

令和元年5月31日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18878

研究課題名(和文)超短パルス光励起スピンの流による電流レス磁化反転

研究課題名(英文) Magnetization switching by spin current induced by ultra short pulse laser

研究代表者

加藤 剛志 (Kato, Takeshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50303665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超短パルス光によるスピン流生成と磁化反転を観測するために以下の2つの実験：1) 3d遷移金属(Fe)を用いたAu層へのスピン流注入、2) RE-TMであるGdFeCoにスピン流を流入した際の磁化反転を行った。Fe/Au系のダンピング定数のFe層厚依存性からAuがスピン流伝送層として有用であることを確認した。また、GdFeCoへスピン流を注入した際に磁化を感じる等価磁場はGdFeCoの補償組成付近で大きくなること、スピン流はFeCoにトルクを及ぼすことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は超短パルス光誘起スピン流による磁化反転に挑戦するものであり、これまで電流のみで可能であったスピン流磁化反転が光を用いても可能であることを示す萌芽的な研究である。今回、Auという材料がスピン流伝送に有用な材料であること、希土類-遷移金属合金であるGdFeCoでは補償組成付近でスピン流による磁化反転が容易に行えることが分かった。今後、これらを組み合わせ、ポンプ光照射によるGdFeCo膜のスピン流磁化反転が可能となると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to observe spin current generation by the ultra short pulse laser and the magnetization switching by the spin current, two experiments, 1) spin current injection to Au from 3d transition metal Fe and 2) magnetization switching of GdFeCo by injecting the spin current, were carried out. Fe thickness dependence of the damping constant of Fe showed the Au layer has useful properties as a spin current conductor. When the spin current injected to GdFeCo, the moment of GdFeCo feels large equivalent magnetic field around the compensation composition. Moreover, it was found that the injected spin current exerts a torque to only FeCo moment.

研究分野：磁性薄膜工学

キーワード：電子・電気材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) に代表されるスピンエレクトロニクスデバイスにおいては磁性材料のスピン (磁化) が記憶の機能を担い、情報の書き換えのためにスピンを反転する。スピンの反転には電流磁界や近年研究が盛んなスピン偏極電流による反転が検討されてきた。スピン偏極電流による磁化反転は電流磁界に比べ高効率であることが分かっているが、それでも磁化反転のエネルギー障壁から計算されるエネルギー (5 aJ 程度) の数万倍のエネルギーを使っている。

近年、スピン偏極電流に代わる電流レスの「スピン流」を用いた磁化反転が注目されている。スピン流は上向きスピンと下向きスピンの逆方向に移動し、電流が流れず電力消費のないスピンの流れである。これは物質中のフェルミ面上の電子の平均速度がゼロ (電流がゼロ) であることと同様である。スピン系の緩和時間である数〜数 10 ps の間に十分な量のスピン流を磁性材料に注入できれば、無駄なエネルギーを消費せず非常に高効率に短時間で磁化反転することが期待される。金属は 10^{29} 個/m³ 程度の電子密度と 10^6 m/s 程度のフェルミ速度をもつ。光励起などにより、フェルミ面上の上向き・下向きスピンの全て逆方向に移動すれば、巨大なスピン流を生むことができる。近年、超短パルス光を利用し、1 ps 程度で金属磁性体のスピン系の整列をばらばらにすること (超高速減磁) により、巨大なスピン流が生成されること①、およびそれを用いたスピン運動誘起の報告がある②。

2. 研究の目的

超短パルス光によるスピン流生成と磁化反転を観測する上で重要な要素は、A) スピン流生成、B) スピン流伝送、C) メモリ層材料の 3 つである。A) スピン流生成にはフェルミ面上に下向きスピンの空き状態が多い 3d 遷移金属を用いる。B) スピン流伝送層としてはスピン拡散長が長く光の浸入長が短い Au, Cu, Al を用いる。C) のメモリ層材料としては、組成により静的な磁気特性だけでなくスピンの動特性も制御可能な希土類-遷移金属 (RE-TM) 材料を用いる。この材料は RE と TM のスピンの反平行に結合したフェリ磁性体であり、磁化の源である RE と TM のスピン角運動量が補償した組成付近で超高速磁化反転が観測されている興味深い材料である。本研究ではまず、超短パルス光により A) 層の磁化歳差運動を誘起し B) 層へのスピン流生成 (スピンポンピング) を行う。次にスピン流を C) 層に注入させ、その際のスピンドイナミクスおよび磁化反転を光学および電気的に検出する。

