

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14202

研究課題名(和文)フェリ磁性レストラックメモリ電流磁壁駆動速度改善による100Gbpsへの挑戦

研究課題名(英文)Improvement of current density and DW velocity based on RE-TM nanowire for 100Gbps

研究代表者

RANJBAR Sina (Ranjbar, Sina)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・ポストドクトラル研究員

研究者番号：30880174

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文): 通信技術の革新的な進歩により、メモリやストレージのデータ転送速度向上が喫緊の課題である。そこで、電流駆動型磁性細線メモリに注目してデータ転送速度向上策を検討した。特に、注目したのはGdFeCo希土類・遷移金属合金を記録膜とした磁性細線メモリで、フェリ磁性の特徴である角運動量補償組成を操作することにより、データに相当する磁壁の移動速度を2000m/secと高速化することに成功した。最短ビット長を100nmとするとデータ転送速度は20Gbpsとなり、現有メモリよりも一桁大幅に高速化できる。このキーポイントとして、電流で磁壁を駆動した後も細線に対して直交磁壁を維持することが重要であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、磁性細線メモリの磁壁移動速度が磁壁形状に依存することを見出した点にある。磁性細線に対し、直交する磁壁であればスピン軌道トルクが有効に働くため磁壁を高速駆動できる。しかし、磁壁駆動後に磁壁が丸く変形すると、スピン軌道トルクの働きが劣化して速度は減速する。このため磁壁が丸くなって磁壁移動速度が劣化した状態でジャロシンスキー守谷相互作用の実効磁界を調べると、直交磁壁に比べて大きく低下していた。本研究の社会的意義は、この磁壁移動速度改善策によりメモリやストレージのデータ転送速度を現より一桁向上できる見込みを得たことである。更に、磁壁移動速度増大できれば100Gbpsも狙える。

研究成果の概要(英文): Due to the revolutionary progress in communication technology, improving the data transfer speed of memory and storage is an urgent issue. Therefore, I focused on current-driven magnetic nanowire memory and investigated measures to improve the data transfer speed. In particular, I focused on a magnetic nanowire memory using a GdFeCo rare earth/transition metal alloy as a recording film, and succeeded in speeding up. If the shortest bit length is 100 nm, the data transfer speed will be 20 Gbps, which is an order of magnitude faster than existing memory. As a key point, I found that it is important to maintain the orthogonal domain wall to the magnetic wire even after driving the domain wall with an electric current.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁性細線メモリ 超高速光磁気記録 高速データレート 高速磁壁移動速度 高感度光磁気記録 短パルス電流高速磁壁駆動 ジャロシンスキー守谷相互作用 スピン軌道相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

第4次産業革命を実現するためには、ビッグデータの蓄積が必要であり、データセンターがいたるところに作られている。しかし、データ蓄積には大量の電力が必要であり、大きな社会問題となっている。この消費電力の問題は主に半導体メモリのSRAMに起因している。半導体メモリでは電荷でデータを蓄えるが、電荷は自然放電するためデータを維持するために常に電力を供給し続ける必要がある。そこで、データをスピンドで蓄える磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)が注目されている。スピンドは永久磁石の元であるため、データ維持に電力は不要である。ただし、磁性層を10層くらい積層する必要があり、コストが問題である。そこで、一つのMRAMでマルチビットを蓄える磁性細線メモリ(レーストラックメモリ)が提案されている。一つのMRAMで1000ビット蓄えることができれば、ビットコストは1000分の1となる。このレーストラックメモリは世界中で研究開発が進められているが、データレートが問題となっている。5Gの規格が本格普及しようとしておりデータレートは20Gbpsが必要とされる。しかし、最も高速なSRAMでもデータレートは1Gbpsであり、レーストラックメモリの高速化が求められている。この高速化を目指して磁性細線の細線方向に外部磁界を印加して高速化に成功したという論文はいくつかあるが、早くなるのは記録磁区の片側だけの磁壁で、残りの磁壁は逆に低速化する。磁区の両側を高速化する必要がある。我々はフェリ磁性GdFeCo磁性細線を使って外部磁化に頼ることなく、無磁場で磁壁の高速化の糸口をつかんでいる。

## 2. 研究の目的

そこで、磁性細線メモリの高速化の糸口としてつかんだGdFeCo磁性細線の組成最適化を行い、磁壁のパルス電流駆動実験を詳細に調べる。これら検討結果をもとにデータレート20Gbpsを狙うことができる磁性細線メモリの高速化メカニズムを明らかにすることが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

