

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26886017

研究課題名(和文)磁性金属における電圧誘起磁化反転の低電圧化に向けた研究

研究課題名(英文) Research to reduce the switching voltage in voltage-driven magnetization switching in ferromagnetic metals

研究代表者

塩田 陽一 (Shiota, Yoichi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究員

研究者番号：70738070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では電圧駆動型MRAMの書込み原理である電圧誘起磁化反転の低電圧化を目的に研究を行った。まず垂直磁化型トンネル磁気接合素子において、フリー層のFeB層をTa,W,Irの異なる材料でキャップした場合の垂直磁気異方性、及び電圧効果を調べ、Ta,Wキャップ層は垂直磁化となることが分かった。またパルス電圧による磁化反転の反転確率を調べ、低電圧化には垂直磁気異方性を小さくすることがカギであることが分かった。一方で、垂直磁気異方性が小さいと熱擾乱耐性が悪くなるという課題も見つかった。シミュレーション計算を行う事で、低電圧化に向けた指針も得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate the approach to reduce the switching voltage in voltage-induced magnetic anisotropy change, which is writing process of voltage-driven MRAM. First, we investigate the perpendicular magnetic anisotropy and voltage effect in FeB/MgO junctions with different capping layer of Ta, W, or Ir. We found that FeB with Ta and W shows the perpendicular magnetization. Then we performed the switching probability of voltage-induced magnetization switching. We found that small perpendicular magnetic anisotropy is key to reduce the switching voltage. However, small perpendicular magnetic anisotropy results in the small thermal stability, which is not suitable for practical application. From the simulation, we found the another method to reduce the switching voltage.

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 電圧誘起磁気異方性制御 磁化反転

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス分野では、次世代不揮発性メモリデバイスとして MRAM の開発が進められている。現在精力的に開発が進められている書込み技術は電流駆動型であるため、ジュール熱損失などの影響により、大きな電力を消費してしまう。

一方、申請者は 2012 年に超薄膜強磁性と絶縁体との界面で起こる電圧効果を利用した電圧駆動型の書込み技術を世界で先駆けてした。この書込み方式は、従来の電流駆動型に比べて 1/500 以下という飛躍的な低消費電力が見込まれ、超低消費電力メモリデバイスの実現が期待されている。しかし現状では、2.0V という大きな電圧を加える必要があり、実用化を目指すにはさらなる低電圧化が必要である。

2. 研究の目的

上述の背景、およびこれまでの研究成果を元に、電圧効果を像出させるような材料の構造を発見し、まだ解明されていない電圧効果の詳細な起源を明らかにする。そのために、強磁性層 / 絶縁層の界面状態や材料に対する依存性を系統的に調べ、大きな電圧効果を示す組み合わせを探る。その構造を用いて電圧印加磁化反転の低電圧化を実証するとともに、高速かつ信頼性の高い磁化反転をシミュレーション及び実験から示す。

3. 研究の方法

(1) CoFeB/MgO 接合の垂直磁化型トンネル磁気接合素子において、キャップ層の材料について Ta, W, Ir を作成し、垂直磁気異方性と電圧効果を評価する。

(2) (1) で作製した素子について電圧印加磁化反転のエラー率を評価し、低電圧化に向けて最適な条件を探る。

(3) シミュレーション計算を用いて実験の結果を考察、及び更なる低電圧化に向けて指標を得る。

4. 研究成果

(1) スパッタリング法を用いて垂直磁化型トンネル磁気抵抗素子を作製した。素子構造としては、ピン層である下部電極は垂直磁化 Co/Pt 人口格子を用いた反強磁性結合膜、絶縁層は MgO で面積抵抗値を $100 \sim 500 \cdot \mu\text{m}^2$ 程度になるように設計、磁化反転層である上部電極は FeB 1.6, 1.8, 2.0nm とし、キャップ層として Ta, W, Ir の 3 種類を作製した。

図 1 にそれぞれの素子において 300・320・350 の加熱処理後の TMR 曲線を示す。Ta、および W キャップについては図に示すように垂直磁化を示す角型のヒステリシスが得られたが、Ir キャップについては垂直磁化を得ることができなかった。また熱処理をすると MR 比が減少したため、Ir が MgO へ拡散したものと考えられる。

