

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656229

研究課題名(和文)電界による磁気スイッチングと超低電力メモリデバイスへの展開

研究課題名(英文)Electric field assisted magnetization switching and development of efficient memory devices

研究代表者

加藤 剛志 (Kato, Takeshi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50303665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：磁化反転のエネルギー障壁制御による高効率磁化反転の実証を行うため、希土類-遷移金属合金を自由層とするCPP-GMR素子温度を変化させた際のスピン注入磁化反転臨界電流密度を調べ、素子温度上昇によりスピン注入臨界電流密度が減少することを確認した。また、電界によるエネルギー障壁制御のためCo超薄膜試料を作成し、異常ホール効果測定による微細加工素子評価および電界印加による磁化曲線変化を観測した。

研究成果の概要(英文)：Temperature dependence of the critical current density of spin transfer torque switching for the CPP-GMR device with rare earth-transition metal alloys has been investigated to show the possibility of the energy efficient writing by controlling the energy barrier of the magnetization switching, and the reduction of the critical current density with temperature was confirmed. Moreover, the ultra-thin Co films were micro-fabricated by the lithography technique and their hysteresis loops with and without an electric field were measured by the anomalous Hall effect to study the effect of the electric field on the energy barrier of the magnetization switching of the ultra thin Co layer.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電気・電子材料 データストレージ 磁性

1. 研究開始当初の背景

スピン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、すなわち電流による磁化反転が検討されてきた。しかしながら、電流駆動方式は消費電力が高く、磁化方向を保持するエネルギー障壁から計算される磁化反転に必要なエネルギーの数万倍程度のエネルギーを要する。

これに対し、近年電圧による磁化反転技術の開発が注目されるようになってきている。これは電圧により磁化反転のエネルギー障壁を下げるまたは電圧のみでの磁化反転が実現することができれば、これまでの電流に頼った磁化反転に比べ反転時に必要な消費電力を大幅に低減できる可能性を秘めているためである。しかしながら、現在までのところ、電圧のみでの磁化反転できる実用化技術の報告例はない。

2. 研究の目的

低消費電力での磁化反転を実現する手法としては、記録時のみ磁化反転のエネルギー障壁を下げる手法とエネルギー障壁を超えるためのエネルギーを有効にスピン系に与えるという2つの方法が考えられる。磁性材料への電界印加による磁化反転はこのうち前者に属する。近年、Co超薄膜に電界を印加することによるキュリー温度の変化が報告されているが、磁性材料のキュリー温度を室温付近にすることができれば、磁化反転のエネルギー障壁をほぼゼロにすることができることになる。また、キュリー温度の変化は磁壁エネルギーの変化につながり、電界により磁壁を移動できる可能性がある。磁壁の移動は局所的な磁化反転を伴うため、電界による磁化反転につながるものと考えられる。そこで本研究ではまず、温度制御により磁性材料のエネルギー障壁を制御することで高効率な磁化反転が実現できるかを確かめるとともに、電界によるエネルギー障壁制御とこれによる高効率な磁化反転手法の提案を目的とする。

3. 研究の方法

磁化反転のエネルギー障壁制御による高効率磁化反転の実証を行うため、素子温度を変化させた際のスピン注入磁化反転臨界電流密度を調べた。ここでは、熱によりエネルギー障壁を制御するとともに、磁化反転手法として既に多くの研究例があるスピン注入磁化反転での検討を行った。試料構成は Si / Ta (10) / CuAl (150) / Tb₁₅(Fe₉₀Co₁₀)₈₅ (20) / Co₄₀Fe₄₀B₂₀ (1) / Cu (3) / Gd_x(Fe₉₀Co₁₀)_{100-x} (9) / Tb₁₆Fe₈₄ (1) / Cu (5) / Ta (5)とした。()内の数字は膜厚で単位は nm である。Ta / CuAl は下地層、電極層であり、TbFeCo / CoFeB 交換結合層が固定層、GdFeCo / TbFe

