

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870192

研究課題名(和文) 圧電素子と磁気抵抗変化素子の融合による超低消費電力磁化反転技術の創出

研究課題名(英文) Ultra-low power magnetization switching technology for magnetic tunnel junctions using inverse magnetostrictive effect

研究代表者

高村 陽太 (Takamura, Yota)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20708482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の不揮発性メモリ素子として有望な磁気抵抗変化素子に磁歪効果が大きなフリー層を導入し、さらに圧電体を融合した集積化可能なデバイスを提案し、シミュレーションにより磁化反転電流を従来の10分の1、その際の消費エネルギーを400分の1に低減できることを示した。さらに、磁歪効果が大きなSmFe<sub>2</sub>薄膜をスパッタ法により作製し、薄膜において-100ppm程度の逆磁歪効果が得られることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Inverse-magnetostrictive magnetic tunnel junctions (IMS-MTJs) that consist of a MTJ with a large magnetostrictive ferromagnetic free layer and piezo-electric materials surrounding the MTJs were proposed. The critical current density  $J_C$  for the magnetization switching of the IMS-MTJs were analyzed by simulation using the LLG equation.  $J_C$  for the IMS-MTJs can be reduced by 1/10 compared to that for the conventional MTJs, which corresponds to the reduction by 1/400 in the consumption energy. Moreover, SmFe<sub>2</sub> films formed by sputtering system were investigated.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：逆磁歪効果 磁気抵抗変化素子 スピントランスファートルク MRAM

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンやパソコンなどの情報機器の待機時の消費電力を大幅に低減できる次世代デバイス・システムとして、電源を遮断しても情報を失わない不揮発情報記憶素子を利用した不揮発メモリや不揮発ロジック回路が注目を集めている。このような不揮発システムを実現できる高速な不揮発情報記憶素子として、磁化(スピン)の向きで情報を記憶する磁気トンネル接合(MTJ)が有望である。しかし、MTJは、情報書換時(動作時)の消費電力が大きく、MTJを利用した真の低消費電力システムを実現するためには、MTJの超低消費電力磁化反転技術を実現する必要がある。

MTJは2層の磁性体とその間のトンネル絶縁膜の3層構造を持つ2端子素子である(図1) MTJでは、1層の磁化の向きを固定した「ピン層」に対して、もう1層の「フリー層」の磁化の向きを反転させることで、磁化の平行状態(低抵抗)と反平行状態(高抵抗)を切り替える。抵抗の変化率はMR比と呼ばれ、高いMR比を実現することは高性能な不揮発ロジックシステムを実現する上で必須となる。このためには、ピン層とフリー層に高いスピン分極率材料が必要となる。

MTJの磁化反転技術には、MTJに流す電流のみで磁化反転させる「スピン注入磁化反転(CIMS)」が用いられている。CIMSでは、スピンの偏った電流によって、磁化反転エネルギー障壁を超えるスピントルク・エネルギーをフリー層に与えることで磁化反転を行う。磁化反転エネルギーはMTJの磁化の方向を面内から面直方向にすることで大幅に低減された。しかしながら、CIMSに必要な電流密度 $J_c$ は、依然 $10^6$  A/cm<sup>2</sup>と大きい。この値は、消費電力の観点だけでなく、配線の信頼性の観点からも問題であり、 $J_c$ は $10^5$  A/cm<sup>2</sup>程度まで低減する必要がある。

$J_c$ 低減の1つのアプローチとして、磁化を反転させるときに熱や電圧を印加し、磁化反転エネルギー障壁を一時的に下げることが注目を集めている。この方法を用いれば、MTJの熱安定性を損なうことなく、 $J_c$ を低減できる。研究代表者の所属研究室では、「応力アシストによるスピン注入磁化反転(逆磁歪効果スピン注入磁化反転)[S. Nakagawa, IEEE Trans. Magn. 42, 3773 (2006).]」を提案していた。本技術では、応力を誘起すると磁性体の磁気異方性エネルギー $K_u$ が変化する逆磁歪効果によって、 $J_c$ を低減させる。このためには、超磁歪材料と呼ばれる大きな磁歪係数をもつ強磁性体をMTJのフリー層に用いる必要がある。これまでの研究で、垂直磁化となる超磁歪材料を実現し、応力を印加することで、小さな外部磁場で磁化反転できることを実証してきた。このとき、応力の印加により、面直方向の磁化の異方性エネルギーが0以下になることが観測された。これは大きな $J_c$ 低減効果が期待できることを示唆している。