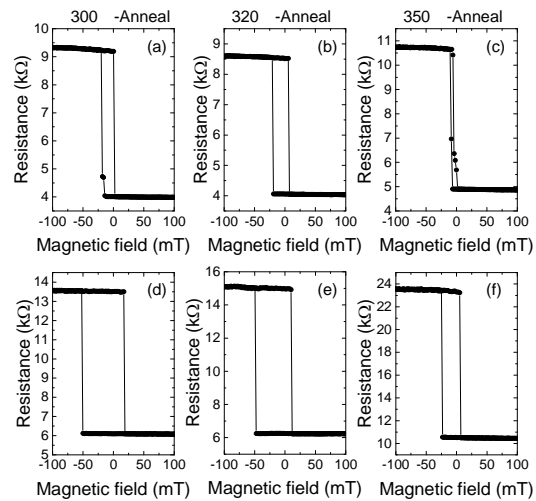


図 1 垂直磁場下における TMR 曲線
(a) ~ (c) Ta キャップの FeB/MgO 接合
(d) ~ (f) W キャップの FeB/MgO 接合

次に電圧効果を評価するため、様々なバイアス電圧下で TMR 曲線を測定した。すると Ta、W キャップの FeB/MgO 接合共に電圧に依存した保磁力変化を観測することができた。負バイアス電圧では保磁力が増大し、正バイアス電圧では保磁力が減少し、これまで観測されてきた電圧効果と同様の変化が得られた。電圧印加磁化反転を実証するためには磁気異方性を打ち消す極性に電圧を加える必要があり、正のパルス電圧を加えれば良いことが分かった。

(2) 次に(1)で作製した素子について、電圧印加磁化反転の実験を行った。実験の手順は以下の通りである。まず磁場を面内より少し垂直に傾けた方向に印加する。このとき磁場の面直成分はピン層からの漏れ磁場を打ち消すため、面内成分は磁化反転の歳差中心軸を定義するためである。次にパルスジェネレータからあるパルス電圧を素子に印加する。このパルス電圧を印加する毎に素子の抵抗値を読み、磁化反転が起きたかどうかを判別し、(反転した回数) / (パルス電圧を印加した回数) から反転確率を計算した。

図 2 は反転確率のパルス幅依存性を示しており、(a) は Ta キャップの FeB/MgO 接合、(b) は W キャップの FeB/MgO 接合を表している。ここでは最大の反転確率が得られた条件を図 2 にしめしている。まず (a)(b) 共に反転確率がパルス幅に対して振動しているのが分かる。これは磁化反転が磁化の歳差運動によって励起されていることを示している。つまり 1ns 付近で反転確率が最大になっておるところは、磁化がちょうど半回転して磁化反転を起こしていることになる。また、電圧の印加時間が長くなるにつれて、反転確率が振動しながら減少している。これは反転時間が長くなったことによって、熱擾乱の影響を受けたことによるものと思われる。

次に印可電圧に注目すると、W キャップの

FeB/MgO 接合では 1.2V の電圧強度で磁化反転が起こっているのに対し、Ta キャップの FeB/MgO では 0.95V の電圧で磁化反転を起こすことができた。これは図 1 から分かるように Ta キャップの方がフリー層の保磁力が小さい、つまり垂直磁気異方性が小さいためにより小さな電圧で磁化反転を起こすことができたものと考えられる。

一方、反転確率に注目すると W キャップでは 100% 近くの反転確率が得られているのに対し、Ta キャップでは 90% 程度の反転確率しか得られなかった。これは Ta キャップの方が垂直磁気異方性が小さいために、熱の影響を受けやすく、エラー率が大きくなってしまった事が原因と考えられる。

