局所磁気履歴計測が可能な 磁区観察顕微鏡

小田切 雄介、柳沢 栄二、目黒 栄、斉藤 伸\* (ネオアーク株式会社、\*東北大学)

Magnetic domain microscope with micrometer-spot laser for measurement of local magnetization hysteresis

Y. Odagiri, E. Yanagisawa, S. Meguro, S. Saito\* (Neoark Corporation, \*Tohoku University)

**はじめに** 現在、STT-MRAM に代表されるスピントロニクスデバイスの開発が鋭意進められている。これらの磁気デバイスでは試料内の局所領域の磁気特性がデバイスの性能へ顕著に影響するため、磁区構造と各所での磁気特性との対応関係を把握することが重要である。磁気光学 Kerr 効果を用いた一括撮像型の顕微鏡は磁区構造の磁界履歴を動画像として取得できるため、微細加工試料の磁気特性把握のために活用されている。Kerr 効果顕微鏡では、取得された磁区像の動画像の所望の領域に対応する画素を選択し、その輝度値を抽出することで局所領域の磁気履歴曲線を得ることが可能である [1]。しかし輝度値は撮像と画像処理の過程で様々な光量変動やノイズの影響を受けるため、信号品位の高い磁気履歴曲線を得ることが難しかった。そこで我々は、磁区観察顕微鏡にレーザー光学系を組み込むことで、高コントラストの磁区像の観察を行いつつ、高品位な磁気履歴曲線の測定を可能とする装置開発を行ったので報告する。

**装置原理** 磁区観察と局所磁気履歴曲線取得を両立させる鍵は、対物レンズ近傍での入射光の焦点を如何にして真円・均一強度・微小径に結ぶかにかかっている。磁区観察光学系では、ケラー照明を実現するため後側焦点位置で焦点を結ばせる (Fig. 1(a))。一方レーザー光学系では、試料表面で極力小径の焦点を結ばせる必要がある (Fig. 1(b))。これらを同時に実現すべく、磁区観察光学系とは別軸でレーザー光学系を設けることとした (Fig. 2)。レーザー光学系では、ファイバーガイドを採用しスポット径の真円化を図ると共に、コリメート光路部のレーザービーム径を 1.5 mm まで広げ、リレーレンズを通さずにレーザー光を対物レンズに直接入射する設計とした。この結果、50 倍対物レンジ使用時に、試料面でのスポット径を 1  $\mu\text{m}$  (極カー観察)、あるいは 3  $\mu\text{m}$  (縦カー観察) まで縮小している。また高品位の偏光変化情報の獲得のためレーザー光には強度変調を施し、偏光差動法とロックイン法を併用して信号検出した。この結果、1 mdeg の偏光回転角でも検出できることを確認し、磁気履歴曲線は従来の輝度抽出法より 22 dB の S/N の改善が図られた。その他、無限遠光学系の光路短縮のため、検光子、フォトダイオードおよび電流-電圧変換回路を一つにまとめた小型ディテクタを採用し、観察方向切り替え機構の簡略化を行う等、工夫をしている。

**観察例** Fig. 3 (a) に零磁界下の NiFe 十字パターン薄膜の磁区像を、(b) (c) にはパターン上に矢印で示した 2 点について、波長 650 nm のレーザー光で計測した局所磁気履歴曲線を示す。(b) (c) では、磁化回転と磁壁移動が重複した複雑な磁化過程が観測されており、特に (b) では印加磁界減少時に磁壁のピンニング外れることがスムーズな磁化過程を阻害していることがわかる。本装置による計測は、磁区動画像と対応させることにより、不均一磁化過程の起源究明の一助となることが大いに期待できる。

参考文献 1) S. Meguro et al., 29<sup>th</sup> Annl. Conf. Magn. Soc. Jpn., 22pB-5, (2005).