しかし、研究開始当初、超磁歪材料を用いたMTJ素子や逆磁歪効果による $J_c$ の低減効果やその多寡は全く評価されていなかった。また、集積化可能な超磁歪MTJのデバイス構造やそれに適した磁性薄膜に関する研究は全く行われていなかった。

2. 研究の目的

そこで、本研究課題では、集積化可能な逆磁歪MTJのデバイス構造の提案と、シミュレーションを用いた逆磁歪効果によるスピン注入磁化反転電流の低減効果の解析、さらに、提案デバイスに必要な負の巨大磁歪定数をもつSmFe<sub>2</sub>薄膜の高品質成膜を目的とした。

3. 研究の方法

シミュレーション

シミュレーションには、スピントラnsファートルク(STT)を含むLLG(Landau-Lifshits-Gilbert)方程式を用いた。この方程式に基づき、STTとダンピングをエネルギーの形式で表現した。逆磁歪効果は、磁気弾性エネルギーを磁化の内部エネルギーに導入することで取り入れ、この他に、反磁性エネルギー、一軸性の垂直磁気異方性エネルギーを計算に含めた。さらに、熱揺らぎの効果をKochモデルを用いて取り入れた。

計算では、MTJの直径は20 nm、フリー層の厚さは2 nmとした。フリー層の物性値は、超磁歪材料であるSmFe<sub>2</sub>のバルク値を参考にし、単位体積当たりの飽和磁気モーメントを0.6 T、磁歪係数を-1258とした。また、垂直方向の結晶磁気異方性定数は室温において60kBTとなるように0.53 MJ/m<sup>3</sup>、ダンピング定数は、0.005とした。

SmFe<sub>2</sub>薄膜の作製と評価

SmFe<sub>2</sub>薄膜は、対向ターゲット式スパッタ法により、厚さ30 μmのガラス基板上にArガス圧0.1Paで成膜した。試料構造はガラス基板(30 μm)/Ta(20nm)/SmFe<sub>2</sub>(100nm)/Ta(10 nm)とし、X線回折(XRD)によりSmFe<sub>2</sub>薄膜の結晶性を評価した。逆磁歪効果は、3Dプリンタで専用に設計した治具を用いて、試料を曲げる前後の磁化特性を振動試料型磁力計(VSM)によって評価した。

4. 研究成果

逆磁歪磁気トンネル接合の提案と逆磁歪効果によるスピン注入磁化反転電流削減効果の解析

図1に本研究課題において提案した逆磁歪MTJのデバイス構造を示す。本デバイスは、フリー層に超磁歪薄膜を含むMTJとそれを取り囲む圧電体部により構成される。このデバイスでは、磁化反転時にのみ圧電体により圧縮応力をMTJのフリー層に生じさせ、逆磁歪

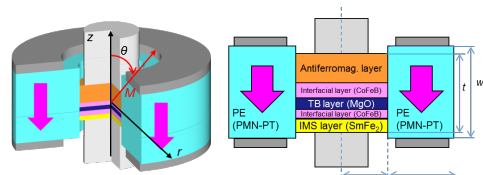


図1 逆磁歪トンネル磁気抵抗素子

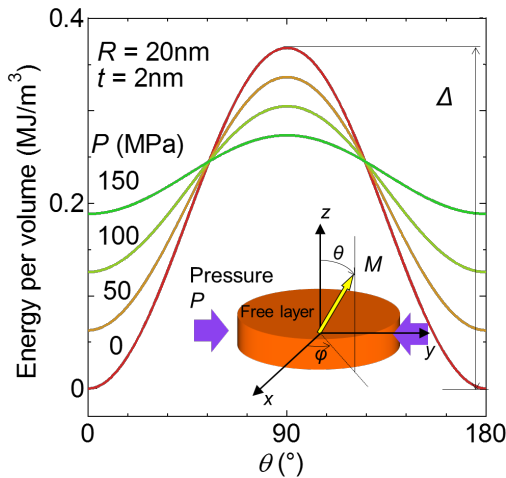


図2 IMS-MTJのフリー層の磁化のエネルギー。圧力を印加すると磁化反転のエネルギー障壁が低減する様子がわかる。

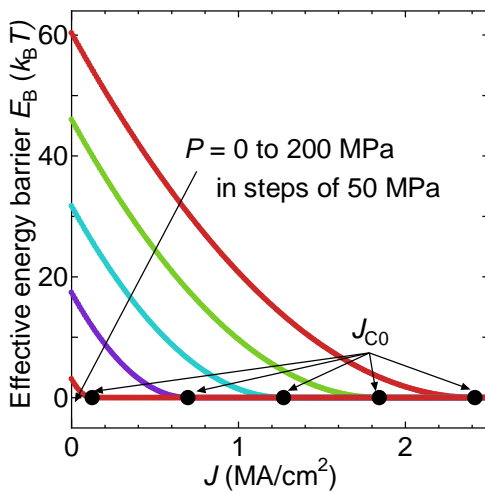


図3 磁化反転のためにエネルギーバリアのSTT電流密度依存性

効果を誘起することができる。このデバイス構造を集積化する場合、圧電体を層間絶縁膜として用いれば、圧電体のための電極構造を工夫するだけでよい。

図2にフリー層の面内に圧縮方向に圧力を印加した場合における磁化の内部エネルギーの変化を示す。圧力の印加により磁気異方性が変化する逆磁歪効果がよく再現された。また、圧力を印加するにつれエネルギーバリアが減少することが分かる。図3にエネルギーバリアのSTT電流密度依存性を示す。STT電流や圧力を印加することで、エネルギーバリアが低減する様子がわかる。特に、エネルギーバリアがゼロとなる電流密度は、スロンチエフスキーが見積もった磁化反転電流密度と一致し、これは計算モデルの妥当性を担保する。

図4に磁化反転電流密度の圧力依存性を示す。パルス幅は、30nsに固定し、磁化反転のエラーレート(BER)をパラメータとした。BERを $10^{-6}$ と設定したとしても、磁化反転電流密度 $105 \text{ A/cm}_2$ の目標値を実現できることがわ

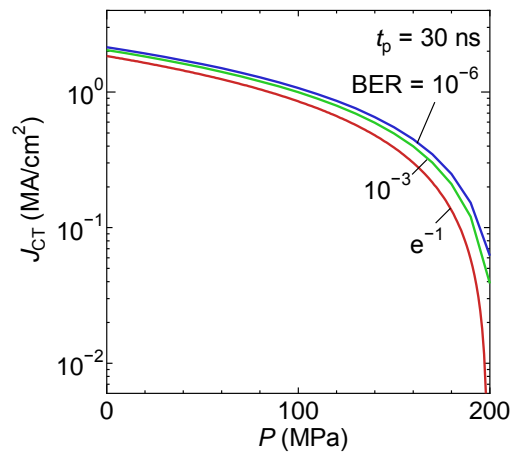


図4 磁化反転電流密度  $J_{CT}$  の圧力依存性。パルス幅を固定し、エラーレートをパラメータとした。

かった。この値は、消費エネルギーを400分の1に低減できたことを意味する。

#### SmFe<sub>2</sub> 薄膜の作製と評価

ガラス基板/Ta/SmFe<sub>2</sub> 構造とガラス基板/Ta構造の試料のXRDパターンを図5に示す。SmFe<sub>2</sub> (220)ピークと相Ta(002)ピークの位置が近く、明確にSmFe<sub>2</sub> 薄膜の結晶化は示せなかったものの、SmFe<sub>2</sub> を堆積した試料では、回折ピークが高角側にシフトしており、SmFe<sub>2</sub> の結晶化を示唆している。