3. 研究の方法

本研究ではまず以下の 2 つの実験: 1) 3d 遷移金属 (Fe) を用いた Au 層へのスピン流注入、2) RE-TM である GdFeCo にスピン流を流入した際の磁化反転を行った。1) では MgO (5 nm) / Fe (0.4 ~ 1.0 nm) / Au (20 nm) / Cr (5 nm) / MgO(001) 基板, Au (2 nm) / Fe (0.4 ~ 1.0 nm) / Au (20 nm) / Cr (5 nm) / MgO(001) 基板を分子線エピタキシー法により作製した。この膜の磁化ダイナミクスは中心波長がポンプ光 1040 nm, プローブ光 520 nm, パルス幅 500 fs, 繰り返し周波数 100 kHz のファイバレーザーを用いた時間分解磁気光学 Kerr 効果 (TRMOKE) 計測により調べ、Fe 層の磁化ダイナミクスの変化から Au 層へのスピン流流入を調べた。2) では、SiN (5 nm) / Gd_x(Fe₉₀Co₁₀)_{100-x} (5 nm) / Ta (20 nm) / 熱酸化膜付き Si 基板を超高真空マグネトロンスパッタ法により作製した。GdFeCo 層は Gd と Fe₉₀Co₁₀ ターゲットの同時スパッタリングにより作製した。Gd 組成はターゲットに印加する rf 電力を調整することで制御し、GdFeCo の補償組成である $x=24$ をまたぐように、 $x=22 \sim 28$ で作製した。GdFeCo 膜は成膜後、電子線露光装置, Ar⁺イオンエッチング装置を用い、1 ~ 10 μ m 幅の十字パターン (ホールクロス) に微細加工した。加工後の GdFeCo の磁気特性は異常ホール効果により調べた。また、ホールクロスに交流、およびパルス状の面内電流を印加し、スピンホール効果を用いて GdFeCo 層にスピン流を流入させ、その際の磁化の挙動を異常ホール電圧の変化から調べた。微細加工前の GdFeCo 膜および Fe 膜の磁気特性は交番磁界勾配型磁力計により測定した。

4. 研究成果

図 1 は MgO (5 nm) / Fe (0.4 nm) / Au (20 nm) / Cr (5 nm) / MgO(001) の TRMOKE 測定結果を示している。測定的外部磁界 H_{ext} は膜法線方向から 70° 方向に印加し、磁界の大きさは図中に示す。TRMOKE 波形にはポンプ光照射

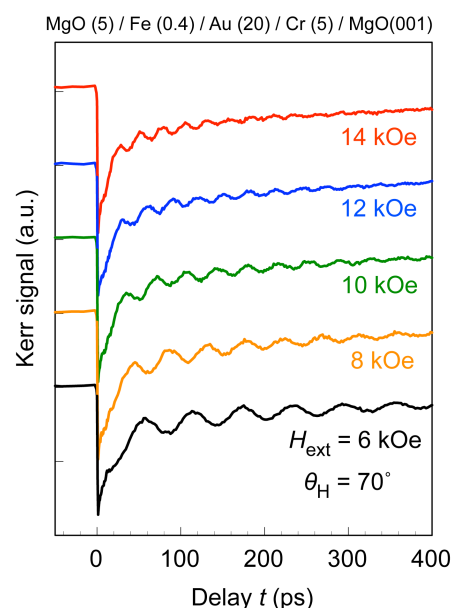


図 1 MgO (5 nm) / Fe (0.4 nm) / Au (20 nm) / Cr (5 nm) / MgO(001) の TRMOKE 測定結果。外部磁界 H_{ext} は膜法線方向から 70° 方向に印加し、磁界の大きさは図中に示す。

時の急激な磁化変化やその後の磁化の回復に起因する信号も含まれている。このうち磁化の歳差運動に起因する減衰振動成分の角周波数 ω と緩和時間 τ のみを取り出す。 ω と τ の H_{ext} 依存性から、Fe膜の異方性磁界 H_k 、 g 係数、ダンピング定数 α を見積もった。

