

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月6日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560315

研究課題名（和文） 熱アシストを利用したスピン注入磁気メモリの研究

研究課題名（英文） Study of spin-transfer torque MRAM using thermal assistnce

研究代表者

綱島 滋 (TSUNASHIMA SHIGERU)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80023323

研究成果の概要（和文）：

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) に書込む際に加熱アシストすることは、スピン注入 (STT) 磁化反転のための臨界電流を低減するために有効と考えられる。本研究では、GdFeCo メモリ層をもつ巨大磁気抵抗膜を用いて MRAM 応用のための熱アシスト STT 磁化反転を試みた。さらに垂直磁化を有しキュリー温度の低い TbFe メモリ層をもつ磁気トンネル接合についても熱アシスト STT 磁化反転を試みた。その結果、熱アシストが STT 磁化反転のための書込み電流を低減するのに有効であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

Heat-assistance of the MRAM cell during the writing is considered to be effective to reduce the critical current density for the spin transfer torque (STT) switching. We fabricated giant magneto-resistance films with GdFeCo memory layers and investigated their STT switching aiming for the application to the thermally assisted MRAM. We also fabricated perpendicularly magnetized tunnel junctions with TbFe layer which has a large perpendicular anisotropy and low curie temperature. In both experiments we found that heat assistance is effective to reduce the current density for the STT switching.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子・電気材料工学

キーワード：電気・電子材料，メモリ，磁性薄膜

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)

における記憶容量の増大すなわち記憶密度の向上に対しては、以下のような問

題点が指摘されていた。

- (1) 記録ビットの寸法を小さくすると反磁界が大きくなるため、書き込みに必要な磁界が大きくなり、磁界発生のための電子回路の負担が大きく、電力消費が大きくなる。
- (2) 磁気異方性のばらつきにより、書き込み時に隣接ビットの情報を破壊する可能性がある。
- (3) 記録密度を高くすると、記録の熱安定性に問題が生じる（熱擾乱で記録の不揮発性が損なわれる）

問題点(2)については、トグル書き込み法が発明され4 Mbit の製品が得られるようになったが、この方法では問題点(1) が克服できないため飛躍的な高密度化は困難と見られる。そこで、問題点(1) と(2) を解決するものとして、書き込みに磁界印加の代わりにスピンの偏極電流を注入して磁化反転する試みがなされているが、まだ高い電流密度を要求されることに問題があり実用化に至っていない。本研究でもスピン注入磁化反転による書き込みを考えているが、スピン偏極電流密度を低減するためにスピン偏極電流にともなうジュール熱を利用した熱アシスト方式を試みる。

本研究では、熱とスピン注入を併用して記録磁界を不要としているが、この方式は、熱と弱い磁界を利用して記録する熱（光）磁気記録方式における磁界の役割をスピン注入に置き換えたものとも云える。最近では、磁気記録にも熱磁気記録の利点を取り入れようとする動きも見られるが、固体メモリに熱磁気記録を取り入れようという研究は申請者の知る限りでは非常に少ない。熱を利用する方式には多くの利点が期待される。例えば、電力消費の面から考えると、光磁気記録の実験例からも分かるように、基板の熱伝導度を適当な値にすれば、1 mW 程度の電力で、100 Mbit/s のデータレートで記録できるはずである。また、記録ビットの選択をスピン偏極電流とジュール加熱にゆだねることによって、書き込み時に隣接ビットの情報を破壊する可能性があるという

現行の MRAM の難点も解消できる。さらに、記録密度に関しても微細加工さえできれば極めて高くできる可能性がある。問題点(3) の記録の熱安定性についても、記録保存時（常温）の磁気異方性が大きく熱的安定性の高い材料を使用することによって解決できる。

本研究では、この熱アシスト方式をさらに発展させ、記録磁界を外部磁界に頼るのではなく、加熱電流でスピン注入を行い電流だけで記録することを試みるものである。スピン注入による磁化反転はSlonczewski によって理論的に予測され、最近、MRAM の書き込みに応用することが試みられているが、書き込みの際に必要な電流密度が 10^7 [A/cm²] と大きいことが問題となっている。必要な電流密度は書き込み層の磁化に比例する（膜面に垂直方向の反磁界により磁化反転が妨げられる）ことから、膜面垂直方向を磁化容易方向とする垂直磁化膜を用いれば、書き込み電流密度を低減できる可能性が指摘されている。垂直磁化膜を用いた実験も行われたが、大きな垂直磁気異方性をもつ垂直磁化膜は、スピンの運動に関する制動数定数が大きくなるためか、書き込み電流の大幅な低減は実現されていない。書き込み電流は磁気異方性に比例することから、昇温時に磁気異方性が小さくなる材料を用いてスピン注入と熱磁気書込みと併用すれば、書き込み電流を桁違いに小さくできる可能性がある。そこで、スピン注入と熱磁気記録を同じ電流に担わせれば、簡単なデバイスでMRAMとして優れたものが期待できるものと考えられる。