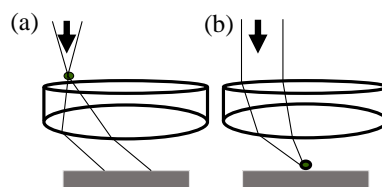


Fig. 1 Focusing for (a) magnetic domain microscope with white light and (b) optical system with a laser.

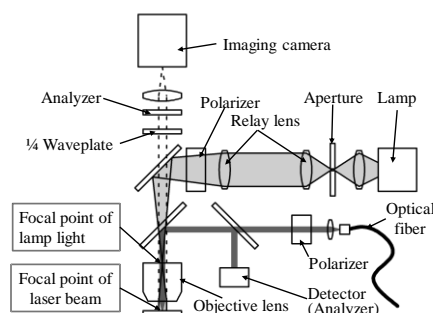


Fig. 2 Schematic of the newly developed magnetic domain microscope with micrometer-spot laser.

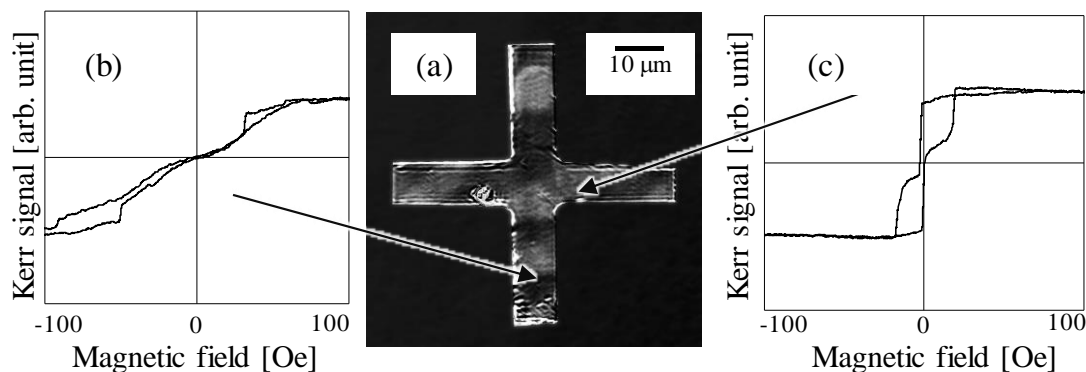


Fig. 3 (a) Magnetic domain image and (b) (c) magnetization curves of the NiFe patterned thin film.

## 電圧誘起ダイナミック磁化反転の書き込みエラー率低減

池浦拓朗<sup>1,2</sup>, 塩田陽一<sup>1</sup>, 山本竜也<sup>1</sup>, 野崎隆行<sup>1</sup>, 鈴木義茂<sup>1,3</sup>, 湯浅新治<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>産総研, <sup>2</sup>筑波大学, <sup>3</sup>大阪大学)

Improvement of write error rate in voltage-induced magnetization switching

T. Ikeura<sup>1,2</sup>, Y. Shiota<sup>1</sup>, T. Yamamoto<sup>1</sup>, T. Nozaki<sup>1</sup>, Y. Suzuki<sup>1,3</sup>, and S. Yuasa<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>Univ. Tsukuba, <sup>3</sup>Osaka Univ.)

### 1 はじめに

電圧誘起磁気異方性変化<sup>1)</sup>を利用した磁化反転制御は、その低消費電力性から電圧駆動型磁気メモリへの応用が期待されている<sup>2)</sup>。しかしながらパルス電圧誘起の歳差運動を利用する反転制御であるため反転確率はパルス時間に非常に敏感であり、実用に向けた低書き込みエラー率(WER)の実証が重要な課題となっている<sup>3)</sup>。WERの低減には高い垂直磁気異方性による熱安定性向上が有効であることが理論予測により明らかとなっているが<sup>3)</sup>、同時にその磁気異方性を打ち消すだけ十分大きな電圧効果も求められる。一方、電圧磁気異方性変化は通常印加電圧に対して線形に変化するため、磁化反転に利用される電圧とは逆符号側では垂直磁気異方性の増大、つまり熱安定性の向上を作り出すことができる。本研究では、この電圧による磁気異方性増大効果を利用して反転前の熱安定性を疑似的に向上させ、書き込みエラー率を低減する手法についてマクロスピンモデルシミュレーションにより検討した。

