

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¹⁾。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²⁾。本研究では、Rh層を介して反強磁性結合する(Tb/Co)_n/Rh/(Co/Tb)_n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)₄/Rh/(Co/Tb)₄/Pt細線とRh層を含まない(Co/Tb)₇/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の速度を測定し、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)₇/Pt細線の下向き磁区に対して、それぞれ約 4×10^{11} A/m²、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).

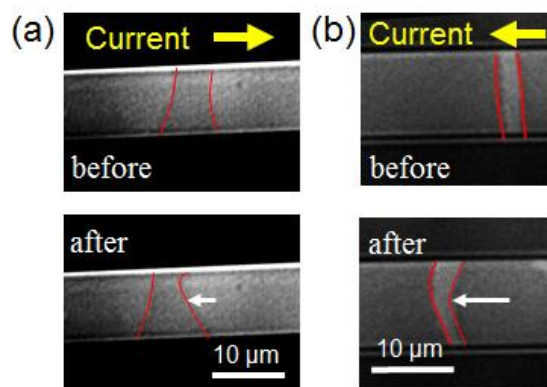


Fig.1 (a)(Tb/Co)₄/Rh/(Co/Tb)₄/Pt 構造細線と (b)(Co/Tb)₇/Pt 構造細線に生成した磁壁の電流印加による挙動。

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

Ru_2MnGe 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 Fe_2CrSi 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 Fe_2CrSi 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 Ru_2MnGe 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).

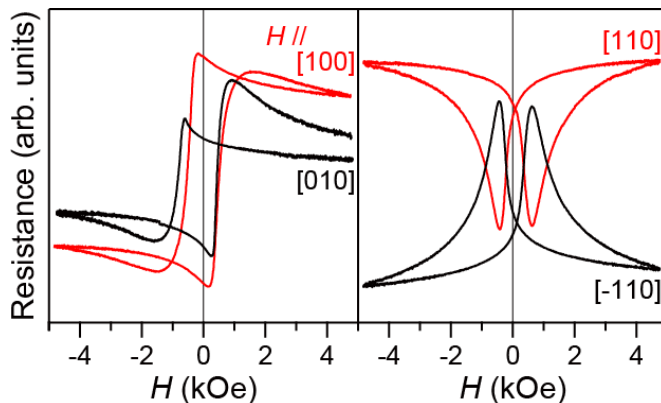


Fig. 1. Applied-field direction-dependent Magnetoresistance of Fe_2CrSi (5 nm) / Ru_2MnGe (20 nm) bilayers at $T = 4$ K.

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¹、山田 啓介²、仲谷 栄伸¹

¹電気通信大学 情報理工学研究科、²岐阜大学 工学部

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

Keisuke Kubota¹, Keisuke Yamada², and Yoshinobu Nakatani¹

¹Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

² 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/cm³、異方性定数 0.2 Merg/cm³、交換スティフネス定数 0.16 μ erg/cm、反強磁性交換定数 $1/\pi$ Gerg/cm³、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 ΔK_u (erg/cm⁴) 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早いことが分かった。図 2 に、 ΔK_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がらなくなり、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/cm⁴ では、AFM の方が速度面の優位性があることが分かった。

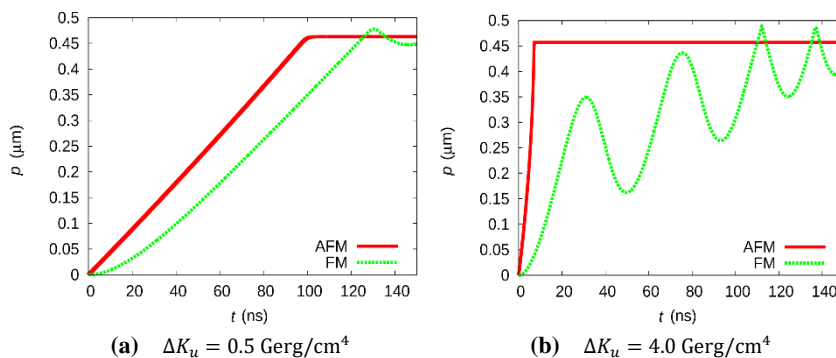


Fig. 1 Change in time of DW position by the slope electric field

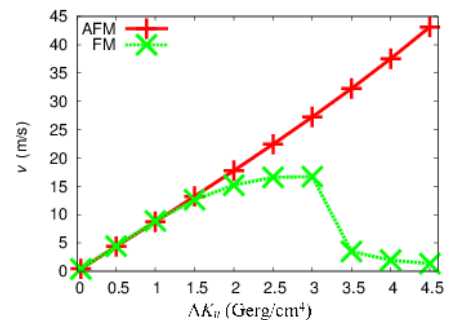


Fig. 2 Comparison of domain-wall velocity between AFM and FM

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).

μm 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 μm (極カー観察)、あるいは 3 μm (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., 29th Annl. Conf. Magn. Soc. Jpn., 22pB-5, (2005).

