

Co₂FeSi/Mn₃Ge 二層構造による垂直磁化膜の作製と評価

松下 直輝, 薮下 大嗣, 長沼 志昌, 高村 陽太, 園部 義明*, 中川 茂樹
(*サムスン日本研究所, 東京工業大学)

Preparation and evaluation of Co₂FeSi/Mn₃Ge bilayered films with perpendicular magnetic anisotropy

N. Matsushita, T. Yabushita, Y. Naganuma, Y. Takamura, Yoshiaki Sonobe*, and S. Nakagawa

(*Samsung R&D Institute Japan, Tokyo Institute of Technology)

はじめに

磁気抵抗メモリ(MRAM)を構成する磁気トンネル接合(MTJ)の強磁性層への要求として書き換え電流の低減, 熱安定性の確保, 高い TMR 比があり, これらを満たすには垂直磁化, 大きな磁気異方性エネルギー, 高いスピン分極率が必要になる. Co₂FeSi(CFS) は L₂₁ 規則構造においてスピン分極率が 100 % のハーフメタル強磁性体と予測される. 本研究では CFS を垂直磁化とするために, 高い結晶磁気異方性エネルギーにより垂直磁化膜となる Mn₃Ge 膜¹⁾と交換結合させた二層構造による垂直磁化 MTJ 電極材料の実現をめざした.

実験方法

対向ターゲット式スパッタ法を用いて MgO(001)基板上に Cr バッファ層を室温で成膜し, 400°C で in-situ アニールを行ったのち, CFS/Mn₃Ge の順で二層構造膜を作製した. CFS および Mn₃Ge の作製温度は 400°C とした. 結晶性の評価は X 線回折により行い, 磁化特性の評価には SQUID を用いた.

実験結果

Fig.1 に CFS(100nm)/Mn₃Ge(100nm)構造の XRD 回折パターンを示す. Mn₃Ge(002), (004)回折ピーク及び CFS(002), (004)回折ピークを確認できるため, Mn₃Ge と CFS はともに(001)配向していることが分かる. Fig.2 に CFS(*t* nm)/Mn₃Ge(100nm)構造の試料の磁化特性を示す. CFS の膜厚 1 から 3 nm においては CFS と Mn₃Ge の層間交換結合による一体化した磁化挙動を示し, 高い垂直磁気異方性を示すことが確認できた. CFS がさらに厚い 5 nm になると磁化の一体化が保てなくなり, 磁化特性にステップが現れる特性を示す. これらの結果は CFS 層がある程度薄ければ, Mn₃Ge の高い垂直磁気異方性エネルギーと CFS の高いスピン分極率を併せ持つ強磁性層を実現できる可能性を示している.

謝辞

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

参考文献

- 1) S. Mizukami et al., Applied Physics Express **6**, 123002 (2013).

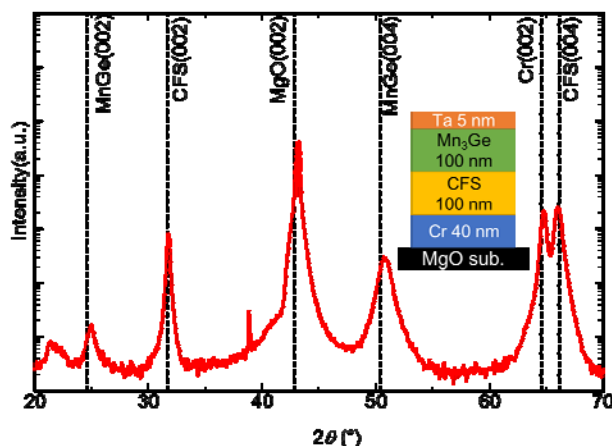


Fig.1 XRD pattern of CFS(100 nm)/Mn₃Ge(100 nm) film.

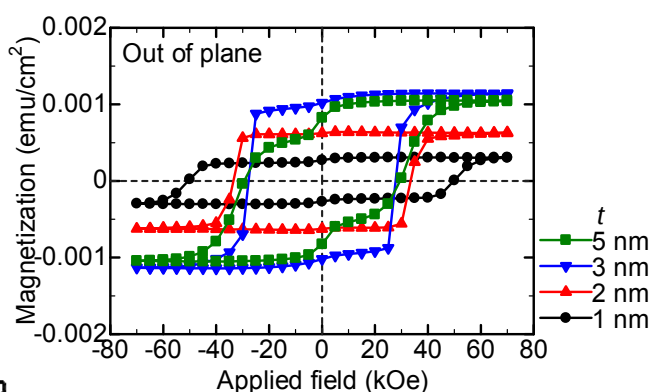


Fig.2 M-H loops of CFS(*t* nm)/Mn₃Ge(100 nm) structure

キュリー温度変調 TbFe/GdFeCo 交換結合構造による反転磁界制御

塚本新¹, 園部義明², 吉川大貴³

(¹ 日本大学理工学部, ² サムスン日本研究所, ³ 日本大学大学院理工学研究科)

Curie temperature controlled TbFe/GdFeCo hybrid structure for low field magnetization switching

A. Tsukamoto¹, Y. Sonobe², H. Yoshikawa³

(¹ College of Science and Technology Nihon Univ., ² Samsung R&D Institute Japan, ³ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,)

はじめに 低エネルギー磁化スイッチング可能な磁気記録媒体やMRAM素子実現に向け、熱磁気特性の異なる二層からなる交換結合磁性層構造による高効率熱的反転磁界低減につき検討を行った。室温（アーカイブ温度）において高保磁力を有し、高い反転磁界の温度依存性を発現するとともに、記録温度において熱的に安定した低磁場磁化反転特性を得る事を目的とした。本検討では、低Curie温度および高磁気異方性（高保磁力）を有する磁性薄膜(A)と高Curie温度および低磁気異方性（低保磁力）を有する磁性薄膜(B)が交換結合した、キュリー温度変調複合磁性構造 (Curie temperature (T_c) controlled hybrid structure: TcC) により、急峻な熱的反転磁界制御を可能とする磁性薄膜を形成した。

作製試料 同系統の材料を用いた磁性薄膜にて上記反転磁界低減を実現する磁性薄膜を形成するために、低Curie温度で高磁気異方性な磁性薄膜には(A) Tb₂₀Fe₈₀ (10nm) を、高Curie温度で低磁気異方性な磁性薄膜には (B) Gd₂₂Fe_{68.2}Co_{9.8} (10nm) とし、3元同時マグネトロンスパッタにより製膜した。それぞれ室温 (300 K) から400Kの保磁力の温度依存特性はFig. 1の様になる。各磁性層単層での特性は、(A) SiN (60 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub. は室温にて保磁力Hc~2.5kOe、Curie温度 T_c を約377 K (外挿値) に有し、(B) SiN (60 nm) / Gd₂₂Fe_{68.2}Co_{9.8} (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub. は上記温度範囲において、Hcが24~64Oe程度と低Hcかつ小さな温度変化にとどまる。そこで、上記二種の薄膜からなる交換結合二層膜(A+B) SiN (60 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ (10 nm) / Gd₂₂Fe_{68.2}Co_{9.8} (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub. を作製、その保磁力の温度特性を評価した。

実験結果 作製した試料(A+B)は、300~400Kの測定温度域において、いずれも角型比の良い垂直磁気ヒステリシス特性を示した。図1に示すように保磁力の温度依存性において室温(300 K)付近において急峻に保磁力の減少 (300K~350Kにおいて1kOe/50K) を示すとともに、その温度勾配は370K付近で緩やかとなり、400 K では、室温の5% 程度となった。実際に、400Kまで加熱した後、一時的に100 Oeの反転磁界を印加後、無磁場で室温へ冷却する事で、完全磁化反転状態が誘起可能であることを確認した。以上より、TcC磁性薄膜が、アーカイブ温度において高保磁力を発現するとともに、比較的低い記録温度において熱的に安定した低磁場磁化反転特性を形成可能であることを示した。このようなTcC構造は低消費電力の磁気記録やMRAM等への応用が期待される。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S1311020)の助成により行った。

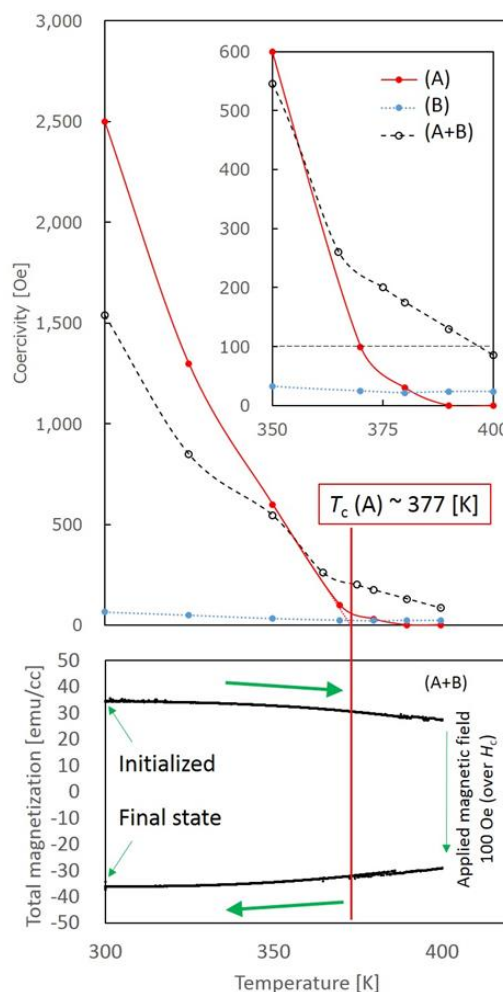


Fig. 1 Temperature dependence of Coercivity and magnetization in (A) SiN (60 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub., (B) SiN (60 nm) / Gd₂₂Fe_{68.2}Co_{9.8} (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub., (A+B) SiN (60 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ (10 nm) / Gd₂₂Fe_{68.2}Co_{9.8} (10 nm) / SiN (5nm) / glass sub.

垂直磁化 GdFeCo 膜のスピンホール効果による磁化反転

松村智矢, 大島大輝, 加藤剛志, 岩田聡

(名古屋大学)

Spin Hall switching of perpendicular magnetized GdFeCo films

T. Matsumura, D. Oshima, T. Kato, S. Iwata

(Nagoya Univ)

はじめに

Gbit を超える MRAM 開発およびその低消費電力化において, 磁性薄膜の高効率な磁化反転手法の開発が求められている. スピンホール効果による純スピン流を利用した磁化反転は, 現在開発中のスピントランスポールトルク磁化反転に比べて低消費電力化の可能性があり, また書き込みマージンの確保が容易であるなどの利点があると指摘されている¹⁾. 本研究では, 希土類-遷移金属(RE-TM)合金である GdFeCo 膜について TM-rich および RE-rich 組成の垂直磁化膜でスピンホール効果による磁化反転を確認し, 磁化反転電流の印可磁界依存性, スピンホール角の大きさを調べたので報告する.

実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置により, 熱酸化膜付き Si 基板上に substrate / Ta (10 nm) / Gd_x(Fe₉₀Co₁₀)_{100-x} (5 nm) / SiN (5 nm) を成膜した. 素子の加工には, 電子ビームリソグラフィと Ar⁺イオンエッチングを用い, 幅 3 μm のホールクロス構造を作製した. スピンホール効果による磁化反転は電流端子にパルス幅 0.1 sec のパルス電流 I_{pulse} を通電後, 読み出し電流 $I_{\text{read}} = 80 \mu\text{A}$ で Hall 電圧を測定することにより確認した. また, 測定時には印可電流と平行に磁界 H_{ext} を加えた.

実験結果

Fig. 1 は, Gd₂₁(FeCo)₇₉ 膜 (TM-rich) において所定のパルス電流 I_{pulse} を流した後にホール電圧 V_H を測定した結果を示している. なお, I_{pulse} と平行に $H_{\text{ext}} = 100 \text{ Oe}$ を印加している. $I_{\text{pulse}} = \pm 2.5 \text{ mA}$ 付近でスピンホール効果による磁化反転を反映したホール電圧の急峻な変化が観測されている. 正, 負の I_{pulse} から見積もった平均の反転電流密度 J_{sw} は, $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 程度となった. TM-rich と RE-rich では Hall 電圧の符号は反転するが, スピンホール磁化反転はどちらの組成においても $I_{\text{pulse}}, H_{\text{ext}}$ がともに正方向の時, 正味の磁化が膜面上向きから下向きに反転することが分かった. また, スピンホール効果による磁化反転の J_{sw} の H_{ext} 依存性は GdFeCo 膜の磁化が大きく, 異方性磁界が小さいものの方が大きいという結果を得た. Fig 2 は Gd₂₁(FeCo)₇₉ 膜に $I_{\text{DC}} = \pm 2.0 \text{ mA}$ を流しながら, I_{DC} と平行な磁界 H_{in} を増加させたときのホール抵抗 R_H の変化を表している. スピンホール効果により $I_{\text{DC}} = -2 \text{ mA}$ より, $+2 \text{ mA}$ の方が磁化が面内を向きやすくなっている. R_H の面内磁界 H_{in} 依存性から見積もったスピンホール角¹⁾はおおよそ 0.1 程度であり, TM-rich, RE-rich と同程度であることが分かった.

参考文献

- 1) L. Liu *et al.*, Science, **336**, 555 (2012).

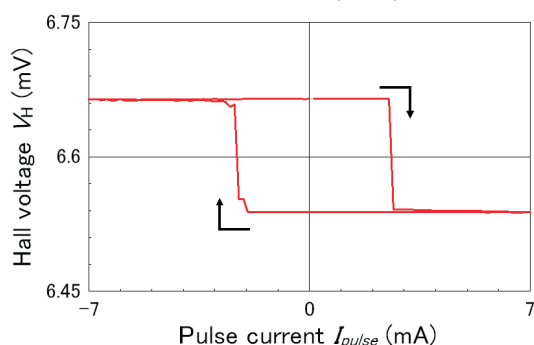


Fig. 1 Anomalous Hall voltage of Gd₂₁(Fe₉₀Co₁₀)₇₉ after the application of in-plane pulse current I_{pulse} , under an external field of $H_{\text{ext}} = 100 \text{ Oe}$.

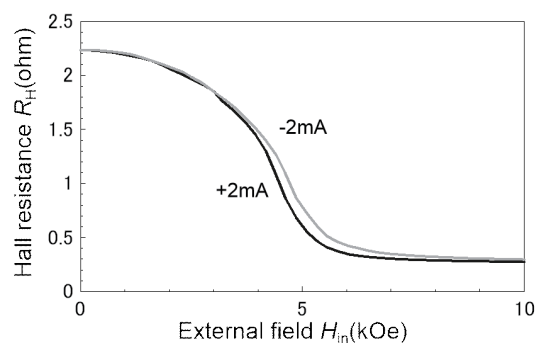


Fig. 2 In-plane field H_{in} dependence of Hall resistance R_H of Gd₂₁(Fe₉₀Co₁₀)₇₉ measured applying a DC current of $I_{\text{DC}} = \pm 2.0 \text{ mA}$.

Co₂FeSi/MgO 積層界面への酸素曝露による磁気異方性への影響

篠原 光貴, 鈴木 隆寛, 高村 陽太, 中川 茂樹
(東京工業大学 工学院 電気電子系)

Change of magnetic anisotropy of Co₂FeSi/MgO films induced by oxygen exposure at the interface

K. Shinohara, T. Suzuki, Y. Takamura, S. Nakagawa
(School of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

1. はじめに

垂直磁気異方性(PMA)を有する垂直磁化型磁気トンネル接合 (p-MTJ)は, 低電流で磁化反転が可能であることから, 次世代の MRAM 用基本メモリ素子として注目を集めている. 近年では PMA を有する CoFeB/MgO/CoFeB 構造においてトンネル磁気抵抗効果 (TMR)が観測され, p-MTJ の実現に成功している^{[1], [2]}. しかし, 従来の p-MTJ は TMR 比が小さい. 高い TMR 比を実現するためにはスピン分極率が 100%のハーフメタル強磁性体(HMF)が有望であるが, 両電極に HMF を用いた p-MTJ は未だ実現されていない. 本研究では HMF として期待されるフルホイスラー合金 Co₂FeSi(CFS)を用いて垂直磁化膜の作製に取り組んでいる^[3]. これまでに報告した CFS/MgO 構造における垂直磁化膜では CFS の成膜温度は室温であったが, 今回 CFS を 400°Cで成膜後, 酸素曝露を行うことで L₂₁構造の実現と垂直磁気異方性の向上に成功したため報告する.

2. 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. 試料の構造は MgO 基板/Cr(40 nm)/Pd(40 nm)/CFS(*t*_{CFS} nm)/MgO(*t*_{MgO} nm)/Ta(10 nm)で, MgO は RF スパッタで, それ以外の膜はすべて DC スパッタで成膜した. 成膜温度は CFS 層を 400°C, それ以外の膜を室温とした. 酸素曝露は CFS を成膜後室温で 2.0 Pa, 10 min 行った.

3. 実験結果

Fig.1 に作製した試料の磁化特性を示す. CFS(0.7 nm)/MgO(1.5 nm)構造では Out-of-plane の *M-H* 曲線において, 5 kOe 以上の大きな飽和磁界が確認されたが, CFS(0.7 nm)/MgO(1.5 nm)の界面で酸素曝露を行うことにより, Fig.1(b)のように飽和磁界が減少した. これは酸素曝露により垂直磁気異方性が強まったことを示唆している. Fig.1 の In-plane と Out-of-plane のそれぞれの *M-H* 曲線で囲まれた領域の面積により垂直磁気異方性エネルギー *K_u* を見積もると, 酸素曝露により *K_u* の値は -2.7×10^6 から -5.9×10^5 erg/cm³ に増加することが分かった. また, Fig.1(a), (b)で飽和磁化がほぼ同じであることから, 酸素曝露に伴う CFS の膜質の劣化がないことも確認できた.

謝辞

本研究は STARC(半導体理工学研究センター)の IS プログラムの助成を受けて実施されました. 謝意を表します.

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] Y. Takamura *et al.*, *J. Appl. Phys. Lett.*, vol. **115**, 17C732 (2014)

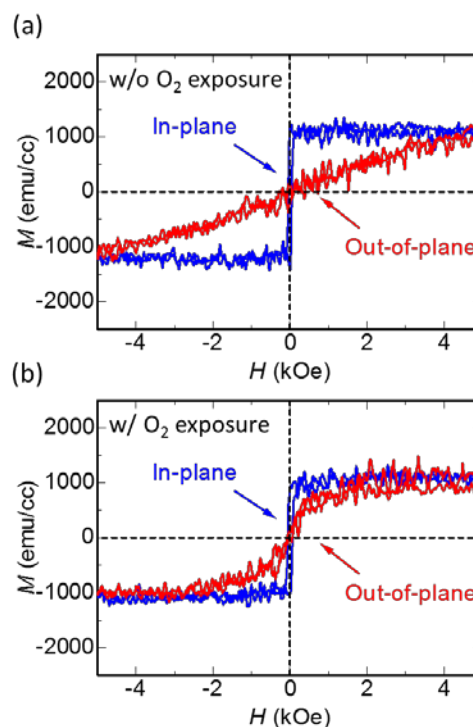


Fig.1 : *M-H* loops of CFS(0.7 nm)/MgO(1.5 nm) structure formed (a) w/o O₂ exposure, (b) w/ O₂ exposure