### 2 結果及び考察

図1に本アプローチで磁化反転制御に用いる(a)パルス電圧とそれにより生じる(b)垂直磁気異方性( $K_{PMA}$ )変化の模式図を示す。通常は正側のみの書き込みパルス電圧印加(時間幅  $t_{sw}$ , 電圧強度+1V)により垂直磁気異方性を消失させ、面内方向に印加しているバイアス磁界を軸とした歳差運動を誘起することにより反転を制御する。本アプローチではそれに加えて、反転パルス印加前に逆バイアス電圧(-1 V)を印加することで疑似的に磁気異方性を増大させてから書き込みパルス電圧を印加し、WERへの影響を調べた。図1(c)に記録層の熱安定性( $\Delta$ )に対するエラー率(WER)を比較した結果を示す。電圧効果の大きさは各条件における垂直磁気異方性を打ち消すことを想定しているため、 $\Delta$ が大きな条件ほど高効率となっている。また、面内バイアス磁界による磁化の面直方向からの傾き角を一定とするため、パルス時間幅  $t_{sw}$  に関しても $\Delta$ に依存して最適値に設定した。通常のパルスのみ(青)と比較して、逆バイアス電圧を印加した場合に明瞭な WER 低減効果が見られ、その効果は $\Delta$ が大きくなるほど有効であることが分かった。発表では低減効果の物理起源についても議論する。

本研究は総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)により、科学技術振興機構を通して委託されたものである。

- 1) T. Maruyama, *et al. Nat. Nanotech.* **4**, 158 (2009).
- 2) Y. Shiota, *et al. Nat. Mater.* **11**, 39 (2012).
- 3) Y. Shiota *et al. Appl. Phys. Express* **9**, 013001(2016).

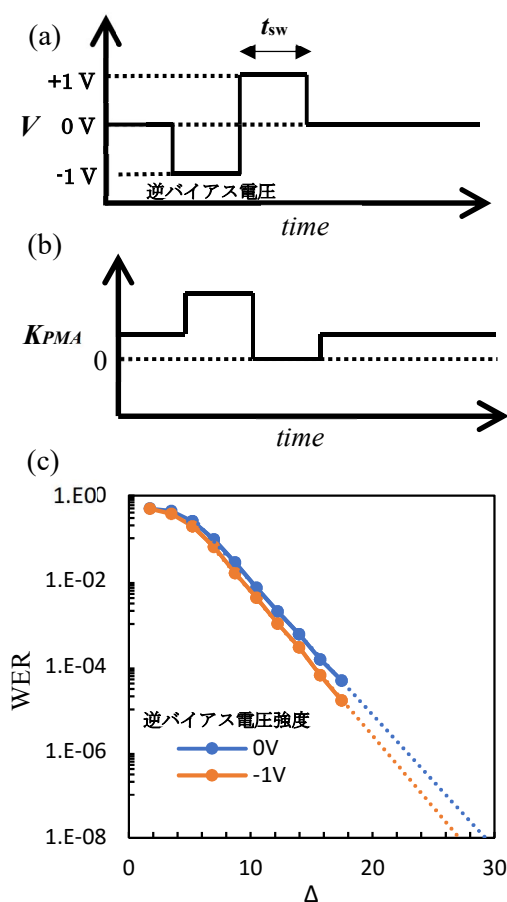


図1 (a)パルス電圧の模式図、(b)垂直磁気異方性変化の模式図、(c)エラー率(WER)に対する負電圧印加効果の熱安定性  $\Delta$  依存性