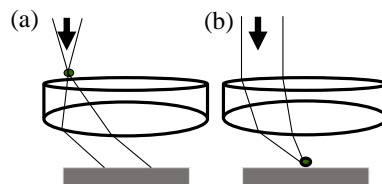


Fig. 1 Focusing for (a) magnetic domain microscope with white light and (b) optical system with a laser.

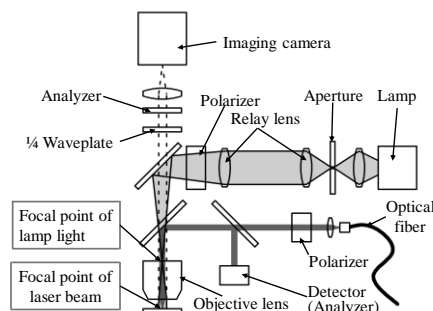


Fig. 2 Schematic of the newly developed magnetic domain microscope with micrometer-spot laser.

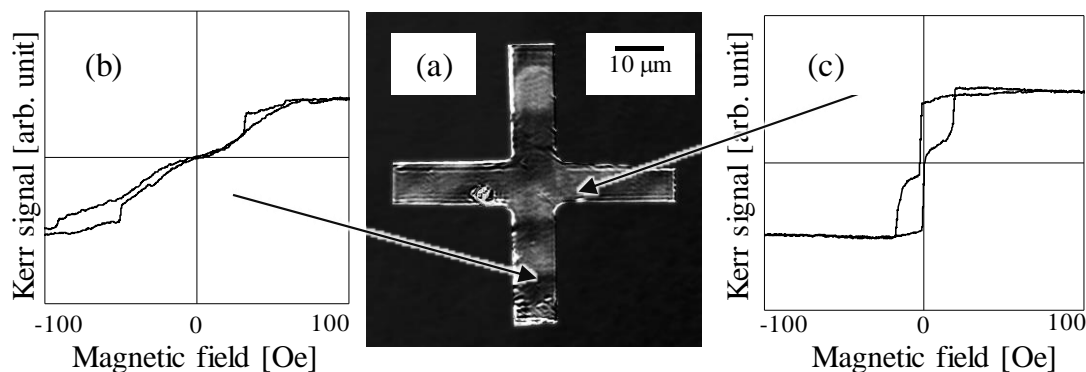


Fig. 3 (a) Magnetic domain image and (b) (c) magnetization curves of the NiFe patterned thin film.

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^{1,2}, 塩田陽一¹, 山本竜也¹, 野崎隆行¹, 鈴木義茂^{1,3}, 湯浅新治¹
 (1産総研、2筑波大学、3大阪大学)

Improvement of write error rate in voltage-induced magnetization switching
 T. Ikeura^{1,2}, Y. Shiota¹, T. Yamamoto¹, T. Nozaki¹, Y. Suzuki^{1,3}, and S. Yuasa¹
 (1AIST, 2Univ. Tsukuba, 3Osaka Univ.)

1 はじめに

電圧誘起磁気異方性変化¹⁾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²⁾。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³⁾。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³⁾、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(Δ)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、 Δ 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 Δ 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 Δ 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).

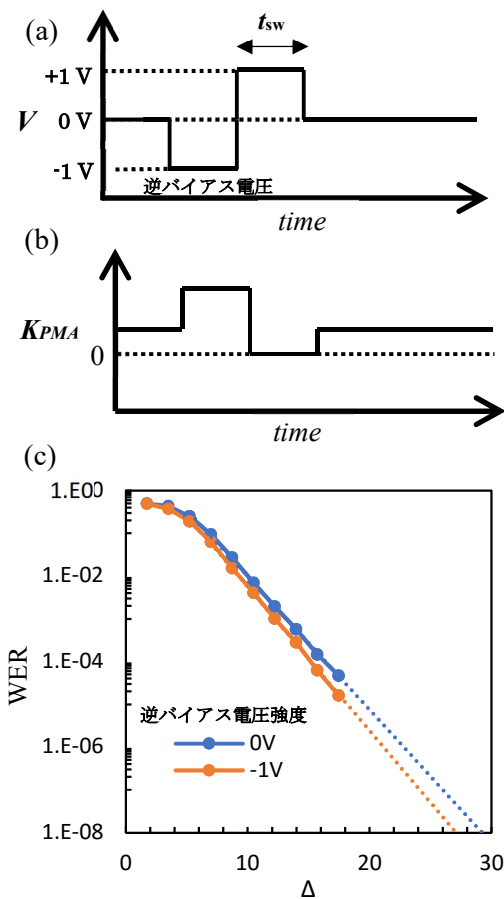


図1 (a)パルス電圧の模式図、(b)垂直磁気異方性変化の模式図、(c)エラー率(WER)に対する負電圧印加効果の熱安定性 Δ 依存性