次に、この試料に圧力を加えながら磁化-磁場曲線を測定し、逆磁歪効果を評価した。試料は、磁化容易軸方向に引張応力、困難軸方向に圧縮応力が加わるように曲げ、印加磁場の方向は困難軸方向とした。図6は、室温成膜した試料について、曲げによって応力が生じる前後の磁化曲線の第一象限を拡大した図である。点線と実線は、それぞれ応力の印加前後の磁化の減磁曲線を示す。磁化曲線が、圧力の印加により変化したことから、逆磁歪効果を示す薄膜が形成されていることがわかる。さらに、さらに、圧縮応力を誘起した方向に、磁化しやすくなっていくことからSmFe<sub>2</sub> 試料の磁歪定数が負であることがわかる。また、応力印加前後の磁化曲線に囲まれた領域の面積は、磁化エネルギーの変化量に相当し、その大きさは $4.9 \text{ kJ/m}^3$ と算出できた。応力印加時の曲率半径と、SmFe<sub>2</sub> のヤング率から、SmFe<sub>2</sub> 薄膜に誘起された応力の大きさは22.4 MPaであることがわかり、この応力と磁化エネルギーの変化量から作製したSmFe<sub>2</sub> 薄膜の磁歪定数は-150ppmと評価した。この値は、バルクでの値に及ばないものの、他の材料よりも比較的大きな値である。今後は、薄膜のさらなる結晶化に取り組み、より大きな磁歪定数をもつ薄膜を作製することが課題となると考えている。

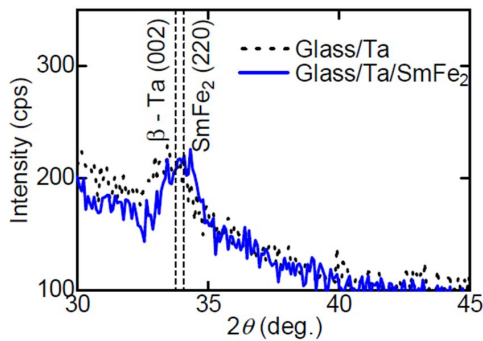


図 4 SmFe<sub>2</sub> 薄膜の X 線回折パターン .SmFe<sub>2</sub> 薄膜の結晶化を示唆している .

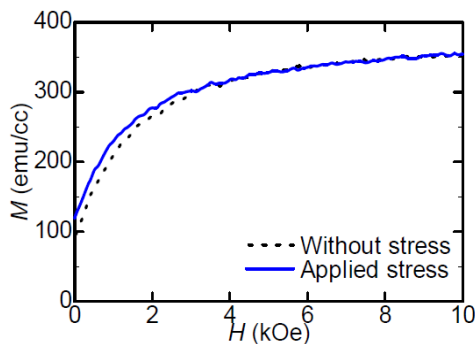


図 5 SmFe<sub>2</sub> 薄膜における応力の有無による磁化-磁場曲線の変化

## 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 1 件 )

Y. Takamura, S. Shuto, S. Yamamoto, H. Funakubo, M.K. Kurossawa, S. Nakagawa, S. Sugahara, 2016 Join International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon, 2016, "Inverse-magnetostriction-induced switching current reduction of STT-MTJs and its application for low-voltage MRAMs", 査読なし, pp. 72-75. DOI: 10.1109/ULSI.2016.7440055

[ 学会発表 ] ( 計 12 件 )

鈴木隆寛, 篠原光輝, 高村陽太, 中川茂樹, " 対向ターゲット式スパッタ法を用いた垂直磁気異方性を有する Co<sub>2</sub>FeSi/MgO および MgO/Co<sub>2</sub>FeSi 構造の作製と評価 ", 第 38 回日本磁気学会学術講演会, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2014 年 9 月 2 日-5 日 .

