

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18853

研究課題名（和文） piezoelectronic・spinデバイスの開発とその超低電圧超低電力メモリの開発

研究課題名（英文） Development of piezoelectronically spintronic devices and its application to ultra-low voltage memory

研究代表者

高村 陽太（Takamura, Yota）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：20708482

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）： piezoelectronic磁気抵抗素子の記録層材料として垂直磁気方位製を有したアモルファスSmFe<sub>2</sub>層を実現し、その磁気異方性の起源を放射光測定で明らかにした。さらにpiezoelectronic磁気抵抗素子の磁気抵抗素子部分として、SmFe<sub>2</sub>を記録層に含む磁気抵抗素子の試作を行い、トンネル伝導による非線形電気伝導特性を確認したが、室温において磁気抵抗変化は観測できなかった。また、圧力印加構造の動作実験として、SmFe<sub>2</sub>円柱に圧電体とその上下に電極を設けた簡易デバイスを作成し、電圧の印加に伴う磁化特性の変化を検出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不揮発性メモリの本質的なトレードオフである情報書換のためのエネルギーと熱的安定性を打破するデバイスとしてpiezoelectronic磁気抵抗素子の開発に挑戦し、そのデバイス動作の一部を実証した。本研究成果は、コンピューターやInternet of Thingsなどに必要な超低消費電力メモリの開発に有効であった。

研究成果の概要（英文）： Amorphous SmFe<sub>2</sub> layers with perpendicular magnetic anisotropy were successfully developed as a recording layer materials for a piezo electronic magnetoresistive devices. The origin of the magnetic anisotropy were investigated. We have also fabricated magnetoresistive devices including SmFe<sub>2</sub> layer as the recording layer and observed nonlinear electric conduction characteristics due to tunnel conduction. However, no magnetoresistance effect could be observed at room temperature. A simple pressurizing structure which apply pressure to a SmFe<sub>2</sub> pillar were fabricated. The change in magnetic characteristics with the application of voltage were detected.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス piezoelectronic磁気抵抗素子 圧電体 不揮発性メモリ MRAM

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンや IoT(Internet of Things)デバイスなどの小型端末に搭載する超低消費電力なメインメモリとして、待機時に電力を消費しない不揮発性メモリが期待されている。しかし、不揮発性メモリは一般に動作時(情報書換時)の電力消費が既存の揮発メモリに比べて大きく、その消費電力削減効果はかなり限定的である。

有力な不揮発性メモリの 1 つである磁気抵抗変化メモリ(MRAM)の不揮発性メモリ素子である磁気トンネル接合(MTJ)の磁化反転(スピン注入方式)の消費電力を削減するには、スピンの異方性(反転のためのエネルギー障壁)を下げれば良いが、同時に熱擾乱に対する耐性も下がってしまい、情報保持特性が劣化する。このトレードオフの関係は本質的なものであり、スピンのみを使って、情報書込時の低消費電力と高い熱安定性の 2 つを同時に達成することは困難である。

超磁歪材料と呼ばれる材料を用いれば、圧力を印加したときだけ異方性を変化させることができる。しかし、バルクや材料としての研究がほとんどでそのスピンデバイス応用、さらに圧力を印加できる機能を付加したデバイスの研究は全く行われていなかった。本研究課題では、スピンデバイスに圧電体を用いた MEMS/NEMS 技術を融合させた新しいデバイスの開発を行い、超低電圧・超低消費電力で動作する不揮発性メモリを開発することを目指した。

本研究代表者らが提案する piezoelectronic spin device である piezoelectronic magnetic tunnel junction (PE-MTJ, 図 1(a)) 素子は、圧電体による圧力印加と、特定の磁性体の有する圧力印加によって磁気異方性が変化する逆磁歪効果を利用して、書き換えを行うときにのみ、書き換えに必要なエネルギー障壁を下げるができる。これにより、情報保持特性を劣化させることなく、従来のものよりも 2 桁小さな消費電力で、情報書換(スピン反転)が可能である。PE-MTJ は、記録層を超磁歪強磁性体と呼ばれる歪みによって磁気異方性が大きく変化する材料で構成した MTJ とその外周に形成された圧電体から成るデバイスである。図 1(b)に書込動作を示す。圧電体の上下に配置した電極に電圧を加えて圧電体を変形させると、参照層に歪みが印加される。逆磁歪効果によってスピン反転のためのエネルギー障壁が減少し、少ないでスピン反転が生じる。この動作原理はまだ実証されていなかった。