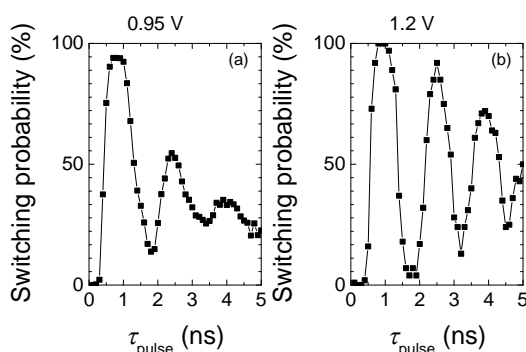


図 2 反転確率のパルス幅依存性
 (a) Ta キャップの FeB/MgO 接合
 (b) W キャップの FeB/MgO 接合

(3) 実験で得られた結果をシミュレーション計算から考察したいと思う。シミュレーションには電圧効果を取り入れた LLG 方程式を数値的に解くプログラムを開発し行った。また熱によるランダム磁場を導入することで、なるべく実験に近い状態を再現した。図 3 は異なる面内磁場下で反転確率を電圧のパルス幅、及び異方性磁場の打ち消した割合（つまり電圧の強度）でマッピングしたもので、白色の部分反転確率が 100% に近い条件である。まず実験と同様に反転確率の振動が再現されていることが分かる。次に、面内磁場が大きい方が電圧の強度が小さくても磁化反転が起こっていることが分かる。つまり面内磁場の強度を大きくすることで磁化反転の低電圧化が実現可能であることがシミュレーションから分かった。一方、面内磁場を大きくすることは磁化の熱擾乱耐性を小さくすることと等価であり、これは反転確率を低下させることになる。つまり、応用に用いるためには、熱擾乱耐性を維持しつつ低電圧化を実現することが必要である。そのための近道はまずは電圧効果の大きさを大きくすることであると考えられる。そこで、今後はさらに大きな電圧効果を示す材料系を探索することが重要であると考えられる。

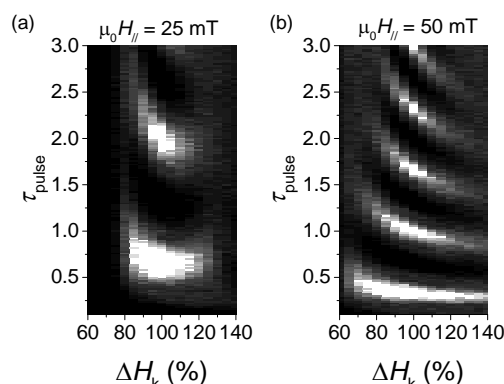


図 3 反転確率をパルス幅及び電圧によって垂直磁気異方性を打ち消した割合でマッピングしたシミュレーション計算
 面内磁場(a) 25 mT (b) 50 mT

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 3 件)

Y. Shiota, D. Sekiya, R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, K. Konishi, S. Miwa, H. Kubota, S. Yuasa, and Y. Suzuki

“Three-Terminal Device for Realizing a Voltage-Driven Spin Transistor”
 IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 51 (2015) 4200304

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2455021

Y. Shiota, S. Miwa, S. Tamaru, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, Y. Suzuki and Y. Suzuki

“Field angle dependence of voltage-induced ferromagnetic resonance under DC bias voltage”
 Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, 400 (2016) 159-162

DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.042

Y. Shiota, T. Nozaki, S. Tamaru, K. Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki

Applied Physics Express, 査読有, 9 (2016) 013001

DOI: 10.7567/APEX.9.013001

[学会発表](計 5 件)

Y. Shiota, S. Miwa, S. Tamaru, T. Nozaki, H. Kubota, A. Fukushima, Y. Suzuki and S. Yuasa

“Enhancement of rectified voltage using electric-field-induced ferromagnetic resonance under dc bias voltage”

20th International Conference on Magnetic (ICM2015), 2015/07/05-10, Barcelona (Spain)

Y. Shiota, D. Sekiya, R. Matsumoto, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nozaki, K.

Konishi, S. Miwa, H. Kubota, S. Yuasa
and Y. Suzuki

“ Three-terminal device for realizing
a voltage-driven spin transistor ”

第 76 回応用物学会秋季学術講演会,
2015/09/13-16, 名古屋国際会議場 (愛
知県)

Y. Shiota, T. Nozaki, S. Tamaru, K.
Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S.
Yuasa and Y. Suzuki

“ Evaluation of write error rate for
voltage-induced dynamic switching in
perpendicularly magnetized magnetic
tunnel junctions ”

第 76 回応用物理学会秋季学術講演会,
2015/09/13-16, 名古屋国際会議場 (愛
知県)

Y. Shiota, T. Nozaki, S. Tamaru, K.
Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S.
Yuasa and Y. Suzuki

“ 2016 IEEE Joint MMM/Intermag
conference, 2016/1/11-15, San Diego,
California (USA)

Y. Shiota, T. Nozaki, T. Taniguchi, K.
Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S.
Yuasa and Y. Suzuki

“ Influence of in-plane magnetic
field on write error rate of
voltage-driven dynamic magnetization
switching ”

第 63 回応用物理学会春季学術講演会,
2016/3/19-22, 東京工業大学大岡山キ
ャンパス (東京都)

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩田 陽一 (SHIOTA Yoichi)

産業技術総合研究所・スピントロニクス研
究センター・研究員

研究者番号 : 70738070

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし