

Ni/Cu 多層構造の電場誘起 XMCD

岡林潤^{1*}・谷山智康²

¹東大理・²東工大

Electric-field induced XMCD in Ni/Cu multilayer

Jun Okabayashi¹ and Tomoyasu Taniyama²

¹The Univ. of Tokyo, ²Tokyo 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 BaTiO₃ 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。BaTiO₃ 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)]₅ の多層構造を BaTiO₃ (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_{2,3} 端の XMCD と L₃ 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 BaTiO₃ の格子変調は約 1 % と見積もられ、BaTiO₃ 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 0.2Ω 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 0.5mV 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)

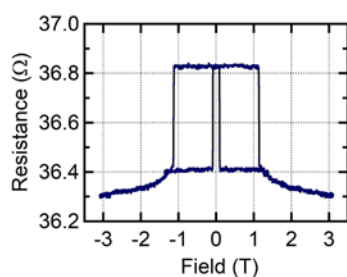


Fig. 1 下フリーCu スペーサ素子の GMR

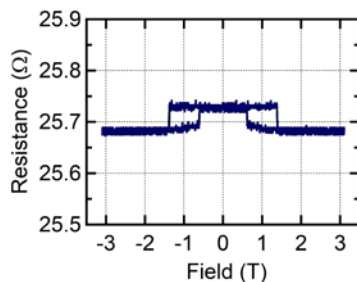


Fig. 2 下フリーIr スペーサ素子の GMR

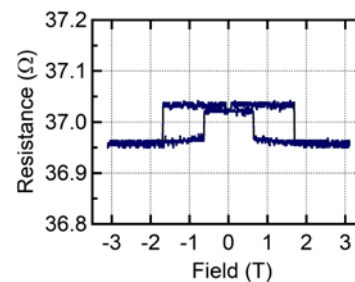


Fig. 3 上フリーIr スペーサ素子の GMR

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¹⁾。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²⁾。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 μm 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、 ± 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).

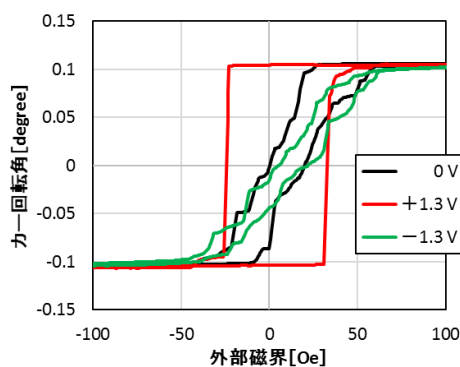


図 1 Co-Fe(0.3)/Gd(0.2)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

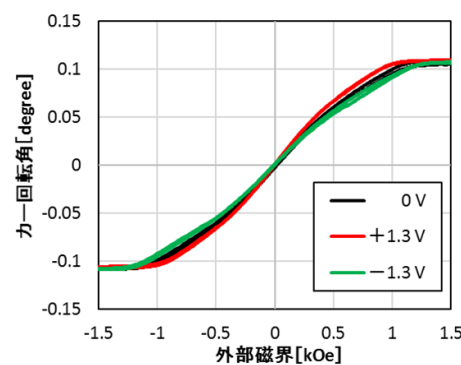


図 2 Co-Fe(0.3)/Gd(0.1)/Gd-Fe(9) 光変調層の MOKE ループ

垂直磁化 Co₂FeSi 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 Co₂FeSi 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^{[1][2]}。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Co₂FeSi(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^[3]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^{[4][5]}。

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)

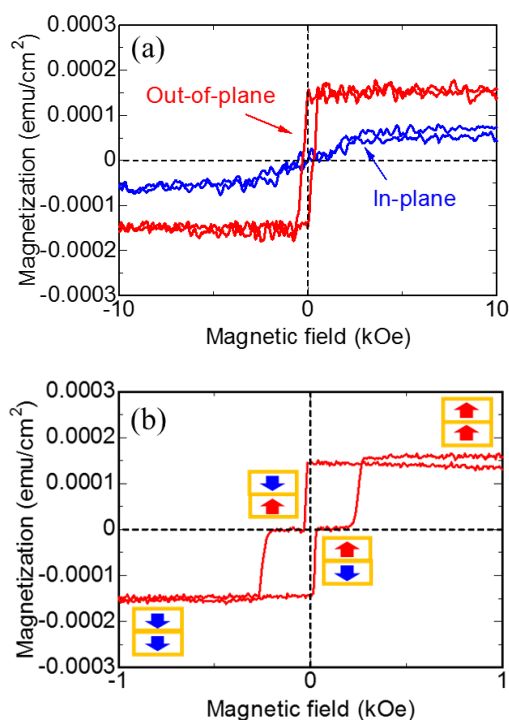


Fig. 1 : M - H loops of CFS/MgO/CFS films. (a) Comparison between out-of-plane and in-plane loops, (b) out-of-plane loop at low field region.

$D0_{22}$ - 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。

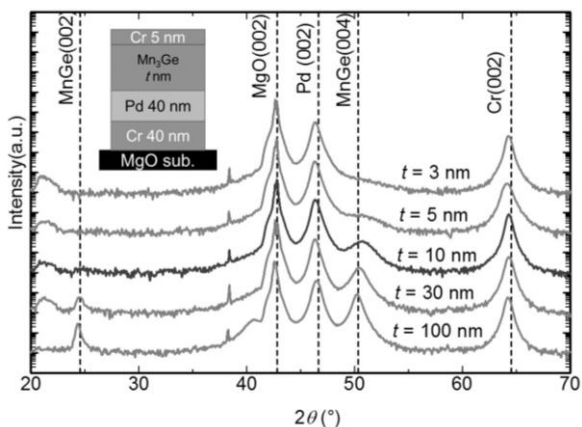


Fig.1: XRD profile of Mn_3Ge (t nm) films

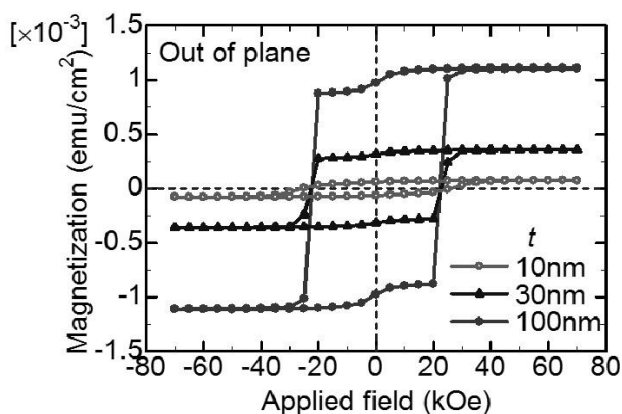


Fig.2: M-H loops of Mn_3Ge (t nm) films

講演取消