磁性細線の作製には、一般的なリフトオフ法を用いた。磁性細線の作製には超高真空マグネトロンスパッタ装置を用い、基板上に下地膜、磁性膜、カバー層を成膜した。スパッタ装置には電極が複数あり、GdターゲットとFeCoターゲットをコスパッタすることで組成を調整した。この試料をネオアーク製偏光顕微鏡の試料ステージにセットし、ピコセカンド社のパルス電流印加装置で100nsec以下のパルス電流を印加して、磁性細線上の磁壁の動く様子を詳細に観察した。この偏光顕微鏡のステージには温度調整機構があり、これにより0から70までの範囲で電流磁壁駆動の温度依存性も測定した。また、印加パルス電流密度を固定して、磁壁移動速度のパルス幅依存性も測定した。磁壁の高速化には、このパルス幅を短くすることが重要であることを見出した。

## 4. 研究成果

図1(a)にはパルス幅を30nsecで固定した時のGdFeCo磁性細線の電流磁壁移動速度の印加電流密度依存性を示した。駆動におけるGd組成依存性も示した。Gd22at%の磁壁移動速度は250m/sec程度であるが、Gd組成24at%のときには750m/secまで増大している。さらにGd組成を増やすと磁壁移動速度は減少に転じ、Gd27at%の時には300m/secにまで遅くなっている。一方、図1(b)にはパルス幅3nsecに短くした結果を示す。この場合もGd組成22at%では400m/secと遅いが、Gd24at%の場合には2000m/secにまで増えている。このように、印加する電流のパルス幅を狭くすることで、磁壁移動速度を向上することができた。また、磁壁移動速度はGd組成が24at%のときに速いことが分かった。

以上の結果をわかりやすくするために、電流密度を $1.7 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ に固定して、磁壁の移動速度を整理したのが図1(c)である。Gd24at%のときが最速で、パルス幅30nsec、3nsecどちらもピークであることが分かる。この理由として、GdFeCoがフェリ磁性体であることを考える必要がある。そこで、GdとFeCoの磁化が互いに逆向きでキャンセルしあう磁化補償温度( $T_{MC}$ )とGdとFeCoの角運動量が互いにキャンセルしあう角運動量補償温度( $T_{AMC}$ )のGd組成依存性を示した。なお、Gd24at%における3nsecのパルス幅の電流を印加した時に生じるジュール熱計算のポイントを青✖で、30nsecのパルス幅の電流を印加した時に生じるジュール熱計算のポイントを茶色✖で示す。この図からわかるように、Gd24at%のときに青✖と $T_{AMC}$ が、かなり接近していることが分かる。すなわち、Gd24at%のときに磁壁移動速度がピー

クを示したのは、 $T_{AMC}$  が室温付近にあったためと考えられる。

では、Gd24at%のときのパルス幅による速度差はどこに起因しているのか調べるために、磁壁移動後の磁壁形状を偏光顕微鏡で調べたパルス幅 3nsec の結果を図 2(a)に示したが、磁壁形状は初期の直線磁壁のままであった。一方、30nsec のパルス幅の結果(b)では磁壁形状が変形して丸くなっていた。この結果からパルス幅による磁壁移動速度の違いは図 3 で説明できる。電流による磁壁の駆動原理は、重金属層 Pt と GdFeCo 層のヘテロ界面に生じるスピンホール効果(SHE)とジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)によるスピン軌道トルクとされている。すなわちスピンホール効果を赤矢印で、DMI によるネール磁壁を青矢印で示してあるように、両者が直交すると最も大きなトルクが働く。したがって、3nsec パルス幅ではネール磁壁はSHEと直交するため磁壁駆動力を最大限利用しているのに対し、パルス幅 30nsec でネール磁壁とSHEは磁壁両端で直交しなくなるため磁壁駆動力が低下することが分かる。

この程度を調べた結果を図 4 に示す。横軸は細線方向に印加した横磁界で、横磁界が大きいほど磁区の前エッジのネール磁壁を強固にできるので磁壁移動速度は直線的に増大している。しかし、このとき磁区の後エッジではこの効果が逆になってネール磁壁を壊してブロッホ磁壁が増大するため磁壁移動速度は減速している。この直線の傾きが急なほど SHE が大きい。しかし、パルス幅 3nsec と 30nsec の傾きは同じである。一方、磁壁移動速度がゼロ、すなわち磁壁が動かなくなるときの横磁界を DMI 磁界と呼ぶが、これが 3nsec のときに大きく、30nsec のときに小さいことが分かった。すなわち、30nsec でネール磁壁が丸くなったために DMI 磁界が低下したと考えることができる。なお、複数磁区が予定通りパルス電流で駆動した様子を図 5 に示した。このように、GdFeCo 磁性細線では、電流密度を変えても高速に理想的に複数磁区を駆動できることが確認できた。このように、本研究成果は今後の磁性細線メモリの性能向上に大きく貢献できると考えられる。

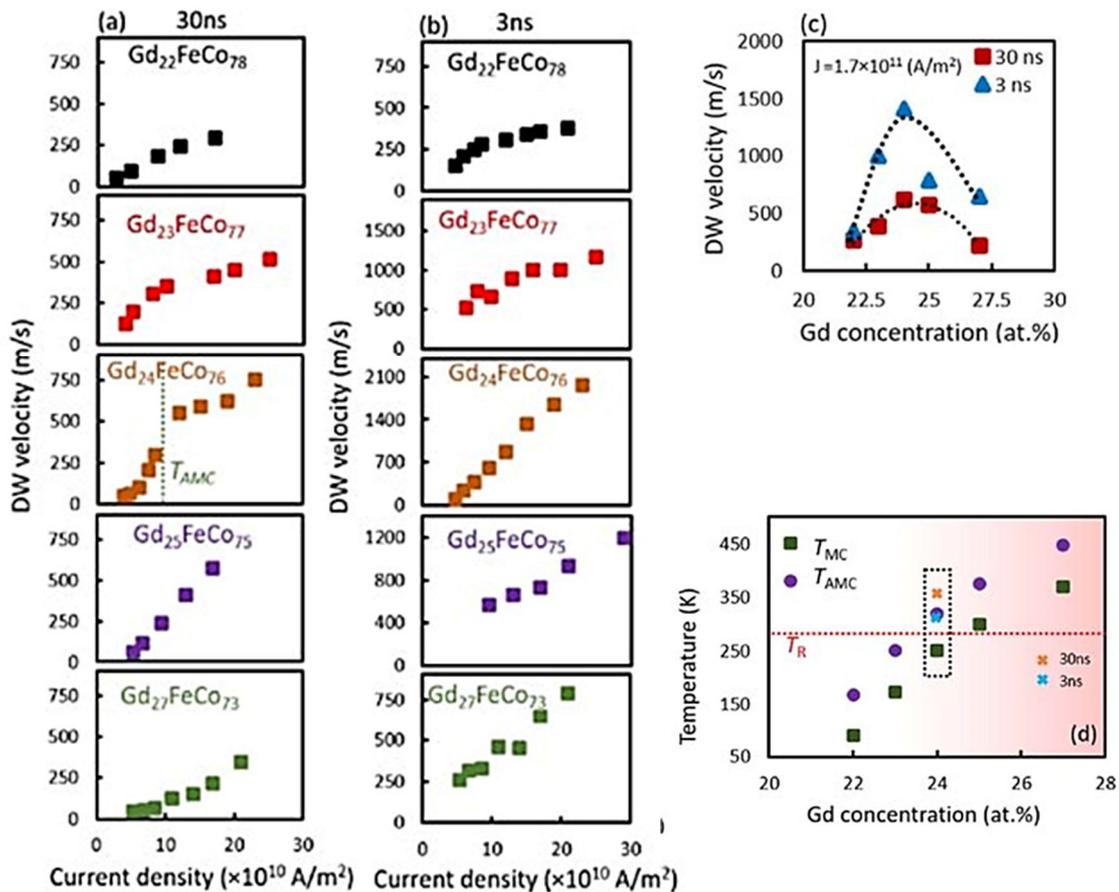


図1 (a) GdFeCo磁性細線に印加するパルス電流密度(30nsec)と磁壁移動速度の関係。およびこれらのGd組成依存性。(b)パルス幅3nsecにおける実験結果。(c) 電流密度を $1.7 \times 10^{11}$  A/m<sup>2</sup>に固定した時の磁壁移動速度とGd組成依存性。(d) 磁化補償温度(TMC)と角運動量補償温度(TAMC)のGd組成依存性。

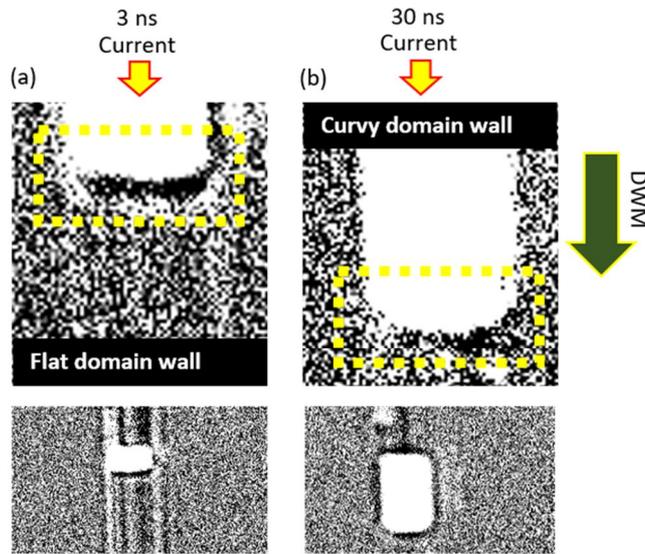


図2 GdFeCo磁性細線にパルス電流を印加した後、磁壁形状を偏光顕微鏡による磁壁形状の観察結果。パルス幅が(a) 3nsecと短いときには、磁壁移動後の磁壁形状は初期の直線形状を維持しているが、パルス幅を(b)30nsecに長くすると、移動後の磁壁形状は丸みを帯びて変形していることがわかる。

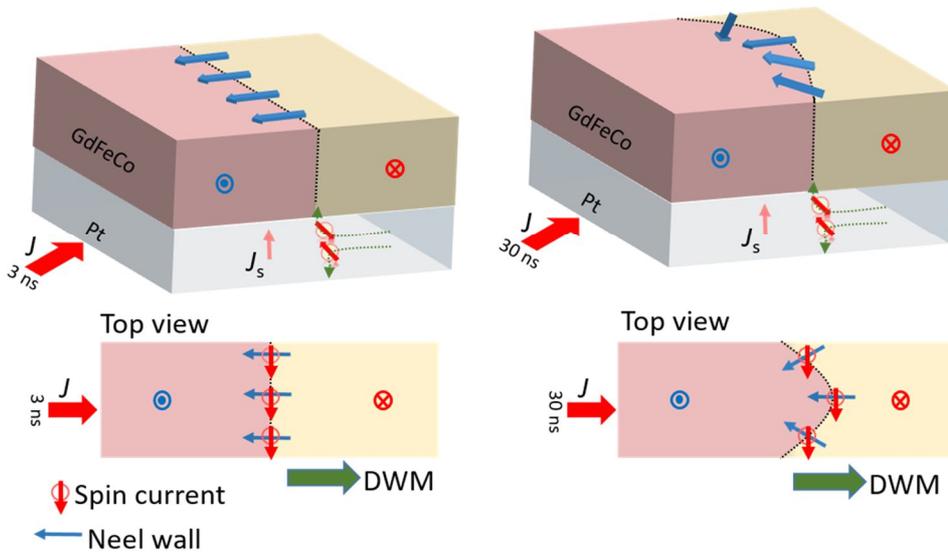


図3 左図のようにGdFeCo磁性細線にパルス電流を印加した後も初期の直線の磁壁形状を維持している場合、スピホール効果により膜面上方向に流れるスピン流( $J_s$ )とネール型磁壁のスピン方向が直交するので大きなスピン軌道トルクが働いて、磁壁を高速に駆動できる。しかし、右図のように磁壁が丸くなると、両者は磁壁中央以外で直交関係が崩れるので、磁壁移動速度が低下すると考えられる。

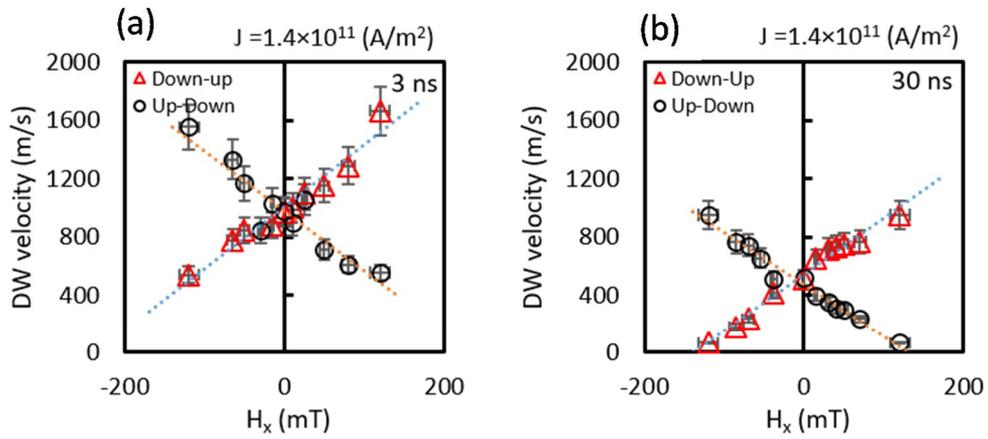


図4 (a) GdFeCo磁性細線の細線方向に $1.4 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ のパルス電流(3nsec)を印加したときの、磁壁移動速度をプロットした図。細線左側に下向き磁区(Down)、細線右側に上向き磁区(Up)を形成した時の測定結果を $\Delta$ 印で、逆パターンのUp-Down磁壁の結果を $\circ$ 印で示す。(b) パルス幅が30nsecと長いときの、同様の実験結果。

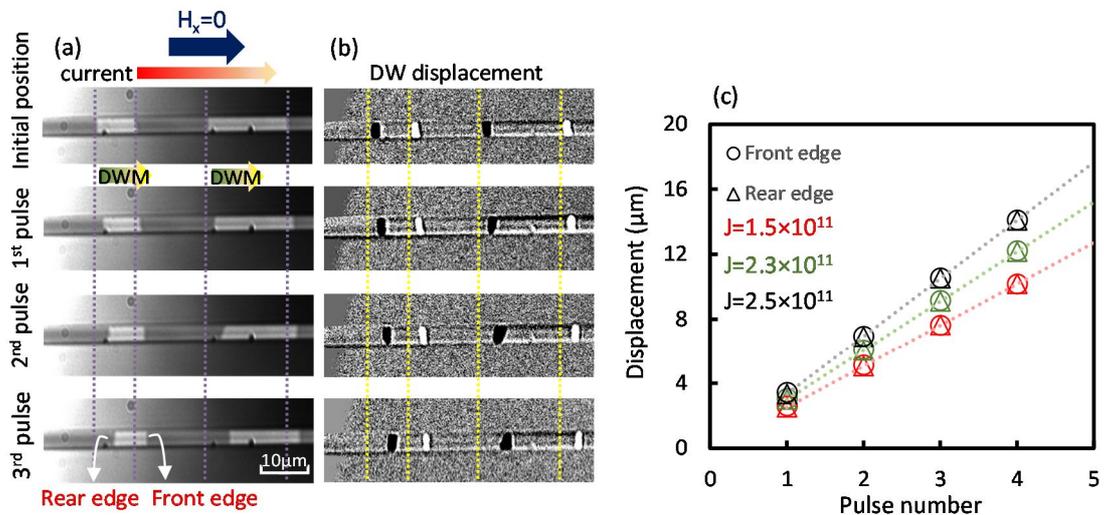


図5 (a) GdFeCo磁性細線に複数の記録磁区を形成し、細線右方向に3nsecのパルス電流を印加したときの、磁区の動きを偏光顕微鏡で観察した結果。(b)このときの磁壁移動前後での差分画像。前エッジ、後ろエッジの移動距離が分かる。(c) 打ち込んだパルス電流の数と、移動した磁壁距離の関係。両者正比例しているのがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 1) S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 11
2. 論文標題 Ultra-thin interfacial domain wall less than 1 nm based on TbxCo100-x/Cu/[Co/Pt]2 heterostructures for multi-level magnetic pillar memory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0072336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 7
2. 論文標題 Large Perpendicular Exchange Energy in TbxCo100-x/Cu (t)/[Co/Pt]2 heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 110141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/magnetochemistry7110141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, H. Awano
2. 発表標題 Current Driven Domain Wall Motion in Compensated Ferrimagnets: Fast Domain Wall Velocity in a Wide Temperature Range Without External Magnetic Field
3. 学会等名 Young Research Meeting, IEEE Magnetics Society Nagoya
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------