が磁化反転する自由層である。キュリー温度を調整するために低キュリー温度の TbFe 層を GdFeCo 層に交換結合させている。中間層は Cu であり、膜構成は巨大磁気抵抗効果(GMR)型のものを用いた。試料は 8 元マグネトロンスパッタリング法により作成し、その後、電子線露光と Ar イオンエッチングにより、接合サイズ 120 nm × 180 nm の膜法線方向に電流を流すタイプの GMR 素子(CPP-GMR 素子)を作成した。試料温度はヒーター、熱電対により制御し、スピン注入磁化反転は 100 msec の電流パルスを印加後の CPP-GMR 素子抵抗を測定することで調べた。

次に、電界による磁性薄膜のキュリー温度制御を検討するため、RF マグネトロンスパッタ法により Si 基板上に Ta (3) / Pt (1.1) / Co (0.4) / MgO (2)膜を作製し、異常ホール効果を検出するための十字構造をフォトリソグラフィ及び Ar イオンエッチングにより作製した。微細加工した Co 超薄膜上に ZnO 絶縁層と電界を印加する Pt 電極層をフォトリソグラフィとリフトオフにより作製した。絶縁層の膜厚は 50nm、電極層の Pt 膜厚は 100 nm とした。

4. 研究成果

図1は GdFeCo (9 nm) / TbFe (1 nm)を自由層とする CPP-GMR 素子の電流パルス印加後の抵抗を横軸パルス電流値としてプロットした図である。CPP-GMR 素子では固定層と自由層の磁化方向が互いに反平行の場合、抵抗が高く、互いに平行な場合、抵抗が低くなる。図1から、+5 mA の電流パルスを印加後に高抵抗から低抵抗に変化している。また、-5 mA では低抵抗から高抵抗へ変化している。このように電流の方向で高抵抗、低抵抗状態、即ち自由層磁化方向を制御できることから、スピン注入により自由層の磁化反転が起こっていることが分かる。なお、磁化反転を起こす正負の電流値を同程度とするために試料には膜法線方向に $H_{bias} = -568.30e$ Oe の磁界を印加している。反平行から平行

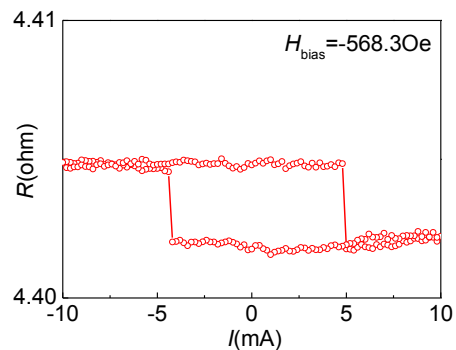


図1 CPP-GMR 素子への電流パルス印加後の抵抗(横軸:パルス電流値、縦軸:パルス印加後の素子抵抗)

および平行から反平行状態へ遷移する電流の平均値からスピン注入林間電流密度 J_c を算出し、この試料温度依存性を測定した結果が図2である。室温での J_c は 2.2×10^7 A/cm² であったが、温度の上昇とともに J_c は減少し、82°C では J_c は約 20%減少した。磁性素子のエネルギー障壁に比例する垂直磁気異方性定数の温度依存性も測定した結果、室温から80°C の温度上昇で約 20%減少することを確認した。この結果から、温度上昇によるスピン注入磁化反転の臨界電流密度の減少はエネルギー障壁の減少によって説明できることが分かった。

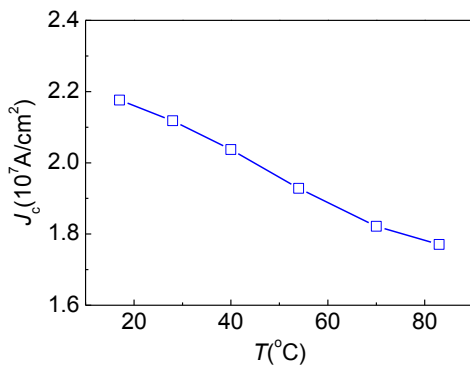


図2 CPP-GMR 素子のスピン注入臨界電流密度 J_c の素子温度依存性

以上は素子温度を上昇することによって磁化反転に必要な臨界電流密度を低減したという結果であるが、電界によってキュリー温度を室温付近に近づけることでも同様の効果が期待される。そこで、Co 超薄膜への電界印加による磁気特性変化の観測を試みた。

図3は異常ホール効果検出電極および電圧印加電極を微細加工により作成した Co 超薄膜の光学顕微鏡像である（素子中心が見えなくなるため、電圧印加用電極作成前のものである）。電流印加用細線幅は 100 μ m であり、電流に直交する方向の電圧検出細線（細線幅 10 μ m）を有する。素子中心部には ZnO 絶縁膜 50 nm が成膜されている。この素子に膜法線方向の磁場を加えて測定した異常ホール

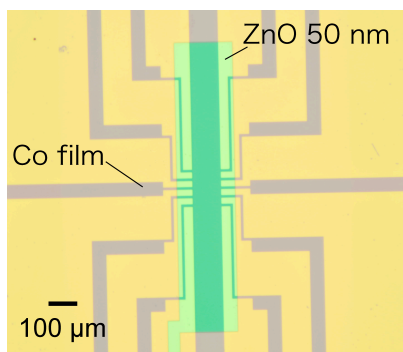


図3 微細加工 Co 超薄膜の光学顕微鏡写真

効果の結果を図4に示す。ここで、測定電流は 100 μ A とした。膜法線方向の角形比（飽和磁化に対する残留磁化の比）が 1 で保磁力 0.3 kOe 程度のヒステリシスループが観測された。これは Co 超薄膜の大きな垂直磁気異方性を反映しているためである。次に、この Co 超薄膜への電界印加を試み、異常ホール効果のヒステリシスループの変化を観測した。しかしながら、ZnO 層を介したリーク電流が大きく、ヒステリシスループ変化が電界に起因するかどうかを判定するには至っていない。リーク電流の原因は Co 超薄膜の微細加工時に発生するスカムと考えられ、O₂ プラズマによるスカム除去等のプロセス検討が必要であることが分かった。

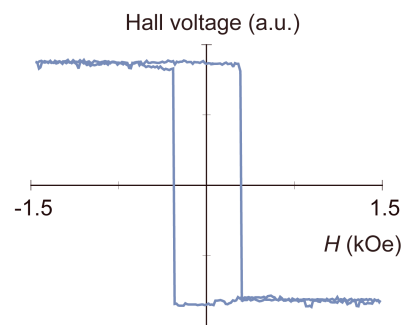


図4 微細加工した Co 超薄膜の異常ホール効果により測定したヒステリシスループ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① B. Dai, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima, Pulse width and temperature dependences of critical current density of spin transfer torque switching amorphous GdFeCo for thermally assisted MRAM IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 49, no. 7, 2013, pp. 4359-4362. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2013.2240380>
- ② B. Dai, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima, Spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo with perpendicular magnetic anisotropy for thermally assisted magnetic memories IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 48, no. 11, 2012, pp. 3223-3226. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2196988>

- ③ T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, S. Iwata, O. Kitakami, S. Tsunashima,
Perpendicular anisotropy and Gilbert damping in sputtered Co/Pd multilayers
IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 48, no. 11, 2012, pp. 3288-3291.
<http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2198446>

[学会発表] (計 10 件)

- ① T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, S. Iwata, S. Tsunashima,
Ion beam irradiation for the fabrication of planer bit patterned media (Invited)
Collaborative Conference on Materials Research, Jeju island, South Korea, (2013).
- ② T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, S. Iwata, S. Tsunashima:
Patterning of magnetic films by ion irradiation for ultra high density data storage (Invited)
2nd International Congress on Advanced Materials, Zhenjiang, China, (2013).
- ③ B. Dai, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima:
Pulse width and temperature dependences of critical current density of spin transfer torque switching amorphous GdFeCo for thermally assisted MRAM
12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, USA, (2013).
- ④ T. Kato, D. Oshima, M. Tanimoto, Q. Xu, S. Iwata, S. Tsunashima,
Planar bit patterned media fabricated by ion beam irradiation (Invited)
2012 Energy Materials Nanotechnology Fall Meeting, Las Vegas, USA, A20 (2012).
- ⑤ B. Dai, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima,
Current induced magnetization switching of amorphous GdFeCo with perpendicular magnetic anisotropy
International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies 2012, Nara, Japan, 4pPS-39, p. 336 (2012).

[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)研究代表者

加藤 剛志 (KATO, Takeshi)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50303665

(2)研究分担者

岩田 聡 (IWATA, Satoshi)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：60151742