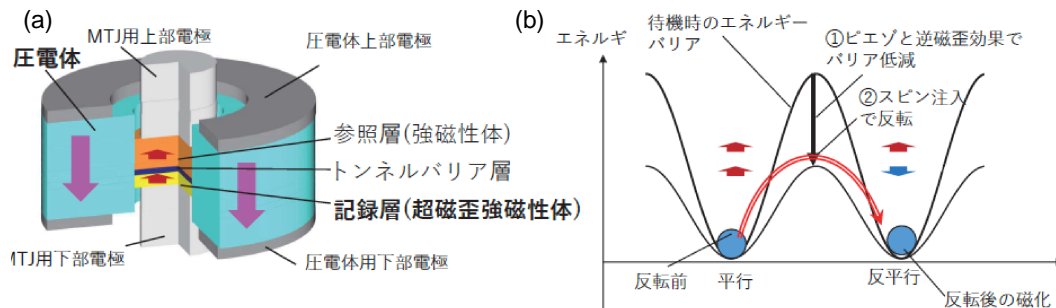


図 1 (a) piezoelectronic magnetic tunnel junction (PE-MTJ) 素子の構造 (b) PE-MTJ の動作原理

### 2. 研究の目的

本研究課題では、PE-MTJ の記録層として負の超磁歪材料  $\text{SmFe}_2$  に垂直磁気異方性を付与すること、及び、PE-MTJ の各デバイス動作、すなわち  $\text{SmFe}_2$  をフリー層を含む MTJ と圧力印加構造、を実験的に実証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1. PE-MTJ の記録層材料の開発

PE-MTJ の記録層材料には、負の大きな磁歪定数を持ち、かつ垂直方向に磁化が向きやすい磁性薄膜が必要である。本研究課題では負の磁歪定数が大きい  $\text{SmFe}_2$  に注目した。 $\text{SmFe}_2$  の類似の材料系からの類推で、本材料は希土類金属合金であるため、短距離秩序を有するアモルファス構造を形成できれば垂直磁気異方性を発現できる可能性がある。

#### 3. 2. $\text{SmFe}_2$ を記録層とした MTJ の作製と評価

$\text{SmFe}_2$  を記録層を含む MTJ の積層構造を作製し、微細加工技術を用いて MTJ デバイス状に加工し、電気伝導測定や磁気伝導測定を行う。

#### 3. 3. 圧力印加構造の試作と評価

$\text{SmFe}_2$  円柱に対して、PE-MTJ の圧力印加構造を形成する。圧電体部に電圧を印加しながら試料振動型磁力計で磁化特性を評価することで、逆磁歪効果の検出により圧力印加構造の動作実証を行う。

#### 4. 研究成果

##### 4.1. アモルファス SmFe<sub>2</sub>の垂直磁気異方性とその起源

スパッタ中の熱処理条件及び後熱処理の条件を系統的に変化させ、200 で成膜し 500 でアニールを行うことで SmFe<sub>2</sub> 薄膜が膜面垂直方向に磁気容易軸を持つことを発見した。この試料においても約-900ppm の高くて負の磁歪定数を持つことも確認した。

X 線回折法や断面透過型電子線顕微鏡観察などの構造解析から、垂直磁気異方性を有する SmFe<sub>2</sub> 薄膜がアモルファス構造を持っていることがわかった。さらに、高エネルギー加速器研究機構 KEK のフォトンファクトリーにおいて、偏光 X 線吸収微細構造(EXAFS)測定を実施し、詳細な解析から、Sm 原子と Fe 原子の距離が面直方向に伸び、面直方向に縮びた短距離秩序が形成されていることを明らかにした。この結果は内部応力の存在を示唆し、逆磁歪効果によって垂直磁気異方性が発現したと結論づけた。

##### 4.2. ピエゾエレクトリック磁気抵抗素子の研究

SmFe<sub>2</sub> を記録層に含む MTJ を試作した。熱処理プロセスによる層間の拡散の問題から、後熱処理温度を下げて実験を行ったため、磁気異方性は面内のままとした。MgO トンネルバリア層と磁性層の界面は CoFeB とし、磁気抵抗効果を高める工夫をした。