図2はMgO/Fe/AuおよびAu/Fe/Au膜の異方性磁界 H_k 、 g 係数、ダンピング定数 α のFe膜厚依存性を示している。 H_k は磁化曲線の測定からも見積もることが可能であるが、TRMOKEと磁化曲線の結果は一部(Au/Fe(0.6 nm)/Au)を除いて良く一致した。全体的に H_k のFe層厚依存性は、MgO/Fe/Auの方がAu/Fe/Auより若干大きな値を示した。 g 係数はFe層厚の増加により増加し、Fe(1 nm)では $g=2.02$ 程度の値となった。 g 係数の減少はFeの軌道角運動量の増加を反映すると考えられ、Fe層厚の減少による H_k の増大は g 係数の減少と関連があると考えられる。また、MgO/Fe/Auの方がAu/Fe/Auより g 係数が小さく、MgO/Fe/Auの方が H_k が大きいことと対応がある。ダンピング定数 α のFe層厚依存性は0.8 nm以下ではFe層厚に反比例している。Fe(1.0 nm)での α の増大は2 マグノン散乱に起因すると考えられる。Au(2 nm)/Fe/AuはMgO(5 nm)/Fe/Auより α が若干小さく、Au層内のスピン拡散長は2 nmに比べ十分長いと考えられる。これらの結果をフィッティングすることでAu/Fe界面のミキシングコンダクタンスは $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、スピン拡散長30 nm程度と見積もられ、Auがスピン流伝送層として有用であることが分かった。

図3はGdFeCoの正味磁化、スピン軌道トルク(SOT)を磁界に換算したもののGd組成依存性を示している。SOTは2つの成分(ダンピングライクトルクとフィールドライクトルク)があることが知られており、それぞれ磁場換算したものを H_{DL} 、 H_{FL} としている。 H_{DL} 、 H_{FL} はGdFeCoホールクロスに面内交流電流を印加し流入する交流のスピン流による磁化方向の変化を異常ホール電圧により検出することで算出した。GdFeCoの正味磁化は $x=24.8$ で最小なり、これが補償組成であることが分かる。 H_{DL} 、 H_{FL} はこの組成付近で大きくなり、スピン流による磁化反転において、この組成付近では大きな磁場が印加されることが分かる。また、 H_{DL} は補償組成をはさんで符号が変化しないのに対して、 H_{FL} は符号が変化している。詳細の説明は省くが、この結果から流入したスピン流はFeCoにトルクを与え、Gd層にはトルクを与えていないと考えられる。

以上のように、Fe/Au系において、ポンプ光照射によりスピン流がAu層に流入すること、補償組成付近のGdFeCoは流入したスピン流により磁化に大きな等価磁場が印加されることが分かった。これらを組み合わせ、ポンプ光照射によるGdFeCo膜のスピン流磁化反転が可能となると考えられる。