2. 研究の目的

固体磁気メモリ、いわゆる磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) は、SRAM 並みの高速性、DRAM なみの高集積度の可能性をもち、さらに電源を切っても不揮発なため、これらのメモリを置き換えるユニバーサルメモリとして期待されている。近年の研究開発により 4Mbit の MRAM が市販されるようになったが、記憶容量の点ではさらに飛躍的な大容量化が望

まれる。

本研究は、MRAMの書込みにスピン注入と熱アシストを併用し、その高密度化を妨げる本質的な問題点を解決し、将来のユニバーサルメモリ実現の基礎を得ようとするものである。

本研究では、常温で十分な大きさの垂直磁気異方性をもった材料を磁性層に用いることにより、前記問題点(3)を回避しつつ、MRAMの書込みにスピン注入磁化反転と熱磁気記録を取り入れ、熱アシストにより書込みに必要な電流がどれくらい低減できるかを明らかにし、微小ビットへの低電力書込みが可能なことを示したい。

3. 研究の方法

(1) メモリ素子の作製と静磁気特性の検討

読み出しに関係した部分の機能を確認する。読みだしには、磁化固定層と記録層(磁化フリー層)の間に薄い絶縁層を設け磁気トンネル効果を利用する。書込みに必要なスピン注入電流の低減のため、磁性層はすべて垂直磁化をもつものとする。トンネル磁気抵抗効果を高めるため、トンネル磁性層の材料探索を行うと共に成膜法の検討を行う。また、高密度記録と熱安定性を両立する異方性制御層(垂直磁気異方性)の材料・構成を検討する。さらに、微細化したときの基本的機能の確認のため光リソグラフィ(現有)と電子ビームリソグラフィ(現有)を組み合わせることにより100 nmスケールの素子の試作を目標とする。

(2) 熱アシストスピン注入の基礎実験

高キュリー温度層/中間層/低キュリー温度層からなる素子において電流(スピン注入)による磁化反転について検討を行う。中間絶縁層としては Al_2O_3 以外に MgO など適宜を用いる。Cuを中間層に用いた場合、巨大磁気抵抗効果で磁化反転を確認する。また、トンネルバリアでのジュール加熱にスピン注入磁化反転を絡ませることを試みる。ここでは、過去に報告のない熱アシストを併用したスピン注入に焦点を絞って実験を行う。

4. 研究成果

平成22年度においては、希土類-遷移金属(RE-TM)膜をメモリー層とした垂直磁化型の $TbFe / CoFeB / Al-O / [Co/Pd]_6$ からなる磁気トンネル接合[MTJ]を作成し、その磁気抵抗(MR)特性および障壁へ印加した電流パルスにより発生するジュール熱を用いた熱アシスト磁化反転を確認した。Al-O層厚0.8 nmのMTJ素子(素子サイズ $20 \mu m \times 20 \mu m$)では低バイアス(40 mV)で面積抵抗 $6 k\Omega \mu m^2$ 程度、MR比10%、TbFe層の保磁力4 kOe程度が得られた。一方、高バイアス(350 mV)では、障壁への通電により発生するジュール熱によりTbFe層の保磁力が2 kOe程度まで減少した。磁界中で電流パルスを印加後の抵抗値から、熱アシスト磁化反転に必要な電力密度の外部磁界依存性を測定した。磁化反転に必要な電力密度は、磁界の減少に伴い単調に増加し、100 Oe程度の磁界では $80 \cdot W / \mu m^2$ と見積もられた。これより、TbFe膜をメモリー層として用いたMTJ素子では低電力での熱アシスト磁化反転が可能であるという結論を得た。 $1 \mu m \times 1 \mu m$ の素子では $20 \mu m \times 20 \mu m$ のものに比べ、室温でのTbFe層の保磁力自体が減少している。これはEBリソグラフィとフォトリソグラフィのプロセス温度の差(EBリソグラフィ 170°C、フォトリソグラフィ 110°C)により、TbFe層が変質したためと考えられる。以上のように、TbFe層をメモリー層とする微小MTJ素子の加工を試みたが、加工プロセス中の加熱により、TbFe層の磁気特性およびAl-O層の電気特性が変化することがわかり、微細加工工程のさらなる検討が必要であることがわかった。

平成23年度においては、熱アシストスピン注入メモリの可能性を探るため、以下の研究を行った。

1) 磁気異方性が充分大きく、熱的に安定な極めて微細なメモリ素子でも低い電流密度でスピンスピントランスファートルクによる磁化反転が可能とするため、書込電流による加

熱で磁気異方性が大きく低下する希土類-遷移金属膜をメモリ層に用いたSi /Ta/CuAl/Pd/Co/CoFeB/Cu/ GdFeCo/Cu/Taを作製し、巨大磁気抵抗効果によりメモリ層のスピントランスファートルクによる磁化反転を調べた。

その結果、図1のように、様々なGd組成をもつGdFeCoメモリ層を用いて充分大きな垂直磁気異方性をもつメモリ膜が得られ、 $1.6 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ のかなり小さな電流密度でスピントランスファートルクによる磁化反転が確認された。

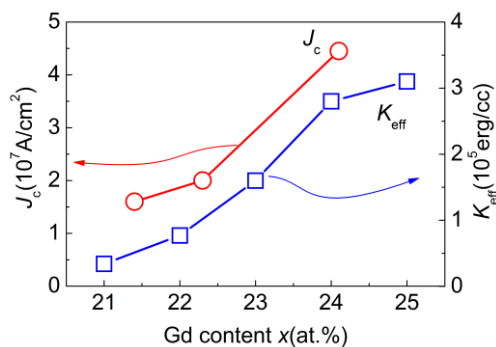


図1 垂直磁気異方性と磁化反転電流のGd組成依存性

2) スピントランスファートルク高速動作する上で重要になるスピンドYNAMIXについて検討した。超短パルスレーザーを用いたポンププローブ法によりCo/Ni多層膜の垂直磁気異方性とダンピング定数の関係を調べた。その結果、ダンピング定数は垂直磁気異方性磁界に依存せずほぼ一定値0.035であり、垂直磁気異方性はダンピング定数にほとんど影響を与えなかった。磁気異方性とダンピング定数はともにスピントランス相互作用に密接に関係すると思われるが、磁気異方性は多層膜の界面が、ダンピングにはバルク的な性質が関与している可能性があるものと思われる。

平成24年度においては、熱アシストスピントランス注入メモリの可能性を探るため以下の研究を実施した。

大きな垂直磁気異方性を有し、キュリー温度の比較的低いTbFeアモルファス膜をメモリ層とした[Co/Pd]/MgO/TbFe 垂直磁化トン

ネル接合を作製し、そのトンネル磁気抵抗特性および熱アシスト書き込み特性を調べた。また、トンネル磁気抵抗特性を測定した結果、MgO厚 1.4 nmの磁気トンネル接合では、低バイアスで、9%のMR比、 $342 \Omega \mu\text{m}^2$ 程度の低い面積抵抗値が得られ、MgOは低抵抗化に適した材料であることがわかった。熱アシスト書き込みについては、作製したトンネル接合を、 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ に加工し、弱い外部磁場をかけながら、パルス幅100 msecの電流パルスをトンネル接合に流し発生するジュール熱によるアシスト磁化反転を試みた。パルス電流値-抵抗特性を測定したところ、二つの磁性層の磁化が反平行状態から平行状態へ遷移したことを示す抵抗の減少が見られた。その際の電流値から見積もると、図2の様に、およそ $2 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ の電力密度のジュール熱を与えることで低磁場でも磁化反転が可能であることが確認できた。

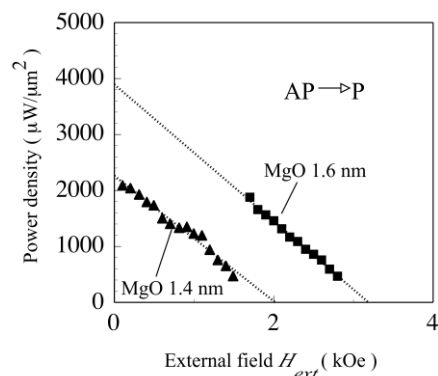


図2 [Pd/Co]₇/MgO(1.6 nm)/Tb₂₀Fe₈₀膜のMTJ素子(四角形)および[Pd/Co]₇/MgO(1.4 nm)/Tb₂₀Fe₈₀素子(三角形)の磁化反転に必要な電力密度の外部磁界依存性。

また、MgO厚 1.2 nmの微細加工膜では、 $56.8 \Omega \mu\text{m}^2$ のより低い面積抵抗が得られた。今後、さらなる低抵抗化を進めるとともに、この膜について、スピントランス注入による磁化反転時の熱アシスト効果について検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

①Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima: Control of Magnetic Properties of MnBiCu Thin Films by Kr⁺ Ion Irradiation J.Appl. Phys., 査読有, vol. 111, 07B906-1-3 (2012).

② 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, pp. 3288-3291 (2012).

③B.Dai, T.Kato, S.Iwata and 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, pp. 3223-3226 (2012).

④Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima: Bit patterned structure fabricated by Kr⁺ ion irradiation onto MnBiCu films IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 48, no. 11, pp. 3406-3409 (2012).

〔学会発表〕 (計 18 件)

① D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima: Switching field distribution measurement of ion beam patterned MnGa film, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013, Taichung, Taiwan, EA-08 (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 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).

④B. 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).

⑤D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima: Control of magnetic properties of MnGa films by Kr⁺ ion irradiation for application to bit patterned media, 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, USA, (2013).

⑥藤澤佑樹, 吉川大貴, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: TbFe 垂直磁化膜をメモリー層とした磁気トンネル接合の熱アシスト磁化反転, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, 名古屋大, (2013).

⑦Q. Xu, R. Kanbara, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima: Bit patterned structure fabricated by Kr⁺ ion irradiation onto MnBiCu films, IEEE International Magnetism Conference 2012, Vancouver, Canada, CS-03 (2012).

⑧B.Dai, T.Kato, S.Iwata and S.Tsunashima: Compositional dependence of critical current density for spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo for thermally assisted MRAM, The 19th International Conference on Magnetism, Busan, Korea, RL08 (2012).

⑨加島新之助, 加藤剛志, 松本宣大, 岡本聡, 菊池伸明, 北上修, 岩田聡, 綱島滋: Co/Pd 多層膜の垂直磁気異方性と Gilbert ダンピング定数, 平成 24 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 秋田大, 秋田, B-4 (2012).

⑩S. Kashima, T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, S. Iwata, S. Tsunashima: Gilbert damping of Co/Pd multilayers with perpendicular anisotropy, International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies 2012, Nara, Japan, 4pPS-79, p. 376 (2012).

⑪. 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 Magnetics Societies 2012, Nara, Japan, 4pPS-39, p. 336 (2012).

⑫Y. Fujisawa, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima: Thermally Assisted Magnetic Switching on Magnetic Tunnel Junctions with TbFe alloy memory layer, International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies 2012, Nara, Japan, 4pPS-42, p. 339 (2012).

⑬D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, S. Tsunashima: Control of magnetic properties of MnGa films by Kr⁺ ion irradiation, International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies 2012, Nara, Japan, 4aA-3, p. 247 (2012).

⑭大島大輝, 谷本昌大, 加藤剛志, 岩田聡, 綱島滋: 規則合金膜へのイオン照射による磁気特性制御とビットパターン構造の作製
電子情報通信学会 電子部品・材料研究会, 機会振興会館, 東京, (2012).

⑮T. Kato, Y. Matsumoto, S. Okamoto, N. Kikuchi, S. Iwata, O. Kitakami, S. Tsunashima: Structural dependent Gilbert damping in sputtered Co/Pd multilayers, IEEE International Magnetics Conference 2012, Vancouver, Canada, CE-04 (2012).

⑯D. Oshima, T. Kato, S. Iwata, and S. Tsunashima: Control of magnetic properties of MnAl films by Kr⁺ ion irradiation for planar bit patterned media, IEEE International Magnetics Conference 2012, Vancouver, Canada, CS-04 (2012).

⑰B.Dai, T.Kato, S.Iwata and S.Tsunashima: Spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo with perpendicular magnetic anisotropy for thermally assisted magnetic memories
IEEE International Magnetics Conference 2012, Vancouver, Canada, BT-12 (2012).

⑱T. 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).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

綱島 滋 (TSUNASHIMA SHIGERU)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80023323

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

岩田 聡 (IWATA SATOSHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60151742

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