MgO バリア層の成膜条件を最適化することで非線形的なトンネル伝導特性を観測した。磁気抵抗効果は室温で観測することはできなかった。今後は低温にして観測することを計画している。

##### 4.3. 圧力印加構造の研究

PE-MTJ の圧力印加構造の動作実証実験として、PE-MTJ の MTJ 部分を W/SmFe<sub>2</sub>/W の積層構造とし、その周囲に圧電体とその上下の電極から成る SmFe<sub>2</sub> 層の磁化特性の変化を観測することで圧力印加効果の実証を試みた。圧電体としては、室温で成膜可能な AlN を採用し、これを反応性スパッタリング法により形成した。デバイスプロセスはゼロから設計し、マスクレス露光装置を用いた光学リソグラフィ、イオンミリングによるドライエッチング技術、Al 抵抗加熱法による電極パッド形成などを組み合わせてデバイスを実際に作製した。加工前後で若干ループ形状は変化した。直径 40 $\mu$ m 以上にするとその変化は無視できるほどであった。さらに電圧印加に応じて磁化特性の変化を検出し成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yota Takamura, Hayato Onozawa, Masato Tomita, Shigeki Nakagawa.	4. 巻 43
2. 論文標題 Fabrication and characterization of perpendicularly magnetized giant magnetoresistive SmFe <sub>2</sub> free layer fro piezo-electric magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ITE technical report	6. 最初と最後の頁 33-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masato Tomita, Yugo Ishitani, Shiori Ishiyama, Yota Takamura, Shigeki Nakagawa,
2. 発表標題 Investigation of amorphous SmFe <sub>2</sub> thin films with giant negative magnetostriction and perpendicular magnetic anisotropy,
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (Intermag), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masato Tomita, Yugo Ishitani, Shiori Ishiyama, Yota Takamura, Shigeki Nakagawa,
2. 発表標題 Fabrication of Sm-rich SmFe <sub>2</sub> thin films with giant negative magnetostriction,
3. 学会等名 The 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yota Takamura, Hayato Onozawa, Masato Tomita, Shigeki Nakagawa,
2. 発表標題 Characterization of ultrathin amorphous SmFe <sub>2</sub> films with giant negative magnetostriction and perpendicular magnetic anisotropy,
3. 学会等名 PASPS 23,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野澤隼, 北川涼太, 高村陽太, 中川茂樹,
2. 発表標題 負の超磁歪SmFe <sub>2</sub> 極薄膜の垂直磁気異方性,
3. 学会等名 第42回日本磁気学会学術講演会,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Takamura, H. Onozawa, S. Urashita, M. Tomita, S. Nakagawa.
2. 発表標題 EXAFS Analysis of SmFe <sub>2</sub> Thin Films with Perpendicular Magnetic Anisotropy for Piezoelectric Magnetic Tunnel Junctions
3. 学会等名 2019 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yota Takamura, Hayato Onozawa, Soki Urashita, Shigeki Nakagawa.
2. 発表標題 Characterization of anisotropic short-range order in amorphous SmFe <sub>2</sub> films with various magnetic anisotropy
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浦下 宗輝, 北川 涼太, 小野澤 隼, スタットラー 嘉也, 春本 高志, 史 蹟, 中村 吉男, 高村 陽太, 中川 茂樹.
2. 発表標題 ピエゾエレクトロニック磁気トンネル接合の圧力印加構造の評価
3. 学会等名 第43回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高村陽太, 小野澤隼, 富田誠人, 中川茂樹
2. 発表標題 ピエゾエレクトリック磁気トンネル接合素子の実現に向けた超磁歪SmFe <sub>2</sub> フリー層の作製と評価
3. 学会等名 マルチメディアストレージ研究会 (ITE-MMS)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北川涼太, 小野澤隼, スタットラー嘉也, 高村陽太, 春本高志, 史蹟, 中村 吉男, 中川 茂樹.
2. 発表標題 ピエゾエレクトロニック磁気抵抗素子の圧力印加構造の設計及び試作
3. 学会等名 一般社団法人 粉体粉末冶金協会 2019 年度春季大会 (第123 回講演大会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中川研究室：研究内容 <a href="http://www.spin.pe.titech.ac.jp/researches_jpn.html">http://www.spin.pe.titech.ac.jp/researches_jpn.html</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考