K. Shinohara, T. Suzuki, Y. Takamura, and S. Nakagawa, "Effect of oxygen exposure at Co<sub>2</sub>FeSi/MgO Interfaces on perpendicular magnetic

anisotropy of Co<sub>2</sub>FeSi layer", 第 62 回応用物理学会春期学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 2015 年 3 月 11 日-14 日

T. Suzuki, K. Shinohara, Y. Takamura, and S. Nakagawa, "Oxygen partial gas pressure dependence of interfacial perpendicular magnetic anisotropy in Co<sub>2</sub>FeSi/MgO thin films, Intermag 2015, 中国・北京, 2015 年 5 月 11 日-15 日 .

H. Hayashibara, M. Nakagome, Y. Takamura, S. Nakagawa, "In-situ internal stress observation of ferromagnetic thin films at the initial stage of the film growth during sputter-deposition process", IEEE International Magnetics Conference (Intermag), CNCC Beijing, 2015 年 5 月 11 日-15 日 .

S. Nakagawa, and Y. Takamura, "Origin of Perpendicular magnetic anisotropy of [Co<sub>2</sub>MnSi/Pd]<sub>n</sub> superlattice films on various substrate", ICMAT2015&IUMRS-ICA2015, 招待講演, Suntec Singapore, 2015 年 6 月 28 日-7 月 3 日 .

S. Nakagawa, H. Hayashibara, Y. Takamura, "Anomalous change and development of anisotropic residual stress at the initial stage of FeCo film growth", 20<sup>th</sup> International Conference on Magnetism" Barcelona, Spain, 2015 年 7 月 5 日-10 日 .

篠原光輝, 高村陽太, 中川茂樹, "Co<sub>2</sub>FeSi/MgO 界面における垂直磁気異方性の酸素暴露依存性", 第 34 回電子材料シンポジウム, ラフォーレ琵琶湖, 2015 年 7 月 15 日-17 日 .

三瓶理人, 高村陽太, 中川茂樹, "異方性磁気抵抗効果を用いたフルホイスラー合金 Co<sub>2</sub>FeSi 薄膜のハーフメタル性評価", 第 34 階電子材料シンポジウム, ラフォーレ琵琶湖 2015 年 7 月 15 日-17 日 .

高村陽太, 中川茂樹, 菅原聡, "逆磁歪効果を用いた STT-MTJ のスイッチング電流削減", 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 名古屋大学東山キャンパス, 2015 年 9 月 8 日-11 日 .

Y. Takamura, S. Nakagawa, S. Sugahara,

"Inverse-magnetostriction-induced switching current reduction for spin-transfer torque MTJs", 第 76 回応用物理学会春期学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 13 日-16 日 .

高村陽太, 篠原光輝, 松下直樹, 鈴木隆寛, 園部義明, 中川茂樹, "フルホイスラー合金 Co<sub>2</sub>MnSi と Co<sub>2</sub>FeSi 薄膜への垂直磁気異方性付与方法の検討", 金属

学会 2015 秋期講演大会,九州大学伊都キャンパス, 2015 年 9 月 16 日-18 日.

Y. Takamura, Y. Shuto, S. Yamamoto, H. Funakubo, M.K. Kurosawa, S. Nakagawa, S. Sugahara, "Inverse-magnetostriction-induced switching current reduction of STT-MTJs and its application for low-voltage MRAMs", EUROS01-ULSI2016, Vienna, Austria, 2016 年 1 月 25 日-27 日.

〔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.spin.pe.titech.ac.jp/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高村 陽太 (Yota Takamura)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 20708482

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

中川 茂樹 (Shigeki Nakagawa)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 60180246

菅原 聡 (Satoshi Sugahara)

東京工業大学・像情報工学研究所・准教授  
研究者番号: 40282842

舟窪 浩 (Hiroshi Funakubo)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 90219080

黒沢 実 (Minoru K. Kurosawa)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 70170090

山本先生 (Shu' uichiro Yamamoto)

東京工業大学・像情報工学研究所・特任講師

研究者番号: 50313375

周藤悠介 (Yusuke Shuto)

東京工業大学・像情報工学研究所・特任助教

研究者番号: 80523670