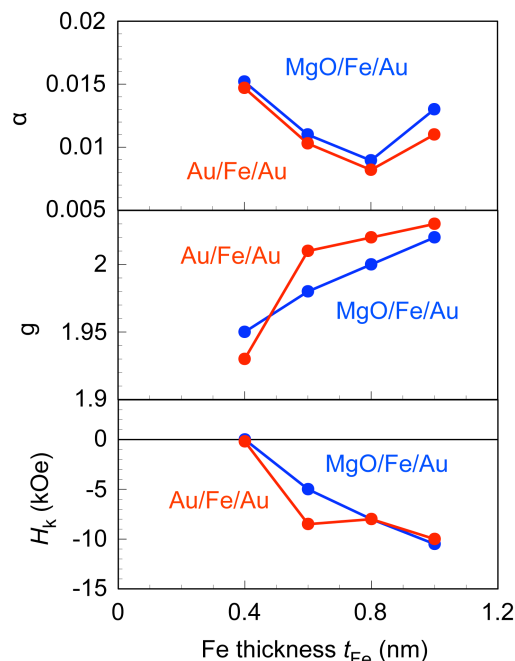


図2 MgO/Fe/Au, Au/Fe/Auのダンピング定数 α 、 g 係数、異方性磁界 H_k のFe層厚依存性。

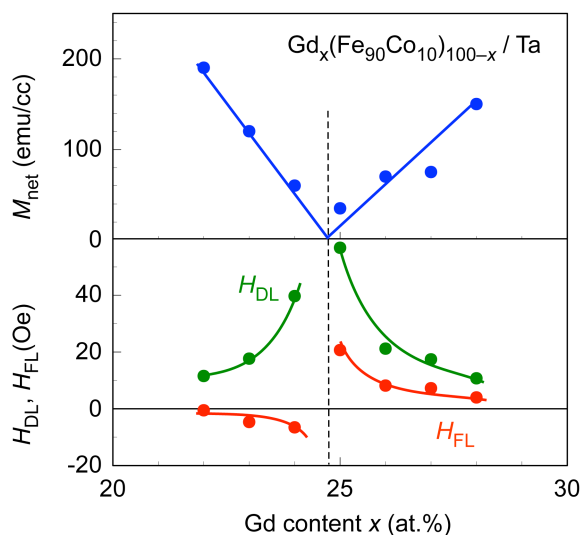


図3 GdFeCoの正味磁化 M_{net} 、 H_{DL} 、 H_{FL} のGd組成依存性。 H_{DL} 、 H_{FL} は交流電流密度2 MA/cm²における値である。

<引用文献>

- ① T. Kampfrath, M. Battiato, P. Maldonado, G. Eilers, J. Nötzold, S. Mährlein, V. Zbarsky, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blügel, M. Wolf, I. Radu, P. M. Oppeneer, M. Münzenberg, Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures, Nat. Nanotech., **8**, 256 (2013).
- ② A. J. Schellekens, K. C. Kuiper, R.R.J.C. de Wit, B. Koopmans, Ultrafast spin-transfer torque driven by femtosecond pulsed-laser excitation, Nat. Commun., **5**, 4333 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① Y. Otaki, T. Kato, S. Okamoto, N. Kikuchi, D. Oshima, S. Iwata, O. Kitakami, Variation of Magnetization Dynamics of Co/Ni Multilayer by Capturing Magnetic Nanoparticles, IEEE Trans. Magn., 査読有, Vol. 54, 2018, 6100804.
DOI: 10.1109/TMAG.2018.2832660
- ② T. Kimura, X. Dong, K. Adachi, D. Oshima, T. Kato, Y. Sonobe, S. Okamoto, N. Kikuchi, Y. Kawato, O. Kitakami, S. Iwata, Spin transfer torque switching of Co/Pd multilayers and Gilbert damping of Co-based multilayers, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 57, 2018, 09TD01.
DOI: 10.7567/JJAP.57.09TD01
- ③ B. Dai, Y. Guo, J. Zhu, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima, L. Yang, J. Han, Spin transfer torque switching in exchange-coupled amorphous GdFeCo/TbFe bilayers for thermally assisted MRAM application, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, Vol. 50, 2017, 135005.
DOI: 10.1088/1361-6463/aa5bca

〔学会発表〕（計5件）

- ① Y. Otaki, T. Kato, S. Okamoto, N. Kikuchi, D. Oshima, S. Iwata, O. Kitakami, Modification of magnetization dynamics of perpendicular magnetized Co/Ni multilayer by adsorption of magnetic nano-particles, 11th International Conference of Electrical, Transport, and Optical Properties of Inhomogeneous Media (2018).
- ② Y. Otaki, T. Kato, S. Okamoto, N. Kikuchi, D. Oshima, S. Iwata, O. Kitakami, Detection of magnetic nanoparticles by variation of magnetization dynamics of Co/Ni multilayer, IEEE International Magnetism Conference 2018 (2018).
- ③ K. Kawakami, D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, Compositional dependence of spin orbit torques in ferrimagnetic GdFeCo / Ta bilayers, Magnetism and Optics Research International Symposium 2018 (2018).
- ④ K. Kawakami, D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, Compositional Dependence of spin orbit torques in amorphous GdFeCo films, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2017).
- ⑤ 川上圭祐, 大島大輝, 加藤剛志, 岩田聡, アモルファス GdFeCo 膜におけるスピン軌道トルク, 第41回日本磁気学会学術講演会 (2017).

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/iwatalab/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：岩田聡

ローマ字氏名：(IWATA, Satoshi)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：未来材料・システム研究所

職名：教授

研究者番号（8桁）：60151742

研究分担者氏名：大島大輝

ローマ字氏名：(OSHIMA, Daiki)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：未来材料・システム研究所

職名：助教

研究者番号（8桁）：60736528

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。